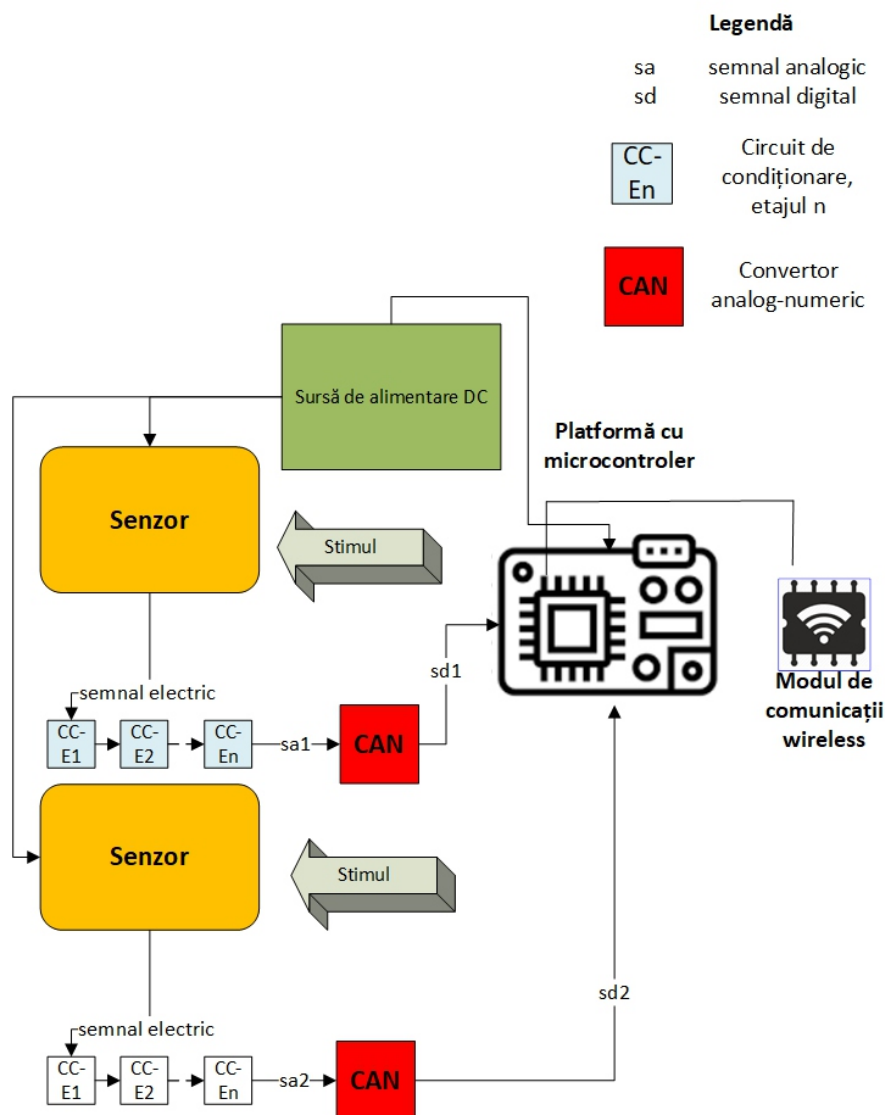


Ana Maria DRĂGULINESCU

INTERNET OF THINGS. DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII



ISBN: 978-606-9608-95-1

Ana Maria DRĂGULINESCU

**INTERNET OF THINGS.
DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII**

**Editura POLITEHNICA PRESS
BUCUREȘTI, 2024**

Copyright © 2024, Politehnica Press

Toate drepturile asupra acestei ediții sunt rezervate editurii.

Adresă: Calea Griviței, 132

10737, Sector 1, București

Telefon: 021.402.90.74

Referenți științifici:

Conf.dr.ing. **Ioana Manuela MARCU**

Conf. dr. ing. **Răzvan CRĂCIUNESCU**

ISBN: 978-606-9608-95-1

PREFAȚĂ

Motivație

Am hotărât să scriu această carte pentru a populariza domeniul în rândul comunității academice din România, al studenților și cadrelor didactice care susțin prelegeri și activități de laborator în domeniul IoT, cât și în cel al cercetătorilor aflați la început de drum, pentru care tehnologiile IoT ar putea deveni instrumente deosebit de utile în realizarea activităților de cercetare. De aceea, veți găsi deopotrivă studii de caz, rezultate ale activității de cercetare, dar și fișe de lucru la sfârșitul fiecărui capitol, pe care cadrele didactice le pot folosi pentru a diversifica activitatea practică a studenților.

Cartea este dedicată introducerii în domeniul Internetului Lucrurilor și prezentării arhitecturii tipice IoT, aducând în prim-plan componentele care stau la baza nivelurilor inferioare ale arhitecturii IoT, respectiv, senzorii, sistemele de calcul și tehnologiile de comunicații utilizate cu preponderență.

În plus, ea combină noțiuni pe care studenții le întâlnesc în cursurile de fizică, teoria semnalelor, electronică, comunicații mobile, tehnici de acces multiplu etc. pe care le văd fructificate în domeniul senzorilor, sistemelor embedded și telecomunicațiilor, demonstrând, astfel, că eforturile lor de înțelegere a acestor concepte, aparent disparate în curriculumul universitar, își vor găsi utilitatea și convergența neîntârziat.

Firește, această carte își va avea edițiile ei ulterioare, actualizate pe baza noilor cercetări din domeniu, care vor aduce aplicații din ce în ce mai provocatoare, dar și pe baza feedback-ului primit de la studenții și colegii din domeniu, cărora le mulțumesc anticipat pentru orice sugestie constructivă transmisă la adresa de e-mail ana.dragulinescu@upb.ro.

Structura cărții

Cartea este structurată în șase capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 prezintă succint evoluția de la rețelele de senzori fără fir la ceea ce este acum Internetul Lucrurilor și ilustrează în mod obiectiv impactul IoT în cercetare și în dezvoltarea actuală de aplicații.

Capitolul 2 prezintă motivația din spatele standardizării în domeniul IoT și descrie arhitectura standardizată elaborată de Uniunea Internațională a Telecomunicațiilor, ITU.

Capitolul 3 descrie principiul rețelelor fără fir și ilustrează componentele acestora, cu un accent deosebit asupra nodurilor de senzori compuse din unități de achiziție și procesare și senzori.

Capitolul 4 prezintă în detaliu subiectul senzorilor, clasificându-i și descriind-le caracteristicile pe care este necesar să le stăpânească oricine participă la implementarea unui sistem IoT și este pus în fața alegerii unui model de senzori. De asemenea, acest capitol este dedicat unui studiu de caz care vizează senzorii utilizați în agricultura de precizie.

Capitolul 5 evidențiază tipurile și caracteristicile unităților de achiziție și procesare. De asemenea, acest capitol prezintă cele mai importante interfețe utilizate de sistemele de calcul, precum și conversia analog-numerică, un concept de bază în achiziția de date folosind sistemele de calcul.

Capitolul 6 tratează tehnologiile de comunicații pe distanțe lungi sau scurte utilizate la nivelul Conectivitate al unei arhitecturi sau al unui sistem IoT, dar și concepte de bază referitoare la propagarea semnalelor.

Legătura dintre capitolele cărții este ilustrată în Figura 1.

Sugestii de utilizare a cărții

Această carte poate fi folosită în cadrul cursurilor și aplicațiilor practice sau al unor programe de formare în Internetul Lucrurilor, fiecare capitol reprezentând un modul complet dintr-un asemenea program. Odată cu susținerea cursurilor și laboratoarelor, am dezvoltat materiale care se regăsesc în această carte. Capitolele 3-5 sunt deosebit de utile pentru a pune bazele și a stârni interesul studenților în cadrul disciplinelor Microcontrolere, Microprocesoare sau Proiect Informatică Aplicată, în timp ce Capitolul 6 este relevant pentru studenții care urmează cursuri de Transmisiuni de Date sau Comunicații Mobile.

O altă direcție de utilizare a cărții derivă din recenta experiență de planificare a unui program de formare în cadrul laboratorului multidisciplinar Vodafone Innovation Hub, la fondarea căruia am participat și în care conduc

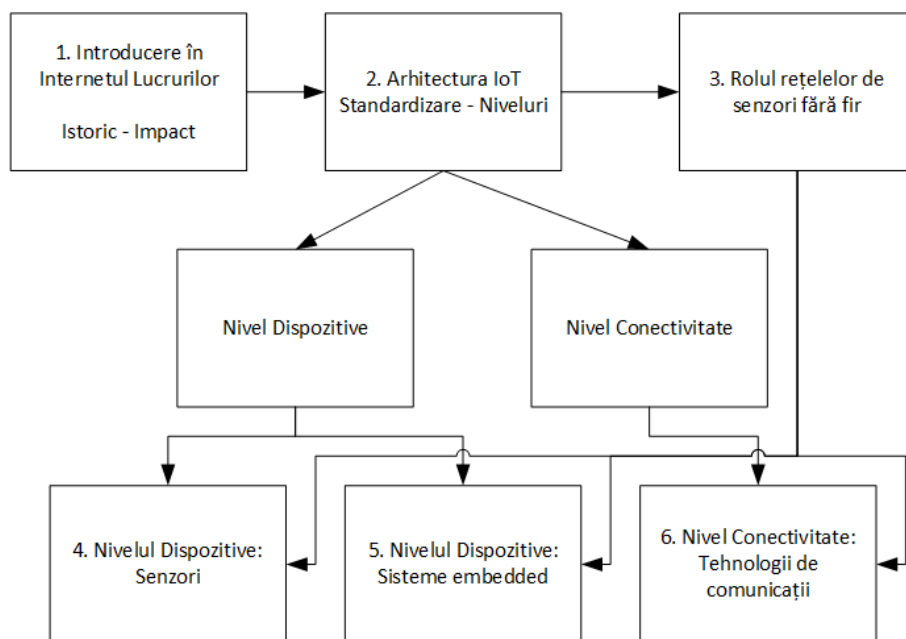


Figura 1: Organizarea lucrării

direcția dedicată IoT. Acest program de formare implică studenții de anul I și II interesați să-și dezvolte abilitățile și competențele în domeniu.

Mulțumiri

Dedic această carte familiei și tuturor studenților și colegilor care mi s-au alăturat în ultimii 10 ani pe acest drum al cercetării și predării, și care au știut să aprecieze fiecare efort și fiecare cărămidă pusă la temelia realizărilor mele profesionale, încurajându-mă și susținându-mă.

Autoarea

17 iulie 2024

INTERNET OF THINGS: DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII

Cuprins

Prefață	5
Listă de figuri	11
Listă de tabele	14
Glosar	15
1 Introducere în Internetul Lucrurilor (IoT)	21
1.1 Istoric: de la rețelele de senzori fără fir la Internetul Lucrurilor	21
1.2 Impactul actual al IoT în activitățile de predare, cercetare și industriale	22
1.3 Fișa de lucru: Întrebări și aplicații	24
2 Arhitectura IoT	25
2.1 De ce avem nevoie de standardizare în IoT?	25
2.2 Arhitectura standardizată IoT-ITU	26
2.3 Întrebări și aplicații	31
3 Rolul rețelelor de senzori fără fir în Internetul Lucrurilor	32
3.1 Introducere	33
3.2 Principiul rețelelor de senzori fără fir: caracteristici și arhitectură	33
3.3 Nodurile de senzori: componente	34
3.4 Rețeaua fără fir: alte componente	36
3.5 Întrebări și aplicații	37
4 Nivelul Dispozitive: Senzori	38
4.1 Senzori vs. traductoare	39
4.2 Categoriile de senzori	39
4.3 Caracteristicile senzorilor	41
4.4 Principiile de funcționare a senzorilor celor mai uzuali	47

INTERNET OF THINGS: DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII

4.5	Studiu de caz: Senzori utilizați în aplicațiile de agricultură inteligentă	92
4.6	Fișă de lucru: Întrebări și aplicații	101
5	Nivelul Dispozitive: Sisteme embedded	104
5.1	Sisteme de calcul	105
5.2	Interfețe de comunicații	114
5.3	Conversia analog-numerică	122
5.4	Aplicații	126
6	Nivelul Conectivitate: Tehnologii de telecomunicații	134
6.1	Noțiuni de propagare	135
6.2	Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru nelicențiat	137
6.3	Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru licențiat	143
6.4	Comparație între tehnologiile LPWAN	145
6.5	Tehnologii de comunicații pe distanțe scurte: Wi-Fi	146
6.6	Fișă de lucru: Întrebări și aplicații	149

LISTĂ DE FIGURI

Figura 1	Organizarea lucrării	7
Figura 1.1	Evoluția numărului de publicații în domeniul Internet of Things în perioada 2004-2024	23
Figura 2.1	Arhitectura IoT structurată pe șapte niveluri [23]	28
Figura 3.1	Componentele unei rețele de senzori fără fir	34
Figura 3.2	Componentele unui nod de senzori	35
Figura 4.1	Senzorul simplu (direct) [38]	39
Figura 4.2	Senzorul complex [36]	40
Figura 4.3	Precizie vs. acuratețe [48]	42
Figura 4.4	Radiația infraroșie focalizată de lentila Fresnel și direcționată către elementul de detecție [72].	51
Figura 4.5	Structura internă a unui senzor PIR [72]	52
Figura 4.6	Structura internă a PIR cu tranzistor FET echipat cu rezistență de sursă și sursă de alimentare [76]	53
Figura 4.7	Configurația PIR incluzând lentila Fresnel pentru filtrarea și focalizarea radiației. [76]	54
Figura 4.8	Funcția de probabilitate a detecției PIR în funcție de direcția de deplasare [71].	54
Figura 4.9	Sensibilitatea PIR. [77]	55
Figura 4.10	(a) Diagrama orientării celor patru senzori PIR; (b) Plasarea celor patru senzori PIR în fiecare dintre cele trei module; (c) Schema dispozitivului pentru detecția mișcării umane [84]	57
Figura 4.11	Trei scenarii diferite pentru detectarea mișcării persoanelor cu senzori PIR: (a) direcții diferite; (b) distanțe diferite; (c) niveluri diferite de viteză. Semnalul de ieșire este de asemenea reprezentat în toate cele trei cazuri [84]	58

Figura 4.12	Setup-ul experimental care arată plasarea senzorilor PIR: (a) vedere din față; (b) vedere de sus [84]	58
Figura 4.13	Arhitectura sistemului de supraveghere folosind senzori PIR pentru codificarea semnalului ultrasonic [87]	59
Figura 4.14	Structura generală a microfonului electret [46]	61
Figura 4.15	Arhitectura sistemului de detectare a căderilor cu o matrice circulară de 8 microfoane [104].	65
Figura 4.16	Senzor ultrasonic piezoelectric [46].	67
Figura 4.17	Modul de operare opus al unui senzor ultrasonic [112]	68
Figura 4.18	Modul de operare în difuzie al unui senzor ultrasonic [112]	68
Figura 4.19	Model tipic de sensibilitate pentru un senzor ultrasonic montat pe perete [77]	70
Figura 4.20	Arhitectura unui sistem de alertare și urmărire pentru persoanele nevăzătoare [122]	72
Figura 4.21	Stânga: interpretând la trombon. Dreapta: interpretând la trombosonic [123]	73
Figura 4.22	Componentele de control al sunetului trombosonicului [123]	73
Figura 4.23	Structura mecanică a unui accelerometru monoaxial [128]	76
Figura 4.24	Diagrama forțelor care acționează asupra corpului accelerometrului [46]	76
Figura 4.25	Schimbarea capacității datorită schimbării distanței dintre plăci [129]	82
Figura 4.26	Condensator diferențial [129]	84
Figura 4.27	Configurația experimentală a sistemului de monitorizare urologică bazat pe accelerometru [139]	89
Figura 4.28	Diagrama-bloc a senzorului Sharp [145]	91
Figura 4.29	Senzorul de temperatură LM35 [160]	94
Figura 4.30	Senzorul STP01 pentru măsurarea temperaturii soluției [159]	94
Figura 4.31	Senzorul 5TM [161]	94
Figura 4.32	Sonda de măsurare a temperaturii și umidității solului Sseed [162]	95
Figura 4.33	Senzorul de umiditate Sparkfun [166]	96
Figura 4.34	Circuitul sondelor de măsurare a umidității solului [167]	96
Figura 4.35	Senzorul ML3 Theta [169]	98
Figura 4.36	Senzorul WET [170]	98

LISTĂ DE FIGURI

Figura 4.37	Sonda PR2 [171]	99
Figura 4.38	Tensiometru SR Irrrometer [173]	100
Figura 5.1	Componentele principale ale unui sistem de calcul . . .	105
Figura 5.2	Componentele unui microcontroler	109
Figura 5.3	Pini intrare vs. ieșire.	110
Figura 5.4	Predivizarea	112
Figura 5.5	Conectarea serială a două plăci de dezvoltare DEVKIT-C v4	115
Figura 5.6	Pachet de date în transmisia serială [203]	115
Figura 5.7	Pașii comunicației seriale [204]	116
Figura 5.8	Conectarea dispozitivului master și a celui slave în comunicația SPI [205]	117
Figura 5.9	Conectarea dispozitivului master și a mai multor dispozitive slave în comunicația SPI [205]	117
Figura 5.10	Registreele pentru comunicația SPI [205]	118
Figura 5.11	Protocolul I^2C [210]	120
Figura 5.12	Protocolul I^2S [211]	121
Figura 5.13	Eșantionarea semnalelor analogice	123
Figura 5.14	Semnalul cuantizat vs. semnalul eșantionat ($n=3, M=8, U_{max} = 1\text{ V}, U_{min} = -1\text{ V}$)	124
Figura 5.15	Semnalul cuantizat vs. semnalul eșantionat ($n=3, M=8, U_{max} = 1\text{ V}, U_{min} = 0\text{ V}$)	125
Figura 6.1	Transmisia semnalelor în comunicațiile fără fir	136
Figura 6.2	Patru dintre locațiile posibile ale unui TX atunci când se cunoaște RSSI	137
Figura 6.3	Influența factorului de împrăștiere, a lărgimii de bandă și a ratei de cod asupra ratei de bit LoRa, pe baza lărgimii de bandă a modulului LoRa Semtech SX1272 pentru care $BW=7.8-500\text{ kHz}$	139

LISTĂ DE TABELE

Tabelul 4.1	Comparație între senzori și traductoare	101
Tabelul 5.1	Exemple de echipamente care folosesc sisteme de calcul de uz general și de uz specific [180, 181] . . .	107
Tabelul 5.2	Comparație între sistemele de calcul de uz general și cele embedded [182–184]	107
Tabelul 5.3	Avantaje și dezavantaje ale sistemelor embedded [182, 183]	108
Tabelul 5.4	Tipuri de sisteme embedded [183–185]	108
Tabelul 5.5	Comparație între uCs și uPs [200–202]	114
Tabelul 5.6	Intervalele de tensiuni și nivelurile corespunzătoare ($n=3$, $M=8$, $U = 1 V$, $\Delta = 0.25 V$)	124
Tabelul 5.7	Atenuările disponibile și domeniile măsurabile. Adaptare după [214]	126
Tabelul 5.8	Distribuția senzorilor pe echipe	132
Tabelul 6.1	Analiză comparativă a tehnologiilor LPWAN [31] .	145
Tabelul 6.2	Versiunile standardului 802.11 (Wi-Fi 1-6)	147

GLOSAR

- I*²C** Inter-Integrated Circuit Protocol (Protocolul Inter-Integrated Circuit). 13, 35, 118–120
- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project (Proiectul parteneriatului generației a 3-a). 143, 144
- AAL** Ambient Assisted Living (Asistență ambientală pentru viață). 58
- AES** Advanced Encryption Standard (Standard avansat de criptare). 141
- ALOHA** Advocates of Linux Open-source Hawaii Association (Protocol de acces multiplu pentru comunicația pe un canal partajat). 138, 140
- BPSK** Binary Phase Shift Keying (Modulație binară cu salt de fază). 148
- CAD** Channel Activity Detection (Detecția activității canalului). 140
- CS** Chip Select (Selector dispozitiv slave). 116–118
- CSS** Chirp Spread Spectrum (Modulație cu spectru împrăștiat cu semnale de tip chirp). 138–140, 145
- DBPSK** Differential Binary Phase Shift Keying (Modulație digitală cu salt de fază diferențială). 142, 145
- DCF** Distributed Coordination Function (Funcție de coordonare distribuită). 146
- DL** Downlink (Legătură descendentă). 145
- DMA** Direct Memory Access (Acces direct la memorie). 121
- EC** Edge Computing (Procesare la marginea Internetului). 29
- ECG** Electrocardiografie. 29

INTERNET OF THINGS: DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII

- eDRX** Extended Discontinuous Reception (Recepție discontinuă extinsă). 144
- EMG** Electromiografie. 29
- eMTC** enhanced Machine Type Communications (Comunicații tip mașină evoluate). 144
- FDMA** Frequency Division Multiple Acces (Acces multiplu cu diviziune în frecvență). 143
- FEC** Forward Error Correction (Cod corector de erori). 138
- FET** Field Effect Transistor (Tranzistor cu efect de câmp). 11, 52, 53
- FOV** Field of View (Câmp vizual). 59
- FSK** Frequency Shift Keying (Modulație cu salt în frecvență). 139, 140
- GFSK** Gaussian Frequency Shift Keying (Modulație cu salt în frecvență cu impuls purtător de tip gaussian). 142, 145
- GPRS** General Packet Radio Service (Serviciu de comunicații bazat pe comutația de pachete). 142
- GPS** Global Positioning System (Sistem de poziționare globală). 142
- GSM** Global System for Mobile Communications (Sistem global pentru comunicațiile mobile). 143
- I²S** Inter-IC Sound (Interfață pentru conectarea dispozitivelor audio). 13, 120–122
- IoMT** Internet of Medical Things (Internetul Lucrurilor Medicale). 27
- IoT** Internet of Things (Internetul Lucrurilor). 22, 26, 27, 135, 147
- IR** Infrared (Infraroșu). 48, 51, 52
- IREDD** Infrared Emitting Diode (Diodă electroluminiscentă în infraroșu). 90, 91
- ITU** International Telecommunication Union (Uniunea Internațională de Telecomunicații). 6, 28

- LB** Link Budget (Bugetul legăturii de comunicație). 141
- LoRaWAN** Long Range Wide Area Networks (Rețele pe distanțe lungi cu arie largă de acoperire). 137, 141, 145
- LPWAN** Low Power Wide Area Network (Rețele de joasă putere și arie largă de acoperire). 137, 145, 148
- LSB** Least Significant Bit (Cel mai puțin semnificativ bit). 120
- LTE** Long Term Evolution (evoluție pe termen lung). 143–145, 147
- LTE-M** Long Term Evolution-Machine-Type Communications (Comunicații de tip mașină cu evoluție pe termen lung. 137
- M2M** Machine-to-Machine (Mașină-mașină). 22
- MISO** Master Input Slave Output (Intrare master, ieșire slave). 116–118
- MOSI** Master Output Slave Input (Ieșire master, intrare slave). 116–118
- MSB** Most Significant Bit (Cel mai semnificativ bit). 118, 120, 121
- MU-MIMO** Multiple User-Multiple Input Multiple Output (Utilizatori multipli-intrare multiplă-ieșire multiplă). 146, 147
- NB-IoT** Narrowband-IoT. 29, 137, 143–145
- OFDM** Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Modulație cu diviziune ortogonală în frecvență). 147, 148
- OFDMA** Orthogonal Frequency Division Multiple Acces (Acces multiplu cu diviziune ortogonală în frecvență). 144, 145, 147
- PCF** Point Coordination Function (Funcție de coordonare centralizată). 146
- PIR** Passive Infrared Sensor (Senzor pasiv în infraroșu). 11, 49, 50, 52–59
- PSD** Position Sensitive Detector (Senzor de poziție). 90
- PSM** Power Saving Mode (Mod economic). 144
- QAM** Quadrature Amplitude Modulation (Modulație în amplitudine în cuadratură). 148

- QoS** Quality of Service (Calitatea serviciilor). 144
- QPSK** Quadrature Phase Shift Keying (Modulația cu salt de fază în cuadratură). 143, 145, 148
- RSSI** Received Signal Strength Indicator (Indicatorul de putere al semnalului recepționat). 136
- RSZ** Raport Semnal-Zgomot. 34, 53, 63, 140
- SC-FDMA** Single Carrier - Frequency Division Multiple Acces (Acces multiplu cu diviziune în frecvență cu o singură purtătoare). 145
- SCADA** Supervisory Control And Data Acquisition (Monitorizare, control și achiziții de date). 22
- SCLK** Serial Clock (Semnal de sincronizare). 116, 117
- SF** Spreading Factor (Factor de împrăștiere). 138
- SPI** Serial Peripheral Interface (Interfață periferică serială). 13, 35, 116, 117, 119
- SU-MIMO** Single User-Multiple Input Multiple Output (un singur utilizator-intrare multiplă-ieșire multiplă). 147
- UAP** Unitatea de achiziție și procesare. 35
- UART** Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (Receptor-transmițător asincron universal). 119
- UL** Uplink (Legătură ascendentă). 145
- UNB** Ultra Narrow-Band Modulation (Modulație de bandă foarte îngustă). 142, 145
- USB** Universal Serial Bus (Magistrală serială universală). 35
- VoLTE** Voice over Long Term Evolution. 144
- Wi-Fi** Wireless Fidelity. 146
- WL** Word Length (Lungimea cadrului de date audio). 120

GLOSAR

WPAN Wireless Personal Area Network (Rețea personală fără fir). 148

WS Word Select (Selectare canal). 120, 121

WSN Wireless Sensors Network (Rețea de senzori fără fir). 21, 23, 34

INTERNET OF THINGS: DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII

Capitolul 1

INTRODUCERE ÎN INTERNETUL LUCRURILOR (IOT)

Obiective:

O1.1 Să se prezinte parcursul tehnologiei IoT de la primele rețele de senzori și până în prezent.

O1.2 Să se prezinte avansul tehnologic în diferite domenii de aplicații ca urmare a implementării tehnologiilor IoT.

Cuvinte cheie: aplicații militare, comunicații M2M, Internetul Lucrurilor Medicale/Muzicale/Maritime/Robotice, Internetul Vehiculelor _____

Cuprins:

1.1 Istoric: de la rețelele de senzori fără fir la Internetul Lucrurilor

1.2 Impactul actual al IoT în activitățile de predare, cercetare și industriale

1.3 Fișa de lucru: Întrebări și aplicații

1.1 Istoric: de la rețelele de senzori fără fir la Internetul Lucrurilor

Ca și multe alte tehnologii, rețelele de senzori wireless (WSN, Wireless Sensors Networks) au fost pentru prima dată implementate pentru a răspunde cerințelor unor aplicații din domeniul militar. În mod curent, acestea au ajuns să acopere o gamă mult mai largă de scenarii, de la case și clădiri inteligente

la monitorizarea calității aerului sau faunei acvatice [1]. Prima inițiativă de sistem asemănător rețelelor de senzori fără fir a fost sistemul de supraveghere bazat pe semnale acustice (SOSUS), dezvoltat de armata Statelor Unite ale Americii în timpul Războiului Rece pentru a detecta și urmări submarinele sovietice. Această rețea folosea senzori acustici de tip hidrofoane ce erau distribuiți în Oceanul Atlantic, precum și în Pacific. Sistemul este funcțional și în ziua de astăzi în scopuri de cercetare a faunei sălbatice submarine sau a activității vulcanice [2, 3]. În anii 80, au fost lansate rețelele de control supervizat și achiziție de date SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) considerate prima generație de rețele ce implementau comunicația mașină-mașină (M2M, Machine-to-Machine) între două dispozitive sau obiecte [4] pe baza unui canal de comunicații fără fir sau prin cablu. Prin ambele tehnologii se poate asigura în mod curent conectarea dispozitivelor de telemetrie și a actuatorilor utilizate pentru controlul de la distanță al unor procese industriale [5], dar una dintre diferențele dintre SCADA și WSN rezidă în faptul că în SCADA sistemele sunt izolate și bazate pe tehnologii proprietare [4], în timp ce în WSN sistemele pot fi interconectate și bazate pe tehnologii deschise.

În timp, rețelele de senzori au evoluat uimitor, în principal mulțumită dezvoltării tehnologiei componentelor semiconductoare, ajungându-se la componente miniaturizate cu un cost redus și cu un consum de energie din ce în ce mai scăzut. Astfel, au apărut procesoare și microprocesoare, microcontrolere, module radio și senzori care, în prezent, pot fi integrate pe un singur cip [6].

Începând cu 2008-2009, anul presupus de lansare al Internetului Lucrurilor (IoT) [7], acest concept s-a dezvoltat în paralel cu cel al rețelelor WSN.

1.2 Impactul actual al IoT în activitățile de pre-dare, cercetare și industriale

Internetul Lucrurilor a devenit un domeniu de mare interes, deosebit de actual pentru mediul academic, precum și pentru companiile din domeniu care oferă soluții inteligente și în care viitorii absolvenți ajung să implementeze aplicații IoT. În plus, în ceea ce privește mediul de cercetare, multe dintre apelurile de proiecte de cercetare naționale și internaționale vizează integrarea acestor tehnologii, iar grupurile de cercetare își propun să dezvolte arhitecturi bazate pe concepte precum rețelele de senzori, tehnologii de comunicații, Edge și Fog Computing. De asemenea, merită subliniat faptul că, pornind de la rețelele

CAPITOLUL 1. INTRODUCERE ÎN INTERNETUL LUCRURILOR (IOT)

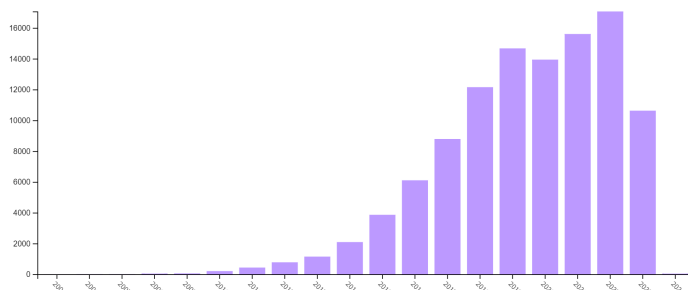


Figura 1.1: Evoluția numărului de publicații în domeniul Internet of Things în perioada 2004-2024

de senzori wireless, au apărut cursuri și aplicații (laborator, proiect) dedicate. În anii anteriori, subiectul WSN se constituia ca un capitol anexat unui curs, în timp ce, în prezent, Internetului Lucrurilor i se dedică un curs întreg. În prezent, în baza de date Web of Science există 107.599 referințe¹ care menționează termenul de Internet of Things (noiembrie 2023). Prima ocurență a termenului în articolele științifice indexate în această bază de date a fost în 2002, urmând ca în 2008 numărul acestora să crească brusc la 43 de articole), așa cum ilustrează Figura 1.1. Se poate observa un maxim atins în 2022, cu peste 17 000 de articole publicate. În 2023, la data interogării bazei de date, erau peste 10 000 de articole publicate, dar acest lucru poate fi motivat fie de faptul că încă sunt articole în așteptarea indexării, fie de existența unei tendințe puternice de a ramifica acest concept. Astfel, vom întâlni în literatura de specialitate concepte derivate, precum: Internetul Lucrurilor Medicale [8], Muzicale [9, 10], Maritime [11], Subacvative [12], Robotice [13, 14], Internetul Vehiculelor [15], Vehiculelor Autonome [16] și altele.

¹<https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/010449a4-0e22-4efe-b014-3b1941dcc5c6-b7c6e912/relevance/1>

1.3 Fișa de lucru: Întrebări și aplicații

Realizați următoarele activități:

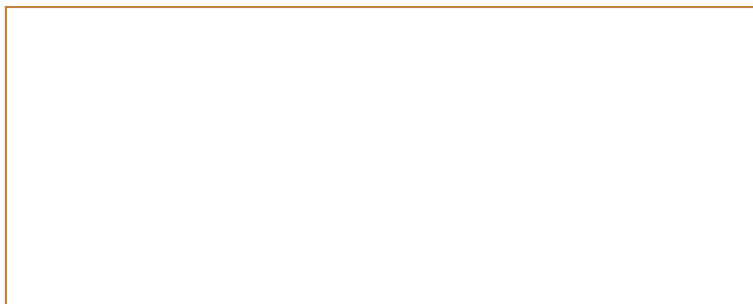
Capitolul 1

.....
(Nume, Prenume)

...../...../.....
(ZZ/MM/AA)

Activitatea 1.1. *Rezumați într-o diagramă legătura dintre IoT, M2M, SCADA și WSN.*

Rezolvare.



Activitatea 1.2. *Menționați anul primei apariții a noțiunii de Internet al Lucrurilor în baza de date Web of Science.*

Rezolvare. _____

Activitatea 1.3. *Folosiți motorul de căutare Google Scholar pentru a determina numărul de articole care menționează conceptul de Internet al Lucrurilor ("Internet of Things"²). Repetați căutarea pentru conceptul de rețele de senzori fără fir ("Wireless Sensor Networks") și comentați rezultatele.*

Rezolvare. _____

²Pentru a căuta exact această sintagmă, este necesar să adăugați ghilimelele.

Capitolul 2

ARHITECTURA IOT

Obiective:

O2.1 Să se prezinte motivația din spatele unei standardizări.

O2.2 Să se prezinte arhitectura IoT-ITU de referință pentru diferite domenii cheie.

Cuvinte cheie: democratizarea datelor, volum de date, date multimodale, interoperabilitate, standarde proprietare, fragmentare

Cuprins:

2.1 De ce avem nevoie de standardizare în IoT?

2.2 Arhitectura standardizată IoT-ITU

2.3 Întrebări și aplicații

2.1 De ce avem nevoie de standardizare în IoT?

Obiectele inteligente din cadrul unui sistem IoT generează volume mari de date (Big Data) ce trebuie colectate, procesate și stocate în mod securizat. Standardizarea presupune stabilirea de specificații și protocoale universal acceptate, prin care se asigură interoperabilitatea reală între dispozitive și aplicațiile dezvoltate, dar și eficiența din punctul de vedere al costurilor. În plus, prin adoptarea de standarde, se deschid multe alte oportunități în diferite domenii [17].

Lipsa standardizării poate submina eforturile de interoperabilitate, ducând la probleme de compatibilitate, securitate și funcționalitate, și poate reprezenta un obstacol în dezvoltarea noilor cazuri de utilizare specifice IoT. La nivelul

companiilor, pe măsură ce acestea își extind inițiativele de transformare digitală, provocările legate de standardizarea IoT pot plasa producătorii în urma concurenței [18].

Democratizarea datelor este un alt subiect important în strânsă legătură cu standardizarea, implicând sortarea, organizarea, prezentarea, explicarea (în mod vizual) acestora. Se estimează că, până în 2025, dispozitivele IoT vor colecta 79,4 zettabytes de date, subliniind astfel necesitatea urgentă de a prioritiza această problemă în orice strategie IoT. Volumul de date, însă, trebuie complementat de calitatea acestora întrucât pe baza lor sunt luate decizii în probleme complexe precum schimbările de mediu, economice, tehnologice și ale pieței muncii, ca și în cele legate de disparitățile sociale în sănătate, venituri, sustenabilitate și bunăstare [18].

În afară de cantitate, o altă problemă legată de date constă în faptul că adesea acestea sunt fragmentate, de o calitate extrem de variabilă, uneori slab documentate și curățate, provenind din surse multiple – video, voce, text, imagine și date telemetrice [19]. În plus, accesul și utilizarea datelor nu mai sunt domeniul exclusiv al unui mic grup privilegiat de oameni de știință și cercetători. Internetul lucrurilor, ca vector definitoriu pentru generarea de date, are nevoie de standardizare și infrastructură capabilă să producă informații valoroase și utilizabile, unde datele sunt democratizate [18]. O parte esențială a infrastructurii necesare este construirea unor comunități de utilizatori și producători în jurul seturilor de date și temelor specifice. Acest lucru începe cu identificarea celor care utilizează datele disperate, ceea ce ajută cercetătorii, inclusiv pe cei juniori și studenții absolvenți, să găsească alți experți în comunitatea lor științifică. În plus, ajută agențiile guvernamentale și de finanțare a cercetării să identifice utilizarea portofoliului lor de investiții în date. De asemenea, oamenii de știință pot găsi alte lucrări complementare celor proprii [19].

2.2 Arhitectura standardizată IoT-ITU

După cum sugerează și numele, scopul Internetului Lucrurilor IoT este de a conecta în mod inteligent dispozitive fizice, senzori, echipamente casnice și industriale, clădiri ș.a prin intermediul unui ansamblu distribuit de tehnologii și servicii Cloud care include servere, baze de date și programe de procesare. Prin integrarea tehnologiei informației (echipamente, programe, utilitare necesare stocării și procesării datelor) și a tehnologiei comunicațiilor (incluzând

CAPITOLUL 2. ARHITECTURA IOT

sisteme electronice pentru comunicații), IoT oferă soluții pentru aproape orice industrie [20]. Astfel, se pun bazele dezvoltării orașelor inteligente (Smart Cities), caselor inteligente (Smart Home), agriculturii inteligente (Smart Agriculture) [21] sau chiar a serviciilor medicale și monitorizării stării pacienților de la distanță prin ceea ce poartă numele de Internet al dispozitivelor medicale (Internet of Medical Things - IoMT).

Obiectele, așa-numitele „things”, în IoT nu au o definiție strictă, ci includ o varietate de elemente sau dispozitive fizice. Dezvoltarea unor aplicații care presupun interconectarea acestor obiecte implică numeroase provocări [21]: interoperabilitatea dispozitivelor, aplicațiilor și serviciilor, soluții de comunicații care să răspundă cerințelor de eficiență energetică, de acoperire etc., probleme de securitate sau de confidențialitate.

În ceea ce privește problema interoperabilității, software-ul de tip middle-ware poate facilita dezvoltarea serviciilor și aplicațiilor, oferind suport pentru integrarea diverselor dispozitive ale utilizatorilor, a echipamentelor eterogene de calcul și comunicații [21].

Comunicația dintre multitudinea de dispozitive (telefoane inteligente, tablete, senzori, actuatori) și serviciile conexe trebuie să fie posibilă în orice moment, în orice loc, autonom [21]. Tehnologia de comunicații folosită trebuie să aibă o eficiență sporită din punctul de vedere al consumului de energie, îndeosebi atunci când dispozitivele sunt utilizate în locuri greu accesibile sau când resursele de energie sunt limitate (de exemplu, atunci când dispozitivele sunt alimentate de la panouri solare). De asemenea, tehnologia de comunicații utilizată trebuie să asigure o rază de acoperire adecvată cazului de utilizare, ca și rata de transmisie necesară transmiterii datelor stabilite prin respectivul caz de utilizare.

Ecosistemul IoT este caracterizat astfel:

- dispozitivele și sistemele IoT sunt amplasate într-o arie geografică largă;
- mediile în care sunt amplasate pot fi deschise și necontrolate;
- răspândirea dispozitivelor și sistemelor IoT în multiple regiuni diferite din punct de vedere administrativ, cu mecanisme, medii, tehnologii și procese diferite;
- deseori, sistemele IoT depind de standarde proprietare;
- majoritatea sistemelor IoT nu sunt construite după o arhitectură pe niveleuri acceptată unanim, ci constituie un mediu puternic fragmentat;
- dispozitivele terminale folosesc modele diferite de adresare și formate eterogene de adresare, fiecare dintre acestea fiind optimizate pentru o

anumită aplicație;

- dispozitivele utilizate au o complexitate scăzută, cerută de costul scăzut sau de puterea limitată a bateriei.

Cunoscând aceste aspecte, implementarea unui sistem IoT robust, în care serviciile devin complexe și descentralizate, nu este posibilă fără cunoașterea și înțelegerea arhitecturii IoT.

În literatură, începând cu anul 2005, odată cu apariția primei arhitecturi relevante pentru domeniul IoT [22], au fost descrise numeroase propuneri de arhitecturi IoT. Modelul de referință, însă, este cel propus de Uniunea Internațională de Telecomunicații (International Telecommunication Union, ITU). În Figura 2.1, este prezentată arhitectura IoT pe șapte niveluri, așa cum o descrie standardul ITU.

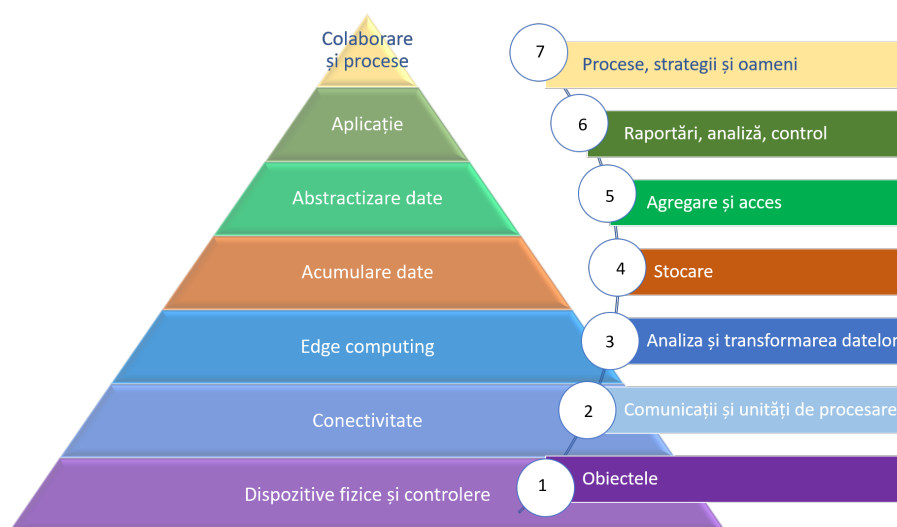


Figura 2.1: Arhitectura IoT structurată pe șapte niveluri [23]

Nivelul Dispozitive.

Nivelul Dispozitive sau Percepție, cum mai este cunoscut, este nivelul care gestionează dispozitivele fizice, prin identificarea acestora (pe baza unor identificatori unici) și achiziția (colectarea) datelor. Spre exemplificare, senzorii sunt dispozitive ce pot colecta parametri ca temperatură, umiditate, presiune (forță), presiune atmosferică, altitudine, accelerație, înclinație, masă, distanță,

CAPITOLUL 2. ARHITECTURA IOT

luminozitate, culoare, puls și semnale precum cel electrocardiografic (ECG), electromiografic (EMG) etc. Nu doar senzorii sunt, însă, dispozitivele aflate pe primul nivel al arhitecturii IoT, ci se pot menționa, de asemenea, dispozitivele personale, precum telefoane, ceasuri și alte accesorii inteligente, sau actuatorile - care sunt toate acele dispozitive ce au rolul de a acționa diferite mecanisme sau sisteme de control pentru ca acestea să realizeze diferite operații în mod corect (motoare, valve etc.).

Nivelul Conectivitate.

Nivelul Conectivitate are rolul de a transmite și securiza datele sensibile către nivelurile superioare. Dintre tehnologiile de comunicații utilizate la acest nivel enumerăm: comunicația în infraroșu, Bluetooth, ZigBee, Wi-Fi (pe distanță scurtă), LoRa, Sigfox, NB-IoT (Narrowband-IoT), 2G/3G/4G (pe distanțe lungi). Nivelul Conectivitate cuprinde dispozitive precum porțile de acces, routerele și stațiile de bază.

Nivelul de procesare la marginea Internetului (Edge Computing, EC)

Modelul EC a fost integrat în ecosistemul IoT pentru ca o parte din procesarea datelor să fie efectuată cât mai aproape de nivelul responsabil pentru achiziția datelor de la dispozitivele implicate sau, altfel spus, mai aproape de nodurile care au generat sursele de date. Motivul care a stat la baza apariției acestui nivel constă în faptul că nu este necesar ca toate datele colectate să fie transmise către nivelurile superioare. La nivelul EC, datele pot fi filtrate. De asemenea, prin aplicarea algoritmilor de compresie, se poate reduce rata de date necesară transmiterii fluxurilor de date către nivelul superior. Întrucât și pentru că aceste operații consumă foarte multe resurse, nivelul Edge reprezintă un element necesar în arhitectura IoT.

Nivelurile descrise până acum vizează datele dinamice, care sunt supuse diferitelor operații și care sunt transmise prin diferite medii. Următoarele două niveluri, Acumulare date și Abstractizare date se referă la datele care nu mai sunt supuse alterării sub diferite forme (procesări, compresii).

Nivelul Acumulare Date

Anterior, s-a menționat faptul că dispozitivele IoT de la nivelul 1 al arhitecturii IoT au putere de calcul extrem de limitată. La nivelul EC, puterea de calcul crește prin adăugarea unor dispozitive cu performanțe mai ridicate, însă insuficient pentru volumul de date transmis de nivelul *Conectivitate*. Mai mult, unele aplicații nu necesită procesări efectuate cu aceeași viteză ca cea folosită de rețea pentru transmisie sau există posibilitatea ca aplicațiile să nu fie capabile să proceseze datele la fel de rapid. De aceea, nivelul *Acumulare date*

este responsabil pentru stocarea informațiilor nivelurilor inferioare în bazele de date. Tot la acest nivel, pachetele de date recepționate sunt filtrate și stocate, devenind intrări în tabelele relaționale ale bazelor de date.

Nivelul Abstractizare date

În arhitecturile IoT, nu este întotdeauna posibil ca toate datele să fie stocate în același loc (bază de date), ca urmare a separării geografice a dispozitivelor care generează fluxurile de date. De asemenea, mutarea datelor dintr-o bază de date în alta este un proces care consumă resurse. În consecință, la nivelul *Abstractizare date* se află componentele responsabile pentru preluarea, procesarea informației și luarea deciziilor pe baza acestora. Pentru aceasta, datele sunt agregate, combinându-se mai multe surse. De asemenea, la nivelul *Abstractizare date*, se rezolvă aspectele legate de incompatibilitatea formatelor sau semanticii datelor și cele legate de securitatea datelor.

Nivelul Aplicație

O aplicație software este un program care realizează anumite operații pentru un utilizator final. Uzual, se face referire la aceasta doar cu denumirea simplă de aplicație. Nivelul *Aplicație* asigură managementul tuturor aplicațiilor dezvoltate pentru utilizatorii finali ai arhitecturii IoT. Acest lucru se realizează pe baza informațiilor primite și procesate de nivelul *Abstractizare date*. La acest nivel datele sunt interpretate folosind diferite metode de extragere a informației, și utilizate de aplicații. Dacă nivelurile anterioare sunt proiectate corect, nivelul *Aplicație* va rezolva în timp util sarcinile atribuite. În caz contrar, vor exista latențe mari, de nedorit pentru aplicațiile în timp real.

Nivelul Strategie

La nivelul *Strategie*, denumit și nivelul *Colaborare și procese*, se creează modele, situații, rapoarte executive bazate pe analiza datelor și a acurateții acestora și se oferă suport persoanelor interesate pentru dezvoltarea strategiilor și pentru a lua decizii corecte privind parcursul ulterior al platformei IoT.

În cadrul acestei cărți, se pun în evidență primele două niveluri ale arhitecturii IoT, Dispozitive și Conectivitate.

2.3 Întrebări și aplicații

Realizați următoarele activități:

Capitolul 2

.....
(Nume, Prenume)

...../...../.....
(ZZ/MM/AA)

Activitatea 2.1. *Menționați două avantaje ale unei arhitecturi IoT standardizate.*

Rezolvare. _____

Activitatea 2.2. *Identificați alte arhitecturi de referință pentru domenii precum: sănătate, rețele de distribuție de energie, agricultură de precizie etc.*

Rezolvare. _____

Capitolul 3

ROLUL REȚELELOR DE SENZORI FĂRĂ FIR ÎN INTERNETUL LUCRURILOR

Obiective:

O3.1 Să se identifice și să se descrie componentele esențiale ale rețelelor de senzori fără fir (WSN).

O3.2 Să se explice principiile de funcționare a nodurilor de senzori și a componentelor acestora.

O3.3 Să se analizeze cerințele specifice pentru aplicațiile critice și non-critice utilizând WSN.

O3.4 Să se evalueze caracteristicile și arhitectura WSN.

Cuvinte cheie: noduri de senzori, unități de achiziție și procesare, modul de comunicații

Cuprins:

3.1 Introducere

3.2 Principiul rețelelor de senzori fără fir: caracteristici și arhitectură

3.3 Nodurile de senzori: componente

3.4 Rețeaua fără fir: alte componente

3.5 Întrebări și aplicații

3.1 Introducere

Rețelele de senzori fără fir cuprind un număr semnificativ de noduri echipate cu senzori [24] care pot comunica unul cu celălalt de la distanță. Mai mult, aceste rețele reprezintă o legătură între mediul înconjurător și mediul digital [25], putând fi utilizate pentru o gamă largă de aplicații, cum ar fi în aplicații de monitorizare a parametrilor unor culturi agricole [26–28], de monitorizare a mediului [29] și de management al dezastrelor [30], precum și în aplicații non-critice de telemedicină [31, 32].

Rețelele de senzori fără fir propuse trebuie să răspundă unor cerințe dependente de aplicație și context. De exemplu, rețelele de senzori fără fir utilizate în aplicațiile critice (monitorizarea hazardelor) trebuie să fie afectate de latențe cât mai mici în momentul în care un eveniment este detectat, însă trebuie să fie reconfigurabile pentru a economisi consumul de energie și de resurse atunci când nu se detectează nicio modificare a parametrilor monitorizați. De asemenea, rețelele WSN utilizate în aplicații non-critice (de exemplu, agricultura de precizie) trebuie să asigure o funcționare corespunzătoare a senzorilor și date relevante pentru ca deciziile luate pe baza acestor date să nu afecteze întregul sistem.

3.2 Principiul rețelelor de senzori fără fir: caracteristici și arhitectură

Rețelele de senzori fără fir (Figura 3.1) sunt infrastructuri compuse din noduri de senzori conectate astfel încât să monitorizeze cooperativ o arie [25]. Acestea sunt capabile să achiziționeze, proceseze și să transmită datele achiziționate de la senzori către un sistem central a cărui sarcină constă în colectarea, postprocesarea și analiza datelor astfel încât evenimentele la care sistemul central trebuie să reacționeze să fie izolate [33].

O rețea de senzori fără fir constă în următoarele componente:

1. noduri de senzori distribuite sau concentrate într-o zonă specifică;
2. rețea fără fir;
3. nod central.

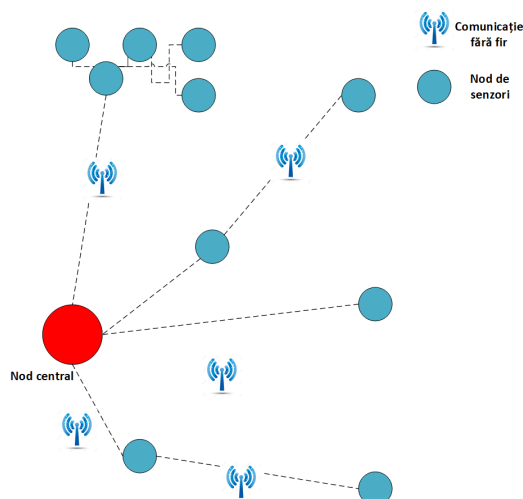


Figura 3.1: Componentele unei rețele de senzori fără fir

3.3 Nodurile de senzori: componente

În Figura 3.2 este reprezentat un nod de senzori ce poate fi integrat într-o rețea de senzori fără fir.

Un nod de senzori cuprinde următoarele componente:

1. senzori și circuite de condiționare a semnalului;
2. unitate de achiziție și procesare;
3. modul de comunicație fără fir;
4. sursă de alimentare.

Senzorii sunt dispozitive de mici dimensiuni, cu un consum redus de energie, echipate cu elemente sensibile la anumiți stimuli externi (de exemplu, lumina din spectrul vizibil, radiația ultravioletă, umiditatea aerului sau a solului etc.) și care convertesc acest stimul non-electric într-un semnal electric. Aceștia se clasifică conform mai multor criterii: senzori analogici/senzori digitali, senzori simpli/senzori complecși, senzori activi/pasivi.

Pe lângă elementele sensibile, senzorii atașați unui nod prezintă circuite de condiționare a semnalului cu rol în amplificarea și rectificarea semnalului analogic, pentru creșterea raportului semnal-zgomot (RSZ) și a rezoluției. Mai mult, pentru că senzorii analogici reprezintă o categorie importantă de dispozitive utilizate în rețelele WSN, existența unui convertor analog-numeric este

CAPITOLUL 3. ROLUL REȚELELOR DE SENZORI FĂRĂ FIR ÎN INTERNETUL LUCRURILOR

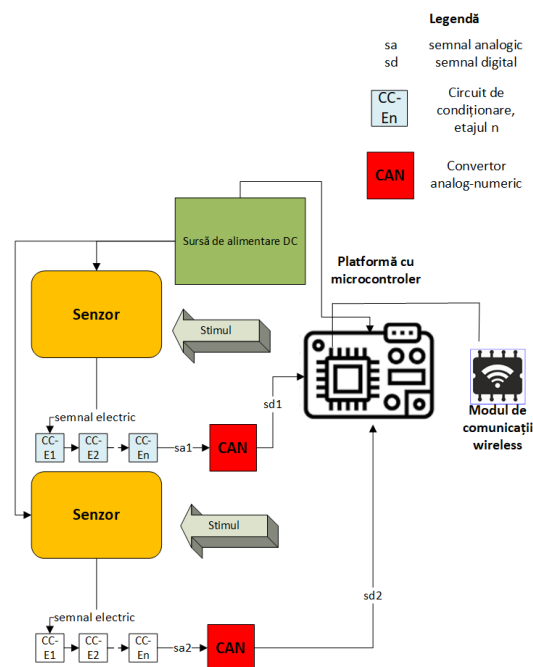


Figura 3.2: Componentele unui nod de senzori

esențială pentru ca semnalele analogice ale acestora să fie convertite în semnale digitale ce poate fi interpretate, de exemplu, de un microcontroler. În Capitolul 4, se vor discuta mai în detaliu aspectele legate de funcționarea și utilizarea senzorilor.

Unitatea de achiziție și procesare (UAP) reprezintă un dispozitiv de calcul cu resurse, de obicei, limitate. Această unitate poate avea în componența ei un microcontroler - cu elemente integrate, așa cum sunt convertoarele analog-numeric. De asemenea, unitatea de achiziție cuprinde interfețe de comunicație precum cea serială, I^2C (interfață între circuite integrate), SPI (interfață serială periferică), oscilator, conector USB (magistrală serială universală), memorie ș.a.

O altă categorie de unități de achiziție și procesare se bazează pe micro-procesoare. Se vor detalia aspecte legate de unitățile de achiziție și procesare în Capitolul 5.

Modulul de comunicație fără fir este un emițător-receptor care are rolul de a transmite datele achiziționate de la senzori și procesate de UAP către alte dispozitive care comunică prin aceeași tehnologie, aflate în raza sa de acoperire. De asemenea, modulul fără fir ce intră în componența nodului de senzori poate recepționa datele transmise de nodurile de senzori din aceeași rețea. Sursa de

alimentare este necesară pentru asigurarea tensiunii necesare funcționării tuturor componentelor unui nod de senzori. Pentru a asigura autonomia nodurilor de senzori, pentru alimentare se pot utiliza baterii, celule solare sau metode de regenerare a energiei (energy harvesting).

3.4 Rețeaua fără fir: alte componente

Colectarea datelor primite de la nodurile de senzori se realizează de către nodul central. La nivelul acestui nod se pot realiza anumite procesări, însă, de obicei, resursele sale sunt limitate. De cele mai multe ori, punctul în care se realizează procesări suplimentare sau operații complexe asupra datelor se află la o distanță considerabilă față de cea dintre nodurile de senzori și nodul central. În plus, existența mai multor protocoale de comunicații și eterogenitatea dispozitivelor determină folosirea unor echipamente suplimentare pentru asigurarea interoperabilității lor. Astfel, apar noi elemente în rețelele de senzori fără fir care participă la agregarea și direcționarea datelor, translatarea protocoalelor între diferitele rețele și coordonarea nodurilor [34]: routerele, punctele de acces, porțile de acces, stațiile de bază, însă acestea nu sunt subiectul prezentei lucrări.

3.5 Întrebări și aplicații

Realizați următoarele aplicații:

Capitolul 3

.....
(Nume, Prenume)

...../...../.....
(ZZ/MM/AA)

Activitatea 3.1. *Descrieți principalele componente ale unui nod de senzori și funcțiile lor.*

Activitatea 3.2. *Explicați cum pot contribui rețelele de senzori fără fir la managementul dezastrelor.*

Activitatea 3.3. *Menționați două aplicații non-critice ale rețelelor de senzori fără fir și explicați de ce sunt considerate non-critice.*

Activitatea 3.4. *Realizați din punct de vedere teoretic un proiect de monitorizare a parametrilor de mediu utilizând rețele de senzori fără fir. Includeți componentele necesare și un plan de implementare.*

Activitatea 3.5. *Proiectați un experiment pentru a măsura performanța rețelelor de senzori fără fir în termeni de latență și consum de energie. Descrieți metodologia și echipamentele necesare.*

Activitatea 3.6. *Propuneți o metodă de optimizare a consumului de energie în rețelele de senzori fără fir utilizate în agricultură de precizie.*

Activitatea 3.7. *Elaborați un studiu de caz despre utilizarea rețelelor de senzori fără fir în managementul dezastrelor. Includeți exemple concrete și analizați eficacitatea acestora.*

Activitatea 3.8. *Simulați o rețea de senzori fără fir folosind un software specific (de exemplu, NS-3, TOSSIM). Prezentați rezultatele și concluziile experimentului.*

Capitolul 4

NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Obiective:

O4.1 Să se definească noțiunea de senzor și să se elimine confuzia cu noțiunea de traductor.

O4.2 Să se clasifice tipurile principale de senzori.

O4.3 Să se prezinte principalele caracteristici de care este necesar să ținem cont atunci când alegem senzorul potrivit pentru o aplicație.

O4.4 Să se prezinte principiile de funcționare ale unor senzori uzuali.

Cuvinte cheie: senzori activi/pasivi, senzori digitali/analogici, domeniu, histerezis, acuratețe, precizie, senzori de umiditate și temperatură a solului

Cuprins:

4.1 Senzori vs. traductoare

4.2 Categoriile de senzori

4.3 Caracteristicile senzorilor

4.4 Principiile de funcționare a senzorilor celor mai uzuali

4.5 Studiu de caz: Senzori utilizați în aplicațiile de agricultură inteligentă

4.6 Fișă de lucru: Întrebări și aplicații

În zilele noastre, întâlnim frecvent dispozitivul numit „senzor”: în aplicații comune, cum ar fi lampa care se aprinde ori de câte ori îi atingem baza, senzorii de fum care ne avertizează cu privire la iminența unui incendiu, senzorul de mișcare care comandă aprinderea luminii și așa mai departe.

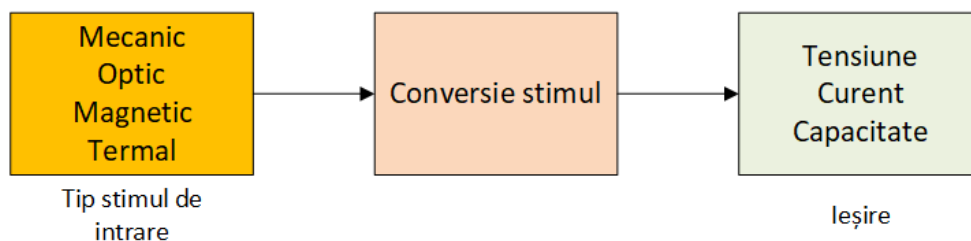


Figura 4.1: Senzorul simplu (direct) [38]

4.1 Senzori vs. traductoare

Senzorul este definit ca un dispozitiv la intrarea căruia se aplică un semnal de intrare neelectric și care emite un semnal electric (analogic) ai cărui parametri pot fi măsurați de anumite instrumente electronice. Altfel spus, un senzor traduce un semnal non-electric într-unul electric. Considerăm că un semnal electric este un semnal care poate fi captat, amplificat și modificat folosind circuite electronice adecvate: curent, tensiune sau capacitate. Vrem să urmărim o dependență între semnalul de intrare și semnalul de ieșire din care măsurăm cantitatea de intrare, cea care ne interesează. Senzorul este un convertor de energie. Percepția de către un senzor implică transfer de informație, iar transferul de informație, după cum este cunoscut, implică transfer de energie [35, 36].

Termenul „traductor” este folosit și în rândul persoanelor care nu sunt neapărat ingineri. Acesta este motivul pentru care se consideră necesară eliminarea oricărei confuzii între acești doi termeni. În timp ce senzorul transformă o energie de tip neelectric într-una electrică, traductorul transformă un anumit tip de energie într-un alt tip de energie, acesta din urmă nefiind legat de procesul de detectare sau percepție [37].

4.2 Categoriile de senzori

4.2.1 Senzori direcți și senzori complecși

Senzorii se pot clasifica în senzori direcți sau simpli (Figura 4.1) și senzori complecși (Figura 4.2).

Senzorii direcți sunt capabili să transforme direct excitația non-electrică

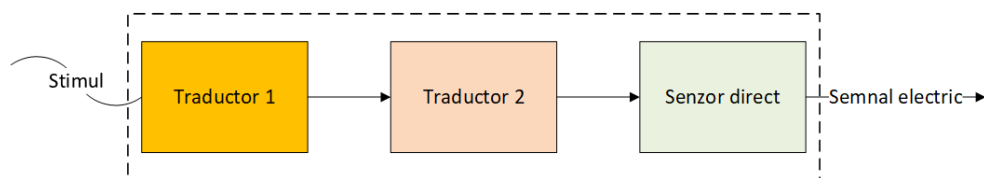


Figura 4.2: Senzorul complex [36]

într-un semnal electric. În această categorie includem termocupluri pentru măsurători simple de temperatură, fotodiode și fototranzistoare pentru măsurarea intensității luminii [39].

În schimb, senzorii complecși au nevoie de conversii multiple pentru a obține semnalul electric [40]. Menționăm aici cazul unui senzor de presiune atmosferică pentru care presiunea este transformată în deplasarea unei membrane și această mișcare este transformată în continuare în semnalul electric ce caracterizează variațiile de presiune. Astfel, se observă că un senzor de deplasare este o componentă a unui senzor mai complex [41].

4.2.2 Senzori activi și senzori pasivi

Termenul „activ” se referă la acea clasă de senzori care posedă capacitatea de a furniza un semnal electric fără intervenția unui semnal de excitație. Senzorii activi poartă, de asemenea, numele de senzori „parametrici”, deoarece parametrii sensorului modulează stimulul. Informația privind mărimea care se dorește a fi măsurată, numită „mărime supusă măsurării”, este purtată prin intermediul modulației [37, 42]. O altă descriere a unui senzor activ, mai simplă decât cele precedente, se referă la acțiunea lor de a emite energie și apoi de a măsura reacția. Acesta este cazul sonarului [43]. RADAR și scannerul laser sunt senzori activi. Cel dintâi este inclus în această categorie datorită acțiunii sale de a emite pulsuri de radiație electromagnetică în domeniul microundelor. El determină distanța măsurând intervalul dintre pulsurile emise și cele reflectate [44].

Pe de altă parte, senzorii pasivi detectează pur și simplu semnalul radiat, puterea măsurată a stimulului determinând puterea semnalului de ieșire. Un exemplu este oferit de senzorii pasivi în infraroșu, care detectează deplasarea prin măsurarea radiației în infraroșu care provine de la obiectele ce se găsesc în zona pe care o scanează [37, 45].

4.2.3 Senzori analogici și senzori digitali

O altă clasificare a senzorilor se realizează în funcție de tipul semnalului de ieșire, analogic sau digital. Un senzor digital generează un semnal fizic caracterizat de două niveluri care corespund celor două valori logice, 0 și 1. Un senzor analogic furnizează un semnal care variază continuu în timp. Acest semnal este proporțional cu mărimea măsurată [37].

4.3 Caracteristicile senzorilor

Pentru a prezenta caracteristicile senzorilor, trebuie să precizăm că vom trata senzorul ca un circuit bloc ale cărui componente nu sunt cunoscute și nu prezintă interes în acest moment. Această decizie a fost luată deoarece dorim să analizăm doar relațiile dintre semnalul non-electric de intrare și semnalul de ieșire. Caracteristicile fundamentale ale senzorilor sunt prezentate în secțiunile următoare.

4.3.1 Domeniu

Senzorii sunt proiectați să funcționeze într-o anumită gamă, ceea ce îi face potriviți pentru anumite aplicații. Dacă intervalul este depășit, senzorul poate suferi deteriorări sau chiar distrugerii. Este de dorit să ținem cont nu doar de valorile minime și maxime ale domeniului de funcționare, ci și de obținerea, dacă este posibil, a unei liniarități îmbunătățite [36].

4.3.2 Acuratețe

Această caracteristică este specificată în termeni de inexactitate [46] care se referă la raportul dintre cea mai mare deviere a valorii date de senzor și valoarea ideală. Pentru multe aplicații, acuratețea reprezintă un aspect crucial pentru un senzor [47] și este adesea confundată cu precizia sau chiar cu rezoluția. Este necesar, însă, să se ia în considerare faptul că un senzor cu o acuratețe ridicată este mai aproape de o valoare reală, în timp ce un senzor precis are o distribuție a valorilor măsurate mai restrânsă [37, 46]. Figura 4.3 arată relațiile dintre senzorii preciși și cei cu acuratețe ridicată și afirmă, de asemenea, că precizia poate fi independentă de acuratețe.

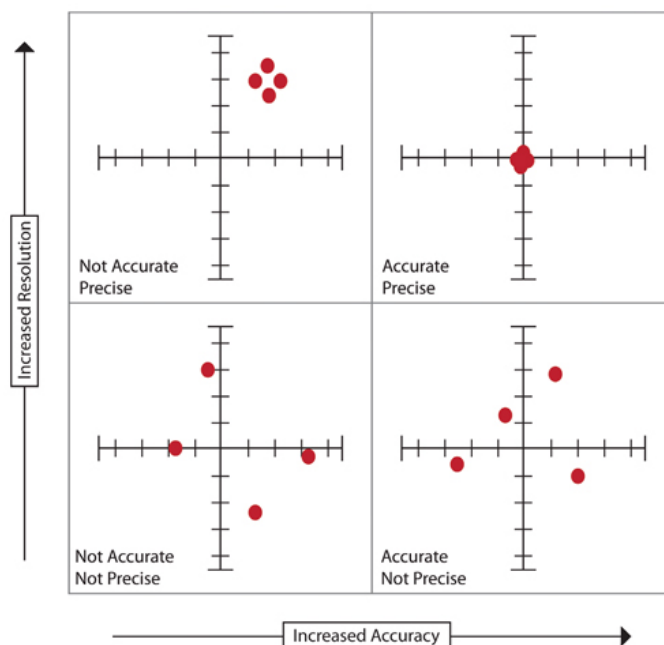


Figura 4.3: Precizie vs. acuratețe [48]

4.3.3 Rezoluție

Rezoluția unui senzor reprezintă cea mai mică diferență pe care o poate detecta în mod fiabil în stimulul de intrare [49].

4.3.4 Funcție de transfer

Funcția de transfer descrie relația dintre stimul, x , și semnalul de ieșire, y . Se poate considera această dependență ca în Ecuația 4.1.

$$y = f(x) \quad (4.1)$$

Problema constă în determinarea lui x cunoscând valoarea semnalului de ieșire pe baza măsurărilor. Stimulul necunoscut x nu este făcut cunoscut direct, ci trebuie extras după procesul de măsurare. Acesta este motivul pentru care este necesară introducerea funcției de transfer inverse (Ecuația 4.2).

$$x = f^{-1}(y) \quad (4.2)$$

De obicei, aceste funcții se bazează pe principii fizice care exprimă funcționarea senzorului [46].

4.3.5 Sensibilitate

Funcția de transfer poate fi aproximată, în cel mai simplu caz, cu o dependență liniară între stimulul de intrare și stimulul de ieșire (Ecuția 4.3).

$$y = ax + b \quad (4.3)$$

Când stimulul nu există, semnalul de ieșire devine $y = b$. În Ecuția 4.3, a reprezintă panta dreptei denumită sensibilitate datorită influenței mai mari a stimulului asupra semnalului de ieșire date de creșterea acestui parametru.

Sensibilitatea nu este o constantă [46] pentru funcțiile neliniare, adică are mai multe domenii de valoare în conformitate cu intervalele stimulilor aplicați la intrare. Pentru astfel de funcții de transfer, sensibilitatea este calculată ca prima derivată a funcției de transfer [46] (Ecuția 4.4).

$$a_i(x_i) = \frac{dy(x_i)}{dx} \approx \frac{\Delta y_i}{\Delta x_i} \quad (4.4)$$

S-a notat cu Δy_i deviația semnalului de ieșire corespunzătoare unei mici deviații a stimulului de intrare.

O altă abordare constă în divizarea funcției de transfer neliniare în multe alte funcții de transfer care sunt liniare [46].

4.3.6 Eroare de neliniaritate

Eroarea de neliniaritate a unui senzor reprezintă abaterea maximă a funcției reale de transfer de la comportamentul liniar ideal. Astfel, este logic ca senzorii să utilizeze o aproximare liniară pentru funcția de transfer. Există multe forme în care putem specifica neliniaritatea. Una dintre ele utilizează forma punctelor terminale [46] în care se determină valorile de ieșire la limitele intervalului. După aceea, se trasează o linie dreaptă care unește cele două puncte pentru care se afirmă că eroarea de neliniaritate este cea mai mică [46].

4.3.7 Calibrare

O remarcă interesantă se referă la ideea că un senzor poate fi realizat cu precizie într-un domeniu de mare interes, nu în orice gamă, scăzând astfel efectele erorii de neliniaritate. Acest lucru se întâmplă datorită caracteristicii de calibrare a senzorului.

Calibrarea este o metodă de îmbunătățire a performanței senzorului prin eliminarea erorilor structurale constatate la ieșirile senzorilor și este necesară mai ales atunci când abaterile de la valorile dorite ale componentelor sunt mai mari decât cele așteptate pentru întregul sistem [50]. Calibrarea se face numai pentru valorile pentru care avem o referință, dar funcția de transfer invers obținută poate fi utilizată pentru întreaga gamă de stimuli de intrare [36].

Ca o concluzie, calibrarea constă în găsirea coeficienților funcției de transfer invers pentru a obține o funcție care poate fi utilizată pentru orice stimul cu o precizie maximă posibilă.

4.3.8 Eroare de reproductibilitate

Să presupunem că, în anumite condiții, senzorul oferă o valoare de ieșire. Dacă se reface cadrul de măsurare, obținând, în cazul ideal, aceleași condiții ca înainte, dar ieșirea livrată este diferită decât în situația precedentă, atunci apare o eroare de reproductibilitate [46]. Expresia sa matematică este dată în Ecuația 4.5:

$$\delta_r = \frac{\Delta}{FS} \cdot 100 \quad (4.5)$$

unde δ reprezintă diferența dintre două valori de ieșire obținute după două etalonări, iar FS, scala completă de intrare [46].

4.3.9 Eroare de histerezis

Eroarea de histerezis este descrisă de următoarea situație. Fie un senzor de presiune pentru care se măsoară semnalul de ieșire aplicând o secvență de stimuli de presiune care crește în timp. Dacă se aplică aceeași secvență de stimuli de presiune, dar în ordine inversă, se va arăta că succesiunea valorilor de ieșire corespunzătoare ordinii inițiale nu corespunde cu cea inițială. Există mici diferențe între perechile de intrare stimul-ieșire semnal electric care arată prezența unei erori de histerezis [46, 51].

4.3.10 Format de ieșire

Când aplicăm un stimul de intrare, se obține la ieșire o anumită caracteristică, adică graficul y în raportul cu timpul. Este necesar să se dețină cunoștințe despre capacitățile senzorului de a produce un anumit semnal pentru a-l utiliza în aplicații adecvate și pentru a-l procesa în mod corespunzător în următorii pași ai procesului de detectare [46].

4.3.11 Banda „moartă”

Uneori, un senzor nu este sensibil pe un anumit domeniu menționat în fișa tehnică. Semnalul de ieșire tinde la o valoare apropiată de 0 și utilizatorul nu cunoaște valoarea reală a măsurătorii. Această zonă de stimuli de intrare este denumită bandă moartă [46].

4.3.12 Eroare dinamică

În practică, stimulii de intrare pot să nu fie constanți, deși această stare poate fi considerată cea mai apropiată de cazul ideal, când funcția de transfer și celelalte specificații pot fi luate ca atare. S-a dovedit că, în realitate, semnalul de intrare fluctuează considerabil, fapt ce determină un răspuns imperfect al senzorului. Eroarea dinamică, consecința situației menționate anterior, relevă caracterul non-instant al cuplării dintre intrare și ieșire. Această eroare determină caracteristica stimulului de intrare să se abată de la cea reală într-o manieră dependentă de timp [46, 52].

4.3.13 Fiabilitate

În ciuda faptului că este aproape neglijat de fișele tehnice, termenul de fiabilitate este foarte important și poate fi descris în moduri diferite, toate, împreună, cuprinzând toată semnificația sa.

În primul rând, este pur și simplu definit ca o capacitate a senzorului de a se comporta în conformitate cu destinația sa în anumite condiții și pentru o perioadă specificată. În al doilea rând, statistic vorbind, fiabilitatea poate fi dată de probabilitatea ca senzorul să nu întâmpine o defecțiune într-un interval de timp specificat sau în timpul mai multor utilizări atunci când funcționează în condiții normale, dar merge sub limitele sale de performanță [46]. Acesta

poate fi denumit timpul mediu dintre defecțiuni, determinat prin calcularea mediei intervalelor de timp dintre defecțiunile succesive [53].

Fiabilitatea este influențată de defectele de fabricație, cum ar fi lipirea slabă. Aceste tipuri de erori sunt detectate prin teste din fabrică, astfel încât dispozitivele care întâmpină astfel de imperfecțiuni sunt excluse de la vânzare [54].

Există alți doi factori care determină gradul de fiabilitate și care nu pot fi eliminați, punând în pericol dispozitivul și sistemul care îl utilizează: defectele aleatorii, care pot apărea oricând în timpul funcționării sensorului, și degradarea care apare atunci când dispozitivul ajunge la sfârșitul funcționării sale. Dacă primul factor este mai puțin controlabil, cel de-al doilea poate fi sau nu influențat de operațiunile de întreținere [54, 55].

4.3.14 Alarmerle fals-pozitive sau fals-negative

Fiabilitatea sistemelor realizate cu ajutorul senzorilor este dependentă de sensibilitatea senzorilor, de acuratețea lor și de condițiile de mediu. În funcție de modul în care senzorii sunt aleși și de modul în care se operează cu aceștia, evenimentele sesizate de senzori se pot constitui în ceea ce literatura denumește alarme fals-pozitive și alarme fals-negative [36].

Alarmerle fals-pozitive sunt acele cazuri în care un senzor este activat, deși nu există acel stimul pe care utilizatorul îl ia în considerare. De exemplu, un sistem simplu, ce urmărește detecția unei persoane, realizat cu senzori de mișcare poate fi oricând activat de trecerea unui animal de casă, deși s-a dorit ca acesta să detecteze doar oameni [36, 56].

Alarmerle fals-negative se produc atunci când, deși stimulul la care este sensibil senzorul este prezent, acesta nu poate detecta prezența lui. Ambele tipuri de alarme sunt foarte dăunătoare sistemelor (detecție, contorizare, identificare, medicale etc.) și utilizatorilor, întrucât scad încrederea în rezultatele obținute. Ele pot fi evitate fie prin subsisteme de verificare realizate cu ajutorul altor senzori, fie prin luarea unor măsuri specifice scopului pentru care au fost concepute respectivele sisteme [36, 57].

Existând marele avantaj al diversității senzorilor, prin includerea diferitelor tipuri într-un sistem, se pot anula aspectele negative ale unui tip de senzor cu ajutorul celorlalți senzori existenți. În astfel de echipamente, este necesar, deci, să se aplice principiul interacțiunii [37, 58].

4.4 Principiile de funcționare a senzorilor celor mai uzuali

După cum s-a arătat în secțiunea precedentă, senzorii sunt împărțiți în mai multe categorii în funcție de:

- numărul de conversii necesare pentru obținerea semnalului de ieșire dorit,
- capacitatea de a genera un semnal de ieșire fără prezența unui semnal de excitație,
- tipul semnalului de ieșire [37].

Pentru a stabili principiile de funcționare ale senzorilor, se iau în considerare câteva remarci importante. Pe de o parte, descrierea modului de funcționare a senzorilor trebuie realizată ținând cont de stimulul din mediu care reprezintă semnalul de intrare. Prin urmare, clasificarea senzorilor făcută până acum nu este suficientă și vor fi oferite unele completări în paragrafele următoare. Pe de altă parte, deoarece nu toate tipurile de senzori pot fi abordate în cadrul acestei lucrări, ne vom limita doar la tratarea senzorilor celor mai utilizați, cum sunt senzorii de mișcare, utilizați pentru detectarea mișcării și ocupării spațiului.

Următorul subcapitol prezintă câteva aspecte generale privind senzorii de mișcare, fiind urmat de secțiuni care prezintă fiecare tip de senzor.

4.4.1 Senzori de mișcare. Generalități

În prezent, există multe tipuri de aplicații de securitate și sănătate bazate pe activitatea audio, video și a senzorilor. Primele două abordări, audio și video, au dezavantajul invadării vieții personale și, de asemenea, necesarul de putere de calcul, ceea ce le face dificil de aplicat în cazuri de urgență.

Sistemele bazate pe senzori de mișcare nu sunt lipsite de neajunsuri. De la început, trebuie menționat că fezabilitatea unui proiect bazat pe senzori, în general, și pe senzori de mișcare, în special, este determinată atât de caracteristicile senzorilor, cum ar fi fiabilitatea, sensibilitatea la zgomot, acuratețea etc., cât și de condițiile de mediu.

În funcție de modul în care se aleg senzorii, apare o susceptibilitate la erori pe care le-am definit anterior ca alarme fals-pozitive sau fals-negative. Prima

expresie desemnează cazul în care o alarmă este declanșată, deși nu există un motiv real pentru aceasta. Alarmerle fals-negative apar ori de câte ori senzorul ar trebui să anunțe o situație așteptată, dar nu este capabil să o detecteze. Deși alarmele fals-pozitive nu pun în pericol utilizatorii, acestea sunt deranjante și scad fiabilitatea sistemului. În securitatea locuinței, de exemplu, aceste alarme fals-pozitive nu numai că deranjează, dar sunt exploatate de intrus [36, 46].

Marele avantaj al senzorilor de mișcare este diversitatea lor. Se pot include mai multe tipuri de senzori de mișcare într-un singur sistem pentru anularea aspectelor negative ale fiecărui senzor cu ajutorul celorlalți. Acest lucru se întâmplă datorită stimulilor diferiți aplicați fiecărui senzor care îi activează, obținând astfel echipamente care utilizează principiul interacțiunii [59].

Senzorii de mișcare pot fi dedicați aplicațiilor de interior sau exterior. Ei pot fi purtabili sau plasați în puncte cheie: uși, pereți, cuptor, frigider etc. În continuare, se vor trata senzorii nepurtabili pentru aplicații de interior [60].

Atunci când cineva intenționează să aleagă senzorii care vor face parte dintr-un sistem bazat pe senzori de mișcare, trebuie să ia în considerare următoarele aspecte:

- natura și ritmul activităților monitorizate,
- configurația fizică a locului monitorizat,
- comportamentul beneficiarului,
- abordarea dinamică a mediului [61, 62].

Tehnologiile diferite sunt prezentate în secțiunile următoare. Structura fiecărei descrieri include:

- principiul general,
- planul de poziționare eficientă,
- avantaje,
- dezavantaje.

4.4.2 Senzori pasivi în infraroșu (PIR)

Principiul de funcționare

Acest tip de senzori se bazează pe radiația în domeniul infraroșu (IR), care este o radiație electromagnetică din spectrul optic, dar invizibilă pentru ochiul uman.

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Fiind un senzor pasiv, senzorul pasiv în infraroșu (Passive InfraRed, PIR) nu emite energie, ci doar „ascultă” mediul pentru a captura modificările câmpului de energie pentru care a fost proiectat: energia termică. De aceea trebuie menționat că PIR nu măsoară energia primită, ci doar modificările bruște ale acesteia. Cu alte cuvinte, detectează zone calde (de exemplu, corpul uman) care sunt în contrast cu un fundal mai rece [63, 64].

Deși orice obiect cu o temperatură mai mare de 0 K (-273,15 °C) emite energie termică, senzorii PIR sunt proiectați să detecteze diferența dintre orice obiect din mediu (care a ajuns deja la temperatura mediului) și un corp viu a cărui temperatură variază între 28 și 40 °C [65].

În optoelectronică, Legea lui Planck arată cum se poate determina cantitatea de energie electromagnetică radiată de un corp negru aflat în echilibru termic (Ecuția 4.6).

$$\rho(\omega) = \frac{\hbar \cdot \omega^3}{\pi \cdot c_0^3 \cdot (e^{\hbar\omega/k_B T} - 1)} \quad (4.6)$$

$\rho(\omega)$ este, de asemenea, numită densitatea de energie radiantă [66].

În termodinamica clasică, a fost posibil să se demonstreze Legea Deplasării a lui Wien. Aceasta afirmă că lungimea de undă corespunzătoare maximumului densității de energie radiantă este invers proporțională cu temperatura absolută [66, 67]. Inițial, Wien nu a putut determina valoarea constantă, așa că a dedus Ecuția 4.7.

$$\lambda[m] = \frac{\Omega}{T[K]} \quad (4.7)$$

După derivarea $\rho(\omega)$ în funcție de ω și egalarea cu 0 (pentru determinarea punctelor extreme), s-a putut constata că Ω poate fi descrisă prin Ecuția 4.8.

$$\Omega = \frac{c_0 \cdot h}{4,9651 \cdot k_B} \quad (4.8)$$

Prin simpla introducere a constantelor bine cunoscute în Ecuția 4.8:

- viteza luminii în vid $c_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$
- constanta lui Planck $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- constanta lui Boltzmann $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

se obține că $\Omega = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ K} \cdot \text{m}$. Prin urmare, lungimea de undă (în micrometri) a unui corp negru având o anumită temperatură este dată prin Ecuția 4.9.

$$\lambda[\mu m] = \frac{2898}{T[K]} \quad (4.9)$$

Folosind Ecuația 4.9, se poate determina domeniul pentru lungimea de undă astfel încât să cuprindă domeniul de temperatură pentru un corp viu. Astfel, domeniul de temperatură exprimată în grade Celsius, 28-40 °C, corespunde domeniului de temperaturi Kelvin 301-314 K. Aceasta înseamnă o lungime de undă în intervalul 9,229-9,627 μm , care este, într-adevăr, în spectrul infraroșu (0,7 μm -1 mm) [66].

Fiecare senzor are un element de detecție care răspunde la un anumit tip de stimul. În cazul senzorilor pasivi în infraroșu, se disting trei tipuri de elemente de detecție:

- bolometru,
- termopilă,
- element piroelectric [36].

Bolometrul și termopila sunt rar utilizate pentru senzorii pasivi în infraroșu. De aceea, secțiunea va fi concentrată doar pe elementul piroelectric.

Elementul de detecție piroelectric se bazează pe fenomenul piroelectric care caracterizează un material a cărui polarizare se modifică atunci când temperatura sa se schimbă. În acest fel, se generează o tensiune temporară ca răspuns la încălzirea materialului, adică atunci când un flux de energie termică afectează acel material [68].

Elementele de detecție se bazează pe pelicule piroelectrice care acționează ca dielectrice, încărcându-se atunci când radiația infraroșie este incidentă asupra lor. Fiind conceput ca un condensator, elementul de detecție are două plăci: una dintre ele realizată din metal, iar cealaltă dintr-un material piroelectric. Când radiația în spectrul infraroșu ajunge pe materialul piroelectric, separă sarcinile și tensiunea pe condensatorul piroelectric se schimbă datorită modificării sarcinii care, la rândul său, este modificată de cantitatea de radiație incidentă [69].

Constanta mare de timp a sa duce la o rată de răspuns la modificările radiației infraroșii cuprinse între 0,2 și 1 Hz [69].

În general, un senzor PIR utilizează două astfel de elemente de detecție care sunt expuse succesiv la radiația infraroșie. Numai în această situație, senzorul produce o tensiune nenulă. Dacă ambele elemente de detecție sunt afectate simultan, fiecare dintre ele livrează aceeași tensiune, dar cum polaritatea unui element de detecție este pozitivă și a celuilalt negativă, aceste tensiuni se anulează reciproc. Prin urmare, senzorul nu produce nicio tensiune [70, 71].

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Elementele de detecție, prin ele însele, nu au eficiență și acest lucru va fi demonstrat în paragrafele următoare. Trebuie precizat că buna funcționare a senzorilor pasivi în infraroșu este condiționată de sistemele optice și de reflexie și, implicit, de acuratețea focalizării radiației termice pe detector.

Prin urmare, senzorii PIR pot utiliza una dintre cele două metode:

- focalizare prin reflexie,
- focalizare prin lentilă [71].

Când se utilizează reflexia pentru focalizarea radiației, se folosește o oglindă concavă, iar elementul de detecție trebuie plasat în focarul sistemului optic. Deoarece acest sistem nu se ocupă de împărțirea suprafeței de interes în zone poligonale, dar are avantajul detectării la distanță mare, este utilizat mai mult pentru aplicații de exterior [71].

Senzorul PIR poate fi echipat cu lentile care sunt destinate să focalizeze radiația infraroșie pe materialul piroelectric și să miște rapid fasciculele de infraroșu către elementul de detecție. Focalizarea prin lentilă nu prezintă o focalizare a radiației infraroșii la fel de eficientă ca reflexia prin oglindă, dar dacă se utilizează lentile Fresnel (vezi Figura 4.4), se obține o modificare foarte simplă a configurației zonelor poligonale [71].

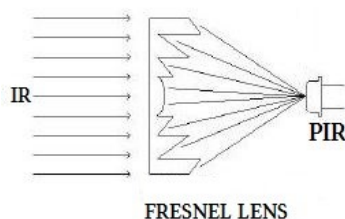


Figura 4.4: Radiația infraroșie focalizată de lentila Fresnel și direcționată către elementul de detecție [72].

O lentilă Fresnel este realizată prin intermediul unei pelicule subțiri de plastic transparent la radiația IR și există o serie de cercuri concentrice gravate pe ea. Gravarea reprezintă o aproximare a hologramei zonelor poligonale realizate de dispozitiv. Altfel spus, lentila nu poate vizualiza suprafața în mod continuu, ci cu o multitudine de fascicule sau conuri înguste și discrete. Lentila acoperă elementele de detecție, iar al doilea scop al acesteia este de a filtra radiația infraroșie [46, 73, 74]. În acest fel, nu întregul spectru IR este considerat, iar senzorul este cel mai sensibil la radiația corpului uman a cărei lungime de undă, după cum s-a menționat anterior, depășește $9 \mu\text{m}$.

Fără această lentilă, când un corp care emite radiație IR se apropie de senzor la o distanță de 1 - 1,5 m și se mișcă în fața senzorului, elementele de detecție vor fi expuse diferit, generând astfel tensiuni diferite și determinând senzorul să aibă o ieșire nenulă. În schimb, când corpul care emite radiație IR se mișcă la o distanță mult mai mare, senzorul percepe modelul de radiație infraroșie ca fiind amestecat și, în consecință, elementele de detecție vor fi aproape egal expuse. Cele două tensiuni vor fi egale, prin urmare, ieșirea senzorului va fi nulă, ceea ce se traduce prin lipsa detectării mișcării [46, 75].

În concluzie, senzorii PIR care utilizează lentila Fresnel sunt cei mai competitivi.

În continuare, se va analiza și nucleul senzorului PIR, care este mai bine evidențiat în Figura 4.5.

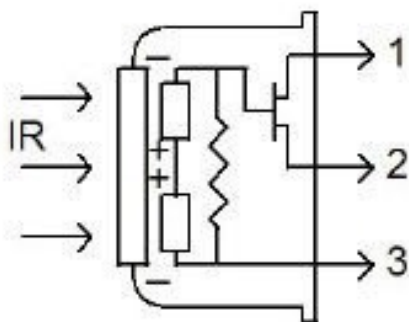


Figura 4.5: Structura internă a unui senzor PIR [72]

În această structură, suprafața care generează sarcina electrică atunci când este expusă la căldură, adică elementul de detecție, constă într-un material cristalin [72]. Este de interes să se măsoare tensiunea produsă ca urmare a expunerii la radiația IR folosind un tranzistor FET ale cărui drenă și sursă sunt conectate la pinii 1 și 2. Observăm că, pe drenă și sursă, tranzistorul FET emite curenții de drenă și sursă, în timp ce scopul nostru este de a obține o tensiune. Ca urmare, se conectează un rezistor în terminalul sursă pentru a face conversia curent-tensiune. Pentru a asigura punctul static de funcționare al tranzistorului, se conectează o sursă de alimentare a cărei tensiune trebuie să aibă valori între 3 și 15 V [72]. Această nouă configurație apare în Figura 4.6.

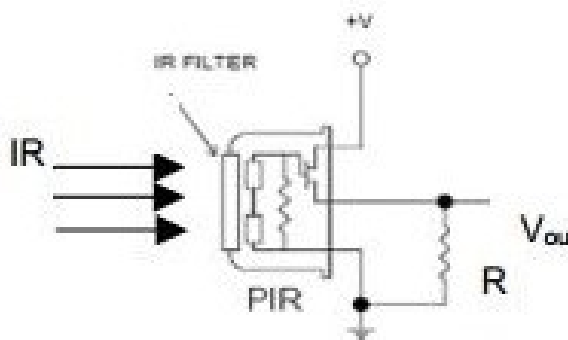


Figura 4.6: Structura internă a PIR cu tranzistor FET echipat cu rezistență de sursă și sursă de alimentare [76]

Condiționarea semnalului

Când se utilizează mai multe etape pentru procesarea semnalului, este necesar să se controleze semnalul analogic în așa fel încât să îndeplinească condițiile impuse de etapele următoare. Acest scop este atins prin utilizarea condiționării semnalului.

În ceea ce privește PIR și evoluția semnalului său, se afirmă necesitatea unui amplificator care are următoarele atribuții:

- creșterea rezoluției semnalului de intrare pentru etajul electronic următor;
- creșterea raportului semnal-zgomot (RSZ).

Este necesar un comparator format din două amplificatoare operaționale pentru a răspunde celor două tranziții ale sensorului, negativă și pozitivă [72]. Acestea fiind prezentate, se oferă o configurație extinsă care include, pe lângă dispozitivul de focalizare a radiației și filtrare prin lentila Fresnel și PIR, următoarele: rezistența de pull-down a sursei, sursa de alimentare, blocurile de amplificator și comparator (Figura 4.7).

Poziționarea sensorului

Caracteristica sensorului este esențială. Senzorii PIR de interior pot fi instalați fie orizontal, fie vertical, pe tavan sau pe pereți, având în vedere că în caracteristica lor de detecție trebuie să fie cuprinse toate zonele importante [71].

Dacă persoanele se deplasează foarte încet sau dacă nu depășesc zonele poligonale create de lentila Fresnel, sensorul nu poate detecta mișcarea lor. Mai mult, dacă se deplasează către sensor, se produce același efect: circuitul diferențial detectează doar o mică modificare a temperaturii și dispozitivul

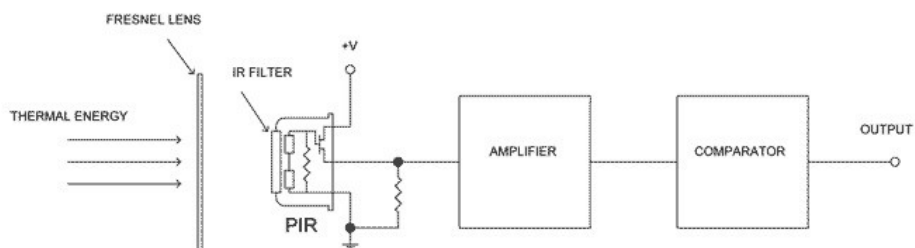


Figura 4.7: Configurația PIR incluzând lentila Fresnel pentru filtrarea și focalizarea radiației. [76]

nu percepe nicio activitate [71]. Persoana trebuie să treacă prin fața senzorului într-o direcție orizontală atunci când ambele elemente sensibile sunt pe un plan orizontal pentru a activa secvențial elementele de detecție. Senzorul trebuie poziționat astfel încât în zona în care caracteristica sa are o probabilitate minimă de detecție, persoana să nu desfășoare nicio activitate. În Figura 4.8 avem un exemplu care arată o posibilă caracteristică.

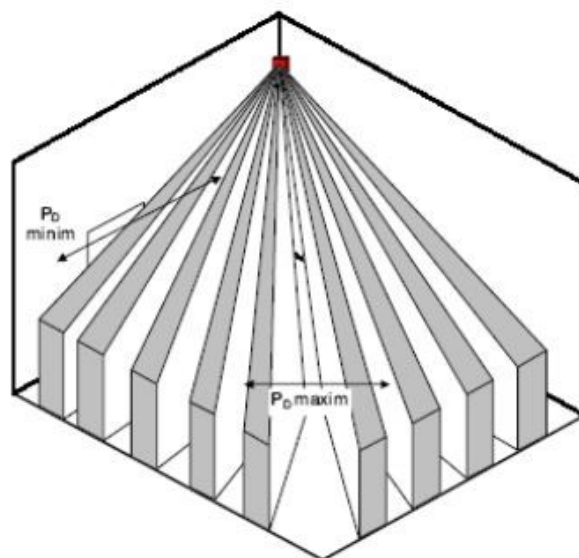


Figura 4.8: Funcția de probabilitate a detecției PIR în funcție de direcția de deplasare [71].

Există o altă modalitate de a sublinia capacitatea de detecție a PIR în funcție de distanța față de obiect și direcția mișcării. Aceasta este prezentată în Figura 4.9.

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

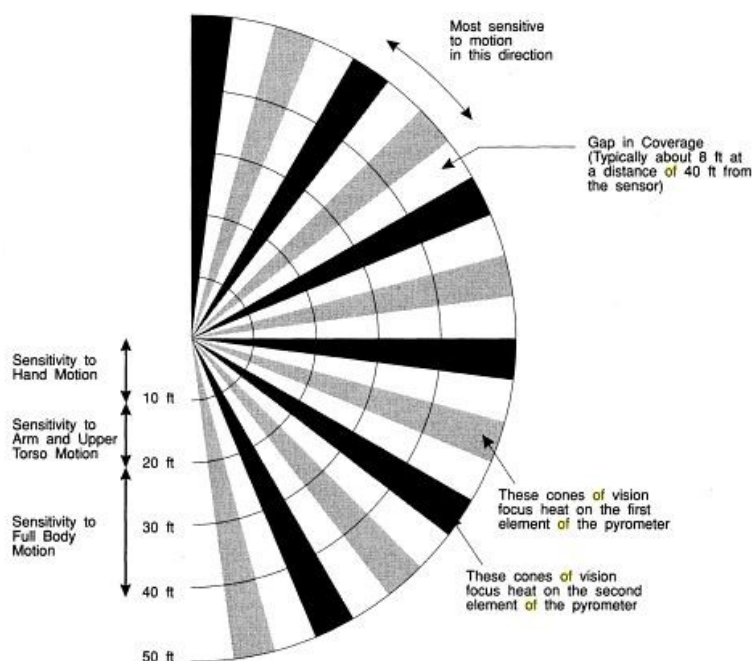


Figura 4.9: Sensibilitatea PIR. [77]

Avantaje

Senzorii PIR sunt utilizați pe scară largă, deoarece sunt foarte ieftini în comparație cu alți senzori de mișcare. Nu necesită circuite complexe, așa că sunt proiectați și fabricați simplu. Pe lângă acest beneficiu economic, există și un alt avantaj tehnologic important al acestor dispozitive. Elementul esențial al senzorilor PIR, caracteristica de detecție, poate fi modificat ușor prin schimbarea lentilei Fresnel. Se pot obține diferite tipuri de caracteristici utile, cum ar fi caracteristici de tip cortină sau caracteristici fragmentate [69, 71, 78, 79].

Dezavantaje

Senzorii PIR pot fi afectați de schimbările naturale, dar bruște ale temperaturii, care sunt provocate de sistemele de încălzire, curenți de aer, radiația solară și animale. În ceea ce privește echipamentele de securitate, ele pot fi ușor păcălite dacă intrusul atinge aceeași temperatură cu cea a mediului. Acest lucru se întâmplă prin creșterea temperaturii în acel mediu.

În ceea ce privește rețelele de senzori, se pot întâmpina alarme false dacă, din nou, contrastul dintre fundalul rece și corpul uman cald nu mai este perceptibil. De asemenea, acest tip de alarme false poate fi declanșat de animale.

Senzorii pasivi în infraroșu nu sunt capabili să cuantifice mișcarea sau

prezența, ci oferă doar o evaluare calitativă a ocupării. Acesta este motivul pentru care nu pot fi utilizați pentru a măsura cu exactitate distanțele sau vitezele [69, 80].

Dacă o persoană stă nemișcată în fața unui astfel de senzor, senzorul nu este capabil să detecteze prezența. Acest lucru se întâmplă deoarece elementul său de detecție este un condensator și se știe că pentru orice astfel de element reactiv nu există un răspuns în curent continuu. În cazul senzorului PIR, componenta de curent continuu corespunde lipsei mișcării [69].

Aplicații ale senzorilor PIR

Senzorii PIR au fost utilizați pentru măsurarea semnalelor termice într-un mediu de casă inteligentă, în scopul detectării prezenței umane [81]. Senzorul PIR este unul omniprezent, destinat detectării prezenței umane și extragerii diverselor informații referitoare la această prezență în mediul specific.

O altă aplicație a senzorului PIR a utilizat o rețea de tip mesh formată din acest tip de senzori, folosită într-un sistem conceput pentru urmărirea persoanelor, beneficiind de costul redus și dimensiunile sale mici. Cercetătorii au investigat dispunerea matricei de senzori PIR și au estimat intervalul corespunzător de detecție. Pentru a obține semnalul asociat evenimentului, aceștia au conceput o metodă specială de procesare a semnalului PIR, atât simplă, cât și eficientă. Mai mult, cercetătorii au propus o metodă nouă de localizare, constând în detectarea bisectoarelor unghiurilor senzorilor PIR și fuziunea datelor. Acuratețea metodei propuse pentru recunoașterea, localizarea și urmărirea persoanelor a fost confirmată atât prin experimente, cât și prin simulări [82].

Alte lucrări s-au concentrat pe detectarea direcției de mișcare folosind senzori PIR. Un grup de cercetători a conceput o metodă pentru detectarea direcției relative a mișcării unei persoane. În comparație cu metodele clasice, care determină mișcarea unei persoane sau a unui obiect prin alternarea polarizării efective a elementelor de detecție din senzorul PIR, metoda propusă a folosit două perechi de senzori PIR, cu o aliniere ortogonală a elementelor de detecție. Cercetătorii au colectat informațiile de la șase subiecți, fiecare dintre ei mergând în opt direcții diferite (distribuite uniform), folosind o unitate de colectare a datelor compusă din patru senzori PIR cu elemente de detecție duale și lentile modificate. Rezultatele experimentale s-au dovedit promițătoare, reușind să atingă o recunoaștere corectă a direcției de mișcare în mai mult de 98% din cazuri, conform datelor colectate de la doi senzori PIR cu lentile modificate, aliniați ortogonal. Mai mult, chiar și atunci când a fost utilizat doar setul cu caracteristici reduse, constând doar în trei valori de vârf pentru fiecare senzor PIR, s-a obținut o acuratețe de detecție de 89-95% [83].

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Cercetătorii din același grup au efectuat și un alt experiment pentru monitorizarea persoanelor care trec printr-un coridor. În acest scop, au plasat în coridor trei module bazate pe senzori PIR, unul pe tavan și celelalte două pe pereții opuși. Fiecare modul a constat din patru senzori PIR, așa cum este prezentat în Figura 4.10.

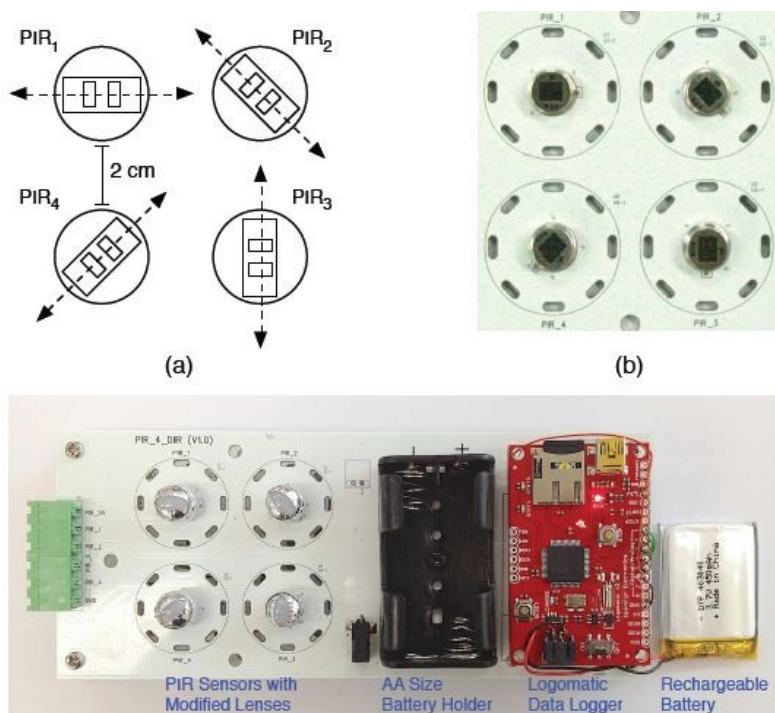


Figura 4.10: (a) Diagrama orientării celor patru senzori PIR; (b) Plasarea celor patru senzori PIR în fiecare dintre cele trei module; (c) Schema dispozitivului pentru detectarea mișcării umane [84]

Opt subiecți au participat la studiu, fiecare dintre ei mergând la trei niveluri de viteză diferite (rapid, moderat, lent), în două direcții (dus-întors) și la trei distanțe diferite (aproape de unul dintre senzorii de pe pereții opuși, aproape de celălalt și la o distanță la mijloc între ei), așa cum este prezentat în Figura 4.11.

Configurația experimentală este prezentată în Figura 4.12. S-au utilizat un set de date brute și un set de caracteristici reduse și fiecare sensor PIR a oferit informații despre durata trecerii. Din setul de date brute, colectat de la fiecare sensor PIR din cele trei module, s-a obținut o acuratețe mai mare de 92% pentru discernerea între subiecți, identificarea direcției și vitezei de mișcare și distanța față de sensor. Din setul de caracteristici reduse, acuratețea în determinarea aceluiași aspecte a fost mai mare de 94% [84].

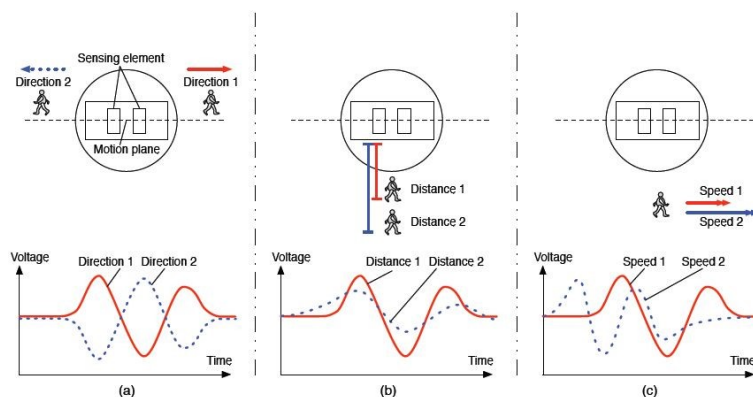


Figura 4.11: Trei scenarii diferite pentru detectarea mișcării persoanelor cu senzori PIR: (a) direcții diferite; (b) distanțe diferite; (c) niveluri diferite de viteză. Semnalul de ieșire este de asemenea reprezentat în toate cele trei cazuri [84]

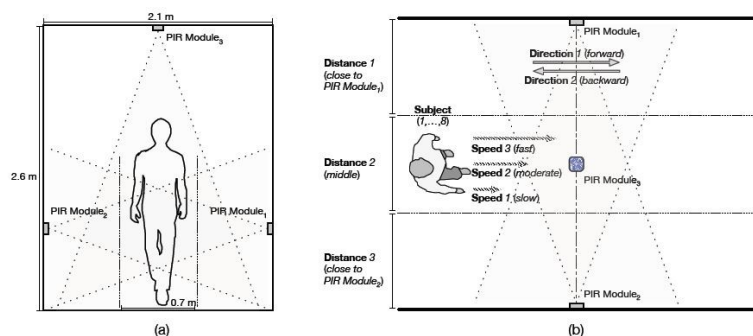


Figura 4.12: Setup-ul experimental care arată plasarea senzorilor PIR: (a) vedere din față; (b) vedere de sus [84]

Senzorii PIR au aplicații și în conceperea algoritmilor de detectare a căderilor. Pe baza mai multor senzori pasivi în infraroșu, se pot implementa sisteme de locuințe asistate inteligent pentru persoane în vârstă sau cu dizabilități. Au fost propuse noi metode pentru detectarea căderii unei persoane. Una dintre aceste metode a folosit doi senzori PIR într-o cameră, fiind propus un algoritm pentru detectarea evenimentelor de cădere [85].

Senzorii PIR au fost utilizați și în studiul detectării căderilor folosind transformarea complexă wavelet single-tree. Astfel, a fost propus un algoritm de detectare a căderii, folosind senzori PIR și senzori de vibrație într-un sistem de asistență la domiciliu (Ambient Assisted Living, AAL) cu costuri reduse, conceput pentru îmbunătățirea calității vieții persoanelor cu dizabilități și a persoanelor în vârstă pentru a le permite să ducă un stil de viață independent

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

asistat de senzori. Senzorii PIR au fost folosiți pentru a determina mișcarea acestor persoane în mediul în care trăiesc [86].

Aplicațiile senzorilor PIR includ, de asemenea, sisteme de supraveghere. Mai mulți senzori infraroșii piroelectrici au fost folosiți într-un astfel de sistem, destinat detectării prezenței intrușilor în diverse clădiri. Senzorii PIR au fost plasați pe tavan și au fost folosiți pentru codificarea semnalului ultrasonic al modulului sensorului ultrasonic. Această codificare a semnalului a fost folosită pentru a atenua problema interferenței prin crosstalk între senzori ultrasonici care au aceeași frecvență. Arhitectura este prezentată în Figura 4.13 [87].

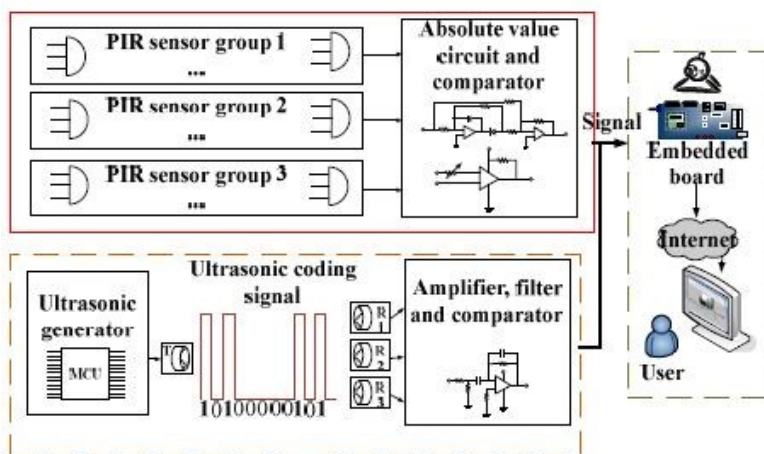


Figura 4.13: Arhitectura sistemului de supraveghere folosind senzori PIR pentru codificarea semnalului ultrasonic [87]

S-au făcut și încercări de a obține o plasare optimă a senzorilor PIR pentru detectarea mișcării persoanelor, așa cum este într-un articol în care, pentru această plasare optimă, a fost propus un algoritm bazat pe genetică. Acest algoritm a ajutat la îmbunătățirea performanței de localizare a senzorilor PIR prin optimizarea atât a amplasării lor, cât și a câmpului vizual (Field of View, FOV) modulată. Pentru a evalua capacitățile de localizare ale sensorului, au fost folosite atât criteriul erorii medii de localizare, cât și cel al erorii maxime de localizare. Algoritmul propus a fost testat și verificat prin simulări și experimente [88].

4.4.3 Senzori acustici

Principiul de funcționare

Mediul este capabil să se comprime și să se extindă cu anumite frecvențe, astfel făcând posibilă existența undelor sonore. Acestea sunt unde longitudinale, adică particulele mediului oscilează în direcția de propagare a undelor. Se poate observa utilizarea verbului „a oscila”, ceea ce subliniază că particulele nu se deplasează odată cu unda sonoră, deoarece poziția lor medie nu se schimbă în timp. Frecvența unei astfel de unde variază de la 20 Hz la 20 KHz [89].

Există o legătură între unda sonoră și vibrație: orice sunet este asociat cu o vibrație mecanică.

În această secțiune se va face referire la senzori care au ca stimul de intrare un semnal sonor, adică un sunet audibil, și care îl convertesc într-un semnal electric. Acești senzori sunt denumiți și microfoane, dar termenul este aplicat și pentru senzori ultra sau infrasonici. Microfoanele, de fapt, sunt traductoare de presiune pentru undele sonore care se propagă în aer sau în solide caracterizate printr-un spectru larg. Totuși, componentele sale au frecvențe mai mari decât câțiva Hz (în domeniul audibil). Microfoanele nu sunt concepute pentru a măsura presiunea constantă sau lent variabilă, așa cum fac senzorii de presiune specializați, dar trebuie să acopere un domeniu larg de frecvențe, la fel ca undele sonore [90].

Undele sonore sunt atât unde mecanice, cât și unde de presiune. Componenta de detecție a microfonului se numește element sau capsulă. În primul rând, sunetul, ca vibrație, este convertit în mișcare mecanică. De aceea, microfoanele au în structura lor o diafragmă mobilă. În al doilea rând, mișcarea diafragmei este convertită într-un semnal electric prin intermediul unui senzor de deplasare. Acesta poate include o carcasă, amortizoare pentru anularea zgomotului, reflectoare de focalizare, cum ar fi pentru microfoanele parabolice etc. [91, 92].

În această lucrare, focalizarea va fi pe microfoanele electretice.

La început, este necesară descrierea în câteva cuvinte a termenului „electret”, folosit pentru a numi materialul dielectric stabil care are o sarcină electrică statică cvasi-permanentă sau o polarizare bipolară încorporată. Proprietățile sale, datorită rezistenței ridicate a materialului, pot fi păstrate mulți ani.

Termenul a fost creat prin combinarea altor doi termeni care descriu principiul său: „electr” de la „electric” și „et”, terminația cuvântului „magnet”. Un electret produce câmpuri electrice interne și externe și este un dipol. Acesta este motivul pentru care poate fi considerat echivalentul electrostatic al unui

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

magnet permanent. Similar magnetilor care generează câmp magnetic, ei generează câmp electrostatic în jurul perimetrului lor [93].

Materialele electretice, piezoelectrice și piroelectrice sunt înrudite. Se știe că materialele piezoelectrice și piroelectrice sunt și ele electreți, cu caracteristici pronunțate, fie piezoelectrice, fie piroelectrice [46].

Merită menționat motivul pentru care se alege un astfel de material într-un microfon. Fiind un material încărcat electric cvasi-permanent, nu mai este necesar să se utilizeze o sursă de alimentare pentru polarizare. Prin urmare, microfonul electret se deosebește de alte microfoane deoarece nu are nevoie de o tensiune de polarizare continuă [94].

La sfârșitul acestei scurte descrieri, se vor menționa câteva exemple de materiale care au proprietăți electretice:

- polietilen tereftalat,
- fluoropolimeri,
- polipropilenă,
- cuarț,
- unele forme de dioxid de siliciu [95].

Microfonul electret este un traductor care constă în două elemente esențiale: diafragma sau membrana și placa de fundal. Diafragma este realizată din material electretic, de obicei un film subțire de polimer acoperit pe o parte cu metal [96]. Un spațiu de aer separă cele două componente, adică diafragma și placa de fundal [46], așa cum se poate vedea în Figura 4.14.

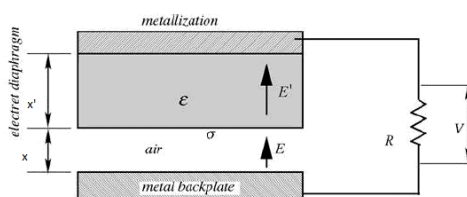


Figura 4.14: Structura generală a microfonului electret [46]

Există o altă modalitate de a construi un microfon electret: se plasează pelicula electret pe placa staționară și se utilizează un film subțire ca diafragmă mobilă [96]. În continuare, se va aborda primul design, cel din Figura 4.14.

Placa de fundal metalică și metalizarea superioară sunt conectate printr-un rezistor. Tensiunea pe acest rezistor poate fi amplificată și poate fi considerată tensiunea de ieșire.

S-a afirmat că electretul este un material încărcat electric cvasi-permanent, astfel suprafața sa are o densitate de sarcină constantă σ . Prin urmare, se consideră că acesta generează în spațiul de aer un câmp electric pe care îl notăm cu E .

Se presupune că atunci când nicio undă nu lovește diafragma, spațiul de aer are o grosime notată cu x . Când o undă sonoră acționează asupra diafragmei, grosimea spațiului de aer scade cu o diferență de Δx .

În cazul menționat, relația pentru calculul capacității este cea din Ecuația 4.10.

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad (4.10)$$

dar pentru că $d = \Delta x$ și $\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$, se obține Ecuația 4.11.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{\Delta x} \quad (4.11)$$

Densitatea de sarcină este descrisă de Ecuația 4.12.

$$\sigma = \frac{Q}{S} \quad (4.12)$$

De asemenea, tensiunea ca funcție de sarcină și capacitate este dată în Ecuația 4.13.

$$U = \frac{Q}{C} \quad (4.13)$$

Dacă se exprimă sarcina ca produs între densitatea de sarcină și suprafață și se înlocuiește alături de capacitate (Ecuația 4.11) în Ecuația 4.13, se obține Ecuația 4.14.

$$U = \frac{\sigma \cdot S}{\frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{\Delta x}} = \sigma \cdot \frac{\Delta x}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \quad (4.14)$$

Dacă senzorul are o capacitate C , tensiunea se va calcula pe baza Ecuației 4.15.

$$U = \frac{\sigma \cdot \Delta x}{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r} \cdot \frac{2\pi f RC}{\sqrt{1 + (2\pi f RC)^2}} \quad (4.15)$$

S-a notat cu f frecvența undelor sonore, iar expresia pentru frecvența de rezonanță va fi dată de Ecuația 4.16.

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{p_0}{x_0 \cdot M}}, \quad (3.11) \quad (4.16)$$

unde p_0 este presiunea atmosferică, x_0 este grosimea efectivă și M este masa membranei. Valorile acestei frecvențe trebuie să fie mult mai mari decât frecvența superioară a domeniului de funcționare pentru microfon [46].

Pentru a sublinia performanțele acestui microfon, se poate menționa că nu are nevoie de nicio polarizare continuă, în timp ce un microfon cu condensator cu sensibilitate și dimensiuni similare necesită mai mult de 100 V ca tensiune de polarizare. În plus, are și o tensiune mecanică scăzută. În acest fel, compresibilitatea spațiului de aer influențează forța de restaurare. Diafragma sa poate fi realizată din Teflon FEP, având posibilitatea de a fi încărcată permanent printr-un fascicul de electroni pentru a avea proprietăți electretice [97,98].

Microfoanele electret pot funcționa și în domeniul infra și ultrasunetelor, dar necesită unele modificări, după cum urmează:

- în gama infrasonică, placa de fundal trebuie să aibă o gaură miniaturală pentru egalizarea presiunii;
- în gama ultrasunetelor, microfonul necesită o polarizare suplimentară (nu doar polarizarea sa proprie), la fel ca în cazul microfonului cu condensator [99, 100].

Un microfon electret se caracterizează prin impedanță mare. De aceea, interfața electronică utilizată cu astfel de microfoane trebuie să aibă o impedanță de intrare mare [36].

Poziționarea senzorului

Senzorul acustic trebuie poziționat astfel încât nivelul zgomotului să fie suficient de scăzut pentru a fi distins de semnalul util. Deoarece fiecare senzor acustic este capabil să detecteze corect până la o distanță specifică de la care RSZ recepționat scade dramatic și deoarece în astfel de proiecte sursele nu sunt staționare, soluția constă în utilizarea mai multor senzori acustici, fiecare plasat în puncte cheie, adică cât mai aproape posibil de sursele de sunet de interes [36].

Avantaje

Microfoanele electret sunt ieftine și nu necesită o sursă de alimentare externă. De asemenea, sunt disponibile într-o varietate largă de dimensiuni și configurații. Microfoanele electretice prezintă o directivitate satisfăcătoare [36, 101].

Un alt avantaj provine din lipsa unei polarizări spontane în aceste materiale, ceea ce le face să prezinte pierderi de histerezis foarte mici sau chiar zero, chiar și atunci când frecvențele de funcționare sunt foarte mari [99, 102].

Dezavantaje

Semnalul de ieșire al microfonului electretic poate fi instabil din cauza zgomotului de fundal.

Un alt dezavantaj este lipsa stabilității la temperatură. Uneori, pentru condiții optime de funcționare, temperatura nu trebuie să aibă variații care depășesc aproximativ 10°C. Chiar dacă aceasta poate apărea ca o restricție foarte importantă, nu este totuși un mare dezavantaj, deoarece aceste dispozitive funcționează de obicei la frecvențe mari și câmpuri de acționare cu valori mici, care sunt relativ ușor de stabilizat din punctul de vedere al temperaturii [36, 101].

Aplicații ale senzorilor acustici

Sistemele bazate pe senzorii acustici au ca avantaje un hardware și o infrastructură mai simplă și mai ieftină comparativ cu metodele bazate pe viziune computerizată. Aceste sisteme constau doar din setul de senzori acustici și un PC/server care ia decizia dacă a avut loc un eveniment, pe baza anumitor condiții și praguri impuse [103].

Una dintre metodele propuse pentru detectarea căderii unei persoane cu ajutorul senzorilor acustici a folosit intensitatea și înălțimea sunetului ca și criterii pentru recunoașterea căderii. Luând în considerare statisticile efectuate în Statele Unite, unde, din numărul total de persoane în vârstă, mai mult de o treime cad cel puțin o dată pe an, oamenii de știință au dezvoltat un sistem acustic de detectare a căderilor (FADE) pentru a aborda această problemă. Sistemul propus oferă avantajul de a fi complet neintruziv, comparativ cu sistemele de detectare a căderilor portabile (de exemplu, accelerometre sau giroscopae) pe care persoanele monitorizate trebuie să le poarte tot timpul. Metoda folosită în acest caz pentru reducerea ratei alarmelor false a constat în utilizarea unei matrice de senzori acustici pentru a obține informații despre înălțimea sursei de sunet. Criteriul aplicat pentru a distinge între o alarmă reală și una falsă a fost pragul de 2 picioare (0,66 m). Dacă înălțimea sursei de sunet era mai mare decât acest prag, sistemul considera că este o alarmă falsă. Sistemul a fost testat pe un set de 23 de căderi, efectuate de un cascador care a fost antrenat să cadă exact ca o persoană în vârstă. Rezultatele obținute în studiu au fost o reducere a ratei orare a alarmelor false de la 32 la 5, la o rată de detectare a căderilor de 100% [104].

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Detectarea căderilor a fost studiată și utilizând matrice circulare de microfoane. Oamenii de știință au folosit o matrice circulară de 8 microfoane pentru detectarea căderilor, util în special în medii dificile, cum ar fi cele zgomotoase și reverberante. Arhitectura sistemului de detectare propus este prezentată în Figura 4.15.

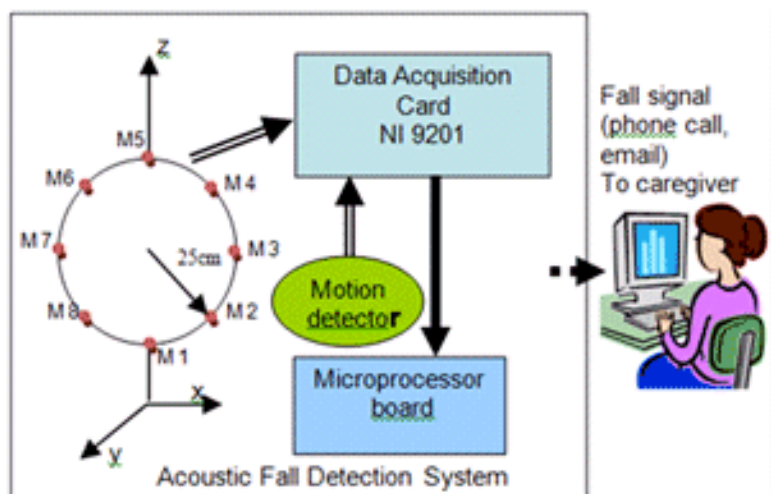


Figura 4.15: Arhitectura sistemului de detectare a căderilor cu o matrice circulară de 8 microfoane [104].

În această arhitectură, cele 8 microfoane au fost plasate într-un model circular cu o rază de 25 cm. Microfoanele au fost agățate la aproximativ 1,5 m deasupra podelei. Sunetul a fost înregistrat cu ajutorul unei plăci de achiziție de date de la National Instruments, NI 9201, cu intrări analogice pe 8 canale. Localizarea și clasificarea sunetului înregistrat au fost realizate folosind Matlab. Experimentele au constatat în înregistrarea unui set de antrenare de 25 de căderi și 50 de alarme false (căderea de cărți cu coperți moi și dure pe podea; vorbire; tastare; sunet de telefon), urmate de aplicarea algoritmului pe un set de test de 30 de căderi și 120 de alarme false. Durata fiecărui eveniment a fost de 0,5 s și frecvența de eșantionare a fost de 20 000 Hz. Rezultatele au confirmat fiabilitatea și robustețea metodei bazate pe matricea circulară pentru estimarea locației sunetului și au oferit, de asemenea, o discriminare corectă între căderile reale și sunetele non-căderi [104].

Alte soluții au fost, de asemenea, propuse pentru detectarea fiabilă a căderilor persoanelor în vârstă, într-o încercare de a reduce la minimum timpul de salvare. Un astfel de sistem se bazează pe detectarea prin intermediul vibrațiilor podelei și al senzorilor acustici. Autorii au dezvoltat un algoritm de

recunoaștere a tiparelor care este capabil să raporteze cu acuratețe dacă a fost căderea unei persoane sau doar a unui anumit obiect. Rezultatele obținute de acest sistem au fost o detectare a evenimentelor reale de cădere cu o sensibilitate de 95% și o specificitate de 95% [105]. Tot prin utilizarea detectării vibrațiilor podelei și a senzorilor acustici, a fost propusă o altă metodă non-purtabilă pentru detectarea automată a căderilor persoanelor în vârstă, concepută având în vedere cazurile critice în care persoana este inconștientă sau sub stres sever. Pentru a discrimina cu acuratețe evenimentele de cădere umană, a fost dezvoltat un algoritm de procesare a semnalului și de recunoaștere a tiparelor. Căderile au fost simulate folosind o păpușă care imită omul. Rezultatele sistemului au fost o detectare a căderilor păpușii care imită omul cu o sensibilitate de 97,5% și o specificitate de 98,6% [106].

4.4.4 Senzori ultrasonici

Principiul de funcționare

În prezent, producerea sunetului este un proces foarte bine cunoscut. Modul în care o vibrație este asociată cu un sunet este ușor de analizat și înțeles, așa cum s-a arătat în secțiunea precedentă. Când cineva se gândește la conversia unui semnal audio într-un semnal electric, soluția este un microfon. Dacă se dorește operația inversă, se folosește un difuzor. Acestea folosesc principii de funcționare similare și s-ar putea crede că operațiile lor ar putea fi interschimbabile. S-ar putea proba, astfel fiind posibil să se obțină dintr-un difuzor un microfon, dar unul care nu este sensibil și are o calitate scăzută [69]. Un microfon poate fi folosit și drept căști, dar nu poate gestiona cantitatea de putere necesară [69].

Prin contrast, detectoarele bazate pe unde ultrasonice pot funcționa în ambele direcții fără nicio restricție. Când se transmit sau se primesc unde ultrasonice în lichide sau solide, există o mică diferență între emițător și receptor. Situația se schimbă atunci când se folosesc senzori echipați cu diafragme și care emit și recepționează în aer. Această particularitate îi face mai specializați [69].

Orice undă mecanică este produsă atunci când o suprafață se mișcă. Unda ultrasonică nu face excepție, deoarece necesită de asemenea ca mediul să se comprime și să se extindă [46]. Prin urmare, este obligatoriu să avem un dispozitiv care să convertească direct energia electrică într-una mecanică pentru a produce mișcarea suprafeței. O altă cerință este ca mișcarea să se producă în domeniul ultrasonic, adică frecvența undei trebuie să fie mai mare de

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

20 kHz. Privind la proprietățile și aplicațiile materialelor, vedem că aceasta este caracteristica unui material piezoelectric care prezintă și efectul invers al piezoelectricității. Astfel de materiale sunt: titanatul de bariu, titanatul de plumb, zirconatul de plumb (PbZrO_3), cuarțul, fosfatul dihidrogenat de amoniu ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) etc. [107–109]

Beneficiind de efectul piezoelectric invers, senzorul produce impulsuri de unde ultrasonice care pot fi trimise către un corp prin intermediul emițătorului său. Când ajunge la suprafața corpului, unda se reflectă și se întoarce la receptorul senzorului ultrasonic. Unda recepționată este convertită într-o tensiune. Pe baza diferențelor dintre un senzor activ și unul pasiv, se poate concluziona că senzorii ultrasonici sunt senzori activi datorită proprietății lor de a se comporta atât ca senzor cât și ca actuator [36]. Se consideră un senzor care folosește un element sensibil fabricat dintr-un material ceramic piezoelectric și o diafragmă metalică. Figura 4.16 pune în evidență funcționarea duală a senzorului.

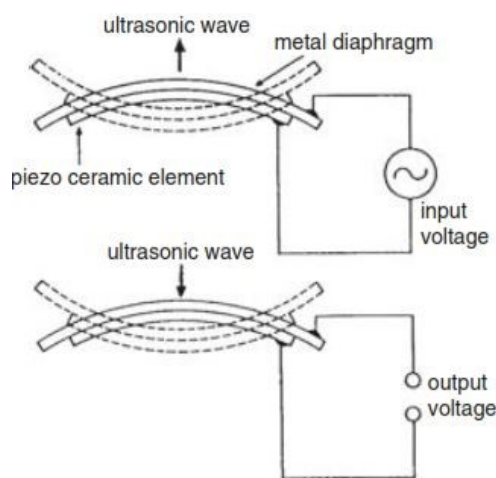


Figura 4.16: Senzor ultrasonic piezoelectric [46].

Tensiunea de intrare este capabilă să deformeze elementul piezoceramic și acesta răspunde la această deformare prin generarea de unde ultrasonice datorită efectului piezoelectric invers. Aceasta este funcția de emițător a senzorului. Undele ultrasonice care vin pe elementul piezoceramic, datorită efectului direct al piezoelectricității, determină o tensiune de ieșire, demonstrând astfel că senzorul are și un mod de operare ca receptor [36, 110].

Moduri de operare ale senzorilor ultrasonici

S-a menționat anterior că senzorul poate acționa atât ca emițător, cât și ca receptor. Aceasta nu este singura funcționalitate a unui senzor ultrasonic. Poate funcționa în două moduri: mod opus și mod difuz (eco) [111].

Modul opus implică existența a doi senzori, un emițător și un receptor. Cel care transmite un impuls ultrasonic este montat în fața celui care primește ultrasunetele, așa cum se poate vedea în Figura 4.17.

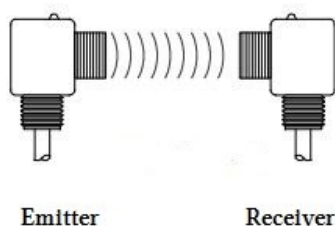


Figura 4.17: Modul de operare opus al unui senzor ultrasonic [112]

Un senzor funcționează în modul difuz când îndeplinește funcția de emițător și receptor. Astfel, senzorul emite unda sonoră și apoi ascultă ecoul care se reflectă de un obiect. Acest caz a fost descris în detaliu înainte, iar Figura 4.18 este relevantă pentru această situație [112].

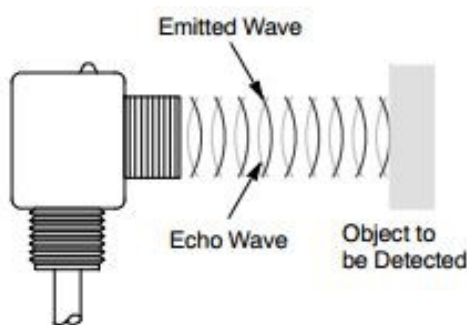


Figura 4.18: Modul de operare în difuzie al unui senzor ultrasonic [112]

Un parametru semnificativ al unui senzor ultrasonic este frecvența de operare, care este de obicei în jur de 40 kHz. Fiecare senzor ultrasonic are două circuite de oscilație. Unul dintre ele este format din elementul piezoceramic

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

care are o frecvență de rezonanță unde sensibilitatea și eficiența sa sunt maxime. Este responsabil de controlul timpului de emisie al pulsului ultrasonic [113]. Celălalt circuit de oscilație determină frecvența de operare a senzorului ultrasonic și este numit și oscilator de comandă. Senzorul tinde către o funcționare optimă atunci când frecvențele celor două oscilatoare sunt cât mai apropiate (în mod ideal, sunt egale) [46].

Există alte două moduri de operare atunci când un singur senzor ultrasonic este implicat. Când transmisia pulsurilor trebuie să fie continuă, se preferă utilizarea a două elemente piezoceramice, unul pentru emisie și celălalt pentru recepție. Dacă nu este cazul, se folosește același element piezoelectric, iar modul de operare este numit mod puls [114].

Un senzor ultrasonic include, de asemenea, un circuit de comandă prin care se aplică tensiune la cele două terminale negative și pozitive, un amplificator pentru semnalul ultrasonic, un circuit de detecție care vizează semnalul ultrasonic recepționat, un comparator care furnizează ieșirea senzorului și un circuit de măsurare a timpului care măsoară timpul necesar pentru ca unda să lovească obiectul, să se reflecte și să se întoarcă la receptor [115, 116].

Există doi parametri de mare interes pentru utilizator: dispersia fascicului și unghiul țintă [69].

Dispersia fascicului

Dispersia fascicului, conform [117], este unghiul de divergență față de axa centrală a unui fascicul electromagnetic sau acustic pe măsură ce acesta călătorește printr-un material. Se mai numește și difracție ultrasonică sau, eronat, divergența fascicului. Când se consideră zona câmpului îndepărtat, termenul „dispersia fascicului” se referă la întregul unghi de la o parte la alta a lobilor principali ai fascicului ultrasonic, care este, de fapt, de două ori divergența fascicului definită ca o măsură a unghiului de la o parte a fascicului ultrasonic până la axa centrală a fascicului în câmpul îndepărtat [118].

Propagarea undelor într-un anumit mediu are loc datorită transferului de energie de la o particulă la alta. Particulele mediului vibrează, dar nu întotdeauna transferă toată energia în direcția în care călătorește unda. În consecință, o parte din energie va fi transferată la un unghi, cauzând dispersia fascicului [118].

Dispersia fascicului depinde de diametrul și frecvența senzorului: crește pe măsură ce frecvența și diametrul scad. Trebuie luată în considerare atunci când se alege un senzor pentru anumite aplicații, deoarece are influență asupra amplitudinii reflexiilor (câmpurile sonore devin mai puțin concentrate). Mai mult, deoarece apar reflexiile datorate marginilor laterale ale obiectului, dispersia fascicului creează, de asemenea, dificultăți în interpretarea semna-

lelor [119].

Unghiul țintă

Unghiul țintă este o măsură a cantității maxime cu care ținta poate fi înclinată fără a ieși din zona de detecție.

Materialul țintă

Orice material care poate reflecta unda ultrasonică poate fi un material țintă. Aici includem chiar și materialele poroase sau lichidele.

Sensibilitatea

Sensibilitatea senzorului ultrasonic poate fi reprezentată folosind o diagramă, ca cea din Figura 4.19. Datorită faptului că undele senzorului ultrasonic acoperă întreaga suprafață într-un mod continuu, fără goluri în model, senzorul se dovedește a fi mai sensibil la mișcare. Din figură, observăm că mișcarea mâinii poate fi detectată de la o distanță care depășește 20 de picioare (în SI, 6.096 m). Mișcarea brațului și a trunchiului superior poate fi detectată de la mai mult de 25 de picioare (7,62 m) și mișcarea întregului corp poate fi detectată de la peste 1,2 m [77].

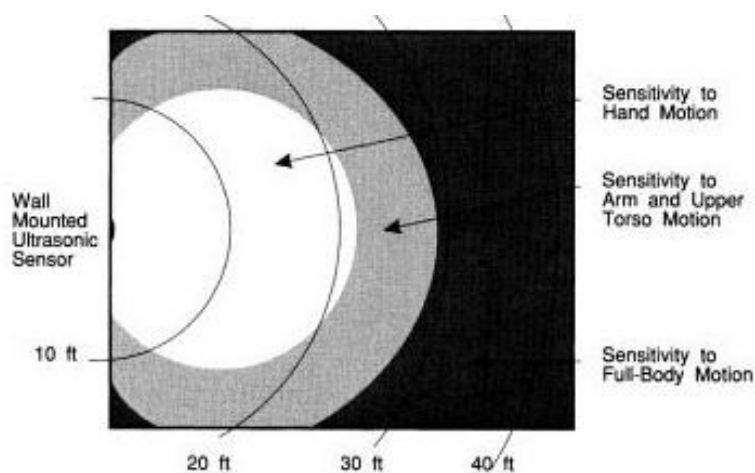


Figura 4.19: Model tipic de sensibilitate pentru un senzor ultrasonic montat pe perete [77]

Eficiența reflecției

Eficiența reflecției depinde de forma și materialul obiectului. Astfel, obiectele care pot fi detectate sunt împărțite în trei categorii principale:

1. Obiecte plane: lichid, cutie, foaie de plastic, hârtie, sticlă etc. Când undele ultrasonice lovesc suprafața lor, o mare parte din undele reflectate este

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

returnată. Din păcate, gradientul unui obiect sensibil este un factor care afectează foarte mult undele.

2. Obiecte cilindrice: doză, sticlă, corp uman etc.

3. Obiecte granulare sau agregate: minereuri, rocă, cărbune, cocs, peleți de plastic etc. În cazul lor, deși există reflecție difuză și undele reflectate sunt neuniforme, undele sunt mai puțin afectate de gradientul unui obiect sensibil [120].

Calculul distanței

Senzorul ultrasonic folosește proprietățile fizice și efectele ultrasunetelor [121]. Deoarece au diverse aplicații, inclusiv detectarea mișcării și măsurarea distanței, suntem interesați să calculăm aceste distanțe și să le interpretăm sau să le folosim în procesarea ulterioară a datelor.

Viteza ultrasunetelor depinde de mediul și de temperatura mediului, urmând Ecuația 4.17.

$$v = 340 + 0,6 \cdot (T [^{\circ}\text{C}] - 15) \text{ m/s} \quad (4.17)$$

Dacă considerăm o temperatură de 25 °C, obținem o valoare de 346 m/s pentru undele ultrasonice în aer.

În acest caz, trebuie să găsim distanța măsurată a unui obiect prin intermediul timpului de propagare a undei ultrasonice. Emițătorul senzorului trimite o undă care se reflectă atunci când întâlnește obiectul și se întoarce la receptorul senzorului. Remarcăm că timpul de propagare constă în două intervale de timp egale, deoarece timpul necesar pentru ca unda să ajungă la obiect este egal cu timpul necesar pentru a se întoarce la receptor. Această observație justifică împărțirea la doi în Ecuația 4.18.

$$d[\text{m}] = \frac{t[\text{s}]}{2} \cdot v[\text{m/s}] \cdot \cos \phi \quad (4.18)$$

unde ϕ este unghiul dintre direcțiile celor două unde. Aici am considerat că emițătorul și receptorul sunt foarte aproape unul de celălalt în raport cu distanța măsurată până la obiect. Prin urmare, $\cos \phi \approx 1$. Înlocuim valoarea lui $\cos \phi$ și pe cea a vitezei undei și se obține Ecuația 4.19.

$$d[\text{m}] = \frac{t[\text{s}]}{2} \cdot 346 \text{ m/s} \quad (4.19)$$

Aplicații ale senzorilor ultrasonici

Senzorii ultrasonici au multe aplicații. Una dintre acestea se referă la sistemele de alertare și urmărire pentru persoanele nevăzătoare. Oamenii de știință au

dorit să implementeze un dispozitiv capabil să detecteze prezența unui obstacol în calea persoanei nevăzătoare. Pentru a atinge acest obiectiv, au fost necesari senzori ultrasonici. Sistemul cuprinde, de asemenea, un buzzer pentru a alerta persoana nevăzătoare de apropierea obstacolului, un GPS pentru localizarea poziției persoanei nevăzătoare și un dispozitiv GSM pentru trimiterea de SMS-uri către rudele persoanei în cazul în care persoana este în pericol. Arhitectura sistemului propus este prezentată în Figura 4.20 [122].

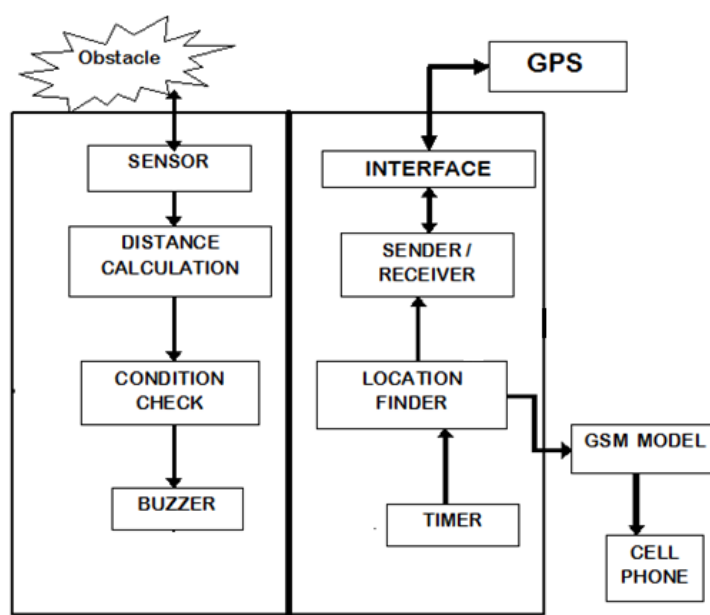


Figura 4.20: Arhitectura unui sistem de alertare și urmărire pentru persoanele nevăzătoare [122]

O altă aplicație a senzorilor ultrasonici implică un nou instrument muzical digital numit trombosonic. O combinație între un senzor ultrasonic și un laser roșu permite interpretului să folosească mișcări asemănătoare cu cele ale unui trombonist care schimbă tonul (vezi Figura 4.21); prin urmare, interpretul trombosonic își mișcă mâna înainte și înapoi, deși nu există un glisor real în instrument. Mai mult, alți senzori sunt folosiți cu scopul de a îmbunătăți expresivitatea muzicală, acest lucru fiind realizat de interpret prin mișcarea mâinilor pe întreaga lungime a dispozitivului și prin respirație. Cercetătorii care au dezvoltat acest prototip au studiat și posibilele aplicații ale acestuia în alte domenii decât muzica. Astfel, au propus utilizarea acestui nou instru-

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

ment pentru persoanele în vârstă și pentru persoanele cu dizabilități care nu pot cânta la un trombon sau la un alt instrument muzical similar.



Figura 4.21: Stânga: interpretând la trombon. Dreapta: interpretând la trombosonic [123]

Componentele trombosonicului care permit controlul sunetului sunt prezentate în Figura 4.22 și includ: patru butoane împreună cu patru diode emițătoare de lumină (LED-uri); un senzor ultrasonic și un indicator laser roșu; un accelerometru; o rezistență termică.

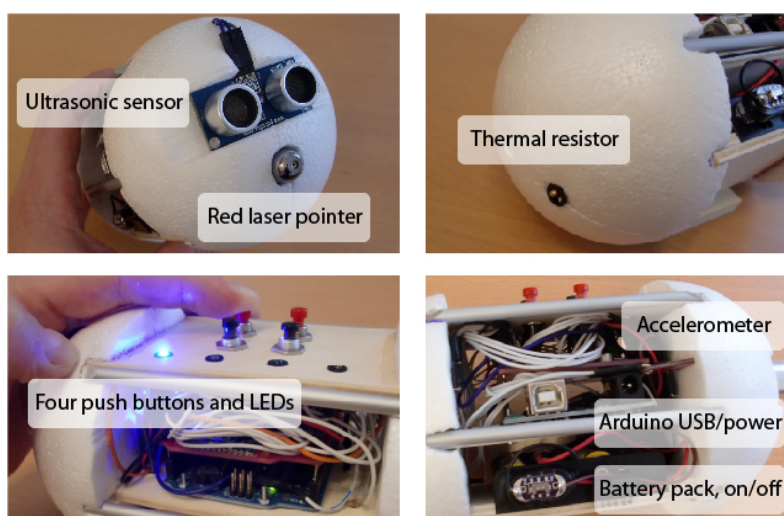


Figura 4.22: Componentele de control al sunetului trombosonicului [123]

În primul rând, cele patru butoane sunt proiectate pentru a controla funcțiile fundamentale ale dispozitivului. Poziția lor este într-o configurație pătrată și sunt operate cu degetele mijlociu și inelar, în timp ce cu celelalte degete se poate ține strâns dispozitivul. Un feedback vizual suplimentar poate fi obținut de la cele patru LED-uri, fiecare conectat la unul dintre butoane, emițând în culori diferite de fiecare dată când unul dintre butoane este apăsat.

În al doilea rând, senzorul ultrasonic controlează frecvența semnalului acustic generat, în timp ce indicatorul laser roșu este folosit pentru a indica direcția senzorului, pentru a obține o mai bună orientare a mâinii care controlează tonul. Laserul proiectează un punct roșu pe palma interpretului ori de câte ori acesta o mișcă înainte și înapoi pe instrument, permițându-i să cânte într-un mod similar cu un trombon real. În plus, la instrument se poate cânta și cu o singură mână, deoarece când undele ultrasonice lovesc un obiect, acestea sunt reflectate înapoi. Prin urmare, interpretul poate interacționa cu alte obiecte care pot fi anumite lucruri sau chiar corpul interpretului însuși. În toate cazurile, distanța este convertită în sunet. În plus, dacă ascultătorii se mișcă sau fac orice gest, acest lucru poate crea o interactivitate între interpret și public în crearea și modelarea muzicii.

O a treia componentă necesară a dispozitivului este accelerometrul, care este folosit pentru măsurarea în 3D a mișcării interfeței.

În final, este necesară și o rezistență termică, pentru a recunoaște respirația interpretului, astfel încât dispozitivul să poată imita trombonul real, care este un instrument de suflat.

Dispozitivul a fost testat pe trei persoane diferite: un cercetător în design de jocuri și interacțiune, un băiat de 13 ani și o femeie de 92 de ani, demonstrând că poate fi folosit de cele mai variate tipuri de persoane. De asemenea, a participat cu succes la o competiție internațională prestigioasă pentru noi instrumente muzicale, fiind un instrument promițător ca dispozitiv de antrenament pentru persoanele în vârstă, dar și pentru copii care nu au fost instruiți pe niciun instrument muzical tradițional, pentru a explora într-un mod intuitiv tehnicile de generare a sunetului [123].

Pe lângă detectarea prezenței umane, în zilele noastre utilizarea senzorilor ultrasonici pentru asistarea șoferilor la parcare cu spatele este crucială. Senzorii ultrasonici au capacitatea de a reduce daunele produse de mai multe coliziuni la mersul înapoi la viteze mici ale mașinii. Este interesant, însă, să se prezinte de la ce studii s-a pornit pentru a ajunge astăzi ca senzorii ultrasonici să echipeze orice mașină modernă.

În [124], sistemul propus a constatat în senzori ultrasonici plasați pe bara de protecție din spate, activați când vehiculul se deplasează în marșarier, la viteze mai mici de 8 km/h. Acești senzori au rolul de a detecta obiecte situate la cel puțin de 25 cm de la sol, la o distanță de până la 2,4 m în spatele vehiculului. Activarea sistemului este automată, când mașina este pornită. Șoferul are opțiunea de a-l porni sau opri în orice moment. Informații suplimentare privind distanța până la obiectele detectate sunt furnizate, în modelul din 2010 al mașinii, prin trei lumini codificate prin culori și sunete de bip. Când senzorii

ultrasonici detectează pentru prima dată un obiect situat în spatele vehiculului la o distanță cuprinsă între 1 m și 2,4 m, o lumină galbenă se aprinde și se generează un sunet de bip. Dacă obiectul se găsește la o distanță mai mică de 1 m, se aprinde o a doua lumină galbenă. Dacă obiectul se apropie la mai puțin de 0,6 m, se aprinde o a treia lumină, roșie, și se generează o serie de sunete de bip, cu o durată de 5 secunde. În final, dacă obiectul se apropie la mai puțin de 30 cm de mașină, toate cele trei lumini se aprind simultan și bip-urile continuă să sune timp de 5 secunde. Prin urmare, tehnologiile care utilizează senzori ultrasonici pentru monitorizarea mediului și avertizarea șoferilor împotriva posibilelor accidente joacă un rol crucial în reducerea numărului de accidente rutiere și a consecințelor acestora [124].

4.4.5 Accelerometre

Principiul de funcționare

Un accelerometru este un senzor care poate măsura vibrația sau accelerația, șocurile, impacturile, mișcarea și chiar înclinarea unei structuri anume [125].

Vibrația este un fenomen mecanic care constă în oscilații periodice care apar într-un punct de echilibru, referința [126].

Când analizăm șocurile sau accelerația liniară, nu ne putem referi la mișcarea oscilațională, dar principiul de proiectare și măsurare al senzorului rămâne același.

Accelerația reprezintă variația vitezei în funcție de timp sau rata de schimbare a variației distanței în funcție de timp (Ecuația 4.20). Fiind un vector, are direcție și magnitudine.

$$a = \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \quad (4.20)$$

Când se trasează un grafic, accelerația reprezintă panta vitezei în funcție de timp. Unitatea de măsură a accelerației este m/s^2 .

Accelerometrele, în schimb, utilizează ca unitate de măsură g , care este accelerația gravitațională nominală a unui obiect în vid în apropierea Pământului [127]. Valoarea sa, în SI, este $9,80665 m/s^2$.

Acestea constau într-o masă de probă care este susținută de un sistem elastic atașat unui cadru rigid având proprietăți de amortizare. O posibilă structură mecanică aparținând unui accelerometru monoaxial este cea din Figura 4.23.

Aici, un arc cu constanta de rigiditate k susține o masă M a cărei mișcare este amortizată de un element de amortizare având coeficientul b . Operând pe

o singură axă, considerăm că masa poate fi deplasată doar în direcție orizontală. Această deplasare se face în raport cu carcasa accelerometrului.

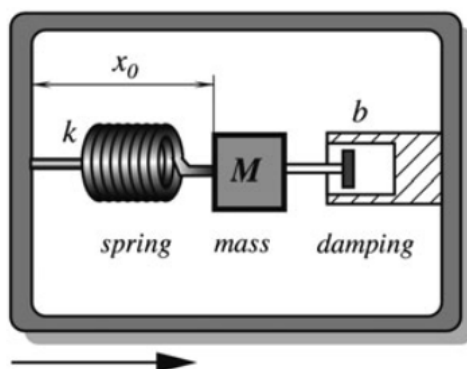


Figura 4.23: Structura mecanică a unui accelerometru monoaxial [128]

Corpul accelerometrului are și el o accelerație de intrare. Aceasta se va reflecta în ecuațiile de mișcare care descriu funcționarea sa. Figura 4.24 prezintă o diagramă ce include forțele care acționează asupra corpului accelerometrului [46].

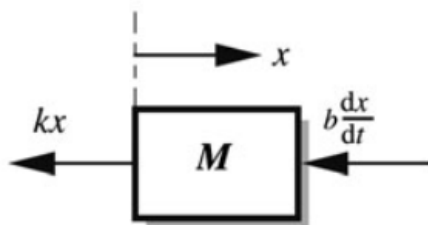


Figura 4.24: Diagrama forțelor care acționează asupra corpului accelerometrului [46]

Pentru a deduce ecuațiile de mișcare și pentru a demonstra funcționarea accelerometrului, trebuie să aplicăm a doua Lege a Mecanicii a lui Newton, considerând fiecare masă ca un corp liber. De asemenea, am presupus că fiecare dintre mase, acum corpuri libere, este deplasată din poziția sa de echilibru și că forțele care acționează asupra masei o readuc în poziția inițială [46]. Aplicând Legea lui Newton pentru structura din Figura 4.24, obținem Ecuația 4.21.

$$-kx - b\frac{dx}{dt} = Ma \quad (4.21)$$

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

unde am observat că masa se mișcă în direcția opusă față de cea a forțelor care acționează.

De asemenea, am notat cu a accelerația masei relativ la Pământ (Ecuația 4.22). Este diferența dintre accelerația masei, adică derivata a doua a poziției sale în funcție de timp, și accelerația de intrare a carcusei accelerometrului:

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \quad (3.17) \quad (4.22)$$

Înlocuim Ecuația 4.22 în Ecuația 4.21 și obținem Ecuația 4.23.

$$-kx - b\frac{dx}{dt} = M \left(\frac{d^2x}{dt^2} - \frac{d^2y}{dt^2} \right) \quad (4.23)$$

După separarea termenilor în x și y , rezultă ecuația de mișcare de ordinul (Ecuația 4.24), prin care este posibil să obținem o formă oscilatorie pentru semnalul de ieșire al accelerometrului:

$$M\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx = M\frac{d^2y}{dt^2} \quad (4.24)$$

Frecvent, se dorește aducerea semnalului de ieșire într-o stare critic amortizată. Acest lucru este posibil atunci când coeficientul b este ales corespunzător [46].

Pentru rezolvarea ecuației finale se aplică transformata Laplace Ecuației 4.24.

Mai mult, pentru orice funcție f căreia i se poate atribui o transformare Laplace, se oferă următoarele echivalențe din Ecuația 4.25.

$$f(t) \rightarrow F(s), \quad \frac{df}{dt} \rightarrow sF(s), \quad \frac{d^2f}{dt^2} \rightarrow s^2F(s) \quad (4.25)$$

Prin aplicarea transformatei Laplace și a echivalențelor, se obține Ecuația 4.26

$$Ms^2X(s) + bsX(s) + kX(s) = MA(s) \quad (4.26)$$

din care se extrage $X(s)$ și se obține Ecuația 4.27.

$$X(s) = \frac{MA(s)}{Ms^2 + bs + k} \quad (4.27)$$

Notând $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}}$ și $2\xi\omega_0 = \frac{b}{M}$ și înlocuind în Ecuația 4.27, se obține Ecuația 4.28.

$$X(s) = \frac{A(s)}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (3.22) \quad (4.28)$$

Se notează $G(s) = \frac{1}{s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2}$ și se obține $X(s) = A(s)G(s)$. Aplicând transformata Laplace inversă, se obține soluția ecuației de mișcare (Ecuația 4.29).

$$x(t) = \mathcal{L}^{-1} \{G(s)A(s)\} \quad (3.23) \quad (4.29)$$

Pe baza teoremei convoluției se obține Ecuația 4.30.

$$x(t) = \int_0^t g(t - \tau)a(\tau)d\tau \quad (3.24) \quad (4.30)$$

și se observă că $a(t)$ reprezintă impulsul accelerometrului și că este dependent de timp. $g(t)$ este transformata Laplace inversă a lui $G(s)$.

Se calculează determinantul ecuației $s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2$ (Ecuația 4.31).

$$\Delta' = \xi^2\omega_0^2 - \omega_0^2 = \omega_0^2(\xi^2 - 1) \quad (3.25) \quad (4.31)$$

Soluțiile pentru numitorul lui $G(s)$ sunt $s_{1,2} = -\xi\omega_0 \pm \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}$ care prezintă două moduri diferite:

- mod subamortizat $\xi < 1$
- mod supraamortizat $\xi > 1$

Astfel, rezultă că $G(s) = \frac{A}{s + \xi\omega_0 - \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}} + \frac{B}{s + \xi\omega_0 + \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}}$ cu $A = \frac{1}{2\omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}}$ și $B = -\frac{1}{2\omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}}$.

Când $\xi < 1$, Δ' este negativ și poliile sunt complexe. De asemenea, ω este real dacă $\omega = \omega_0\sqrt{1 - \xi^2}$.

Se obține, astfel, Ecuația 4.32.

$$G(s) = \frac{1}{2\omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}} \left(\frac{1}{s + \xi\omega_0 - \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}} - \frac{1}{s + \xi\omega_0 + \omega_0\sqrt{\xi^2 - 1}} \right) \quad (4.32)$$

Înlocuim ω și se obținem Ecuația 4.33:

$$G(s) = \frac{1}{2\omega} \left(\frac{1}{s + \xi\omega_0 - \omega} - \frac{1}{s + \xi\omega_0 + \omega} \right), \quad (4.33)$$

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

care are transformarea Laplace inversă din Ecuația 4.34.

$$g(t) = \frac{1}{2\omega} (e^{-\xi\omega_0 t + \omega t} - e^{-\xi\omega_0 t - \omega t}) \quad (4.34)$$

Dar,

$$\frac{1}{2\omega} (e^{-\xi\omega_0 t + \omega t} - e^{-\xi\omega_0 t - \omega t}) = \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0 t} \cdot \frac{(e^{\omega t} - e^{-\omega t})}{2} = \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0 t} \sin \omega t. \quad (4.35)$$

Prin urmare,

$$g(t) = \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0 t} \sin \omega t \quad (4.36)$$

Soluția finală pentru modul subamortizat este:

$$x(t) = \int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0(t-\tau)} \sin \omega(t-\tau) a(t) d\tau \quad (4.37)$$

Dacă $\xi > 1$, Δ' este pozitiv și polii sunt reali, în timp ce $\omega_0 \sqrt{(1-\xi^2)}$ este complex, adică $\omega_0 \sqrt{(1-\xi^2)} = j\omega$. Prin urmare, $\omega = \omega_0 \sqrt{(\xi^2 - 1)}$.

Ecuația 4.36 devine:

$$G(s) \rightarrow \frac{1}{2\omega} (e^{-\xi\omega_0 t + j\omega t} - e^{-\xi\omega_0 t - j\omega t}). \quad (4.38)$$

În această situație,

$$\frac{1}{2\omega} (e^{-\xi\omega_0 t + j\omega t} - e^{-\xi\omega_0 t - j\omega t}) = \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0 t} \cdot \frac{(e^{j\omega t} - e^{-j\omega t})}{2} = \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0 t} \sinh \omega t \quad (4.39)$$

Pentru modul supraamortizat, soluția finală este:

$$x(t) = \int_0^t \frac{1}{\omega} e^{-\xi\omega_0(t-\tau)} \sinh \omega(t-\tau) a(t) d\tau \quad (4.40)$$

Aceste ecuații pot fi aplicate și analizate pentru diferite intrări de accelerație ale corpului accelerometrului. Dacă $b=0$ și nu există amortizare, obținem că $\xi = 0$ și $\omega = \omega_0$. Astfel, accelerometrul neamortizat produce semnale infinit de mari, ceea ce este nedorit [129]. Este convenabil să avem un coeficient de amortizare finit.

În ceea ce privește frecvența naturală, pentru un dispozitiv care funcționează corect, aceasta trebuie să fie unică, marcată și ușor de identificat.

De asemenea, $\omega < \omega_0$ reprezintă scopul proiectanților, deoarece în acest interval accelerația de intrare ar fi proporțională cu deplasarea masei. Pentru $\omega > \omega_0$, adică la frecvențe înalte, masa rămâne staționară.

În intervalul în care măsurătorile pot fi efectuate cu precizie, răspunsul în frecvență trebuie să fie plat. Acest lucru este necesar deoarece frecvența de vibrație se schimbă și există variații în caracteristica frecvenței. Totuși, senzorul trebuie să perceapă schimbarea fără a multiplica semnalul de ieșire prin aceste variații [46].

Caracteristicile accelerometrului

Calibrarea accelerometrului trebuie să fie urmată de determinarea unor caracteristici, precum sensibilitatea, răspunsul în frecvență, frecvența de rezonanță, liniaritatea amplitudinii.

Sensibilitate

Este definită ca raportul dintre tensiunea de ieșire și stimulul mecanic de intrare. Intrarea poate fi o anumită forță a cărei unitate de măsură este unitatea de accelerație, g, corespunzătoare cu $9,80665 \text{ m/s}^2$. Astfel, unitatea de măsură a sensibilității poate fi V/g.

Nivelul de ieșire este proporțional cu amplitudinea vibrațiilor, în timp ce frecvența semnalului de ieșire AC este egală cu frecvența vibrațiilor.

Sensibilitatea este considerată și factorul de scalare al accelerometrului și este determinată luând în considerare o singură frecvență de referință a unui semnal sinusoidal. În Europa, această frecvență a fost aleasă la 160 Hz. În America, în schimb, este de 100 Hz. La alegerea lor s-a considerat eliminarea frecvențelor liniilor de alimentare și a armonicilor [46].

Valoarea sensibilității dată în fișa tehnică are constrângeri în ceea ce privește frecvența, amplitudinea accelerației și temperatura. Uneori, se oferă și toleranța acesteia care asigură că sensibilitatea se încadrează într-un anumit interval.

Răspunsul în frecvență

Poate fi considerat și un factor de scalare. Totuși, răspunsul în frecvență oferă mai multe informații deoarece include variabila frecvență.

Răspunsul în frecvență este, de fapt, răspunsul în amplitudine sau sensibilitatea specificată pentru întreaga gamă de frecvențe a senzorului.

De obicei, toleranța acestuia față de sensibilitatea la frecvența de referință este, de asemenea, oferită, fie sub formă tabulară, fie printr-un grafic [46].

Frecvența de rezonanță

Frecvența de rezonanță este frecvența caracteristică a senzorului atunci când se atinge nivelul maxim de oscilație. Pentru senzorii neamortizați, se observă ușor punctul în care caracteristica frecvenței prezintă un maxim care depășește cu aproximativ 3 dB valoarea amplitudinii corespunzătoare frecvenței de referință.

Când ne referim la un senzor aproape critic amortizat, nu este la fel de ușor să identificăm frecvența de rezonanță din caracteristică. Acesta este motivul pentru care trebuie să se traseze deplasarea fazei. Frecvența de rezonanță este apoi identificată căutând acea frecvență pentru care diferența dintre deplasarea fazei corespunzătoare și deplasarea fazei la frecvența de referință este $\pm\pi$ [46].

Liniaritatea amplitudinii

Liniaritatea amplitudinii prezintă liniaritatea ieșirii unui accelerometru pentru un interval dinamic specificat și se referă, de fapt, la neliniaritatea amplitudinii deoarece arată deviația de la liniaritatea perfectă.

În cazul ideal, pentru orice punct din intervalul amplitudinii, accelerometrul trebuie să aibă aceeași sensibilitate.

Liniaritatea amplitudinii este specificată și valabilă doar pentru o frecvență. Se poate găsi în fișele tehnice exprimată în diferite moduri, restrictive sau mai puțin restrictive.

O modalitate restrictivă de a specifica liniaritatea amplitudinii este prin intermediul procentului de citire. De obicei, valoarea sa este de $\pm 1\%$ pe întregul interval [46].

Liniaritatea amplitudinii este specificată într-un mod mai puțin restrictiv dacă este exprimată pe bucăți, ca în exemplul următor: dacă sensibilitatea crește cu 1% la fiecare 750 g, luând în considerare un interval de la 0 la 4,500 g, aceasta înseamnă că, la capătul superior al intervalului de amplitudine, sensibilitatea nu poate varia cu mai mult de 6% față de cea de la capătul inferior al intervalului de amplitudine.

Erorile de neliniaritate pot fi cauza distorsiunii semnalului, în special în cazul accelerațiilor de mare amplitudine. De asemenea, atunci când se operează în medii cu multiple frecvențe de vibrație, se poate produce distorsiunea intermodulației care determină, în echipamentele electronice, frecvențe (sume și diferențele frecvențelor semnalelor intermodulate) care nu erau prezente mecanic la accelerometru [130].

Funcționarea accelerometrelor capacitive

Accelerometrele care utilizează elemente de detectare capacitive oferă la ieșire o tensiune care depinde de distanța dintre două suprafețe plane [131]. Aces-

tea pot fi considerate plăcile unui condensator dacă considerăm că una sau ambele sunt încărcate. O placă este atașată la masa de probă și se poate mișca fără restricții în raport cu carcasa. Cealaltă este staționară și este conectată la carcasa [129].

Așa cum a fost evidențiat, capacitatea depinde de distanța dintre plăci conform Ecuației 4.10. Prin urmare, tensiunea electrică dată de ecuația 4.14 depinde și ea de această distanță.

Pentru a măsura accelerația, este necesar să se determine deplasarea masei de probă în raport cu carcasa ca o consecință a vibrațiilor sau mișcării.

Accelerometrul capacitiv nu trebuie să măsoare deplasări mai mari de $20\ \mu\text{m}$ [46]. Lucrând cu deplasări foarte mici, este necesar ca accelerometrul să compenseze eficient derivatele și posibilele interferențe. Aceasta nu este o sarcină foarte dificilă dacă se folosește tehnica diferențială, care constă în adăugarea unui al doilea condensator construit într-un mod similar cu cel descris anterior. Capacitatea acestui nou condensator adăugat nu trebuie să difere prea mult de cea a primului și trebuie să sufere modificări cu o schimbare de fază de 180° . Accelerația poate fi reprezentată ca diferența dintre cele două capacități. Cu alte cuvinte, accelerația depinde de deplasare, aceasta din urmă fiind exprimată în termeni de schimbare a distanțelor dintre plăcile condensatorului [129].

Să explicăm principiul de detectare capacitivă începând cu un element de detectare cu un singur condensator, ca în figura următoare:

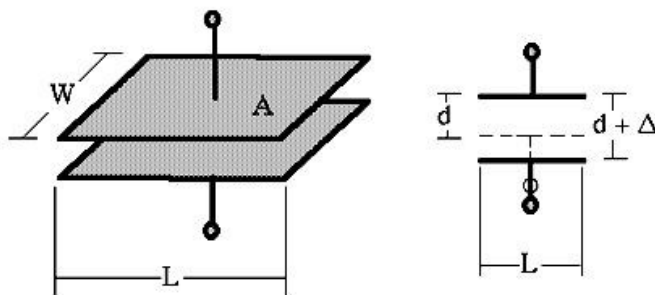


Figura 4.25: Schimbarea capacității datorită schimbării distanței dintre plăci [129]

În Figura 4.25, considerăm doi electrozi separați de distanța d , fiecare având suprafața S . Dacă un semnal fizic determină creșterea distanței d cu o cantitate mică, Δ , capacitatea dată de ecuația 4.10 se schimbă în Ecuația 4.41.

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d + \Delta} \quad (4.41)$$

La o primă vedere, Ecuația 4.41 exprimă o relație neliniară între capacitate și deplasare, Δ . Totuși, scopul nostru este să obținem o dependență liniară și aceasta poate fi îndeplinită dacă considerăm că deplasarea este foarte mică. În acest caz, putem aplica seria Taylor, care pentru o funcție $f(d)$ poate fi scrisă astfel:

$$f(d) = f(d)|_{d=d_0} + \frac{f'(d)|_{d=d_0}}{1!} (d-d_0) + \frac{f''(d)|_{d=d_0}}{2!} (d-d_0)^2 + \frac{f'''(d)|_{d=d_0}}{3!} (d-d_0)^3 + \dots \quad (4.42)$$

În cazul nostru, $f(d) = C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d + \Delta}$.

Calculăm prima și a doua derivată a Ecuației 4.41:

$$f'(d) = -\frac{\varepsilon \cdot S}{(d + \Delta)^2} \quad (4.43)$$

și

$$f''(d) = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot S}{(d + \Delta)^3} \quad (4.44)$$

Notăm că $\Delta = d - d_0$.

După extindere, Ecuația 4.41 devine:

$$C = f(d) = \frac{\varepsilon \cdot S}{d_0 + \Delta} - \frac{\varepsilon \cdot S}{(d_0 + \Delta)^2} (d - d_0) + \frac{\varepsilon \cdot S}{(d_0 + \Delta)^3} (d - d_0)^2 + \dots \quad (4.45)$$

Înlocuim $d_0 + \Delta = d$ și $d - d_0 = \Delta$ și obținem expresia:

$$C = f(d) = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} - \frac{\varepsilon \cdot S}{d^2} \Delta + \frac{\varepsilon \cdot S}{d^3} \Delta^2 + \dots \quad (4.46)$$

Următorul pas este să dăm ecuația finală:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \left(1 - \frac{\Delta}{d} + \frac{\Delta^2}{d^2} \right) \quad (4.47)$$

care demonstrează că, pentru $\Delta \ll d$, capacitatea C se schimbă liniar cu deplasarea Δ , deoarece putem neglija termenul $\frac{\Delta^2}{d^2}$.

Accelerometrele pentru măsurători precise sunt afectate de această neliniaritate de ordinul doi. De aceea, trebuie să găsim o soluție pentru a o elimina.

Așa cum a fost menționat, interferențele pot fi evitate dacă folosim condensatoare diferențiale.

În paragrafele următoare, se va descrie această structură îmbunătățită, prezentată și în Figura 4.26.

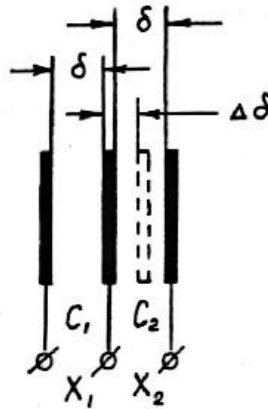


Figura 4.26: Condensator diferențial [129]

Acum, scopul nostru este să determinăm diferența dintre capacități. Presupunem că distanța dintre plăci este din nou d . De asemenea, imaginăm că placa din mijloc este supusă unei deplasări Δ . Noile distanțe dintre plăcile fiecărui condensator devin: pentru C_1 , $d \rightarrow d + \Delta$; pentru C_2 , $d \rightarrow d - \Delta$.

Prin urmare, diferența dintre capacități poate fi exprimată astfel:

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon \cdot S}{d - \Delta} - \frac{\varepsilon \cdot S}{d + \Delta} \quad (4.48)$$

Ecuția 4.47 oferă dezvoltarea Seriei Taylor pentru C_1 .

Este necesară dezvoltarea expresiei lui C_2 conform aceluiași principiu [129].

Se presupune:

$$f(d) = C_2 = \frac{\varepsilon \cdot S}{d - \Delta} \quad (4.49)$$

Se calculează prima și a doua derivată a funcției C_2 :

$$f'(d) = -\frac{\varepsilon \cdot S}{(d - \Delta)^2} \quad (4.50)$$

și

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

$$f''(d) = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot S}{(d - \Delta)^3} \quad (4.51)$$

Se notează de această dată $\Delta = d_0 - d$.

Astfel, Ecuația 4.49 după extindere devine:

$$C_2 = f(d) = \frac{\varepsilon \cdot S}{d_0 - \Delta} - \frac{\varepsilon \cdot S}{(d_0 - \Delta)^2}(d - d_0) + \frac{\varepsilon \cdot S}{(d_0 - \Delta)^3}(d - d_0)^2 + \dots \quad (4.52)$$

Se înlocuiește $d_0 - \Delta = d$ și $d - d_0 = -\Delta$ și se obține expresia:

$$C_2 = f(d) = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} + \frac{\varepsilon \cdot S}{d^2}\Delta + \frac{\varepsilon \cdot S}{d^3}\Delta^2 + \dots \quad (4.53)$$

Următorul pas este să dăm ecuația finală:

$$C_2 = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \left(1 + \frac{\Delta}{d} + \frac{\Delta^2}{d^2} \right) \quad (4.54)$$

Prin urmare,

$$\Delta C = C_2 - C_1 = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \left(1 + \frac{\Delta}{d} + \frac{\Delta^2}{d^2} \right) - \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \left(1 - \frac{\Delta}{d} + \frac{\Delta^2}{d^2} \right) = \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \cdot \frac{\Delta}{2d} \quad (4.55)$$

Neliniaritatea de ordinul doi este eliminată. Nu s-au luat în considerare neliniaritățile de ordin superior. Neliniaritatea de ordinul trei ar fi următoarea importantă, dar deoarece $\Delta \ll d$, este ne semnificativă pentru analiza de față. Cu toate acestea, pentru proiectarea accelerometrului și măsurători precise, toate aceste distorsiuni sunt luate în considerare și minimizate [129].

În concluzie, metoda de detectare capacitivă este foarte fiabilă. Are o bună sensibilitate la deflecții extrem de mici și nicio sensibilitate naturală la temperatură. Mai mult, are stabilitate și acuratețe ridicate. Acest lucru face ca accelerometrul să fie mai puțin afectat de zgomot și variațiile de temperatură și, de asemenea, mai puțin consumator de energie și poate avea lățimi de bandă mai mari datorită circuitelor interne de feedback [129].

Problema dificilă este legată de precizia fabricației, deoarece este mai greu de produs astfel de electrozi care sunt atât de apropiați unul de altul și paraleli. Accelerometrele capacitive sunt utilizate în general atunci când măsurătorile trebuie efectuate cu mare precizie [129].

Poziționarea și montarea senzorilor

Accelerometrele non-purtabile sunt cel mai frecvent montate pe podea sau pe pereți. De importanță primordială este planeitatea suprafețelor dintre accelerometru și suprafața de montare. De asemenea, metoda folosită pentru montarea instrumentului pe suprafața de testare are o influență puternică asupra acurateții rezultatelor. Pentru a obține cea mai bună eficiență, trebuie să se cupleze strâns suprafața de montare a accelerometrului cu suprafața de testare, astfel încât mișcarea să poată fi reprodusă cât mai precis posibil, acest factor fiind și mai important la frecvențe înalte [132].

Avantaje

Un avantaj important al accelerometrelor este faptul că pot fi utilizate ușor pentru măsurarea caracteristicilor vibrațiilor. În plus, sunt compacte și robuste, având un interval dinamic larg și un domeniu de frecvențe extins. Accelerometrele sunt, de asemenea, relativ ieftine (cel puțin cele piezoelectrice). Calibrarea și utilizarea lor nu sunt dificile, iar schimbările de mediu afectează neesențial funcționarea lor. Fiabilitatea accelerometrelor este, de asemenea, foarte bună, și sunt stabile pe o perioadă lungă de timp. Suplimentar, orientarea lor poate fi aleasă convenabil astfel încât să se poată măsura accelerația de-a lungul axelor [133].

Dezavantaje

Printre principalele tipuri de accelerometre, accelerometrul pendul, deși prezintă o eficiență foarte mare, are și dezavantajul de a fi relativ mare și costisitor. Accelerometrul piezoelectric, pe de altă parte, este mai ieftin și are dimensiuni mai mici, dar cu limitarea că nu poate măsura nici accelerațiile statice, nici pe cele care apar la frecvențele joase (care sunt cele implicate de obicei în mișcarea umană).

Un alt neajuns prezentat de un accelerometru este că, atunci când măsoară accelerația unui corp în mișcare, detectează și componentele gravitației Pământului, alterând astfel ușor rezultatele pe care le oferă.

Semnalele accelerometrului care apar la frecvențe joase nu pot fi filtrate; de asemenea, componenta gravitațională, care apare în mare parte la frecvența mișcării, nu poate fi eliminată.

Dacă accelerometrul se mișcă aleatoriu, va da la ieșire nu numai accelerațiile dinamice, ci și suma liniară a acestor accelerații reale și a celor datorate câmpului gravitațional al Pământului. Accelerometrul nu poate discrimina între una și cealaltă, și încă nu au fost implementate tehnici pentru filtrarea semnalului produs de gravitația Pământului [134].

Aplicații ale accelerometrelor

Multe aplicații s-au concentrat pe studiul detectării căderilor folosind accelerometre. Într-un astfel de studiu, a fost propus un sistem îmbunătățit de detectare a căderilor, pentru a monitoriza persoanele în vârstă prin intermediul accelerometrelor montate pe podea. Acești senzori au scopul de a colecta semnalele care notifică căderea unui corp uman. Soluția propusă a încercat să evite dezavantajele accelerometrelor purtabile, astfel crescând fiabilitatea și utilizabilitatea sistemului. Testele de laborator au fost efectuate pentru evaluarea prototipului, urmate de un test pe o perioadă de 507 zile în condiții reale, în casele subiecților studiului. Rezultatele testelor de laborator au arătat o sensibilitate de 87% și o specificitate de 97,7%, pe patru podele diferite și într-un scenariu de cădere bine definit [135].

Totuși, accelerometrele pentru detectarea și monitorizarea căderilor au fost utilizate recent în principal în sisteme purtabile, în ciuda dezavantajelor, cum ar fi intruzivitatea și disconfortul atunci când aceste dispozitive sunt plasate în mai multe părți ale corpului uman.

Există, totuși, un domeniu particular de cercetare medicală care utilizează frecvent accelerometre pentru măsurători științifice: analiza mișcărilor fetale. Aceste mișcări sunt importante de monitorizat deoarece corespund clinic stării de bine a fătului. Cea mai precisă metodă de măsurare a mișcărilor fetale folosește ultrasunete care, totuși, au două mari dezavantaje: intruzivitatea și costul. O metodă alternativă care nu prezintă aceste dezavantaje este utilizarea accelerometrelor neintruzive și cu costuri reduse pentru a colecta date despre activitatea fetală [136].

Un studiu care a folosit aceste accelerometre a dezvoltat o metodă pentru detectarea și analiza mișcărilor fetale prin intermediul distribuțiilor timp-frecvență (TFD) cvadratică. TFD-urile sunt un mijloc de reprezentare, pentru semnalele nestaționare, a caracteristicilor lor temporale, spectrale și energetice în planul timp-frecvență. Printre numeroasele TFD-uri cvadratică propuse în literatură, cel mai frecvent utilizate sunt distribuția Wigner-Ville, distribuția Choi-Williams, Spectrograma, B-Distribuția etc. Totuși, aceste tehnici au dezavantajul că în nucleu se pot modifica doar câțiva parametri, în general parametrii de lag și Doppler. O metodă nouă propusă a inclus proiectarea unui nou nucleu cu mai mulți parametri, care a realizat pentru semnal o reprezentare timp-frecvență (TFR) cu o rezoluție mai mare, îmbunătățind astfel acuratețea determinării mișcărilor fetale. TFD-ul propus în lucrare este o extensie a distribuției Choi-Williams (TFD gaussiană). Ecuația care dă funcția nucleu în modelul propus este următoarea:

$$g_{\text{lag}}(\nu, \tau) = \sum_i^{n-1} w_i \cdot \frac{\partial^i \exp\left(-\frac{\nu^2 \tau^2}{\sigma}\right)}{\partial \nu^i} \quad (4.56)$$

unde funcția nucleu este obținută din suma derivatelor ponderate ale TFD Gaussiană. Autorii au comparat TFD-ul rezultat cu alte metode și au aplicat datele, înregistrate de accelerometre, la analiza și clasificarea mișcărilor fetale, cu rezultate satisfăcătoare [136]. Într-o altă lucrare a aceluiași grup de cercetare, au fost comparate trei tipuri de TFD (B distribuție, B distribuție modificată (MBD) și distribuție gaussiană separabilă) și a fost propus un tip nou - o extensie a MBD - cu numele de MBD cu nucleu separabil extins. Caracteristica acestui TFD este utilizarea unui nucleu separabil (adaptat dintr-o extensie a MBD), atât în domeniul temporal, cât și în domeniul frecvenței. Simulările au fost efectuate pentru a compara metoda propusă cu cele anterioare și pentru a-i evalua eficiența. În final, noul TFD a fost aplicat la date reale de mișcare fetală, înregistrate folosind accelerometre [137].

În același domeniu al detectării mișcărilor fetale cu ajutorul accelerometrelor, a fost dezvoltată o metodă de detectare pasivă a mișcărilor fătului folosind o abordare de procesare a semnalului timp-frecvență (TF). Sistemul multi-senzor propus pentru monitorizarea fetală a avut ca scop reducerea numărului de decese fetale, în prezent la un nivel alarmant de ridicat în lume. Se știe că fătul începe să se miște din perioada incipientă a sarcinii, iar mișcărilor sale devin mai frecvente și mai complexe în timp. Astfel, detectarea unei scăderi a mișcărilor fetale este un semn că ceva nu este în regulă și că trebuie luate măsuri. Oamenii de știință au propus recent o abordare experimentală, bazată pe procesarea digitală a semnalului (DSP), pentru detectarea mișcărilor fetale din semnalele înregistrate de accelerometre. Autorii au creat, de asemenea, o metodă inovatoare de detectare. Configurația sistemului a fost una nouă; procedura de achiziție a datelor a fost îmbunătățită; TFD-ul utilizat pentru detectarea mișcărilor fetale a inclus o decompunere TF matching pursuit (TFMP) și un filtru TF matched (TFMF) bazat pe TFD-uri cvadractice de înaltă rezoluție [138].

Pe lângă detectarea poziției și mișcării ființelor umane (de la făt până la bătrânețe), accelerometrele pot fi utilizate și în aplicații medicale pentru detectarea locației unui cateter în diagnosticul și tratamentul urologic. Un modul de detectare a mișcării în timp real, realizat prin încorporarea mai multor accelerometre MEMS într-un cateter Foley standard, a fost raportat recent [139]. Accelerometrele sunt utilizate pentru măsurarea orientărilor cateterului în diverse puncte, pentru a permite o urmărire în timp real a formei uretrei și a

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

mișcării gâtului vezicii urinare. Configurația experimentală propusă este prezentată în Figura 4.27.

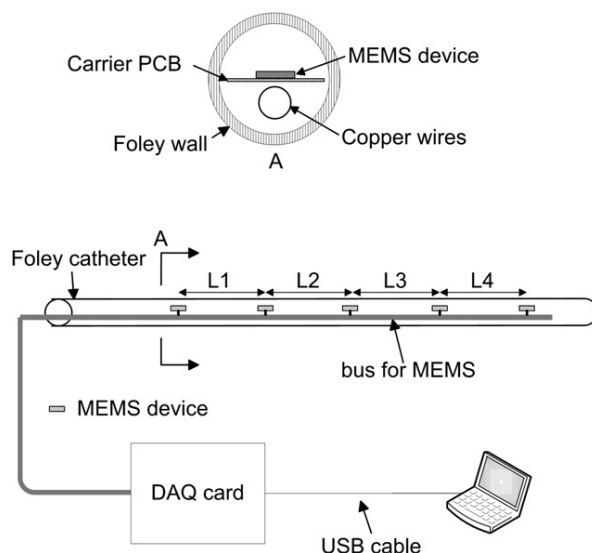


Figura 4.27: Configurația experimentală a sistemului de monitorizare urologică bazat pe accelerometru [139]

Figura 4.27 arată cateterul Foley flexibil (cu o lungime de 30 cm și un diametru de 5 mm), în interiorul căruia au fost plasate mai multe accelerometre MEMS. Lipirea tuturor dispozitivelor MEMS a fost realizată pe o placă de circuit imprimat (PCB) subțire și mică. Sursa de alimentare pentru dispozitivele MEMS este constituită din două baterii AA, oferind o alimentare de 3 V c.c. Canalele de ieșire sunt conectate, prin fire de cupru subțiri izolate, la o placă de achiziție de date. La rândul său, placa efectuează conversia de la semnalele analogice pe mai multe canale într-un semnal digital serial; apoi, printr-un port USB standard, semnalul digital este preluat de un computer, care efectuează procesarea sa și creează o imagine a mișcării cateterului.

Grupul de cercetare a stabilit, de asemenea, un algoritm pentru extragerea informațiilor din accelerometrele MEMS pe trei axe, despre înclinare, poziție și formă. Din rezultatele experimentale, oamenii de știință au concluzionat că sistemul urmărește cu succes în timp real mișcarea cateterului Foley, cu o eroare absolută pentru măsurarea statică mai mică de $1,1^\circ$ în domeniul de operare [139].

4.4.6 Senzori bazați pe diode electroluminiscente în infraroșu

Un senzor bazat pe diode electroluminiscente în infraroșu constă, de regulă, din trei blocuri majore:

- senzor de poziție (Position Sensitive Detector, PSD);
- diodă electroluminiscentă în infraroșu (Infrared Emitting Diode, IRED);
- circuit de procesare a semnalului [36, 46].

Senzorul de poziție este un senzor optic pentru detectarea poziției, care permite măsurarea pozițiilor punctelor luminoase 1D și 2D pe suprafața senzorului.

Există două mari clase de senzori PSD, cu principii de funcționare diferite. Prima clasă, așa-numiții senzori PSD izotropi, și-au primit numele de la suprafața izotropă a senzorului, având o structură de tip rastru, care oferă în mod continuu date cu privire la poziție. Principiul de funcționare se bazează pe efectul fotoelectric lateral. Atunci când un spot de lumină este incident pe o diodă PIN, efectul constă din variația rezistenței locale și crearea unui flux de electroni.

Acești senzori au avantajul că poziția spotului luminos poate fi măsurată în mod continuu, ratele de măsurare depășind 100 kHz. În privința dezavantajelor, se poate menționa faptul că măsurarea locală depinde de dimensiunea și de forma spotului luminos, însă poate fi îmbunătățită cel puțin parțial, prin folosirea unor electrozi cu o formă specială [140, 141].

Cea de-a doua clasă, așa-numiții senzori PSD tetra-laterali 2D [142], se caracterizează prin prezența unor senzori discreți pe suprafața senzorului PSD, utilizați pentru furnizarea de date locale discrete. Acești senzori sunt capabili să furnizeze în mod continuu măsurători 2D ale poziției spotului luminos incident. Un astfel de senzor este compus dintr-o singură diodă PIN, de formă sferică, și cu un strat rezistiv. Lumina incidentă pe regiunea activă a senzorului produce un fotocurent care este colectat de la patru electrozi [36, 143].

Dioda IRED este corespondentul diodei electroluminiscente (LED) în spectrul infraroșu. Principiul de funcționare al unui IRED este foarte asemănător cu cel al unui LED. În același mod în care LED-urile – dispozitive bazate pe o joncțiune p-n - emit lumină în spectrul vizibil atunci când sunt polarizate direct, așa și diodele IRED-urile emit lumină în domeniul infraroșu. Cele mai uzuale lungimi de undă de emisie pentru diodele IRED sunt 770 nm, 870 nm, 880 nm, 940 nm și 950 nm [144].

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

În comparație cu lămpile cu incandescență, care au un domeniu foarte larg de lungimi de undă de emisie, o diodă IRED emite o bandă îngustă, la fel ca și LED-urile care, din acest motiv, par să emită pe o singură culoare (evident, acest efect nu poate fi văzut în cazul diodelor IRED, având în vedere faptul că acestea emit în afara spectrului vizibil) [66, 145]. Blocurile constructive care cuprind senzorul Sharp sunt reprezentate în diagrama bloc din Figura 4.28.

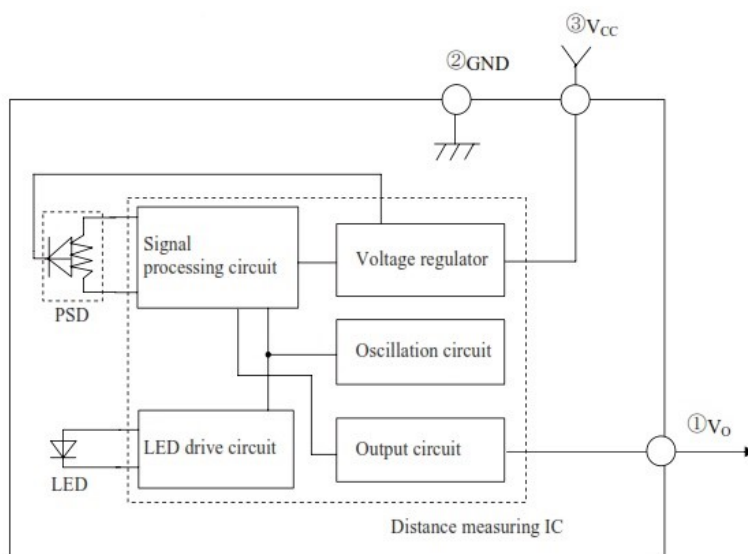


Figura 4.28: Diagrama-bloc a senzorului Sharp [145]

Observații privind plasarea eficientă a senzorilor IRED

În plasarea senzorilor IRED, trebuie să se țină cont, ca și în cazul celorlalți senzori, de aplicația pentru care vor fi dedicați. În general, se evită plasarea în anumite zone sau sub anumite unghiuri fără a verifica prezența anumitor obstacole din calea fasciculului prin intermediul experimentelor. În [146], s-a constatat că o deviație aproape insesizabilă ochiului uman a alinierii lentilelor față de ținta ce trebuia detectată poate produce erori de aproximativ 25,64%.

Avantajele senzorului IRED

Diodele IRED au aceleași avantaje ca și corespondentele lor din spectrul vizibil. Astfel, ele pot fi fabricate cu dimensiuni mici, consumă o cantitate redusă de putere, au o durată mare de funcționare, sunt compatibile cu circuitele SSD și sunt de asemenea convenabile din punctul de vedere al prețului. Aceste avantaje le fac să fie potrivite și foarte utile în aplicații precum dete-

ția de fum, sisteme de codare, comutatoare optice (atât de tip reflectător, cât și transmițător) [147]. Totodată, acești senzori au avantajele unui răspuns rapid, unor valori mult mai reduse ale curentului de întuneric (nedorit) și unor costuri de fabricație mai mici. Mai mult, precizia lor și rezoluția măsurătorilor realizate cu ajutorul acestor senzori nu depind de dimensiunea și de forma spotului [46, 66].

Dezavantajele senzorului IRED

Pe de altă parte, însă, ei prezintă dezavantajul neliniarității. Estimarea poziției față de poziția reală este aproximativ liniară doar atunci când spotul se află în zona centrală a senzorului. Dacă spotul luminos se îndepărtează față de acest centru, estimarea devine neliniară, ceea ce constituie o limitare a utilizării acestui tip de senzori în aplicațiile care necesită liniaritate [148].

4.5 Studiu de caz: Senzori utilizați în aplicațiile de agricultură inteligentă

Agricultura de precizie este un alt domeniu pentru care Internetul Lucrurilor a deschis noi perspective.

Unii dintre cei mai importanți senzori utilizați în agricultură sunt cei pentru monitorizarea temperaturii și umidității solului, întrucât datele furnizate de aceștia pot oferi informații despre schimburile de energie și apă dintre sol și mediul înconjurător [149]. În etapele incipiente de dezvoltare, condițiile de creștere ale plantelor și parametrii care descriu cu precădere primul strat de aproximativ 10 cm de sol sunt deosebit de importanți, întrucât acesta este mediul în care se dezvoltă viitoarele plante. Temperatura și umiditatea solului se schimbă rapid cu modificările climatice, generând fluxuri intense de energie între atmosferă și sol, cu influențe asupra etapelor de germinare și creștere a sistemului radicular [150]. Totodată, temperatura solului influențează absorbția de nutrienți [151], procesul de fotosinteză, respirația, transpirația, activitatea microbiană, deplasarea solului etc. [152].

Cerințele ce trebuie îndeplinite de acești senzori sunt robustețea (pentru a putea avea o durată de viață semnificativă, considerând că este necesară plasarea lor în sol), acuratețea, compatibilitatea cu platformele de dezvoltare existente ș.a.

4.5.1 Senzorii de temperatură a solului

Temperatura optimă pentru creșterea plantelor este între 20 și 30°C [152]. Senzorii de temperatură a solului pot utiliza termistoare, dispozitive active/materiale semiconductoare, termodetectori în infraroșu, termocupluri sau termocupluri cu mediere [153]. Termistoarele sunt cei mai ieftini senzori de temperatură, dar și cei mai predispuși schimbărilor de caracteristică, fiind totodată greu de calibrat. Cu toate acestea, există probe dezvoltate pe baza acestor componente, cum este cea inclusă în kit-ul LI-COR LI-8100A [154].

Existența senzorilor de temperatură ce folosesc materiale semiconductoare este strâns legată de relația dintre tensiunea bază-emitor a tranzistorului bipolar, V_{BE} și curentul de colector I_C [155] exprimată în Ecuația 4.57.

$$V_{BE}(T) = V_{g0} \left(1 - \frac{T}{T_0} \right) + \frac{T}{T_0} V_{BE}(T_0) - \eta \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_C(T)}{I_C(T_0)} \right) \quad (4.57)$$

unde V_{g0} este o constantă ce reprezintă banda interzisă extrapolată la 0 K, η este o constantă dependentă de proces [156], iar k este constanta lui Boltzmann. Acest tip de senzori este cunoscut pentru acuratețea ridicată și pentru liniaritatea în timpul operării la temperaturi între -55 °C și 150 °C.

În [151], este studiat senzorul de temperatură LM35 [157] și este propusă integrarea acestuia pentru măsurarea temperaturii solului. Circuitul integrat LM35 are cost redus, este fiabil și are o acuratețe de 0,5°C și un domeniu de măsurare între -55 și 150°C. Necesită o tensiune de alimentare cuprinsă între 4 și 30 V (Figura 4.29). Senzorul este analogic, iar tensiunea de ieșire este proporțională cu temperatura în grade Celsius (cu o pantă de 10 mV/°C), fiind calibrat pentru măsurarea în grade Celsius. Față de senzorii calibrați în Kelvin, acest dispozitiv are un avantaj prin faptul că nu mai este necesară scăderea unei componente continue de valoare mare din semnalul de la ieșire pentru a obține valoarea exprimată în grade Celsius [157]. Principiul de funcționare al acestui senzor se bazează pe variația rezistenței cu temperatura. Se consideră că temperatura sensorului variază cu cel mult 0,01°C față de cea a suprafeței pe care este amplasat dacă temperatura aerului este aceeași cu cea a suprafeței. În caz contrar, temperatura sensorului ar fi o temperatură intermediară între temperatura aerului și cea a suprafeței [158]. Un exemplu de senzor de măsurare a temperaturii solului bazat pe termocupluri este senzorul STP01 [159] reprezentat în Figura 4.30. Acest senzor măsoară temperatura la 5 adâncimi diferite, începând de la 0 și până la 0,5 m. Domeniul său de măsurare este (-30 °C, 70 °C) și oferă posibilitatea de autotestare.

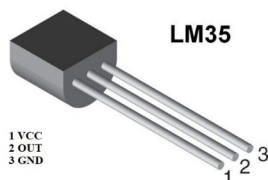


Figura 4.29: Senzorul de temperatură LM35 [160]



Figura 4.30: Senzorul STP01 pentru măsurarea temperaturii solului [159]

Senzorul 5TM [161] (Figura 4.31) este un senzor ce integrează cele două tipuri de măsurători, temperatura și umiditatea solului. Senzorul determină



Figura 4.31: Senzorul 5TM [161]

conținutul volumetric de apă prin măsurarea constantei dielectrice a solului, prin analizarea variației capacității cu frecvența. Acuratețea senzorului este dependentă de minimizarea efectelor texturale și ale salinității, prin posibilitățile de filtrare a semnalului [161]. De asemenea, este disponibilă calibrarea oferită de producători pentru soluri minerale, pentru pământ de ghivece și compost și fibre precum azbest sau perlit [161]. Senzorul este potrivit atât pentru plasarea pe terenurile agricole, cât și în sere. Domeniul de măsurare a temperaturii este $(-40, +60^{\circ}\text{C})$. Pentru a achiziționa datele, este necesar un sistem de colectare a datelor (n.n data logger) Em-50. Senzorul poate comunica serial sau prin interfața SDI-12.

Sonda Sseed (Figura 4.32) de la Digi-Key [162] utilizează senzorul SHT10 [163]. Acesta este un senzor digital, eficient din punctul de vedere al consu-

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

mului de energie și complet calibrat. Pentru măsurarea umidității relative, senzorul utilizează un singur element capacitiv. Temperatura este măsurată prin intermediul unui senzor de temperatură de tip semiconductor. Dispozitivul SHT10 integrează circuite de procesare a semnalului, un convertor analog-digital pe 14 biți și un circuit de interfață serială. Pentru măsurători și aplicații de achiziție de date, există un kit de evaluare EK-H4 ce cuprinde un senzor și patru canale pentru măsurători, hardware și software pentru conectarea la PC [163].



Figura 4.32: Sonda de măsurare a temperaturii și umidității solului Seed [162]

4.5.2 Senzorii de umiditate a solului

Umiditatea solului este cunoscută științific sub numele de conținut volumetric de apă și este exprimată sub formă de procente, fiind egală cu raportul dintre cantitatea de apă și cantitatea de sol [164]. De exemplu, un metru cub de sol cu un conținut volumetric de apă de 25% conține $0,25 \text{ m}^3$ apă. Solurile nisipoase conțin particule mai mari, acestea având o capacitate redusă de retenție a apei. Solurile formate din particule mici, în schimb, vor fi capabile să rețină mai multă apă.

O altă mărime importantă este tensiunea, aceasta arătând cât de multă apă reține solul respectiv și fiind exprimată ca forță pe unitatea de suprafață necesară pentru ca plantele să înlăture apa din sol [164], [165]. Același conținut volumetric de apă va determina o tensiune diferită, în funcție de tipul solului.

În Figura 4.33, este prezentat un exemplu simplu de astfel de senzor, și anume, senzorul de umiditate Sparkfun [166]. Principiul de funcționare al senzorului se fundamentează pe modificarea conductivității solului odată cu modificarea gradului de umiditate din sol. Mărimea care poate fi cuantificată în acest caz este rezistența. Când gradul de umiditate este mare, conductivitatea crește, iar rezistența scade (Ecuația 4.58).

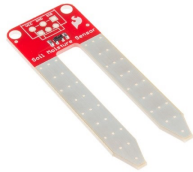


Figura 4.33: Senzorul de umiditate Sparkfun [166]

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (4.58)$$

unde R este rezistența, $\sigma = \frac{1}{\rho}$ este conductivitatea, l și S sunt lungimea și, respectiv, aria secțiunii transversale.

Circuitul sondelor este reprezentat în Figura 4.34. Se poate observa configurația emitor comun a tranzistorului 2N3904.

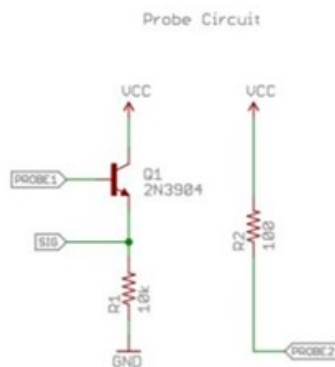


Figura 4.34: Circuitul sondelor de măsurare a umidității solului [167]

Rezistența la capătul probei poate varia între 0 (pentru cazul nerealist de 100% umiditate în sol) și infinit (pentru un sol complet uscat). Variația acestei rezistențe va determina o modificare a tensiunii de polarizare directă ce va conduce, la rândul ei, la o variație a curentului din baza tranzistorului, I_b . Variația curentului din colector (I_c) și, respectiv, emitor (I_e), este direct proporțională cu valoarea curentului din bază (Ecuțiile 4.59 și 4.60).

$$I_c = \beta I_b \quad (4.59)$$

$$I_e = (\beta + 1) I_b \quad (4.60)$$

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Astfel, modificarea curentului din baza tranzistorului va duce la modificarea tensiunii de la pinul SIG, tensiune ce depinde direct proporțional de curentul de emitor (Ecuția 4.61).

$$V_{SIG} = R_1 I_e = R_1 (\beta + 1) I_b \quad (4.61)$$

Deși se menționează că lungimea și spațierea dintre cele două plăcuțe care formează senzorul nu sunt niște variabile semnificative [166], se recomandă ca acestea să fie astfel plasate încât să nu se atingă accidental (la aproximativ 2,5 cm una de cealaltă). Un neajuns este determinat de faptul că este necesar ca senzorul să fie calibrat pentru fiecare tip de sol în parte.

Senzorul de umiditate a solului de la Vernier [168] măsoară conținutul de apă al solului pe baza capacității electrice. Umiditatea solului influențează permitivitatea dielectrică a acestuia, ϵ_r , care, la rândul ei, influențează capacitatea electrică (cf. Ecuției 4.62).

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad (4.62)$$

Domeniul de măsurare a conținutului volumetric de apă este de 0-40 %. În cazul în care se realizează calibrarea, domeniul se extinde la 0-100 %. Acuratețea este, de obicei, $\pm 4\%$, iar rezoluția tipică este de 0.1 %. Senzorul se alimentează la sursă de tensiune continuă de 5 V, cu un curent de alimentare de 3 mA. Temperatura de operare a senzorului este între -40 și 60 grade Celsius.

Senzorii Campbell Scientific CS616, CS650 și CS655 [153] măsoară conținutul volumetric de apă al unui mediu poros (din categoria aceasta făcând parte și solurile). Dintre aceștia, CS616 și CS650 au sonde de lungime $l = 30\text{cm}$, iar CS655 are sonde de lungime mai mică, 12 cm. CS650 și CS655 măsoară, pe lângă conținutul volumetric de apă, temperatura solului, permitivitatea dielectrică, conductivitatea electrică a solului, cu o acuratețe de $\pm 3\%$ și cu precizie a conținutului volumetric de apă mai mică de 0.05%. Senzorii se alimentează la tensiunea de 12 V, însă pentru CS650 și CS655 mai este disponibilă și alimentarea la 6, 12 și 18 V, cu un consum de 80, 45, respectiv 35 mA.

Senzorul ML3 Theta (Figura 4.35) are o acuratețe de 1 %, fiind lider în categoria senzorilor de umiditate a solului [169]. Se alimentează la 5-14 V și necesită un curent de 18 mA.

Senzorul are un răspuns bun la salinitate, putându-se caracteriza până la o conductivitate electrică de 2000 mS/m. Operează temperaturi de până la -40°C și include un senzor de tip termistor pentru măsurarea temperaturii solului. Senzorul poate fi utilizat cu orice data logger care poate furniza o tensiune de alimentare între 5 și 15 V. Sondele sunt din oțel inoxidabil și pot fi schimbate



Figura 4.35: Senzorul ML3 Theta [169]

atunci când sunt uzate sau deteriorate. De asemenea, se pot atășa suplimentar tuburi de extensie de până la 1 m lungime. Ca urmare a răspunsului predictibil la salinitate, acest senzor poate fi utilizat chiar și în soluri foarte salin. De asemenea, utilizarea senzorului se pretează și altor medii decât solul [169].

Senzorul WET [170] (Figura 4.36) poate măsura nu doar conținutul de apă, ci și conductivitatea electrică a porilor (ECp) sau conductivitatea electrică a apei disponibile rădăcinilor plantelor.



Figura 4.36: Senzorul WET [170]

De asemenea, dispozitivul WET integrează și un senzor de temperatură. Senzorul este eficient în condiții artificiale de creștere a plantelor, cum ar fi în sistemele hidroponice sau de fertigare. Senzorul oferă informații rapide despre salinitatea solului, un aspect critic pentru sănătatea culturilor, întrucât gradul ridicat al salinității va reduce producția. Pentru achiziția și stocarea de date, senzorul se poate conecta la Data Logger-ul GP1 sau GP2. Calibra-

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

rea senzorului este asigurată pentru soluri minerale, organice, nisipoase sau argile [170].

Pentru inserarea la adâncime, Delta-T Devices [171] oferă sonda PR2 (Figura 4.37) ce poate fi instalată într-un punct fix sau poate fi folosit ca un dispozitiv portabil. Este disponibilă și cu interfața SDI-12 și se poate conecta la Data Logger precum GP2 sau DL6 [171]. Sunt disponibile două modele, PR2/4 și PR2/6. Primul model poate fi folosit la adâncimi de până la 40 cm, iar cel de-al doilea poate fi utilizat pentru măsurarea umidității la adâncimi de până la 100 cm.



Figura 4.37: Sonda PR2 [171]

4.5.3 Senzori pentru determinarea nutrienților din sol

Sistemul de grădină inteligentă Edyn [172] este adecvat grădinilor sau fermelor organice de mici dimensiuni. Odată inserat în sol, dispozitivul Edyn poate colecta și analiza datele despre condițiile meteo și despre condițiile de sol. Dispozitivul este echipat cu mai mulți senzori care detectează schimbările luminozității, umidității, temperaturii, pH-ului, umidității solului și -una dintre cele mai importante caracteristici- ale conținutului de nutrienți din sol. De asemenea, sistemul este prevăzut cu o aplicație mobilă ce transmite alerte sau sugestii utilizatorului și cu o pompă de apă acționată automat pe baza datelor colectate de senzori. Pentru testare, este generat un semnal electric care se modifică sau este atenuat în funcție de conținutul de apă sau aditivi, precum fertilizatori organici, oxid de calciu sau compost. Sistemul utilizează o bază de date proprie, dar și datele altor utilizatori pentru luarea deciziilor, sistemul având acces la Cloud prin Wi-Fi.

4.5.4 Tensiometre

Dispozitivele de tip tensiometru (Figura 4.38) sunt o alternativă la senzorii de umiditate a solului, acestea măsurând tensiunea generată de apa din sol, indicând efortul pe care îl depun rădăcinile pentru a extrage cantitatea de apă necesară din sol [173]. După cum am menționat anterior, tensiunea din sol este exprimată ca forță pe unitate de suprafață, deci unitatea de măsură a acesteia va fi N/m^2 sau Pa. Deși tensiunea la care se recomandă irigația depinde de tipul de sol, în general, aceasta ia valori între 30 și 50 kPa. Tensiometrele sunt disponibile în multiple dimensiuni, sunt dispozitive de tip „true water potential”, de aceea nu sunt afectate de salinitate și nici nu necesită calibrare.



Figura 4.38: Tensiometru SR Irrrometer [173]

4.6 Fișă de lucru: Întrebări și aplicații

Realizați următoarele activități:

Capitolul 4

.....(Nume,
Prenume)

...../...../..... (ZZ/MM/AA)

Activitatea 4.1. Creați o listă de dispozitive comune care utilizează senzori și descrieți funcționarea fiecăruia.

Activitatea 4.2. Comparați și subliniați diferențele dintre senzori și traductoare. Realizați un tabel cu diferențele și asemănările dintre ele. Puteți folosi Tabel 4.1 ca punct de pornire.

Tabelul 4.1: Comparație între senzori și traductoare

Aspect	Senzori	Traductoare
Definiție		
Funcție		
Exemplu		

Activitatea 4.3. Identificați trei aplicații pentru senzorii direcți și trei aplicații pentru senzorii complecși.

Activitatea 4.4. Explicați diferența dintre senzorii activi și cei pasivi. Dați un exemplu pentru fiecare categorie.

Activitatea 4.5. *Realizați o schemă bloc care ilustrează funcționarea unui senzor complex. Includeți și descrieți fiecare componentă.*



Activitatea 4.6. *Desenați și explicați funcționarea unui senzor activ și a unui senzor pasiv utilizat în detecția mișcării.*

Activitatea 4.7. *Măsurați și analizați datele furnizate de un senzor de umiditate a solului într-un experiment practic. Prezentați grafic rezultatele.*

Activitatea 4.8. *Cercetați și documentați un caz de utilizare a senzorilor în agricultură inteligentă. Includeți beneficiile și provocările utilizării acestora.*

CAPITOLUL 4. NIVELUL DISPOZITIVE: SENZORI

Activitatea 4.9. *Scrieți un raport despre alarmele fals-pozitive și fals-negative în sistemele bazate pe senzori. Propuneți soluții pentru reducerea acestora.*

Activitatea 4.10. *Calculați sensibilitatea unui senzor de temperatură și explicați cum variația acesteia influențează măsurătorile.*

Activitatea 4.11. *Realizați un proiect practic pentru calibrarea unui senzor. Documentați pașii urmați și evaluați acuratețea măsurătorilor obținute.*

Activitatea 4.12. *Discutați despre importanța fiabilității senzorilor în aplicații critice și non-critice. Dați exemple de astfel de aplicații.*

Activitatea 4.13. *Analizați caracteristicile unui senzor specificat în fișa tehnică și discutați cum influențează acestea performanța în aplicațiile practice.*

Capitolul 5

NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

Obiective:

O5.1 Să se definească și să se explice conceptul de sistem de calcul și componentele sale.

O5.2 Să se compare diferitele tipuri de memorii (cache, principală, secundară) și rolurile acestora în sistemele de calcul.

O5.3 Să se analizeze rolurile și funcționalitățile porturilor de intrare și ieșire într-un sistem de calcul.

O5.4 Să se clasifice sistemele de calcul în funcție de scopul lor (uz general vs. uz specific).

O5.5 Să se compare microcontrolerele și microprocesoarele și să se identifice aplicațiile specifice fiecărui tip, avantajele și dezavantajele lor.

O5.6 Să se descrie interfețele de comunicații (serială, SPI, I2C, I2S) și aplicabilitatea lor în sisteme embedded.

O5.7 Să se explice principiile și etapele conversiei analog-numerică (CAN) și specificațiile convertoarelor utilizate în ESP32.

Cuvinte cheie: Sisteme de calcul, componente hardware, CPU, memorie cache, memorie principală, RAM, memorie secundară, porturi de intrare și ieșire, UART, I2C, I2S, SPI, CAN

Cuprins:

5.1 Sisteme de calcul

5.2 Interfețe de comunicații

5.3 Conversia analog-numerică

5.4 Aplicații

5.1 Sisteme de calcul

Înainte de a oferi o definiție, secțiunea debutează cu trei întrebări de cultură electronică.

1. Ce cântărea 30 de tone, era lung de 33 m, consuma 150 KW și costa 500.000 USD?

Răspuns: Sistemul integrator și calculator numeric electronic (en. Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC), în 1946. Acesta cântărea 30 t și era format din 18 000 tuburi [174].

2. Ce cântărea 56 de grame, avea o putere de calcul de 17 ori mai mare decât ENIAC și a călătorit în spațiul interstelar?

Răspuns: Unitatea centrală de procesare Intel 4004 pe 4 biți, dezvoltat în 1970 [175].

3. Ce au în comun aceste sisteme?

Răspuns: Ambele au în comun conceptul de sistem de calcul.

Ce este, așadar, un sistem de calcul? Un sistem de calcul este un ansamblu hardware-software destinat preluării (colectării), stocării, prelucrării (procesării) și transmiterii datelor [176]. Figura 5.1 prezintă principalele componente ale unui astfel de sistem de calcul.

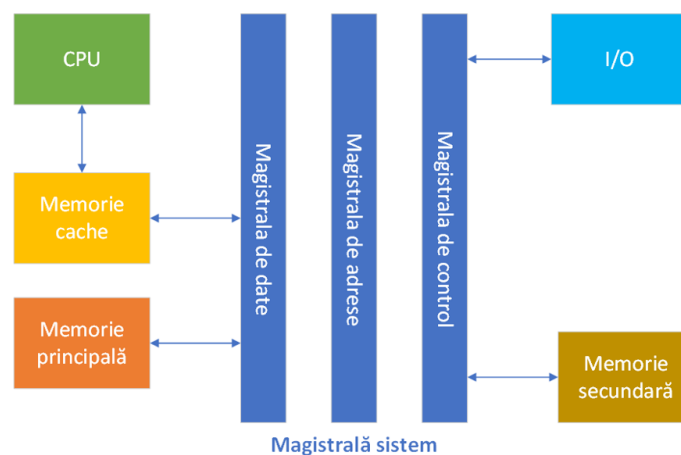


Figura 5.1: Componentele principale ale unui sistem de calcul

INTERNET OF THINGS: DISPOZITIVE ȘI TEHNOLOGII DE COMUNICAȚII

- Unitatea Centrală de Prelucrare (en. Central Processing Unit, CPU), Aceasta are rol în controlul și manipularea datelor.
- Memoria cache. Este o locație temporară de stocare a datelor pentru a avea acces mai rapid la aceste date.
- Memoria principală. Permite stocarea unor cantități mici de date și instrucțiuni. Nu permite stocarea datelor în absența alimentării, fiind o memorie volatilă pe care unitatea centrală de prelucrare o accesează aleatoriu, de unde și numele de memorie cu acces aleatoriu (en. Random Access Memory, RAM).
- Memoria secundară. Permite stocarea unor cantități de date incomparabil mai mari decât memoria principală. Tot la acest nivel sunt stocate programele pe termen lung, fiind o memorie ce permite stocare de date și în absența alimentării (stocare persistentă și permanentă). Timpul de acces este mai mare decât în cazul memoriei principale.
- Porturile de intrare și de ieșire. Formează un sistem de module funcționale care acționează ca o interfață între dispozitivele externe și CPU. Permit, de asemenea, schimbul de date între CPU, memorie și dispozitivele externe.
- Magistrala de sistem. Este un subsistem care asigură conectivitatea între componentele principale ale sistemului de calcul. Aceasta este compusă din alte trei magistrale care servesc unor scopuri diferite:
 1. Magistrala de date. Aceasta are rolul de a transfera date între componentele de bază ale sistemului de calcul.
 2. Magistrala de adrese. Aceasta este responsabilă de transportul și indicarea adresei de memorie sau a adresei de pe magistrala de sistem utilizate în transferul de date.
 3. Magistrala de control. Conține comenzi și informație de stare și controlează accesul la date. În plus, controlează generarea adreselor [177, 178].

Sistemele de calcul pot fi clasificate după mai multe criterii: scop, dimensiune, performanță, arhitectură etc. În această secțiune, se va evidenția clasificarea lor în funcție de scop. Astfel, sistemele de calcul pot fi de uz general sau de uz specific. Acestea din urmă poartă denumirea de sisteme încorporate (embedded systems), dar termenul „sistem embedded” a fost și el adoptat pe scară largă în jargonul tehnic [179]. În următoarele secțiuni, se va folosi acest

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

ultim termen pentru a face referire la sistemele de uz specific. În Tabelul 5.1, sunt prezentate câteva exemple de sisteme de uz general și embedded.

Tabelul 5.1: Exemple de echipamente care folosesc sisteme de calcul de uz general și de uz specific [180, 181]

Sisteme embedded	Sisteme de uz general
imprimante, camere video, frigider, televizoare, semafoare, televizoare HD, automobile (ABS, Sisteme de control și navigație, Sisteme de diagnoză și alarmă, control uși/geamuri, sisteme pentru siguranța pasagerilor)	computere personale, laptopuri, tablete, telefoane inteligente, console de jocuri.

În Tabelul 5.2, s-au evidențiat diferențele dintre sistemele embedded și cele de uz general.

Tabelul 5.2: Comparație între sistemele de calcul de uz general și cele embedded [182–184]

Criteriu	Sisteme de uz general	Sisteme embedded
Aplicații	Clasă largă de aplicații	Una sau mai multe aplicații (în funcție de scopul pentru care au fost proiectate)
Sistem de operare	Sofisticat	Poate lipsi
Flexibilitate	Ridicată	Scăzută
Complexitate de proiectare	Ridicată	Medie
Necesară reducerea complexității codului?	Nu	Da
Constrângeri legate de consumul de energie	Nu	Da
Necesară predictibilitatea performanței în timp real?	Nu	Da
Sarcini dedicate	Mai multe	1

În Tabelul 5.3 sunt prezentate avantajele și dezavantajele sistemelor embedded.

Tabelul 5.3: Avantaje și dezavantaje ale sistemelor embedded [182, 183]

Avantaje	Dezavantaje
Ușor de administrat (puține conexiuni) Dimensiuni și costuri reduse Nu este necesar pentru utilizatorul final să acceseze fizic sistemul embedded Potrivite pentru producția de masă Fiabile Optimizează consumul de resurse	Difícil de întreținut (use and throw) Fără îmbunătățiri tehnologice Backup dificil al fișierelor embedded

Pentru implementarea sistemelor embedded există mai multe soluții tehnice bazate pe: microprocesoare, microcontrolere, sisteme în pachet, sisteme pe chip, procesoare digitale de semnal.

Pentru începătorii în domeniu, însă, este necesar să se prezinte comparativ diferitele tipuri de sisteme embedded (Tabelul 5.4).

Tabelul 5.4: Tipuri de sisteme embedded [183–185]

μ computer	CPU	μ P	μ C	SoC	SBC	SiP
Microprocesor cu memorie și I/O.	un procesor/chip Necesită alte componente (memorie, I/O)	Procesoare embedded: μ P proiectate pentru sarcinile unui sistem embedded. Necesită memorie externă, periferice și alte componente pentru a funcționa.	Are toate componentele necesare să realizeze o sarcină (memorie, registre, porturi I/O). Poate realiza o singură sarcină. Pot fi componente ale unui SoC.	Minicomputer pe un singur chip capabil să realizeze toată sarcina de calcul. Flexibilitate limitată. Capabil să funcționeze cu un sistem de operare. Mai multe funcții decât μ C.	Computer în care microprocesorul, funcțiile I/O, memoria și perifericele sunt pe aceeași placă printată.	Integrarea tuturor componentelor necesare într-un singur pachet compact. Performanță optimizată prin reducerea latenței și a consumului de energie.

În secțiunile următoare se vor aborda doar microcontrolerele.

5.1.1 Microcontrolere

Microcontrolerul este un sistem de calcul integrat pe un singur circuit bazat pe un procesor, memorie, porturi de intrare și ieșire și multe alte componente. Acesta este un sistem ce implică costuri reduse, fiind proiectat să execute un program la infinit. Este destinat aplicațiilor embedded, iar microprocesorul său, componenta cheie, este dinamic și foarte simplificat [186, 187].

Componentele unui microcontroler sunt ilustrate în Figura 5.2.

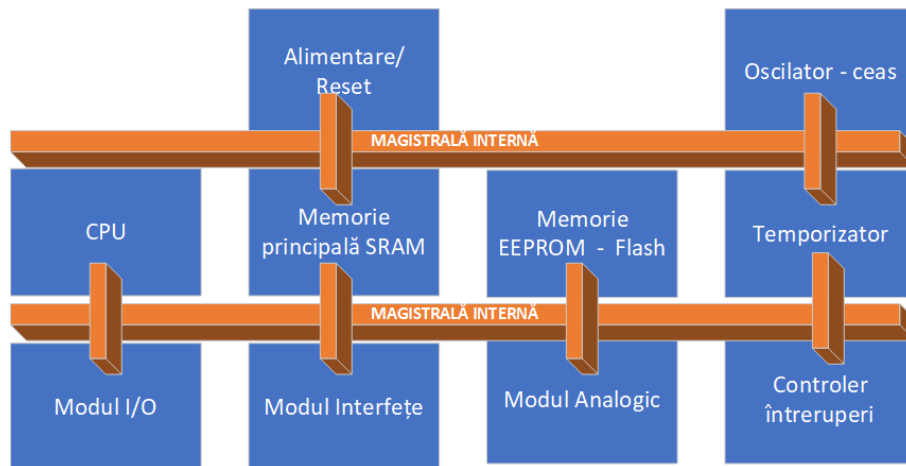


Figura 5.2: Componentele unui microcontroler

CPU

Unitatea centrală de prelucrare preia, decodează și execută instrucțiuni. De asemenea, generează semnalele de control pentru gestionarea componentelor hardware. În plus, este responsabil de mutarea datelor în interiorul sistemului. Aceasta include unitățile de memorie internă (registrele), decodorul, acumulatorul, numărătorul de program și cea mai importantă componentă, unitatea logică aritmetică [186, 187].

Memoria principală SRAM

Memoria principală cu acces aleatoriu de tip static (volatilă). Memoria SRAM este o memorie volatilă care stochează date și oferă acces rapid pe perioada cât există alimentare [188].

Memoria EEPROM/Flash

Memoria EEPROM este o memorie read-only, non-volatilă, relativ scumpă, care poate fi programată și ștearsă pe baza generării unor tensiuni (en. Elec-

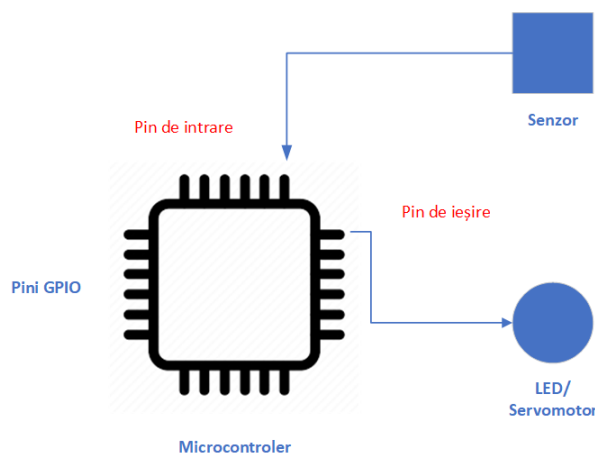


Figura 5.3: Pini intrare vs. ieșire.

trically Erasable and Programmable ROM), suportând aproximativ 100 000 cicluri de ștergere-programare. Ștergerea este posibilă per locație (adresă). Este de preferat ca această memorie să fie utilizată pentru stocarea pe termen lung a unor parametri, în detrimentul programării repetate. Memoria Flash este tot o memorie non-volatilă, dar mai ieftină. Spre deosebire de EEPROM, ștergerea se face în blocuri sau chiar per memorie întreagă. Pentru că nu se pot șterge datele octet cu octet, de exemplu, memoria Flash nu este potrivită pentru stocarea de date, ci doar a programului [189–191].

Modul intrare-ieșire

Acesta cuprinde pinii digitali sau analogici ale căror stări sau tensiuni pot fi determinate sau setate prin software [192]. La acești pini se pot conecta senzori (pini de intrare), LED-uri, servomotoare (pini de ieșire). Diferențele dintre pinii de intrare și cei de ieșire sunt ilustrate în Figura 5.3. Este valabil faptul că tensiunea de ieșire a senzorului (dependentă de stimulul non-electric aplicat pe elementele sensibile) este aplicată la un pin de intrare al microcontrolerului. În schimb, un LED sau servomotor este conectat la un pin de ieșire întrucât microcontrolerul este responsabil de generarea unei tensiuni care să comande aceste actuatoare. Diferența dintre un pin analogic și unul digital constă în existența unui convertor analog-digital și în posibilitatea de interpretare a tensiunilor aplicate pe acești pini pe baza nivelurilor de tensiune [193].

Oscilator-ceas

Sursa de sincronizare (ceas) este foarte importantă într-un microcontroler, toate operațiile interne depinzând de aceasta. Această sursă generează semnalele

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

de ceas (sincronizare) pe baza cărora se realizează controlul operațiilor și al componentelor. Poate fi de două tipuri: sursă bazată pe dispozitive mecanice rezonante sau sursă bazată pe oscilatoare RC. Cele mai multe microcontro- lere utilizează oscilatoarele RC, de performanțe mai scăzute, dar preferate de proiectanți. Acestea, însă, pot acumula erori în timp [192].

Alimentare/Reset

Sursa de alimentare a unui microcontroler reprezintă un dispozitiv (sursă de tensiune, adaptor extern) sau o baterie care poate genera o tensiune stabilă necesară alimentării circuitelor microcontrolerului.

Modul analogic

Acesta cuprinde convertoarele analog-digitale care pot avea diferite rezoluții și un anumit număr de canale. Conversia analog-digitală sau analog-numerică și aspecte legate de aceasta, precum rezoluția, vor fi abordate pe larg în Secțiunea 5.3. Numărul de canale al unui convertor se referă la numărul de canale al unui multiplexor. Reamintim că multiplexorul cu N canale este un circuit care are rolul de a selecta unul din cele N semnale aflate la intrarea sa. Astfel, un convertor cu N canale va putea gestiona N semnale, dar nu simultan, ci prin selecție.

Modul interfețe

Interfețele sunt componente ale microcontrolerelor prin care un sistem embe- dded poate comunica cu lumea exterioară. Pentru a defini complet o interfață, este necesară definirea specificațiilor pentru schimbul de date, conexiunilor electrice și protocoalelor de comunicație [194]. Fiecare microcontroler are propriile interfețe. Tipurile de interfețe vor fi discutate pe larg în Secțiunea 5.2.

Temporizatoare

Acestea reprezintă unele dintre cele mai importante caracteristici în microcon- trolerele moderne. Mai sunt denumite și numărătoare. Ele permit:

- măsurarea duratei execuției unui proces
- crearea de cod non-blocant cu întârzieri;
- controlul cu precizie al temporizării pinilor;
- rularea de sisteme de operare;
- implementarea modulației pulsurilor în lățime (en. Pulse Width Modu- lation, PWM) [195, 196].

Temporizatoarele sunt circuite hardware care au funcție de numărare (crescător/descrescător). De exemplu, un temporizator (numărător) pe 8 biți numără de la 0 la 255 (256 „bătăi”, revenirea de la 255 la 0 contează ca o „bătaie”). Acestea sunt resetate, apoi, la 0 când se atinge valoarea maximă [197, 198].

Se adresează întrebarea: **Cât de repede poate număra un temporizator?**

Răspuns: Intervalul dintre două „bătăi” (tick) depinde de frecvența de ceas. Temporizatoarele din MCU sunt conectate la ceasul unității CPU. Temporizatoarele din ceasurile în timp real (RTC), însă, au propriul ceas.

Exemplu: Fie un microcontroler cu frecvența de ceas $F = 80 \text{ MHz}$.

$$\text{Perioada de ceas} = \frac{1}{F} = \frac{1}{80 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 0,0125 \mu\text{s}$$

Dacă avem un temporizator pe 16 b, atunci el va număra 65 536 de bătăi în intervalul 0 - 65 535.

$$\Rightarrow 0.0125 \mu\text{s} \times 65\,536 = 819,2 \mu\text{s} \text{ este durata unui ciclu complet de numărare}$$

Problemă: Nu putem determina durate ale evenimentelor mai mari decât $819,2 \mu\text{s}$. De aceea, un concept foarte util este cel de predivizor (Figura 5.4). Acesta este tot un circuit de numărare cu rol de reducere a frecvenței de ceas.

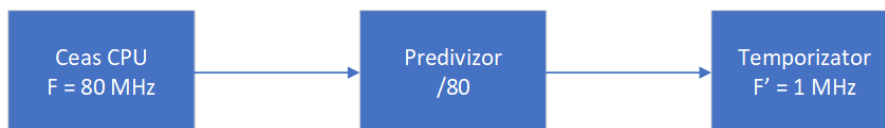


Figura 5.4: Predivizarea

Având un predivizor cu factorul de predivizare $M = 80$, frecvența de ceas devine $\frac{F}{M} = \frac{80 \text{ MHz}}{80} = 1 \text{ MHz}$.

$$\text{Perioada de ceas devine } T_{CLK} = \frac{1}{10^6 \text{ Hz}} = 1 \mu\text{s}$$

Având același temporizator pe 16 b, obținem:

$$0-65\,535 \Rightarrow 1 \mu\text{s} \times 65\,536 = 65\,536 \mu\text{s} \text{ durata unui ciclu complet de numărare}$$

Putem determina, deci, durate ale evenimentelor $\leq 65,536 \text{ ms}$.

Un predivizor pe N biți va putea diviza frecvența de ceas cu un număr cuprins între 1 și 2^N .

Controler întreruperi

Întreruperile sunt semnale care spun microcontrolerului să oprească ceea ce execută la momentul întreruperii și să execute o funcție specifică, numită rutină de serviciu a întreruperilor (ISR). Întreruperile pot fi declanșate de diverse surse: butoane, senzori, comunicații seriale sau alte periferice.

Exemplu de utilizare: Se presupune că se monitorizează o intrare GPIO și că este necesar să existe un răspuns rapid, în câteva microsecunde, la activarea acesteia (pentru comparație: nu zeci de milisecunde ca în cazul apăsării unui buton). Programul microcontrolerului poate fi în orice punct al execuției sale când această intrare devine activă. Este necesară monitorizarea acestui semnal nu de o sută de ori pe secundă, ci de sute de mii de ori pe secundă, în timp ce sunt executate și alte instrucțiuni necesare în program.

Întrebare: Cum putem răspunde atât de rapid și totuși să avem timp să facem alte lucruri în programul nostru?

Răspuns: Cu ajutorul întreruperilor.

Pașii parcurși pentru generarea unei întreruperi sunt:

1. CPU-ul memorează locația următoarei instrucțiuni pe care urma să o execute și stochează adresa acelei instrucțiuni într-un registru (link register) sau locație de memorie. Salvarea într-un registru de legătură este, totuși, mai rapidă. Mutările între registre sunt întotdeauna mai rapide decât mutările din registru în memorie. Dacă este necesar un alt nivel de întreruperi (sau subrutine), se salvează registrul de legătură în memorie prin codul utilizatorului.

2. CPU execută direct codul desemnat de programator pentru acea întrerupere specifică. Apoi, CPU salvează adresa următoarei instrucțiuni, dar și registrul de stare. În plus, dezactivează alte întreruperi și șterge automat cererea de întrerupere care a declanșat intrarea în ISR pentru a evita intrarea de mai multe ori în ISR.

În Tabelul 5.5 sunt prezentate comparativ microcontrolerele și microprocesoarele.

În continuare, se va face referire la un microcontroler foarte utilizat în aplicațiile IoT și anume, ESP32, care se regăsește pe plăci de dezvoltare precum DEVKIT-C v4. Întrucât cartea nu este dedicată unui microcontroler anume, pentru o prezentare detaliată a acestei plăci de dezvoltare cu microcontroler, cititorul este invitat să consulte pagina producătorului [199].

Tabelul 5.5: Comparație între uCs și uPs [200–202]

uCs	uPs
<ul style="list-style-type: none"> • Unități de sine stătătoare cu CPU sau uP simplu • Utilizate pentru o aplicație specifică, pre-programată • Performanță redusă • Consum energetic redus • Capacitate de stocare redusă • Nu pot funcționa în afara scopului pentru care au fost programate • Execută un set de instrucțiuni (task) repetitive 	<ul style="list-style-type: none"> • Mai complexe și mai versatile ca funcții • Utilizate pentru aplicații de calcul mai generale • Viteze mai mari (frecvență ceas mai mare, de ordinul GHz, comparativ cu Hz) • Implică numeroase provocări de proiectare și manufacturare • Necesită componente externe (RAM, porturi I/O, stocare) pentru a funcționa (cumpărate și conectate separat) • Consum energetic ridicat • Ineficiente pentru funcționarea continuă

5.2 Interfețe de comunicații

5.2.1 Interfața serială

Comunicația serială între două dispozitive care posedă această interfață este posibilă prin intermediul celor doi pini dedicați sau asigurați ai fiecărui dispozitiv. În cazul ESP32, aceștia sunt TXD și RXD care trebuie conectați astfel: TXD1-RXD2, TXD2-RXD1 (Figura 5.5).

Un pachet de date astfel transmis este ilustrat în Figura 5.6. Acesta este format din biți de start, bit de stop (obligatorii), bit de paritate (opțional) și biți de date. Într-un cadru serial, poate fi un bit de start, unul sau doi biți de stop, iar când se folosește un bit de paritate, atunci numărul biților de date poate fi între 5 și 8 (în funcție de interfață). Configurația transmițătorului și a receptorului privind acest număr de biți și rata de transmisie trebuie să fie identice.

Când nu este folosit bitul de paritate, numărul biților de date poate crește la 9. Primul bit transmis este cel mai nesemnificativ bit (en. Least Significant

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

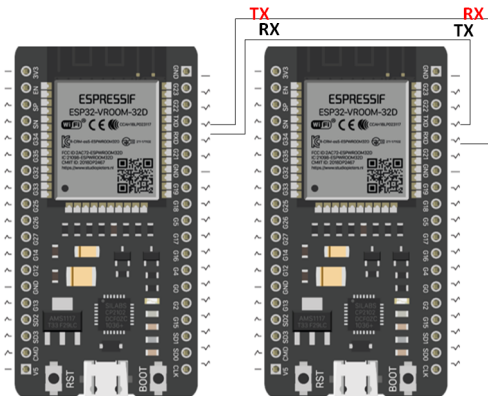


Figura 5.5: Conectarea serială a două plăci de dezvoltare DEVKIT-C v4

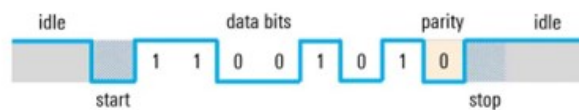


Figura 5.6: Pachet de date în transmisia serială [203]

Bit, LSB). Rolul bitului de paritate rezidă în detecția de erori. Aceste erori presupun modificarea accidentală a unor biți și se pot produce din multiple motive, precum:

- radiație electromagnetică;
- rate de transfer diferite;
- transfer pe distanțe lungi.

Comunicația prin intermediul interfeței seriale cuprinde trei pași (Figura 5.7):

- Pasul 1: La nivelul transmițătorului (TXD), pe lângă biții de date, se adaugă bitul de start, bitul de stop, bitul de paritate (opțional, pentru detecția de erori) și are loc o conversie paralel – serie a datelor.
- Pasul 2: Se transmit serial cadrele de date către receptor (RXD).
- Pasul 3: La nivelul receptorului (RXD) se detectează bitul de start și se citesc datele cu o rată de transfer (denumită baud rate și exprimată în biți pe secundă, bps), făcându-se o conversie serie – paralel a datelor. La detecția bitului de stop, se opresc transferul și conversia [204].

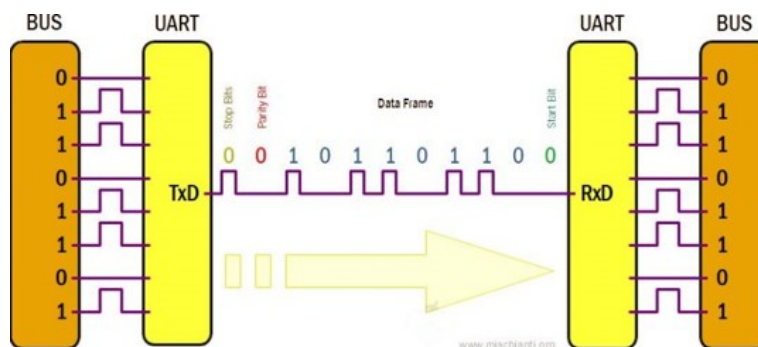


Figura 5.7: Pașii comunicației seriale [204]

Este necesar ca atât transmițătorul, cât și receptorul să aibă aceeași rată de transfer. Este permisă, totuși, o diferență de cel mult 10%. În plus, atât la recepție, cât și la emisie este necesară definirea aceleiași structuri de pachet.

Fluxul transmisiei presupune ca, în momentul în care începe transferul de date, să aibă loc o tranziție de la nivel logic 1 la nivel logic 0 pentru o perioadă de ceas, iar în momentele în care nu se transmite nimic pe interfață, nivelul logic al semnalului să fie 1 (Figura 5.6).

În cazul acestei interfețe, transmisia este asincronă, neexistând un semnal de sincronizare. În loc de semnal de sincronizare, receptorul preia și identifică biți de start și biți de stop, aceștia constituind începutul și sfârșitul pachetului transmis.

5.2.2 Interfața serială periferică (SPI)

Interfața serială periferică (en. Serial Peripheral Interface, SPI) este o interfață sincronă, disponibilă în mod full-duplex, ceea ce permite transmisia simultană în ambele direcții, de la dispozitivul master către cel slave și invers, arhitectura fiind de tip master-slave. Interfața SPI permite existența unui singur dispozitiv master care poate controla mai multe dispozitive de tip slave. În plus, interfața se bazează pe conectarea a patru pini (Figura 5.8) cu următoarea semnificație:

- pinul MOSI (Master Output Slave Input);
- pinul MISO (Master Input Slave Output);
- pinul SCLK (Semnal de sincronizare);
- pinul CS (Selecție dispozitiv slave) [205].

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

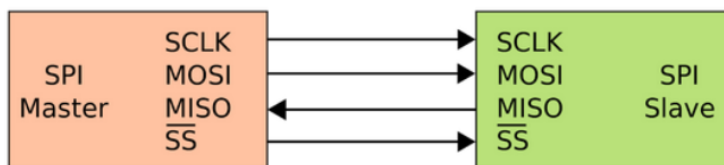


Figura 5.8: Conectarea dispozitivului master și a celui slave în comunicația SPI [205]

Comunicația SPI se bazează pe tranzații, adică pe instanțe ale dispozitivului de tip master prin care se declară o linie de selecție a dispozitivului slave, se transferă date către și de la dispozitiv și se eliberează respectiva linie. Tranzațiile SPI sunt atomice: nu pot fi întrerupte de alte tranzații.

Dispozitivul slave se selectează prin transmiterea de către master a unui semnal cu nivel logic 0 către dispozitivul dorit. Pentru celelalte dispozitive slave, se va menține semnalul în nivel logic 1. Semnalele MOSI, MISO, SCLK sunt partajate de toate dispozitivele slave (Figura 5.9). Astfel, magistrala SPI se constituie din liniile MOSI, MISO, SCLK și una sau mai multe linii CS [205].

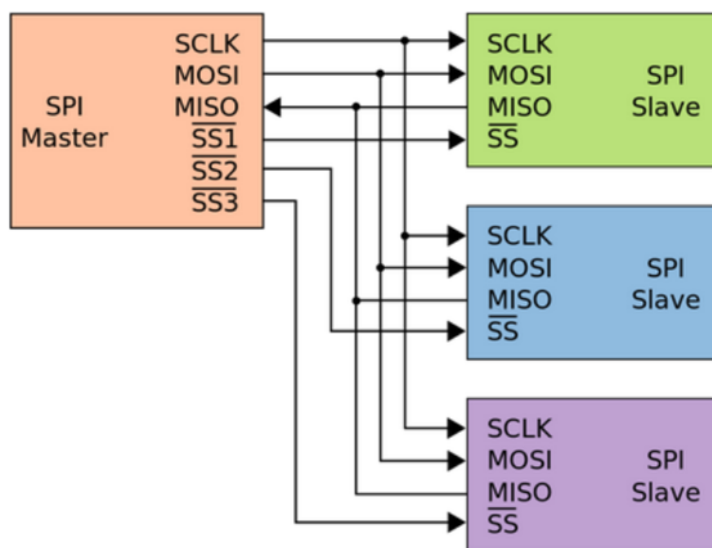


Figura 5.9: Conectarea dispozitivului master și a mai multor dispozitive slave în comunicația SPI [205]

Frecvența dispozitivului master poate fi mai mică sau egală decât frecvența dispozitivului slave, iar transmisia se bazează pe două registre de deplasare,

unul la nivelul dispozitivului de tip master, iar altul la nivelul dispozitivului de tip slave (Figura 5.10).

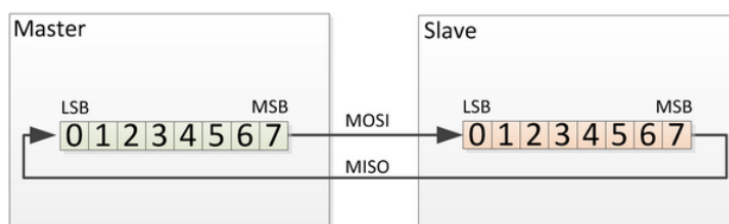


Figura 5.10: Registrele pentru comunicația SPI [205]

În comunicația SPI, pe liniile MISO/MOSI se mută prima dată bitul cel mai semnificativ (Most Significant Bit, MSB). Fiecare bit nou este adăugat pe poziția bitului celui mai nesemnificativ al registrului. Transmisia fiecărui cadru se realizează prin deplasarea registrelor, dispozitivele master și slave făcând schimbul de valori existente în cele două registre de deplasare. Procesul se reia în cazul în care mai este necesară transmisia de date. În caz contrar, se întrerupe semnalul de ceas pe care îl generează dispozitivul Master, iar acesta din urmă va comanda nivelul logic 1 pentru semnalul de selecție a dispozitivului (CS) către care s-au transferat date (slave). Se poate selecta un singur dispozitiv slave la un moment dat de timp, iar dispozitivele slave pentru care nivelul logic CS este 1 ignoră semnalul CS și semnalul MOSI. În acest mod, dispozitivele slave neselectate nu vor putea genera date pe linia MISO.

La nivelul ESP32, sunt disponibile patru periferice SPI:

- SPI0, SPI1: utilizate intern pentru acces la memoria flash;
- SPI2, SPI3: accesibile utilizatorilor ESP32 (3 linii CS pentru 3 dispozitive slave) [205–207].

5.2.3 Interfața inter-circuite integrate (I2C)

Interfața inter-circuite integrate (en. Inter-Integrated Circuits, I^2C) a fost dezvoltată în 1982 de Philips și presupunea adresarea pe 7 biți, permițând conectarea unui număr de dispozitive periferice limitat la 112, cu o frecvență de 100 kHz. În anul 1995 a fost lansată o primă specificație publică cu adrese pe 10 biți, ceea ce a dus la creșterea numărului de dispozitive periferice ce puteau fi conectate la 1008, frecvența crescând și ea la 400 kHz. Între timp, au fost lansate alte trei moduri, pe următoarele frecvențe: 1 MHz (modul rapid,

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

fast), 3.4 MHz (modul de mare viteză, high-speed), 5 MHz (modul ultra-rapid, ultra-fast) [208, 209].

I^2C nu este doar o interfață, ci definește și un protocol ce permite comunicația dintre mai multe periferice digitale, fiind recomandat doar pe distanțe scurte, similar cu SPI. La fel ca și UART, necesită doar două fire pentru schimbul de date. Spre deosebire de SPI, implementarea hardware și software este mai complexă, SPI bazându-se pe registre de deplasare, dar este mai facilă decât în cazul UART. Această interfață reușește, însă, să elimine dezavantajele UART, cum sunt problemele legate de rata de transmisie diferită, surplusul de date (bit de stop, paritate etc.) care determină o rată de transmisie scăzută, dar și constrângerea legată de numărul de dispozitive care pot comunica simultan. În plus, interfața I^2C elimină limitările SPI, cum sunt numărul de pini necesari și constrângerea de a avea un singur controler, deoarece permite comunicația cu mai multe controlere [207]. Pentru ratele de transmisie ale celor trei interfețe, se respectă relația din Ecuația 5.1.

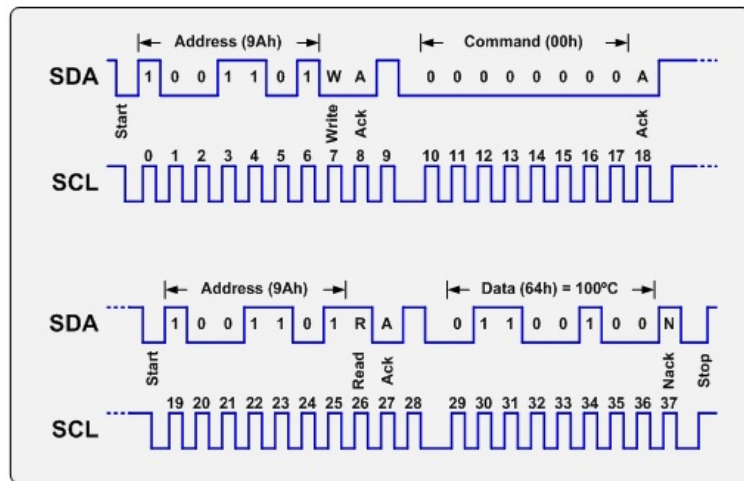
$$R_{UART} (230400 \text{ bps}) < R_{I^2C} < R_{SPI} (10 \text{ Mbps}) \quad (5.1)$$

În comunicația I^2C , dispozitivul master este denumit controler, iar dispozitivul slave este denumit periferic, existând două tipuri de cadre (Figura 5.11):

1. un cadru de adrese, unde controlerul indică perifericul la care este trimis mesajul;
2. unul sau mai multe cadre de date pe 8 biți transmise de la controler la periferic sau invers.

Condiția de start este îndeplinită dacă nivelul logic al semnalului SDA devine 0 înaintea celui al semnalului de sincronizare. Într-o secvență de comunicații I2C, adresa este prima, fiecare dispozitiv I^2C având o astfel de adresă. Bitul W transmis după cadrul de adrese arată dacă la nivelul controlerului se cer (nivel logic 1) sau se transmit date (nivel logic 0). Pentru fiecare 8 biți de date, un bit suplimentar este necesar pentru semnalizarea ACK/NACK, în cazul procesării cererii sau, din contră, al lipsei de răspuns din partea perifericului. După cei 8 b de date, dispozitivul de recepție trebuie să aducă linia SDA în nivel logic 0 înainte de al 9-lea puls de ceas. Transmisia cadrelor se finalizează atunci când nivelul logic al semnalului SDA devine 1 înaintea semnalului de sincronizare.

Datele sunt plasate pe linia SDA după ce SCL ajunge la nivel logic 0 și sunt eșantionate după ce linia SCL ajunge la nivel logic 1. Dacă sunt mai

Figura 5.11: Protocolul I^2C [210]

multe controlere, cel care determină primul SDA să ajungă în nivel logic 0 va prelua controlul.

La nivelul ESP32, pinii GPIO pentru linia SDA și linia SCL sunt 21 și, respectiv, 22.

5.2.4 Interfața Inter-integrated Circuit Sound (I^2S)

I^2S definește o interfață și un protocol de comunicație serial, sincron utilizat pentru transmiterea datelor audio între două dispozitive audio digitale.

O magistrală I^2S este formată din următoarele trei linii (Figura 5.12):

- linia de semnal de ceas (SCK);
- linia de selecție a canalului (Word Select, WS);

Dacă $WS = 0$, Canalul 1 (canalul stâng) este utilizat. Altfel, dacă $WS = 1$, atunci Canalul 2 (canalul din dreapta) este utilizat.

- Linie de date seriale (SD).

MSB este transmis primul, ceea ce este util atunci când lungimile cadrelor (Word Length, WL) sunt diferite. Astfel, dacă lungimea cadrului receptorului (WL_{RX}) este mai mare decât lungimea cadrului transmițătorului (WL_{TX}), atunci cuvântul este trunchiat, iar biții de date cel mai puțin semnificativi sunt setați la 0. Dacă $WL_{RX} < WL_{TX}$, biții după LSB sunt ignorați.

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

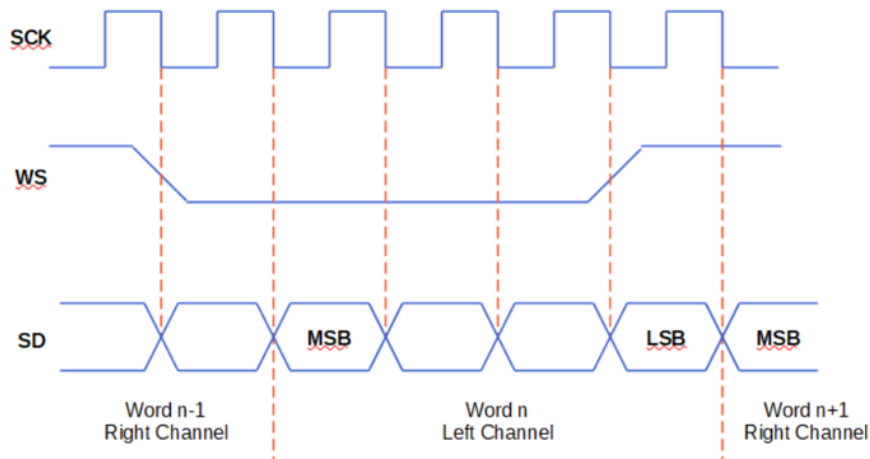


Figura 5.12: Protocolul I²S [211]

Datele sunt transmise pe front scăzător. Linia WS se schimbă cu un ciclu de ceas înainte ca MSB să fie transmis, astfel că receptorul are timp să stocheze cuvântul anterior (word) și să șteargă registrul de intrare pentru cuvântul următor. MSB este trimis atunci când SCK se schimbă după modificările WS.

Fiecare controler I²S are mai multe caracteristici care pot fi configurate folosind driverul I²S. Astfel, acestea pot funcționa ca master sau slave și pot fi capabile să acționeze ca emițător sau receptor. În plus, există un controler Direct Access Media (DMA) ce permite accesul direct la memorie care permite transmiterea fluxurilor de date fără a fi necesar ca procesorul să copieze fiecare eșantion de date.

Mai mult, orice controler I²S poate funcționa în modul de comunicații semi-duplex. Astfel, dacă se combină două controlere, se poate stabili o comunicație full-duplex.

ESP32 conține două periferice I²S ce pot fi configurate pentru a avea la intrare și ieșire eșantioane de date prin driverul I²S. Există următoarea posibilitate de conectare:

- Serial Clock (SCK) = GPIO26
- Word Select (WS) = GPIO25
- Serial Data (SD) = GPIO33

Exemplu:

Fie un semnal audio cu frecvența de eșantionare $f_S = 44,1$ kHz, cu $n_c = 2$ canale, pentru fiecare canal alocându-se $n_b = 16$ biți. Să se determine frecvența semnalului de ceas f_{SCK} necesar transmisiei I²S a acestui semnal audio.

Rezolvare:

Semnalul de ceas serial are frecvența $f_{SCK} = f_S \cdot n_c \cdot n_b = 44,1 \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 16 \text{ b/canal} \cdot 2 \text{ canale} = 1,411 \cdot 10^6 \text{ bps} = 1,411 \text{ Mbs}$, unde pentru rata de transmisie se consideră că $1 \text{ Mb} = 10^6 \text{ b}$.

5.3 Conversia analog-numerică

5.3.1 Principiul conversiei CAN

Conversia analog-numerică (Analog-to-digital conversion, ADC, în limba engleză) este utilă pentru a converti un semnal analogic (de exemplu, o tensiune) într-un semnal digital care poate fi interpretat de un microcontroler [212, 213].

Semnalele analogice reprezintă o funcție continuă de timp, $x(t)$. Semnalul digital, însă, este o secvență de valori discrete $\{0, 1\}$. Un microcontroler nu poate interpreta decât semnale digitale, adică niveluri de tensiune care depind de un parametru al convertorului analog-numeric, numit rezoluție, ce va fi explicat în continuare.

Conversia analog-numerică implică trei etape: eșantionarea, cuantizarea și codarea.

În etapa de eșantionare, pe baza unui parametru numit perioadă de eșantionare și notat cu T_s , se preiau din semnalul analogic doar acele valori care corespund multiplilor de perioadă de eșantionare, adică valorile care îndeplinesc condiția $x(kT_s)$, unde $k = 1, 2, \dots$, numite în continuare eșantioane. În Figura 5.13, este reprezentat un semnal analogic (sinusoidal) cu perioada $T = 1$ s (deci, cu frecvența $f = 1$ Hz), eșantionat cu perioada $T_s = 0.05$ s. Pe lângă perioada de eșantionare, se mai folosește și noțiunea de frecvență de eșantionare, aceasta fiind inversa perioadei de eșantionare: $f_s = \frac{1}{T_s}$.

Pentru ca semnalul eșantionat să poată cuprinde informația conținută într-un semnal continuu, frecvența de eșantionare trebuie să fie cel puțin dublul frecvenței maxime a semnalului, $f_s \geq 2f_{max}$. Această condiție este foarte importantă și poartă numele de Teorema eșantionării Nyquist-Shannon [212, 213].

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

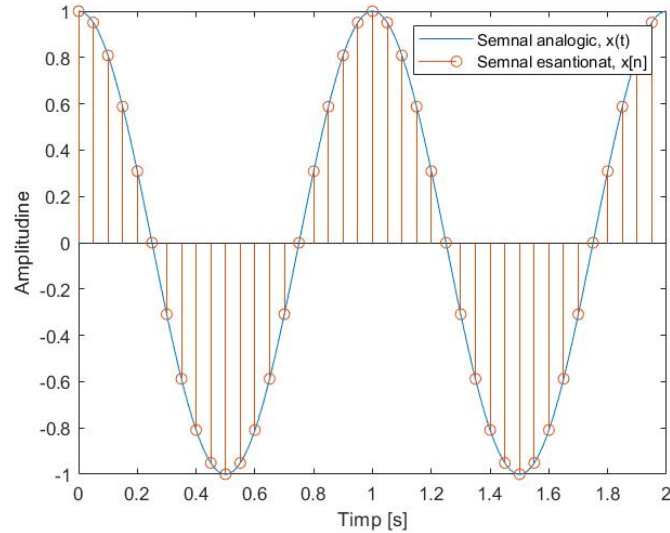


Figura 5.13: Eșantionarea semnalelor analogice

În etapa de cuantizare, fiecare eșantion (reprezentat ca un număr real) este aproximat cu o valoare dintr-un set de valori discrete ce pot fi convertite în secvențe binare. Fiecare convertor CAN poate face conversia pe un anumit număr de biți, n . Numărul de valori discrete (niveluri) specific unui anumit convertor CAN este $M = 2^n$. Invers, se poate determina numărul de biți al unui convertor CAN cunoscând numărul de niveluri sau de valori discrete, aplicând Ecuația 5.2.

$$n = \log_2 M \quad (5.2)$$

Pasul de cuantizare arată cum sunt mapate valorile de intrare și se calculează ca în Ecuația 5.3.

$$\Delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{M} \quad (5.3)$$

Luând ca exemplu un CAN cu $n=3$ biți, obținem $M = 2^3 = 8$ niveluri, setul de valori discrete fiind $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$. Tensiunea la vârf a semnalului sinusoidal eșantionat este $U=1$ V, offset=0, $T=1$ s, $T_s = 0.05$ s (Figura 5.14).

În acest caz, pasul de cuantizare este $\Delta = \frac{U_{max}-U_{min}}{M} = \frac{1V-(-1V)}{8} = \frac{1}{4}V$. Astfel, vom avea intervalele ilustrate în Tabel 5.6. După etapa de cuantizare,

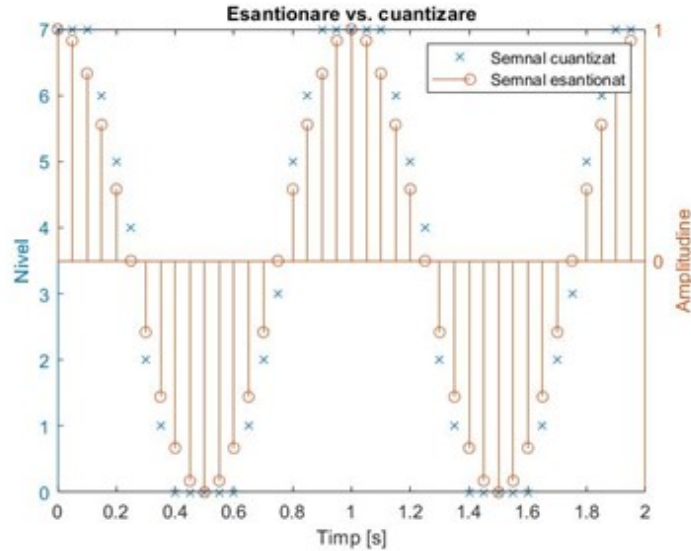


Figura 5.14: Semnalul cuantizat vs. semnalul eșantionat ($n=3$, $M=8$, $U_{max} = 1$ V, $U_{min} = -1$ V)

nivelurile vor fi codate pe n biți, astfel pentru $n=3$, nivelul 7 va fi, de fapt, secvența 111, nivelul 0 va fi 000 etc.

Tabelul 5.6: Intervalele de tensiuni și nivelurile corespunzătoare ($n=3$, $M=8$, $U = 1$ V, $\Delta = 0.25$ V)

Interval	Nivel	Codare
$[0.75, 1]$	7	111
$[0.5, 0.75)$	6	110
$[0.25, 0.5)$	5	101
$[0, 0.25)$	4	100
$[-0.25, 0)$	3	011
$[-0.5, -0.25)$	2	010
$[-0.75, -0.5)$	1	001
$[-1, -0.75)$	0	000

În Figura 5.15 este reprezentat semnalul eșantionat și cuantizat când $U_{max} = 1$ V, $U_{min} = 0$ V pentru $n = 3$ b. Pasul de cuantizare a devenit $\Delta = \frac{1}{8}$ V.

Există, totodată, conceptul de tensiune de referință (V_{ref}). Aceasta reprezintă valoarea maximă pe care un convertor AN o poate converti. În exemplele anterioare, am ignorat o astfel de limitare. Ținând cont de tensiunea de refe-

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

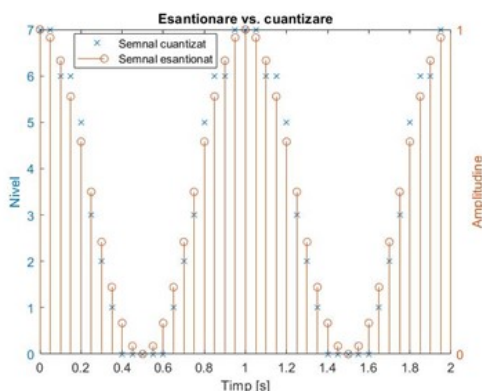


Figura 5.15: Semnalul cuantizat vs. semnalul eșantionat ($n=3$, $M=8$, $U_{max} = 1$ V, $U_{max} = 0$ V)

rință, se consideră că rezoluția unui CAN este dat de raportul din Ecuația 5.4

$$\frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{V_{ref}}{M} \quad (5.4)$$

5.3.2 Conversia analog-numerică pentru ESP32 și canalele analog-numerice ale ESP32

În continuare, pentru că ESP32 este intens utilizat în aplicațiile didactice și nu numai, se va exemplifica principiul conversiei analog-numeric pe un microcontroller ESP32 care posedă 2 convertoare analog-numeric. Primul convertor, ADC1, are 8 canale (GPIO 32-39), iar cel de-al doilea, ADC2, are 10 canale (GPIO0, GPIO2, GPIO4, GPIO12-15, GPIO25-27). Canalele convertorului sunt, de fapt, intrările unor multiplexoare cu rolul de a selecta semnalul de intrare convertit la un anumit moment dat.

Tensiunea de referință a convertoarelor ESP32 este 1,1 V, iar numărul de biți implicit pe care se poate face conversia este $n = 12$ b. Rezoluția este, așadar, $\frac{V_{ref}}{2^n} = \frac{1,1 \text{ V}}{2^{12}} = 2,685 \cdot 10^{-4}$ V. Rezoluția poate fi modificată la nivel software cu ajutorul unei funcții (`void analogSetWidth(nrbiti)`) care modifică numărul de biți pe care se face conversia. Convertoarele ESP32 pot converti și tensiuni mai mari decât 1,1 V, prin introducerea unor atenuări ale semnalului (Tabel 5.7) [214]. Pentru modificarea atenuării, în C și C++ se folosește funcția `void analogSetAttenuation(attenuation)`, unde pentru parametrul de intrare se pot folosi următoarele macro-uri definite în Tabelul 5.7).

Tabelul 5.7: Atenuările disponibile și domeniile măsurabile. Adaptare după [214]

Atenuare [dB]	Atenuare	Macro	Domeniul măsurabil
0 dB	1	ADC_0db	100 mV - 950 mV
2,5 dB	$10^{(2.5/20)}=1,33$	ADC_2_5db	100 mV - 1250 mV
6 dB	$10^{(6/20)}=2$	ADC_6db	150 mV - 1750 mV
11 dB	$10^{(11/20)}=3,54$	ADC_11db	50 mV - 2450 mV

Cu toate acestea, conversia realizată de convertoarele ESP32 nu este liniară, așa cum este de așteptat, valorile între 0 și 0,1 V, precum și cele între 3,1-3,3 V fiind convertite la aceeași valoare, 0, respectiv, 4095.

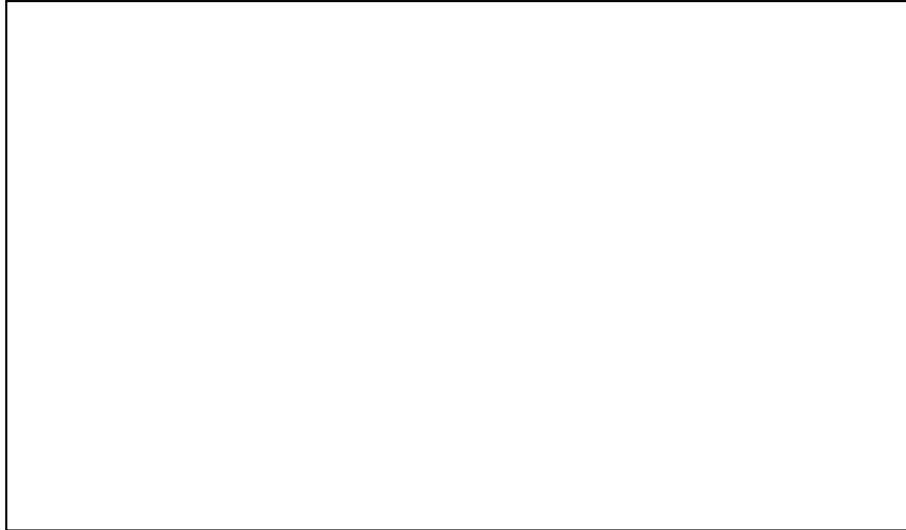
5.4 Aplicații

5.4.1 Sisteme de calcul

Activitatea 5.1. *Descrieți componentele principale ale unui sistem de calcul și explicați rolul fiecăreia.*

Activitatea 5.2. *Realizați o diagramă care să ilustreze arhitectura unui sistem de calcul.*

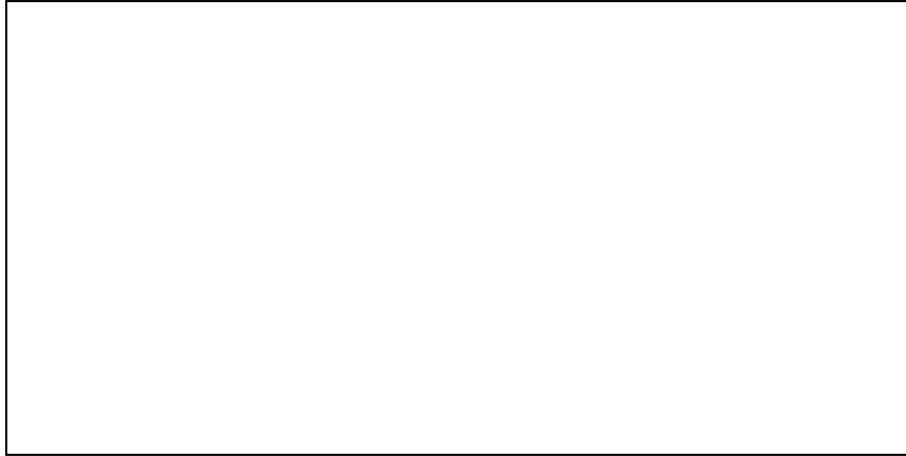
CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED



Activitatea 5.3. *Identificați și descrieți avantajele și dezavantajele sistemelor embedded. Includeți exemple de aplicații pentru fiecare aspect menționat.*

Activitatea 5.4. *Explorați diferitele tipuri de soluții tehnice pentru implementarea sistemelor embedded. Enumerați și descrieți caracteristicile fiecărei soluții.*

Activitatea 5.5. *Descrieți funcționarea unui microcontroler. Includeți un desen detaliat al componentelor sale și explicați rolul fiecărei componente.*



Activitatea 5.6. *Analizați utilizarea memoriei în microcontrolere. Discutați diferențele dintre memoria SRAM, EEPROM și Flash.*

Activitatea 5.7. *Explicați rolul oscilatorului-ceas în microcontrolere și cum influențează acesta funcționarea întregului sistem.*

Activitatea 5.8. *Descrieți importanța și funcționarea temporizatoarelor într-un microcontroler. Dați exemple de aplicații care necesită utilizarea temporizatoarelor.*

Activitatea 5.9. *Explorați conceptul de întreruperi într-un microcontroler. Explicați cum sunt gestionate întreruperile și dați un exemplu de utilizare.*

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

Activitatea 5.10. *Comparați microcontrolerele și microprocesoarele. Realizați un tabel cu diferențele și asemănările dintre ele.*

Aspect	Microcontrolere	Microprocesoare
Componente		
Aplicații		
Cost		
Consumul de energie		
Performanță		
Complexitate de proiectare		

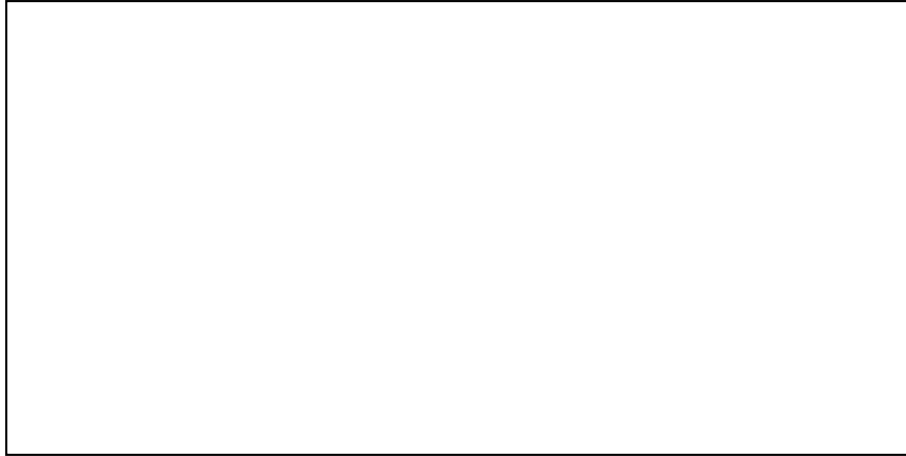
5.4.2 Interfețe de comunicații

Activitatea 5.11. *Calculați nr. de biți utilizați pentru transferul a 50 de pagini de text, fiecare având 25 de linii a câte 80 de caractere. Fiecare caracter consumă un byte și există un bit de stop.*

Activitatea 5.12. *Calculați timpul necesar transferului datelor de la Activitatea 5.11 pentru o rată de transfer de a) 9600 bps b) 57600 bps c) 115200 bps.*

Activitatea 5.13. *Fie o comunicație UART cu un cadru cu un bit de start, 8 biți de date, un bit de paritate și doi biți de stop la o rată de transfer de 3300 bps. Cât timp este necesar transmisiei mesajului "UART este o interfata asincrona."? (În Tabelul ASCII, nu există caractere cu diacritice!)*

Activitatea 5.14. *Realizați o schemă de conexiuni pentru comunicația serială între două plăci de dezvoltare. Explicați cum funcționează transmisia de date.*



Activitatea 5.15. *Explicați pașii necesari pentru configurarea interfeței SPI și descrieți o aplicație practică.*

Activitatea 5.16. *Explicați funcționarea interfeței I2C și descrieți cum se realizează comunicația între multiple dispozitive. Dați un exemplu de utilizare a acestei interfețe.*

5.4.3 Interfețe și conversia analog-numerică

Activitatea 5.17. *Descrieți conceptul de convertor analog-numeric (ADC) și importanța acestuia în sistemele embedded. Dați exemple de aplicații unde este necesară conversia analog-numerică.*

Activitatea 5.18. *Realizați un experiment pentru măsurarea unui semnal analogic folosind un ADC. Documentați pașii și analizați rezultatele obținute.*

Activitatea 5.19. *Explorați și documentați utilizarea plăcilor de dezvoltare Arduino Portenta și DEVKIT-C v4 într-un proiect de comunicație serială. Prezentați avantajele și provocările utilizării acestor plăci.*

Activitatea 5.20. *Fie următoarele componente:*

- *1 x Senzor de lumină analogic cu ieșire logaritmică Sharp GAI1S202WP (I-W, A)*
- *8 x Senzor de nivel de apă (I-W, A)*
- *11 x Senzor de umiditate a solului (I-W, A)*
- *1 x Senzor de gaz și fum MQ-2 (I-W, A/D)*
- *2 x Senzor de ploaie (I-W, A/D)*
- *2 x Senzor de forță*
- *2 x Senzor de îndoire*
- *1 x Senzor de temperatură și umiditate a aerului*
- *1 x Senzor de lumină profesional TSL-235R*
- *2 x Senzor UV SI1145*
- *1 x Accelerometru MMA8452 (I2C)*
- *1 x Senzor de presiune atmosferică și altitudine*
- *Rezistențe 10 k Ω*
- *Breadboard*

Pe baza componentelor aflate la dispoziția echipei (Tabel 5.8), realizați un proiect și o aplicație care să utilizeze aceste componente și care să respecte următoarele cerințe:

Tabelul 5.8: Distribuția senzorilor pe echipe

Echipe	Senzor 1-W analogic	Senzor 1-W digital	Senzor I2C
1	Senzorul de lumină analogic cu ieșire logaritmică Sharp GA1A1S202WP (1-W)	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul de presiune atmosferică și altitudine
2	Senzorul de nivel de apă	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Accelerometrul MMA8452 (I2C)
3	Senzorul de umiditate a solului (1-W, A)	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul UV SI1145
4	Senzorul de gaz și fum MQ-2	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Accelerometrul MMA8452 (I2C)
5	Senzorul de ploaie	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul UV SI1145
6	Senzorul de forță	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Senzorul de presiune atmosferică și altitudine
7	Senzorul de îndoire	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul UV SI1145
8	Senzorul de nivel de apă	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Accelerometrul MMA8452 (I2C)
9	Senzorul de îndoire	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul de presiune atmosferică și altitudine
10	Senzorul de nivel de apă	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Senzorul UV SI1145
11	Senzorul de forță	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Accelerometrul MMA8452 (I2C)
12	Senzorul de ploaie	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Senzorul de presiune atmosferică și altitudine
13	Senzorul de nivel de apă	Senzorul de lumină profesional TSL-235R	Senzorul UV SI1145
14	Senzorul de forță	Senzorul de umiditate și temperatură a aerului	Accelerometrul MMA8452 (I2C)

a) Găsiți-i o utilitate practică, oferiți-i un nume și descrieți aplicația din punctul de vedere al:

- interconectării;
- funcționalităților;

CAPITOLUL 5. NIVELUL DISPOZITIVE: SISTEME EMBEDDED

– *capabilităților sale.*

- b) Realizați experimente în care să demonstrați funcționalitatea.*
- c) Realizați o documentație în care să atingeți următoarele puncte:*
 - a. Titlu.*
 - b. Motivația aplicației și nevoile pe care le-ar putea rezolva.*
 - c. Diagrama hardware și descrierea componentelor.*
 - d. Fluxul de lucru software și implementarea codului sursă.*
 - e. Testarea și validarea aplicației în trei scenarii de utilizare.*

Capitolul 6

NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

Obiective:

06.1 Să se definească și să se explice rolul tehnologiilor de telecomunicații în arhitecturile IoT.

06.2 Să se explice principiile propagării semnalelor în comunicațiile fără fir și factorii care influențează pierderile de propagare.

06.3 Să se compare tehnologiile LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT, LTE Cat M1) și să se identifice aplicațiile specifice fiecărei tehnologii.

06.4 Să se descrie tehnologia Wi-Fi și rolurile diferitelor dispozitive în rețelele Wi-Fi.

Cuvinte cheie: tehnologii celulare, tehnologii cu consum de putere redus, pierderi de propagare, RSSI, sensibilitatea receptorului, domeniu de acoperire

Cuprins:

6.1 Noțiuni de propagare

6.2 Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru nelicențiat

6.3 Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru licențiat

6.4 Comparație între tehnologiile LPWAN

6.5 Tehnologii de comunicații pe distanțe scurte: Wi-Fi

6.6 Fișă de lucru: Întrebări și aplicații

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

Arhitecturile, rețelele și aplicațiile IoT nu se pot dezvolta fără tehnologiile de telecomunicații care permit transmiterea și agregarea datelor de la multitudinea de dispozitive. Tehnologiile de telecomunicații sunt, așadar, o altă componentă critică a oricărei infrastructuri IoT și sunt definite ca o totalitate de echipamente și programe care facilitează transmisia și recepția de date. Orice tehnologie de telecomunicații se bazează pe un sistem de comunicații de date și un standard. Pentru că datele sunt transmise cu ajutorul undelor electromagnetice, un alt aspect semnificativ este mediul de propagare. În plus, orice tehnologie de telecomunicații are în vedere și topologiile posibile prin care se poate realiza comunicația cu unul sau mai multe dispozitive.

Astfel, tehnologiile de comunicații se pot clasifica după mai multe criterii. Dacă tehnologia permite comunicația între mai mulți utilizatori, se poate discuta despre tehnici de acces multiplu care au rolul de a asigura partajarea mediului și a resurselor între utilizatori.

6.1 Noțiuni de propagare

Tehnologiile de comunicații fără fir (wireless) sunt bazate pe transmisia semnalelor pe calea undelor electromagnetice (studiate încă din liceu). Acest tip de transmisie mai poartă numele de propagare. Propagarea semnalelor are loc între un emițător cu o antenă de emisie, care va fi notat cu TX (dispozitiv care transmite semnalul), și un receptor având o antenă de recepție, notat cu RX (dispozitiv care recepționează semnalul). Emițătorul transmite semnal cu o putere pe care o vom nota P_{TX} , iar receptorul va recepționa semnalul cu puterea P_{RX} . În comunicațiile fără fir și nu numai, cele două valori, P_{TX} și P_{RX} , sunt diferite, ca urmare a existenței unor pierderi pe care le numim pierderi de propagare și pe care le notăm PL (Path Loss, în engleză) [215, 216]. Ecuația 6.1 arată legătura dintre puterea de transmisie, puterea semnalului recepționat și pierderile de propagare.

$$P_{RX} = P_{TX} - PL \quad (6.1)$$

Un factor important care determină pierderile de propagare este distanța 2D dintre TX și RX, notată în Figura 6.1 cu d_{TX-RX} . Cu cât distanța crește, cu atât pierderile de propagare cresc, iar puterea semnalului recepționat scade. Alți factori geometrici implicați în pierderile de propagare sunt înălțimile antenelor emițătorului și receptorului, h_{TX} și h_{RX} . Pe lângă factorii geometrici, pierderile de propagare cresc odată cu frecvența.

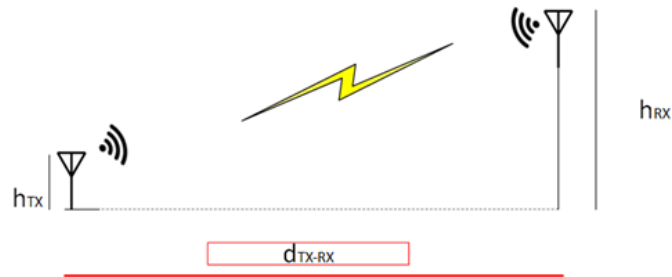


Figura 6.1: Transmisia semnalelor în comunicațiile fără fir

Pentru început, este suficient să se ia în considerare un model simplificat al acestor pierderi de propagare, în care pierderile de propagare (PL) cresc cu pătratul distanței. Astfel, puterea semnalului recepționat scade cu pătratul distanței.

În comunicațiile fără fir, puterile se măsoară în wați (W) și submultipli ai acestuia sau în decibeli-miliwați (dBm, unitate de măsură folosită în telecomunicații, unde dBm are ca referință o putere de 1 mW). Dispozitivele de comunicații fără fir au capacitatea de a determina un parametru numit indicator de putere a semnalului recepționat (Received Signal Strength Indicator, RSSI) care, în multe cazuri, reprezintă o măsură a nivelului de putere a semnalului recepționat. RSSI se măsoară în dBm și are valori negative, iar o valoare mai apropiată de 0 va arăta că semnalul recepționat este mai puternic [217]. De exemplu, un semnal recepționat cu $RSSI_1 = -69$ dBm este mai puternic decât un semnal recepționat cu $RSSI_1 = -89$ dBm și putem considera că un receptor RX_1 care recepționează cu $RSSI_1$ este mai aproape de TX decât un receptor RX_2 care recepționează cu $RSSI_2$. Cu toate acestea, nu se poate ști în ce direcție față de RX_1 sau RX_2 se află TX, așa cum se poate arăta în Figura 6.2.

Prin intermediul dispozitivelor de comunicații fără fir se pot transmite date atât timp cât aceste dispozitive se află în domeniul/raza de acoperire a dispozitivului către care se dorește transmiterea respectivelor date. În acest caz, valoarea RSSI trebuie să fie mai mare decât un prag specific dispozitivului de recepție, numit sensibilitatea receptorului [218]. Aceasta reprezintă acea valoare minimă a puterii semnalului recepționat pentru care se poate recepționa corect un semnal. Fiecare modul de comunicații are o sensibilitate specifică. De exemplu, modulul de comunicații Wi-Fi integrat în ESP32 are o sensibilitate de -97 dBm. Aceasta arată că, atât timp cât valoarea RSSI este mai mare decât -97 dBm, RX poate recepta corect semnalul transmis de TX. În plus,

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

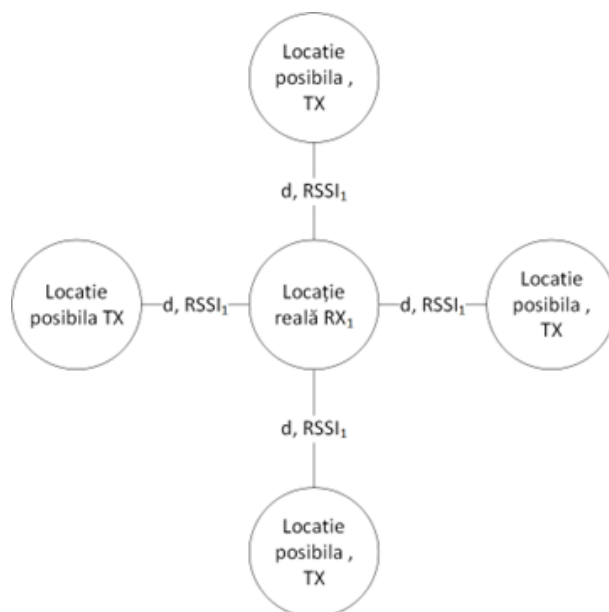


Figura 6.2: Patru dintre locațiile posibile ale unui TX atunci când se cunoaște RSSI

modulul Wi-Fi al ESP32 prezintă și un mod de funcționare numit Long Range (LR) posibil doar între două module Wi-Fi aflate fiecare în echiparea a câte unui ESP32. În acest mod, sensibilitatea scade la -105 dBm, ceea ce arată că, atât timp cât valoarea RSSI este mai mare decât -105 dBm, RX poate recepta corect semnalul transmis de TX.

6.2 Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru nelicențiat

Conceptul de rețele de mică putere și arie largă de acoperire (Low Power Wide Area Networks, LPWAN) include tehnologiile care permit comunicații pe o arie largă, de putere redusă și de cost mai redus, având cerința de a transmite mici cantități de date pe o distanță mare [219]. Dintre acestea, se pot enumera LoRa, LoRaWAN, Sigfox și tehnologiile celulare NB-IoT și LTE-M.

6.2.1 Modulația LoRa și protocolul LoRaWAN

Principalul scop al organizației LoRa Alliance a constat din dezvoltarea unei tehnologii care să fie adecvată pentru aplicații de tip oraș inteligent, însă caracteristicile tehnologiei LoRa și protocolului LoRaWAN dezvăluie un potențial ridicat și pentru alte domenii, precum cele propuse în această lucrare [31, 32].

LoRa Alliance a dezvoltat standardul LoRaWAN, un protocol de comunicații bazat pe protocolul ALOHA și o arhitectură ce utilizează tehnologia LoRa pe post de nivel fizic.

Tehnologia LoRa se bazează pe comunicația cu spectru împrăștiat cu semnale de tip chirp, CSS (Chirp Spread Spectrum) [220]. Semnalele chirp sunt semnale modulate în frecvență, cu amplitudine constantă, având o variație liniară a semnalului modulator în domeniul $[f_0, f_1]$ în intervalul de simbol T_S [221], unde $f_0 < f_1$ (pentru semnal cu variație liniar crescătoare) sau $f_0 > f_1$ (pentru semnal cu variație liniar descrescătoare). Se consideră că banda semnalului modulat (BW) este egală cu $|f_0 - f_1|$. Semnalul informațional este divizat în impulsuri cu o rată foarte mare, numită rata de chip (R_C) egală cu banda BW.

Factorul de împrăștiere (SF) este un parametru calculat pe baza lărgimii de bandă (BW) și a ratei de simbol $R_S = \frac{1}{T_S}$, conform Ecuației 6.2

$$R_S[\text{simbol}/s] = \frac{BW[\text{Hz}]}{2^{SF}[\text{chip}/\text{simbol}]} \quad (6.2)$$

În plus, SF ne arată câți biți sunt cuprinși într-un simbol. De aceea, rata de bit fără introducerea codurilor corectoare de erori (R'_B) este dată de Ecuația 6.3.

$$R_B[b/s] = R_S[\text{simbol}/s] \cdot SF[b/\text{simbol}] = \frac{BW[\text{Hz}]}{2^{SF}[\text{chip}/\text{simbol}]} \cdot SF[b/s] \quad (6.3)$$

Pentru configurarea unui simbol, se pot modifica BW, respectiv SF.

Modulația CSS, însă, este folosită în combinație cu tehnici de corecție a erorilor FEC (Forward Error Correction) [220] de tipul intra-pachet. În acest scop, 4 biți sunt codați, cu o redundanță dată de rata de cod (CR). CR este raportul dintre numărul de biți utili ($k=4$ în cazul LoRa) și numărul de biți ai secvenței codate ($n=5, 6, 7$ sau 8), $CR = \frac{k}{n}$. O rată de cod ridicată este utilă în sistemele cu interferențe semnificative, însă aceasta duce la creșterea considerabilă a duratei transmisiei unui pachet LoRa.

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

În final, pentru a determina rata de bit în cazul utilizării codurilor corectoare de erori, se folosește Ecuația 6.4.

$$R'_B [b/s] = \frac{BW [Hz]}{2^{SF} [chip/symbol]} \cdot SF [b/s] \cdot CR \quad (6.4)$$

Dacă valoarea BW este mare, evident, vom avea o valoare mai mare a ratei de bit, dar sensibilitatea receptorului va fi afectată. În schimb, crescând factorul de împrăștiere, putem avea un domeniu de acoperire mai mare și o legătură mai fiabilă, dar cu dezavantajul că rata de bit va scădea [222]. De asemenea, creșterea numărului de biți redundanți va duce la scăderea ratei de bit (Figura 6.3).

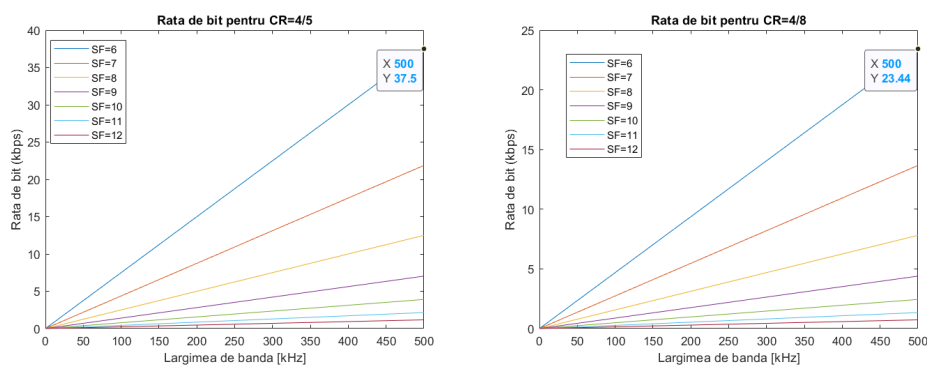


Figura 6.3: Influența factorului de împrăștiere, a lărgimii de bandă și a ratei de cod asupra ratei de bit LoRa, pe baza lărgimii de bandă a modulului LoRa Semtech SX1272 pentru care BW=7.8-500 kHz

Modulația CSS păstrează caracteristica de putere redusă a modulației FSK (Frequency Shift Keying, Modulație cu salt în fază), dar reușește să crească aria de acoperire [223] și furnizează o comunicație bidirecțională [223]- [224].

Funcționând în banda de 868 MHz în Europa, 915 MHz în America de Nord și 433 MHz în Asia, LoRa este caracterizată de o rată redusă a datelor (27 kbps pentru $SF = 7$ și o lărgime de bandă a canalului de 500 kHz și un maxim de 50 kbps atunci când se utilizează modulația FSK). Conform Silva și alții [225], rata de transmisie variază între 290 bps și 50 kbps. Acest din urmă aspect nu reprezintă neapărat un dezavantaj, dacă se plasează tehnologia LoRa în contextul potrivit și în cadrul scenariului potrivit.

După cum s-a menționat anterior, LoRa are o arie de acoperire mare (poate depăși 5 km în zonele urbane [31]; 15 km, [226] sau, ca în [225], 45 km în zonele rurale). În timp ce rata de eroare pentru legătura ascendentă pentru 95% din timpul alocat comunicației (95%-tile uplink failure rate) pentru utilizatorii

LoRa în mediul exterior este sub 5%, în ceea ce privește aplicațiile de interior, LoRa reușește să furnizeze acoperirea și capacitatea necesare [227], în [228] fiind menționat că o singură poartă de acces LoRa poate asigura o acoperire pe o suprafață de 34 000 mp utilizând un factor de împrăștiere $SF = 7$. Semnalele LoRa de bandă largă determină rezistența la interferențe și fac dificilă detecția sau bruiajul [219].

De asemenea, pentru tehnologia LoRa, rata de date poate varia și mai multe canale pot să coexiste. Acest lucru este posibil deoarece interferența dintre canale este nulă datorită modulației CSS utilizate.

Deși Augustin și alții afirmă în [223] că, din punctul de vedere al coliziunilor, LoRa se comportă la fel ca ALOHA pur, în [229] autorii au demonstrat superioritatea comunicațiilor LoRa în ceea ce privește performanțele și scalabilitatea.

LoRa permite compensarea unui RSZ redus, deoarece transmisia informației fără erori într-un canal radio cu RSZ redus și cu o putere a semnalului adesea sub nivelul zgomotului (ca în aplicațiile de spectru împrăștiat) implică doar creșterea lărgimii de bandă a semnalului [230]. De asemenea, în acest caz, atunci când se folosește modulația CSS, nu este necesară nicio creștere a consumului de putere pentru a putea transmite la o distanță mai mare (de exemplu, în comparație cu modulația FSK).

LoRa are unele avantaje față de alte tehnologii fără fir similare, mai ales atunci când diferitele rețele dezvoltate se află în imediata apropiere unele de altele. Dacă alte rețele fără fir care funcționează în spectrul de bandă nelicențiat sunt expuse interferențelor, LoRa poate rezolva această problemă utilizând mecanismul de detecție a activității canalului (CAD, Channel Activity Detection), sau prin setarea factorului de împrăștiere, a lărgimii de bandă și a puterii de transmisie [220] cu o excepție semnificativă: interferența cu Sigfox. Haxhibeqiri și alții [231] au demonstrat că Sigfox conduce la o creștere cu 28% a pierderilor pe pachete atunci când interferența se produce în decursul intervalului de timp de preamble. Ei au comparat, de asemenea, alte tehnologii, precum Z-Wave sau IOHomeControl, însă pierderile de pachete au fost mai mici sau egale cu 17%.

LoRaWAN este un protocol adoptat pe scară largă, bazat pe nivelul fizic LoRa și proiectat în vederea conectării a mii de dispozitive cu rol de senzori și actuatoare în rețele vaste [227] organizate în topologii de tip stea de stele [232], adică rolul jucat de porțile de acces constă în redistribuirea pachetelor între dispozitivele finale și rețeaua centrală [233]. În plus, nodurile nu sunt legate de o singură poartă de acces, ci pot trimite pachetele la mai multe porți de acces [234] printr-un singur salt, permițând astfel o diversitate la recepție ce

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

poate fi folosită pentru a crește rata transmisiilor reușite [235]. De asemenea, porțile de acces sunt conectate la serverul rețelei (core) printr-o rețea non-LoRaWAN precum IP peste Ethernet sau IP peste tehnologii celulare [232].

Protocolul LoRaWAN utilizează două mecanisme de securitate, unul pentru aplicație și unul pentru rețea. Ea furnizează criptare completă (end-to-end), prin intermediul unei chei pentru sesiunea de aplicație (Application Session Key) și asigură integritatea datelor utilizând o cheie de sesiune a rețelei (Network Session Key) [236]. Mai mult, în LoRaWAN, datele utile (payloads) aplicației care sunt partajate între dispozitivele finale și serviciile Cloud sunt criptate prin intermediul standardului de criptare avansat (AES, Advanced Encryption Standard) [227].

În LoRaWAN este posibilă comunicația bidirecțională, însă aceasta se concentrează în mod special pe legătura ascendentă, adică pe comunicația de la dispozitivul final către rețeaua centrală. Din punctul de vedere al capacităților legăturii descendente (downlink) ce presupune comunicația de la rețeaua centrală la dispozitivele finale, există trei clase posibile de dispozitive (Clasa A, Clasa B, Clasa C).

Clasa A include acele dispozitive care nu pot transmite mesaje către rețeaua centrală până când nu a avut loc o transmisie reușită pe legătura ascendentă. În plus, dispozitivele de clasă A așteaptă răspuns din partea rețelei centrale un timp echivalent a două ferestre consecutive ale legăturii descendente. Dacă răspunsul preconizat este recepționat în decursul primei ferestre a legăturii descendente, cea de-a doua este dezactivată [232]. Aceste dispozitive sunt cele mai eficiente din punct de vedere energetic.

Dispozitivele de Clasă B sunt orientate către aplicații ce necesită un trafic pe legătura descendentă suplimentar. De aceea, dispozitivele pot programa adițional recepția din partea legăturii descendente. Acest lucru este posibil datorită sincronizării dispozitivelor cu semnalizările periodice trimise de porțile de acces. În consecință, consumul de energie al dispozitivelor de clasă B este mai ridicat decât în cazul anterior al dispozitivelor de Clasă A.

În ceea ce privește dispozitivele de Clasă C, recepția pe legătura descendentă este permisă ori de câte ori dispozitivul final nu transmite. Această caracteristică este specifică dispozitivelor proiectate pentru aplicații cu latență scăzută. Consumul de putere al dispozitivelor de clasă C este mai ridicat decât cel al dispozitivelor de clasă A și B. De aceea, ar fi potrivit să fie folosite atunci când este disponibilă o sursă de alimentare permanentă.

Un avantaj important al LoRa și al LoRaWAN este valoarea bugetului legăturii radio (Link budget, LB), care este mai mare decât în cazul altor tehnologii fără fir standard. Un alt avantaj, în raport cu alte tehnologii (de exemplu,

ZigBee), îl constituie absența modulelor suplimentare care funcționează ca routere. Astfel, rețeaua LoRaWAN este mai puțin complexă și mai puțin costisitoare [227]. LoRa și LoRaWAN cuprind soluția practică de geolocalizare, numită geolocalizare LoRa, pentru urmărirea nodurilor de senzori LPWAN fără a mai fi necesare modulele cu sistem de poziționare globală GPS [237].

În mod clasic, locația poate fi urmărită cu ajutorul unui modul GPS instalat pe dispozitivul țintă, soluție care este specifică pentru dispozitivele 3G/4G, GPRS (serviciu de comunicații bazat pe comutația de pachete). Modulele GPS, însă, sunt foarte mari consumatoare de energie, reducând durata de viață a bateriei dispozitivului de 40-50 de ori.

Ideea din spatele principiului de geolocalizare LoRa constă în utilizarea metodei trilaterării pentru a determina poziția dispozitivului. Astfel, dacă un singur dispozitiv este recepționat de trei sau mai multe porți de acces, se poate calcula poziția dispozitivului utilizând mărcile temporale (en. timestamps) [237].

6.2.2 Sigfox

Tehnologiile cu spectru nelicențiat includ de asemenea și Sigfox, care a fost dezvoltat în Toulouse, Franța începând cu anul 2010 [238]. Dacă în ceea ce privește tehnologiile LoRa și LoRaWAN, nu era necesară contractarea unui abonament, pentru a conecta dispozitive Sigfox la rețeaua Sigfox, trebuie contractate abonamente care pornesc de la 6 euro/dispozitiv, atunci când se alege trimiterea a două mesaje pe dispozitiv pe zi sau până la 14 euro/dispozitiv, atunci când este activă opțiunea cu 140 de mesaje pe dispozitiv pe zi [239].

În Europa, numărul maxim de mesaje Sigfox pe zi este limitat la 144. Acest număr provine din limitarea la 1% a factorului de umplere pentru această tehnologie. Spre exemplu, în 24 de ore sunt 86 400 de secunde, ceea ce înseamnă că un dispozitiv Sigfox poate transmite timp de 864 s pe zi. Dacă vom considera că timpul de propagare necesar pentru ca un mesaj să fie transmis este de 6 s, obținem un număr maxim de 144 de mesaje pe zi, sau 6 mesaje pe oră [240].

Sigfox se bazează pe modulațiile de bandă foarte îngustă (UNB, Ultra Narrowband), modulația cu salt de frecvență cu impuls purtător de tip gaussian (GFSK, Gaussian Frequency Shift Keying) și modulația în fază diferențială (DBPSK, Differential Binary Phase Shift Keying) [233]. Datorită lărgimii înguste de bandă, interferențele sunt reduse, iar sensibilitatea receptorului este semnificativ îmbunătățită.

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

În ceea ce privește consumul de energie al dispozitivelor Sigfox și influența ratei datelor, în conformitate cu [241], alimentate de la o baterie de 2400 mAh și trimițând numărul maxim de mesaje (6) pe oră cu o rată a datelor de 600 bps (S.U.A.), fiecare dispozitiv poate funcționa 1,5 ani.

Dacă rata datelor scade la 100 bps (Europa), timpul de viață crește la 2,5 ani de funcționare. Mai mult, autorii au arătat că timpul de viață al dispozitivului crește asimptotic la 14,6 ani atunci când rata datelor descrește [241].

Rata redusă a datelor pentru Sigfox prezintă unele avantaje în ceea ce privește implementarea. De exemplu, se poate utiliza un dispozitiv de cost redus pentru implementarea dispozitivului de emisie-recepție. Dacă rata de date pentru legătura ascendentă diferă în funcție de regiunea în care este implementată rețeaua, rata de date pentru legătura descendentă este aceeași în toate regiunile, și anume, 600 bps [242].

6.3 Tehnologii de comunicații și protocoale de date pe distanțe lungi și de mică putere în spectru licențiat

6.3.1 Narrowband-IoT (NB-IoT)

NB-IoT este o altă tehnologie LPWAN care poate fi implementată în benzile licențiate LTE (Long Term Evolution) sau ale sistemului global pentru comunicațiile mobile GSM (Global System for Mobile Communication) [219]. Tehnologia a fost dezvoltată prin parteneriatul 3GPP (Proiectul Parteneriatului Generației a 3-a, în engleză: 3rd Generation Partnership Project) ca parte componentă din specificațiile incluse în documentația 3GPP numită Release 13. Tehnologia este integrată în standardul LTE, însă poate fi, de asemenea, considerată o nouă interfață radio, deoarece elimină multe dintre caracteristicile standardului LTE în scopul îmbunătățirii timpului de viață al bateriei și al minimizării costului dispozitivelor [234]. A fost optimizată pentru transmisiile ocazionale (rare) de mesaje de mici dimensiuni prin renunțarea la caracteristici precum cea de handover, de monitorizare a calității canalului de comunicație și agregarea de purtătoare [243], [244]. Are o rată de transmisie maximă de 20 kbps pe legătura descendentă și de 17 kbps pe legătura ascendentă.

Pe legătura ascendentă este utilizată modulația cu salt de fază în cuadratură QPSK, folosind tehnica de acces multiplu cu diviziune în frecvență FDMA.

Pentru transmisia pe legătura descendentă, se folosește accesul multiplu cu diviziune în frecvență ortogonală OFDMA.

Utilizând NB-IoT, se pot conecta 100 000 de dispozitive pe celulă și chiar mai multe, dacă sunt exploatate purtătoare NB-IoT multiple [219].

Rata de eroare pentru legătura ascendentă pentru 95% din timpul alocat comunicației pentru utilizatorii NB-IoT în exterior este sub 5%, similar cu LoRa, însă NB-IoT este singura tehnologie care poate furniza conectivitate atât pe legătura ascendentă, cât și pe cea descendentă pentru aplicații de interior cu o rată de eșec de sub 5% [227], [240].

Îmbunătățirea tehnologiei NB-IoT s-a continuat cu o nouă versiune a standardului 3GPP (Release 15). Un dispozitiv conectat NB-IoT poate atinge o durată de viață a bateriei de 10 ani dacă transmite în medie, pe zi, 200 de octeți [219]. Raportat la LoRa, Bao și alții [245] au dovedit că NB-IoT are o acoperire mai redusă, însă o rată de transmisie la marginea celulei mai mare.

6.3.2 Tehnologia de comunicații LTE Cat M1

Cunoscută, de asemenea, sub numele de eMTC (comunicații tip mașină evolute, eng. enhanced Machine Type Communications), LTE Cat M1 face parte, de asemenea, din 3GPP Release 13. Fiind implementată în spectrul licențiat la fel ca NB-IoT, se poate crește semnificativ calitatea serviciilor, QoS (eng. Quality of Service), față de tehnologiile nelicențiate. Este dezvoltată în benzile LTE și ocupă 1,4 MHz, coexistând cu traficul curent și funcționând în întregul spectru LTE. Spre deosebire de NB-IoT, poate suporta handover și VoLTE. Latența variază între 10-15 ms, iar rata datelor este de până la 375 kbps pentru legătura ascendentă și până la 300 kbps pentru legătura descendentă [246].

Funcții foarte valoroase, precum modul de economisire a energiei PSM (Power Saving Mode) și recepția discontinuă eDRX (Extended Discontinuous Reception) permit dispozitivelor conectate să își crească durata de funcționare. În PSM, dispozitivul LTE Cat M1 intră în modul de veghe pe o perioadă nedeterminată de timp și părăsește această stare atunci când decide să transmită date în conformitate cu o regulă ori cu un temporizator [247]. Modul eDRX este o extensie a modului de veghe [248].

6.4 Comparație între tehnologiile LPWAN

În Tabel 6.1, este realizată o analiză comparativă a tehnologiilor LPWAN prezentate. Au fost evidențiați cei mai importanți parametri și cele mai importante caracteristici.

Tabelul 6.1: Analiză comparativă a tehnologiilor LPWAN [31]

	LoRa/LoRaWAN	Sigfox	NB-IoT	LTE Cat M1
Spectru Licențiat	Nu	Nu	Da	Da
Frecvență	EU: 868 MHz USA: 915 MHz Asia: 433 MHz	EU: 868 MHz USA: 915 MHz Asia: 433 MHz	banda LTE	banda LTE
Modulație	CSS	UNB DBPSK GFSK	QPSK	DL: OFDMA UL: SC-FDMA
BW	125/250/500 kHz	100 Hz	180 kHz	1,4 MHz
R_b UL			17 (63) kbps ¹	375 kbps
R_b DL	250 bps-50 kbps	100/600 bps	20 kbps [27]	300 kbps
Acoperire	5 km (urban) 15 km [226] 45 km [225] (rural)	10-50 km [231]	<3 km [245]	2G: 35 km 3G: 200 km 4G: 200 km [225]
Duplexare	Semi-duplex	Limitată Semi-duplex	Semi-duplex	Semi-duplex
Economisire energie	Nu	Nu	Da	Da
Eficiență energetică	Foarte ridicată	Foarte ridicată	Foarte ridicată	Medie
Autentificare/ Criptare	Da, LoRaWAN	Nu	Da	Da
Imunitate la interferență	Ridicată	Ridicată	Scăzută	Scăzută
Max. msj/zi	Limitat	Limitat (144) ² 4, 8, 12 B	Nelimitat	Nelimitat
Date utile	Max: 243 B	Max: 12 B (UL) 8 B (DL)	Max: 1600 B	N/A
Abonare	Nu	Da	Da	Da
QoS	Nu	Da	Da	Da

6.5 Tehnologii de comunicații pe distanțe scurte: Wi-Fi

6.5.1 Tehnologia Wi-Fi în contextul dezvoltării IoT

Wi-Fi, un acronim al denumirii ”Wireless Fidelity”, reprezintă denumirea tehnologiei standardizate IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) prin standardul 802.11. Această tehnologie este una dintre cele mai răspândite, cu mai mult de 13 miliarde de dispozitive conectate, conform Wi-Fi Alliance [250].

În tehnologia Wi-Fi, există două funcții ale subnivelului de acces la mediul de comunicații, cunoscute ca funcția de coordonare centralizată (Point Coordinated Function, PCF), opțională, mai complexă, și funcția de coordonare distribuită (Distributed Coordinated Function DCF, mai simplă) sau modul ad-hoc. În primul caz, dispozitivele comunică prin intermediul unui punct de acces. În cazul funcției de coordonare distribuită, dispozitivele pot comunica fără a fi necesar un punct de acces.

Deși versiunile Wi-Fi sunt multiple (Tabel 6.2), în continuare se va face referire la cele mai noi standarde, 802.11ac (Wi-Fi 5, versiunea 2013, respectiv, 2016), 802.11ah (Wi-Fi HaLow) și 802.11ax (Wi-Fi 6, 2020). Conform standardului 802.11ac, Wi-Fi 5 operează în banda de 5 GHz, cunoscută ca fiind o bandă în care interferențele sunt reduse, comparativ cu abordarea precedentă, în care era utilizată banda de 2,4 GHz. Rata de transmisie maximă este de 3.5 Gbps, datorită antenelor MU-MIMO 4x4 (eng. Multi-User Multiple Input-Multiple Output) folosite care permit transmisia mai multor fluxuri simultan către și dinspre diferiții clienți. În această configurație, pentru un singur punct de acces, pot fi deserviți maximum 4 utilizatori, crescând, astfel, capacitatea rețelei și numărul de dispozitive gestionate de un singur router.

Un dezavantaj al tehnologiei MU-MIMO constă în faptul că aceasta facilitează doar creșterea vitezei de descărcare a datelor, nu și pe cea de încărcare, nefiind compatibilă cu standarde Wi-Fi anterioare Wi-Fi 5.

¹Rata de date în uplink crește la 63 kbps în transmisiile multi-ton, atunci când se folosește o spațiere de sub-purtătoare de 15 kHz și de sloturi de 0,5 ms [249].

²Numărul maxim de mesaje pe zi pentru Sigfox este de 144, adică 140 de mesaje pentru uplink și 4 mesaje pentru downlink [238].

³Certificări tip Wave 1.

⁴Certificări tip Wave 2.

⁵Anul standardizării oficiale de către IEEE.

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

Tabelul 6.2: Versiunile standardului 802.11 (Wi-Fi 1-6)

Certif.	Standard	An	Frecvența	Rata de date	Rază
1	802.11b	1999	2,4 GHz	11 Mbps	35 m
2	802.11a	1999	5 GHz	54 Mbps	38 m
3	802.11g	2003	2,4 GHz	54 Mbps	38 m
4	802.11n	2009	2,4 GHz, 5 GHz	150 Mbps	70-250 m
5	802.11ac	2013 ³ , 2016 ⁴	5 GHz	3,5 Gbps	80 m
HaLow	802.11ah	2017	750-928 MHz	40 Mbps	1 km
6	802.11ax	2020 ⁵	2,4 GHz, 5 GHz	9,6 Gbps	N/A

Wi-Fi 6 este o versiune îmbunătățită care împrumută din tehnicile utilizate în tehnologii precum LTE. Astfel, dacă Wi-Fi 5 folosea tehnica de multiplexare cu diviziune în frecvență ortogonală OFDM ca și precursoarele sale Wi-Fi 2 și Wi-Fi 3, Wi-Fi 6 folosește tehnica de acces multiplu OFDMA, utilă pentru transmisiile de pachete de mici dimensiuni, în condiții de congestie ridicată.

În plus, merită menționat faptul că un punct de acces Wi-Fi 6 poate comuta între trei moduri diferite de operare: MU-MIMO, SU-MIMO (Single-User Multiple Input-Multiple Output) sau OFDMA.

Rata de transmisie a Wi-Fi 6 crește la 9.6 Gbps, iar antenele folosite sunt tot de tipul MU-MIMO, însă configurația cunoaște o îmbunătățire prin faptul că se pot oferi 8 fluxuri spațiale pentru același canal pentru maximum 4 clienți. Mulțumită acestor antene MU-MIMO 8x8, puterea semnalului crește cu până la 3 dB față de Wi-Fi 5, ceea ce determină creșterea domeniului de acoperire.

Printre avantajele tehnologiilor Wi-Fi 5 și Wi-Fi 6, putem menționa funcționarea în spectrul nelicențiat, rata de transmisie ridicată și latența scăzută. Ca dezavantaje ale tehnologiei putem enumera consumul ridicat de energie al dispozitivelor.

Standardul Wi-Fi HaLow este dedicat dispozitivelor IoT fiind destinat aplicațiilor ce necesită un transfer cu o rată a datelor mai scăzută, cu un domeniu de acoperire semnificativ și cu cerințe de consum de energie scăzut. Funcționând în benzile nelicențiate sub-GHz, comunicația prin Wi-Fi HaLow este mai puțin afectată de interferențe decât cea realizată prin tehnologiile ce funcționează pe frecvențele de 2.4 GHz sau 5 GHz. De asemenea, propaga-

rea este mai puțin afectată de obstacole, fiind cunoscut faptul că semnalele de frecvență mai joasă penetrează diferitele medii de propagare mai ușor decât cele pe frecvențe mai înalte.

Wi-Fi HaLow folosește tehnica de multiplexare OFDM și tehnicile de modulație BPSK, QPSK și modulația de amplitudine în cuadratură QAM16.

Tehnologia Wi-Fi HaLow reprezintă soluția de mijloc între rețelele fără fir personale (WPAN) și rețelele de mică putere și arie mare de acoperire, LPWAN. Acest standard oferă rate de date egale, de până la 78 Mbps, atât pentru legătura ascendentă, cât și pentru cea descendentă, în vreme ce tehnologiile LPWAN prezintă limitări importante din punctul de vedere al ratei de transmisie, dar și al factorului de umplere de 1% care determină, de exemplu, pentru tehnologii precum Sigfox un număr maxim de 144 de mesaje pe zi. Un avantaj important al acestei tehnologii rezidă în posibilitatea de a fi utilizată în aplicații ce necesită transferul de fluxuri video, sau în cele care necesită operarea frecventă a actuatorilor ori transmisia frecventă de date. Ca dezavantaj, însă, pentru dispozitivele care folosesc tehnologii sub-GHz, se poate menționa faptul că sunt necesare antene de dimensiuni mai mari [251,252].

6.5.2 Rolurile dispozitivelor în tehnologia Wi-Fi

În comunicația Wi-Fi, dispozitivele pot avea diferite roluri. De exemplu, un dispozitiv poate avea rolul de stație (Wi-Fi station), de punct de acces (Acces Point, AP) sau de router [253,254]. Denumirea de punct de acces provine de la capacitatea acestor dispozitive de a permite accesul la rețeaua de comunicații fiind o punte de legătură între stații și routere. Se poate realiza o rețea de astfel de dispozitive prin conectarea mai multor stații Wi-Fi la un punct de acces Wi-Fi. Mai departe, acest punct de acces se poate conecta el însuși la un router Wi-Fi. În tehnologia Wi-Fi, există anumite constrângeri, prin modul în care a fost proiectată și implementată tehnologia:

- Punctele de acces nu se pot conecta între ele direct.
- Stațiile nu se pot conecta între ele direct.

Modulele de comunicații Wi-Fi integrate pe ESP32 sunt conforme standardelor b, g și n, evidențiate în Tabelul 6.2 cu scris îngroșat (bold).

6.6 Fișă de lucru: Întrebări și aplicații

Realizați următoarele activități:

Capitolul 6

.....
(Nume, Prenume)

...../...../.....
(ZZ/MM/AA)

Activitatea 6.1. Explicați rolul tehnologiilor de telecomunicații în dezvoltarea arhitecturilor, rețelelor și aplicațiilor IoT. Includeți exemple de aplicații practice.

Activitatea 6.2. Descrieți conceptul de propagare a semnalelor și explicați factorii care influențează pierderile de propagare.

Activitatea 6.3. Calculați puterea semnalului recepționat (P_{RX}) dacă puterea de transmisie (P_{TX}) este 10 W și pierderile de propagare (PL) sunt 30 dB.

Rezolvare. _____

Activitatea 6.4. Realizați o diagramă care să illustreze transmiterea semnalelor într-un sistem de comunicații fără fir. Includeți un emițător, un receptor, și factorii geometrici precum înălțimile antenelor și distanța dintre ele.



Activitatea 6.5. *Explicați cum se măsoară puterea semnalului recepționat (RSSI) și cum este utilizată pentru a determina calitatea conexiunii.*

Activitatea 6.6. *Descrieți tehnologiile LPWAN și dați exemple de aplicații IoT care utilizează aceste tehnologii.*

Activitatea 6.7. *Comparați modulația LoRa și protocolul LoRaWAN cu tehnologia Sigfox. Includeți un tabel cu diferențele și asemănările dintre ele.*

Aspect	LoRa/LoRaWAN	Sigfox
Spectru		
Frecvență		
Modulație		
Rata de date		
Acoperire		
Duplexare		
Eficiență energetică		

CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE TELECOMUNICAȚII

Activitatea 6.8. *Realizați un experiment pentru măsurarea RSSI și a sensibilității receptorului folosind un modul ESP32. Documentați pașii și analizați rezultatele obținute.*

Activitatea 6.9. *Explicați diferențele dintre tehnologiile de comunicații pe distanțe lungi și cele pe distanțe scurte, oferind exemple de tehnologii și aplicații pentru fiecare categorie.*

Activitatea 6.10. *Descrieți funcționarea modulației Chirp Spread Spectrum (CSS) utilizată de LoRa și modul în care aceasta influențează aria de acoperire și rata de transmisie a datelor.*

Activitatea 6.11. *Analizați influența factorului de împrăștiere (SF) și a lărgimii de bandă (BW) asupra ratei de bit și a sensibilității receptorului în modulația LoRa. Realizați grafice ilustrative.*



Activitatea 6.12. *Explorați tehnologia Narrowband-IoT (NB-IoT) și LTE Cat M1. Descrieți diferențele principale dintre acestea și dați exemple de aplicații practice pentru fiecare.*

Activitatea 6.13. *Realizați o diagramă comparativă a diferitelor tehnologii LPWAN prezentate în Tabelul 6.1. Includeți frecvențele, rata de date, acoperirea și avantajele fiecărei tehnologii.*



Activitatea 6.14. *Explicați avantajele și dezavantajele utilizării Wi-Fi pentru aplicațiile IoT. Includeți o comparație între versiunile Wi-Fi 5, Wi-Fi 6 și Wi-Fi HaLow.*

Activitatea 6.15. *Descrieți rolurile diferitelor dispozitive într-o rețea Wi-Fi și cum se poate realiza conectivitatea între acestea.*

**CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE
TELECOMUNICAȚII**

Activitatea 6.16. *Analizați performanțele standardelor Wi-Fi utilizate de modulele ESP32 (802.11b/g/n) și explicați cum influențează acestea aplicațiile IoT.*

Activitatea 6.17. *Analizați utilizarea tehnologiei Wi-Fi HaLow pentru aplicațiile IoT. Descrieți avantajele și provocările utilizării acestei tehnologii.*

CUVÂNT DE ÎNCHEIERE

Cartea de față reprezintă o mică parte din experiența câpătată ca urmare a activității desfășurate în ultimii 10 ani în domeniul IoT. Reunind principii teoretice, concepte fundamentale, dar și aplicații practice, volumul aduce în atenția studenților și a tuturor persoanelor interesate o gamă largă de activități menite atât să stimuleze curiozitatea începătorului, cât și să-i provoace pe cei cu experiență deja în domeniu.

Lucrarea tratează primele două niveluri ale arhitecturii IoT - nivelul Dispozitive sau Percepție și nivelul Conectivitate, punând accent pe conceptele esențiale ale acestora. Înțelegerea acestor niveluri este crucială pentru a construi soluții IoT robuste și scalabile. Abordarea practică a fost gândită pentru a oferi cititorilor o bază solidă și pentru a stimula inovația în proiectele lor.

Volumul debutează cu un mic istoric și cu explicarea necesității de standardizare în domeniul IoT. Rețelele de senzori reprezintă precursorii sistemelor complexe IoT de astăzi, astfel că lor li se dedică o parte importantă a acestei lucrări, prin prezentarea componentelor care stau la baza lor, a senzorilor și sistemelor de calcul cu rol de unități de achiziție și procesare.

Bineînțeles, tehnologiile de comunicații sunt esențiale în dezvoltarea acestor rețele, dar și a întregului ecosistem IoT. Discuția privind tehnologiile de comunicații începe cu propagarea semnalelor prin intermediul undelor electromagnetice - un subiect complex, influențat de numeroși factori, cum ar fi: distanța, frecvența și caracteristicile fizice ale mediului de propagare, evidențind cum pot afecta calitatea semnalului recepționat pierderile de propagare și cum indicatorul de putere a semnalului recepționat (RSSI) poate fi utilizat pentru a evalua această calitate. Aceste concepte sunt fundamentale pentru proiectarea și optimizarea rețelelor IoT. Mai departe, cartea explorează tehnologiile LPWAN, esențiale pentru aplicațiile IoT care necesită transmisii pe distanțe lungi și cu consum redus de energie, dar și tehnologiile de comunicații pe distanțe scurte cum este Wi-Fi - care oferă rate de transmisie ridicate și este omniprezent, fiind utilizat pe scară largă în aplicațiile IoT.

Acest volum reprezintă nu doar o incursiune în colecția de cunoștințe acumulate, ci și o invitație adresată studenților și profesioniștilor de a explora și a

***CAPITOLUL 6. NIVELUL CONECTIVITATE: TEHNOLOGII DE
TELECOMUNICAȚII***

inova în domeniul IoT. Experiența de peste un deceniu în acest domeniu mi-a confirmat că învățarea continuă este esențială în acest domeniu cu evoluție fulminantă a tehnologiei. Sper ca prin această lucrare să fi dovedit pasiunea mea pentru IoT și să fi oferit un instrument util pentru oricine dorește o împărtășească și să aibă propria contribuție la acest domeniu fascinant.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Arne Bochém and Hang Zhang. Robustness Enhanced Sensor Assisted Monte Carlo Localization for Wireless Sensor Networks and the Internet of Things. *IEEE Access*, 10:33408–33420, 2022.
- [2] Intelligence Resource Program. Sound surveillance system (sosus). <https://irp.fas.org/program/collect/sosus.htm>. accesat la 25.11.2023.
- [3] Silicon Laboratories. The evolution of wireless sensor networks. <https://www.silabs.com/documents/public/white-papers/evolution-of-wireless-sensor-networks.pdf>. accesat la 25.11.2023.
- [4] Jaewoo Kim, Jaiyong Lee, Jaeho Kim, and Jaeseok Yun. M2m service platforms: Survey, issues, and enabling technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1):61–76, 2014.
- [5] Johana A. Manrique, Johan S. Rueda-Rueda, and Jesús M.T. Portocarrero. Contrasting internet of things and wireless sensor network from a conceptual overview. In *2016 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings) and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom) and IEEE Smart Data (SmartData)*, pages 252–257, 2016.
- [6] International Electrotechnical Commission. Internet of things: Wireless sensor networks. <https://www.iec.ch/basecamp/internet-things-wireless-sensor-networks>. accesat la 25.11.2023.
- [7] Santiago Silvestre Jordi Salazar. Internet of things. <https://core.ac.uk/download/pdf/132530214.pdf>. accesat la 25.11.2023.
- [8] Ashish Tomar and Sachin Tripathi. Bcsom: Blockchain-based certificateless aggregate signcryption scheme for internet of medical things. *Computer Communications*, 212:48–62, December 2023.

BIBLIOGRAFIE

- [9] Luca Turchet and Francesco Antoniazzi. Semantic web of musical things: Achieving interoperability in the internet of musical things. *Journal of Web Semantics*, 75:100758, January 2023.
- [10] Luca Turchet and Chan Nam Ngo. Blockchain-based internet of musical things. *Blockchain: Research and Applications*, 3(3):100083, September 2022.
- [11] Zongwang Li, Zhuochen Xie, Xiaohe He, and Xuwen Liang. Heterogeneous temporal graph powered drl algorithm for channel allocation in maritime iot systems. *Computer Communications*, 213:260–270, January 2024.
- [12] Abdul Razzaq, Aakash Ahmad, Asad Waqar Malik, Mahdi Fahmideh, and Rabie A. Ramadan. Software engineering for internet of underwater things to analyze oceanic data. *Internet of Things*, 24:100893, December 2023.
- [13] Hodayun Kabir, Mau-Luen Tham, and Yoong Choon Chang. Internet of robotic things for mobile robots: Concepts, technologies, challenges, applications, and future directions. *Digital Communications and Networks*, May 2023.
- [14] Jean-Paul A. Yaacoub, Hassan N. Noura, and Benoit Piranda. The internet of modular robotic things: Issues, limitations, challenges, and solutions. *Internet of Things*, 23:100886, October 2023.
- [15] Juan Contreras-Castillo, Sherali Zeadally, and Juan Antonio Guerrero-Ibañez. Internet of vehicles: Architecture, protocols, and security. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5):3701–3709, 2018.
- [16] Ashish Nanda, Deepak Puthal, Joel J. P. C. Rodrigues, and Sergei A. Kozlov. Internet of autonomous vehicles communications security: Overview, issues, and directions. *IEEE Wireless Communications*, 26(4):60–65, 2019.
- [17] Sabine Dahmen-Lhuissier. Internet of Things (IoT) — etsi.org. <https://www.etsi.org/technologies/internet-of-things>. [Accessed 11-06-2024].
- [18] Emily Himes. What is iot standardization, and why manufacturers should care. <https://www.ptc.com/en/blogs/iiot/what-is-iiot>

- standardization-why-manufacturers-should-care, 2023. [Accessed 11-06-2024].
- [19] Julia Lane and Nancy Potok. Democratizing data: Our vision. *Harvard Data Science Review*, (Special Issue 4), April 2024.
- [20] Iuliana Chiuchisan, H.N Costin, and Oana Geman. Adopting the Internet of Things Technologies in Health Care Systems. In *2014 IEEE International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2014)*, pages 532–535, 2016.
- [21] Shivangi Vashi, Jyotsnamayee Ram, Janit Modi, Saurav Verma, and Chetana Prakash. Internet of things (iot): A vision, architectural elements, and security issues. In *2017 International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC)*, pages 492–496, 2017.
- [22] D. Aksu and M. A. Aydin. A survey of iot architectural reference models. In *2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals Devices (SSD)*, pages 413–417, 2019.
- [23] Sami Tabbane. IoT Standards, Part I: IoT Technology and Architecture. <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/Documents/Events/2018/IoT-BDG/IoT%20Standards%20Part%20I%20Sami.pdf>.
- [24] Craig Lee and Andrea Fumagalli. Internet of things security - multilayered method for end to end data communications over cellular networks. In *2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 24–28, 2019.
- [25] Walteneagus Dargie and Christian Poellabauer. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks*. John Wiley & Sons, Ltd, July 2010.
- [26] Cristina Bălăceanu, Alexandru Negoită, **Ana-Maria Claudia Drăgulinescu**, Roxana Roșcăneanu, Veronica Sanda Chedea, and George Suci. The use of IoT technology in Smart Viticulture. In *2021 23rd International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, pages 362–369, 2021.
- [27] Ioana Marcu, Carmen Voicu, **Ana-Maria Claudia Drăgulinescu**, Octavian Fratu, George Suci, Cristina Bălăceanu, and Maria-Mădălina

- [34] Michael J. McGrath and Cliodhna Ní Scanail. *Sensor Network Topologies and Design Considerations*, pages 79–95. Apress, Berkeley, CA, 2013.
- [35] John Vetelino and Aravind Reghu. *Introduction to sensors*. CRC press, 2017.
- [36] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*. Springer International Publishing, 2016.
- [37] Ramon Pallas-Areny and John G Webster. *Sensors and signal conditioning*. John Wiley & Sons, 2012.
- [38] H. Foll. 7.1.3 MEMS Sensors and Actuators — tf.uni-kiel.de. http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_7/bacbone/r7_1_3.html. [Accessed 14-06-2024].
- [39] Waldemar Nawrocki. *Measurement systems and sensors*. Artech House, 2016.
- [40] Hari Singh Nalwa. *Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology: Ne-P*. January 2004.
- [41] Pavel Ripka and Alois Tipek. *Modern sensors handbook*, volume 61. Wiley Online Library, 2007.
- [42] Varnakavi Naresh and Nohyun Lee. A review on biosensors and recent development of nanostructured materials-enabled biosensors. *Sensors*, 21(4):1109, 2021.
- [43] G. Robert Arrabito, Brian E. Cooke, and Sharon M. McFadden. Recommendations for enhancing the role of the auditory modality for processing sonar data. *Applied Acoustics*, 66(8):986–1005, August 2005.
- [44] Victor Henrique Alves Ribeiro, Gilberto Reynoso-Meza, and Leandro dos Santos Coelho. Multiobjective optimization design procedures for data-driven unmanned aerial vehicles automatic target recognition systems. In *Unmanned Aerial Systems*, pages 231–256. Elsevier, 2021.
- [45] Antoni Rogalski and Krzysztof Chrzanowski. Infrared devices and techniques. In *Handbook of optoelectronics*, pages 633–686. CRC Press, 2017.

BIBLIOGRAFIE

- [46] Jacob Fraden. *Handbook of Modern Sensors*. Springer New York, 2010.
- [47] Kristin A. Bartlett, Katharine E. Forth, and Stefan I. Madansingh. Characterizing sensor accuracy requirements in an artificial intelligence-enabled medical device. *IPEM-Translation*, 1:100004, April 2022.
- [48] Tim Shotter. Understanding Accuracy and Precision for MEMS Pressure Sensors — designworldonline.com. <https://www.designworldonline.com/understanding-accuracy-and-precision-for-mems-pressure-sensors/>. [Accessed 15-07-2024].
- [49] Michael J McGrath, Cliodhna Ní Scanaill, Michael J McGrath, and Cliodhna Ní Scanaill. Sensing and sensor fundamentals. *Sensor technologies: Healthcare, wellness, and environmental applications*, pages 15–50, 2013.
- [50] Philipp Clausen, Jan Skaloud, Roberto Molinari, James Balamuta, and Stéphane Guerrier. An overview of a new sensor calibration platform. In *2017 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace)*, pages 364–368, 2017.
- [51] Bulent Aydemir, Levent Yagmur, and Sinan Fank. Hysteresis errors of commonly used sensor materials. *Measurement*, 43(6):792–796, 2010.
- [52] Leonty Konstantinovich Samoilov, Darya Yurievna Denisenko, and Nikolav Nikolaevich Prokopenko. Dynamic error appraisal of the primary transducer in the sensor structure of the physical quantity. In *2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA)*, pages 1–4. IEEE, 2020.
- [53] Fatemeh Afsharnia. Failure rate analysis. In *Failure Analysis and Prevention*. IntechOpen, 2017.
- [54] Cherry Bhargava. Reliability analysis: need and techniques. In *AI Techniques for Reliability Prediction for Electronic Components*, pages 1–44. IGI Global, 2020.
- [55] Chaoqun Duan, Bo Li, and Dongdong Kong. Prognostics for deteriorating systems under indirect discrete monitoring and random failure. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 70:1–11, 2021.

- [56] Anuradha Singh, Saeed Ur Rehman, Sira Yongchareon, and Peter Han Joo Chong. Sensor technologies for fall detection systems: A review. *IEEE Sensors Journal*, 20(13):6889–6919, 2020.
- [57] Ismail Butun, Salvatore D Morgera, and Ravi Sankar. A survey of intrusion detection systems in wireless sensor networks. *IEEE communications surveys & tutorials*, 16(1):266–282, 2013.
- [58] Paul PL Regtien and Edwin Dertien. *Sensors for mechatronics*. Elsevier, 2018.
- [59] Randy Frank. *Understanding smart sensors*. Artech House, 2013.
- [60] Juhi Ranjan. *It Takes Two: Exploring Interactions between Smart Objects and Wearables to Implicitly Identify and Authenticate Object Users*. PhD thesis, University of Virginia, 2016.
- [61] Sunder Ali Khowaja, Aria Ghora Prabono, Feri Setiawan, Bernardo Nugroho Yahya, and Seok-Lyong Lee. Contextual activity based healthcare internet of things, services, and people (hiotsp): An architectural framework for healthcare monitoring using wearable sensors. *Computer Networks*, 145:190–206, 2018.
- [62] Chioma Virginia Anikwe, Henry Friday Nweke, Anayo Chukwu Ikegwu, Chukwunonso Adolphus Egwuonwu, Fergus Uchenna Onu, Uzoma Rita Alo, and Ying Wah Teh. Mobile and wearable sensors for data-driven health monitoring system: State-of-the-art and future prospect. *Expert Systems with Applications*, 202:117362, 2022.
- [63] SR Vijayalakshmi and S Muruganand. *Wireless Sensor Networks: Architecture-Applications-Advancements*. Stylus Publishing, LLC, 2018.
- [64] Joseph Caniou. *Passive infrared detection: theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [65] Dustin J Welbourne, Andrew W Claridge, David J Paull, and Andrew Lambert. How do passive infrared triggered camera traps operate and why does it matter? breaking down common misconceptions. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2(2):77–83, 2016.
- [66] Valentin Feieș. *Optoelectronics. Course Notes*. 2012. Politehnica University of Bucharest, 2012/2013.

BIBLIOGRAFIE

- [67] John P. Dakin and Robert G. W. Brown. *Handbook of Optoelectronics*. CRC Press, 2010.
- [68] Ashim Kumar Bain and Prem Chand. *Pyroelectric materials: physics and applications*. John Wiley & Sons, 2022.
- [69] Ian R. Sinclair. *Sensors and Transducers*. Newnes Publishing House, third edition edition, 2001.
- [70] Sidney B Lang and Dilip K Das-Gupta. Pyroelectricity: Fundamentals and applications. In *Handbook of advanced electronic and photonic materials and devices*, pages 1–55. Elsevier, 2001.
- [71] Ion Iordache, Silviu Sorici, and Petre Manolache. *Security Systems Designer. Training Course (rom. Proiectant sisteme de securitate. Curs de specializare)*. Reșița Business Center and Siemens, June 2010.
- [72] Glolab Corporation. Focusing devices for pyroelectric infrared sensors. Glolab, 2014. accessed on 01.04.2014.
- [73] Hoang Vu, Ngoc Minh Kieu, Do Thi Gam, Seoyong Shin, Tran Quoc Tien, and Ngoc Hai Vu. Design and evaluation of uniform led illumination based on double linear fresnel lenses. *Applied Sciences*, 10(9):3257, 2020.
- [74] Murad Ali, Fahad Alam, and Haider Butt. Fabrication of 5d fresnel lenses via additive manufacturing. *ACS Materials Au*, 2(5):602–613, 2022.
- [75] Kai Liang, Heng Zhang, Haiping Chen, Dan Gao, and Yang Liu. Design and test of an annular fresnel solar concentrator to obtain a high-concentration solar energy flux. *Energy*, 214:118947, 2021.
- [76] Embedded Staff. Using Pyroelectric Infra-Red (PIR) sensors for motion detection - Embedded.com — embedded.com. <https://www.embedded.com/using-pyroelectric-infra-red-pir-sensors-for-motion-detection/>. [Accessed 13-07-2024].
- [77] Leslie Hodges. [egr.msu.edu. https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/fall109/group05/docs/ece480_dt5_application_note_lhodges.pdf](https://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/fall109/group05/docs/ece480_dt5_application_note_lhodges.pdf). [Accessed 15-07-2024].

- [78] Piero Zappi, Elisabetta Farella, and Luca Benini. Pyroelectric infrared sensors based distance estimation. In *SENSORS, 2008 IEEE*, pages 716–719. IEEE, 2008.
- [79] Shafiqul Abidin and Manu Ahuja. Infra red radiation detection using paassive infrared sensor. *International Journal of Computer Applications*, 152(5), 2016.
- [80] Rashmi Priyadarshini and RM Mehra. Quantitative review of occupancy detection technologies. *Int. J. Radio Freq*, 1(1):1–19, 2015.
- [81] T. Guettari, J. Boudy, B. E. Benkelfat, G. Chollet, J. L. Baldinger, P. Dore, and D. Istrate. Thermal signal analysis in smart home environment for detecting a human presence. In *Proceedings of the 2014 1st International Conference on Advanced Technologies for Signal and Image Processing (ATSIP)*, pages 334–339, Sousse, Tunisia, March 2014.
- [82] B. Yang, J. Luo, and Q. Liu. A novel low-cost and small-size human tracking system with pyroelectric infrared sensor mesh network. *Infrared Physics & Technology*, 63:147–156, March 2014.
- [83] J. Yun and M. H. Song. Detecting direction of movement using pyroelectric infrared sensors. *IEEE Sensors Journal*, 14(5):1482–1489, May 2014.
- [84] J. Yun and S. S. Lee. Human movement detection and identification using pyroelectric infrared sensors. *Sensors*, 14(5):8057–8081, May 2014.
- [85] A. E. Çetin. Ambient assisted smart home design using vibration and pir sensors. In *Proceedings of the 2013 21st IEEE Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)*, pages 1–4, Haspolat, Cyprus, April 2013.
- [86] A. Yazar, F. Keskin, B. U. Töreyn, and A. E. Çetin. Fall detection using single-tree complex wavelet transform. *Pattern Recognition Letters*, 34(15):1945–1952, November 2013.
- [87] Y. W. Bai, C. C. Cheng, and Z. L. Xie. Use of ultrasonic signal coding and pir sensors to enhance the sensing reliability of an embedded surveillance system. In *Proceedings of the 2013 IEEE International Systems*

BIBLIOGRAFIE

- Conference (SysCon)*, pages 287–291, Orlando, Florida, U.S.A., April 2013.
- [88] G. Feng, M. Liu, and G. Wang. Genetic algorithm based optimal placement of pir sensors for human motion localization. *Optimization and Engineering*, pages 1–14, January 2013.
- [89] Jerzy Filipiak, Lech Solarz, and Grzegorz Steczko. Surface acoustic wave (saw) vibration sensors. *Sensors*, 11(12):11809–11832, 2011.
- [90] Silvia Adorno, Fabrizio Cerini, and Federico Vercesi. Microphones. In *Silicon Sensors and Actuators: The Feynman Roadmap*, pages 503–522. Springer, 2022.
- [91] Dennis Baxter. The art and science of microphones and other transducers. In *Immersive Sound Production*, pages 67–95. Focal Press, 2022.
- [92] Marc Fueldner. Microphones. In *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*, pages 937–948. Elsevier, 2020.
- [93] Ankur Goswami and Prosenjit Sen. *Energy Harvesting Using Droplet*, page 113–143. Elsevier, 2018.
- [94] Xin Li, Yurui Wang, Minxuan Xu, Yueqin Shi, Hemiao Wang, Xin Yang, Haoting Ying, and Qi Zhang. Polymer electrets and their applications. *Journal of applied polymer science*, 138(19):50406, 2021.
- [95] Hikmet Sezen and Sefik Suzer. Xps for chemical- and charge-sensitive analyses. *Thin Solid Films*, 534:1–11, May 2013.
- [96] Malcolm J. Crocker. *Handbook of Acoustics*. John Wiley & Sons Publishing House, New York, 1998.
- [97] Thomas E Blanford and Zane Rusk. Summary of “microphones: Design, development, and characterization”. In *Proceedings of Meetings on Acoustics*, volume 51. AIP Publishing, 2023.
- [98] Steven L Garrett and Steven L Garrett. Membranes, plates, and microphones. *Understanding Acoustics: An Experimentalist’s View of Sound and Vibration*, pages 283–330, 2020.
- [99] Ziling Song, Xianfa Cai, Yiqin Wang, Wenyu Yang, and Wei Li. Leveraging ferroelectret nanogenerators for acoustic applications. *Micro-machines*, 14(12):2145, 2023.

- [100] Zhaoyi Wan, Huazhan Liu, Yuebin Zheng, Yuhua Ma, Kehai Liu, Xu Zhou, Chang Liu, Kaihui Liu, and Enge Wang. A review of acoustic devices based on suspended 2d materials and their composites. *Advanced Functional Materials*, 34(3):2303519, 2024.
- [101] J Hillenbrand, S Haberkott, and GM Sessler. Electret microphones with stiff diaphragms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 134(6):EL499–EL505, 2013.
- [102] Ashish Kumar, Arathy Varghese, Dheeraj Kalra, Anshuman Raunak, Jaiverdhan, Mahanth Prasad, Vijay Janyani, and R.P. Yadav. Mem-based piezoresistive and capacitive microphones: A review on materials and methods. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 169:107879, 2024.
- [103] F. Hijaz, N. Afzal, T. Ahmad, and O. Hasan. Survey of fall detection and daily activity monitoring techniques. In *Proceedings of the 2010 International Conference on Information and Emerging Technologies (ICIET)*, pages 1–6, Karachi, Pakistan, June 2010.
- [104] Y. Li, Z. Zeng, M. Popescu, and K.C. Ho. Acoustic fall detection using a circular microphone array. In *Proceedings of the 32nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS 2010)*, pages 2242–2245, Buenos Aires, Argentina, August-September 2010.
- [105] D. Litvak, Y. Zigel, and I. Gannot. Fall detection of elderly through floor vibrations and sound. In *Proceedings of the 30th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS 2008)*, pages 4632–4635, Vancouver, Canada, August 2008.
- [106] Y. Zigel, D. Litvak, and I. Gannot. A method for automatic fall detection of elderly people using floor vibrations and sound—proof of concept on human mimicking doll falls. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 56(12):2858–2867, December 2009.
- [107] Yu Song, Xiaoming Shi, Dandan Li, Jing Wang, and Houbing Huang. Designing high piezoelectric properties at the batio₃-pbzro₃-pbtio₃ phase boundary by landau-devonshire theory. *Journal of Advanced Dielectrics*, 2023.

BIBLIOGRAFIE

- [108] R.S. Priyadarshini and M. Saravanan. An extensive investigation of crystalline, nonlinear, piezoelectric, optical, phase purity and electro optic properties of doped ammonium dihydrogen phosphate single crystals. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2023.
- [109] Nur Ain Binti Zaki, Anees Abdul Aziz, N. Khairudin, and Norhafizah Binti Burham. Simulation of zinc oxide, barium sodium niobate, and barium titanate as lead-free piezoelectric materials. *2021 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM)*, pages 38–41, 2021.
- [110] Masoud Mohammadgholiha, Antonio Palermo, Nicola Testoni, Jochen Moll, and Luca De Marchi. Finite element modeling and experimental characterization of piezoceramic frequency steerable acoustic transducers. *IEEE Sensors Journal*, 22:13958–13970, 2022.
- [111] R.Aasin Rukshna, S. Anusha, E.Bhuvaneshwarri, and T. Devashena. Interfacing of proximity sensor with my-rio toolkit using labview. *International Journal for Scientific Research and Development*, 3:562–566, 2015.
- [112] Wayback Machine — web.archive.org. https://web.archive.org/web/20140823211854/http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/ca/c116-ca503_en-p.pdf. [Accessed 15-07-2024].
- [113] ***. Application. ultrasonic alarm, subchapter: Circuit explanation for the ultrasonic detection unit. http://www.piclist.com/images/www/hobby_elec/e_sonic1_3.htm. accessed on 05.04.2014.
- [114] Behruz Saidov and Vladimir Telezhkin. Simulation of ultrasonic sensor at lower ultrasonic range in data transmission. In *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pages 703–707, 2021.
- [115] Tan-Sy Nguyen, Trong-Nghia Nguyen, Quoc-Sang Tran, and Thai-Hoang Huynh. Improvement of ultrasound-based localization system using sine wave detector and can network. *J. Sens. Actuator Networks*, 6:12, 2017.
- [116] Long-Yeu Chung. Remote teleoperated and autonomous mobile security robot development in ship environment. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013:1–14, 2013.

- [117] Sybil P. Parker, editor. *McGraw-Hill Dictionary of Scientific and Technical Terms*. McGraw-Hill Professional Publishing, September 2002.
- [118] Transducer Beam Spread — web.archive.org. <https://web.archive.org/web/20140329065639/http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/EquipmentTrans/beamspread.htm>. [Accessed 15-07-2024].
- [119] Fundamentals of ultrasonic inspection * revised. 2018.
- [120] Intech Chennai — intechchennai.com. <https://intechchennai.com/faq/ultrasonic-sensors.php>. [Accessed 15-07-2024].
- [121] A. K. Shrivastava, A. Verma, and S. P. Singh. Distance measurement of an object or obstacle by ultrasound sensors using p89c51rd2. *International Journal of Computer Theory and Engineering*, 2(1):64–68, February 2010.
- [122] K.C. Nalavade, F. Bharmal, T. Deore, and A. Patil. Use of ultrasonic sensors, gps and gsm technology to implement alert and tracking system for blind man. In *Proceedings of the International Conference of Advance Research and Innovation (ICARI-2014)*, pages 272–274, February 2014.
- [123] O. Hödl and G. Fitzpatrick. Trombosonic: Designing and exploring a new interface for musical expression in music and non-music domains. In *Proceedings of ACHI 2014: The Seventh International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, pages 54–59, Barcelona, Spain, March 2014.
- [124] J. B. Cicchino, A. H. Eichelberger, and A. T. McCartt. Buick lucerne drivers’ experiences with rear parking sensors. *Journal of Traffic Injury Prevention*, 2014 (in press).
- [125] Genesis of mems accelerometers for select the optimal accelerometer for bio applications. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 2019.
- [126] Sergey Viktorovich Eliseev and Andrey Vladimirovich Eliseev. Theory of oscillations - structural mathematical modeling in problems of dynamics of technical objects. In *Studies in Systems, Decision and Control*, 2019.

BIBLIOGRAFIE

- [127] Manish J. Gajjar. Chapter 3 - sensors and actuators. In Manish J. Gajjar, editor, *Mobile Sensors and Context-Aware Computing*, pages 37–83. Morgan Kaufmann, 2017.
- [128] University of Zurich. Novel design principles and technologies for a new generation of high dexterity soft-bodied robots inspired by the morphology and behavior of the octopus. http://www.octopus-project.eu/files/OCTOPUS_IP_D3.1_300409.pdf, 2009. [Accessed 17-07-2024].
- [129] Lecture Notes on Sensors — scribd.com. <https://www.scribd.com/document/63079032/Lecture-Notes-on-Sensors>. [Accessed 16-07-2024].
- [130] Scott Mayo. Understanding Key Accelerometer Specs && Evaluation Engineering — web.archive.org. <https://web.archive.org/web/20141208075347/http://www.evaluationengineering.com/articles/200906/understanding-key-accelerometer-specs.php>, 2009. [Accessed 16-07-2024].
- [131] Halit Eren. Capacitive sensors: Displacement, humidity, force. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*, 2014.
- [132] Dytran Instruments. Wayback Machine — web.archive.org. <https://web.archive.org/web/20170623074521/http://www.dytran.com/assets/PDF/Accelerometer%20Mounting%20Considerations.pdf>. [Accessed 16-07-2024].
- [133] Sensonics Ltd. What Are The Benefits Of Piezoelectric Accelerometers — sensonics.co.uk. <https://www.sensonics.co.uk/blog/benefits-of-piezoelectric-accelerometers>. [Accessed 16-07-2024].
- [134] Gary Felsing. Accelerometer Limitations - Motus Bioengineering — motusbioengineering.com. <http://www.motusbioengineering.com/accelerometer-limitations.htm>. [Accessed 16-07-2024].
- [135] F. Werner, J. Diermaier, S. Schmid, and P. Panek. Fall detection with distributed floor-mounted accelerometers: An overview of the development and evaluation of a fall detection system within the project ehome. In *Proceedings of the 2011 5th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth)*, pages 354–361, Dublin, Ireland, May 2011.

- [136] Taoufik Ben Jabeur□, , and Boualem Boashash. Design of quadratic time frequency distribution and application to the analysis and detection of fetal movements. 2011.
- [137] B. Boashash and T. Ben Jabeur. Design of a high-resolution separable-kernel quadratic tfd for improving newborn health outcomes using fetal movement detection. In *Proceedings of the 2012 11th International Conference on Information Science, Signal Processing and their Applications (ISSPA)*, pages 354–359, Montreal, Canada, July 2012.
- [138] B. Boashash, M.S. Khlif, T. Ben-Jabeur, C.E. East, and P.B. Colditz. Passive detection of accelerometer-recorded fetal movements using a time–frequency signal processing approach. *Digital Signal Processing*, 25:134–155, February 2014.
- [139] H. Sun, G. Fu, and H. Xie. A mems accelerometer-based real-time motion-sensing module for urological diagnosis and treatment. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 37(2):127–134, January 2013.
- [140] Ioan Alexandru Ivan, Mihai Ardeleanu, Guillaume J. Laurent, Ning Tan, and Cédric Clévy. High dynamics and precision optical measurement using psd (position sensitive detector) in reflection-mode. application to a 2d object tracking over a smart surface. 2012.
- [141] Wang Guanghui, Ping Shum, Xu Guoliang, and Zhang Xu-ping. Position detection improvement of position sensitive detector (psd) by using analog and digital signal processing. *2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing*, pages 1–4, 2007.
- [142] Yifu Wang, Peichen Yang, Haoyu Du, Weizong Xu, Dong Zhou, Fangfang Ren, Dunjun Chen, Rong Zhang, Youdou Zheng, and Hai Lu. 4h-sic tetra-lateral position sensitive detector for ultraviolet measurements. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024.
- [143] Jacek Mądry and Roman Wawrzaszek. Design and tests of sunsensor based on 2d position sensitive detector. In *Symposium on Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments (WILGA)*, 2019.
- [144] Excelitas Technologies. IR Light Emitting Diodes | Excelitas — excelitas.com. <https://www.excelitas.com/product-category/ir-light-emitting-diodes>. [Accessed 16-07-2024].

BIBLIOGRAFIE

- [145] Amjed S. Al-Fahoum, Heba B Al_hmoud, and Ausaila A. Al-Fraihat. A smart infrared microcontroller-based blind guidance system. *Active and Passive Electronic Components*, 2013:1–7, 2013.
- [146] Ana-Maria Claudia Dragulinescu, Ioana M. Marcu, Simona Halunga, and Octavian Fratu. Sensors system design for discrimination between humans and animals. In *Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies*, 2016.
- [147] Mingyao Wei, Bo-Rui Lin, Yong-Ye Lin, Gwo-Jen Chiou, and Wen-Kai Kuo. Experimental study on effects of light source and different smoke characteristics on signal intensity of photoelectric smoke detectors. *2021 IEEE 3rd Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, pages 518–522, 2021.
- [148] Martina O’Toole and Dermot Diamond. Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 8:2453 – 2479, 2008.
- [149] H. Ma and Q. Liu. The analysis of the difference between infrared soil temperature and I band effective soil temperature. In *2011 International Workshop on Multi-Platform/Multi-Sensor Remote Sensing and Mapping*, pages 1–4, Xiamen, 2011.
- [150] E. Claverie, J. Lecoœur, V. Letort, and P. Cournède. Modeling soil temperature to predict emergence. In *2016 IEEE International Conference on Functional-Structural Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Applications (FSPMA)*, pages 28–37, Qingdao, 2016.
- [151] C. Liu, W. Ren, B. Zhang, and C. Lv. The application of soil temperature measurement by lm35 temperature sensors. In *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, pages 1825–1828, Harbin, 2011.
- [152] Almaw Ayele Aniley, Naveen Kumar S.K., and Akshaya Kumar A. Soil temperature sensors in agriculture and the role of nanomaterials in temperature sensors preparation. *International Journal of Engineering and Manufacturing Science*, 7(2):363–372, 2017.
- [153] Campbell Scientific. Soil temperature sensors. <https://www.campbellsci.com/soil-temperature>. Accesat la 30.10.2018.

- [154] LI-COR. Li-8100a soil gas flux system. <https://www.licor.com/env/support/LI-8100A/topics/acu110-temperature-probe.html>.
- [155] W. Kester, J. Bryant, and W. Jung. Temperature sensors. <https://www.analog.com/media/en/training-seminars/design-handbooks/Practical-Design-Techniques-Sensor-Signal/Section7.PDF>. Accesat la 02.11.2018.
- [156] R. . Wang et al. Temperature sensor using bjt-mosfet pair. *Electronics Letters*, 48(9):503–504, April 2012.
- [157] Texas Instruments. Lm35 precision centigrade temperature sensors. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Accesat la 31.10.2018.
- [158] T. Agarwal. Temperature sensors – types, working & operation. <https://www.elprocus.com/temperature-sensors-types-working-operation/>. Accesat la 31.10.2018.
- [159] Hukseflux Thermal Sensors. Stp01 soil temperature sensor. <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/soil-temperature-sensors/stp01-soil-temperature-sensor>.
- [160] Lm35 temperature sensor. <https://www.instructables.com/id/LM35-Temperature-Sensor/>. Accesat la 31.10.2018.
- [161] Soil moisture and temperature. <https://www.metergroup.com/environment/products/ech2o-5tm-soil-moisture/>. Accesat la 31.10.2018.
- [162] Soil moisture and temperature sensor. <https://www.digikey.com/catalog/en/partgroup/soil-moisture-and-temperature-sensor/69885>. Accesat la 02.11.2018.
- [163] Sensirion Company. Humidity and temperature sensor ic - datasheet sht1x (sht10, sht11, sht15). https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/Sensirion%20PDFs/SHT10_11_15.pdf. Accesat la 02.11.2018.
- [164] Larry Pitts. Monitoring soil moisture for optimal crop growth. <https://observant.zendesk.com/hc/en-us/articles/208067926-M>

BIBLIOGRAFIE

- onitoring-Soil-Moisture-for-Optimal-Crop-Growth. Accesat la 04.11.2018.
- [165] Definition of soil-moisture tension. <https://www.merriam-webster.com/dictionary/soil-moisture%20tension>. Accesat la 05.11.2018.
- [166] Sparkfun soil moisture sensor. <https://www.sparkfun.com/products/13322>. Accesat la 05.11.2018.
- [167] admin. Soil Moisture Sensor and Arduino Interfacing — theorycircuit.com. <https://theorycircuit.com/arduino-projects/soil-moisture-sensor-and-arduino-interfacing/>. [Accessed 16-07-2024].
- [168] Soil moisture sensor. <https://www.vernier.com/products/sensors/sms-bta/>. Accesat la 05.11.2018.
- [169] M13 thetaprobe soil moisture sensor. <https://www.delta-t.co.uk/product/m13/>. Accesat la 05.11.2018.
- [170] Wet-2 sensor. <https://www.delta-t.co.uk/product/wet-2/>. Accesat la 05.11.2018.
- [171] Pr2 profile probe - analogue version. <https://www.delta-t.co.uk/product/pr2/>. Accesat la 05.11.2018.
- [172] Edyn: Welcome to the connected garden. <https://www.kickstarter.com/projects/edyn/edyn-welcome-to-the-connected-garden>. Accesat la 05.11.2018.
- [173] Irrrometer tensiometers. <http://www.irrometer.com/sensors.html>. Accesat la 06.12.2018.
- [174] D. R. HARTREE. The eniac, an electronic computing machine. *Nature*, 158(4015):500–506, October 1946.
- [175] Anshul A. Vyas, Changjian Zhou, and Cary Y. Yang. On-chip interconnect conductor materials for end-of-roadmap technology nodes. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 17(1):4–10, 2018.
- [176] Stuart Ferguson and Rodney Hebels. *Computer systems and technology*, page 167–196. Elsevier, 2003.

- [177] Ugah John, Chigozie-Okwum Chioma, Ezeanyejì Peter, and Mbaocha Nnamdi. Virtual and cache memory: Implications for enhanced performance of the computer system. *International Journal of Computer Applications*, 2018.
- [178] Michał Kruszewski. How shifting focus from register to data functionality can enhance register and bus management. *Electronics*, 2024.
- [179] Peter Marwedel. *Embedded System Design: Embedded Systems Foundations of Cyber-Physical Systems*. Springer Netherlands, 2011.
- [180] Okoro U. Raymond. Application of microprocessors. 2013.
- [181] Marc Duranton, David Black-Schaffer, Koen De Bosschere, and Jonas Maebe. The hipec vision for advanced computing in horizon 2020. 2013.
- [182] Edward A. Lee and Sanjit A. Seshia. Introduction to embedded systems - a cyber-physical systems approach. 2013.
- [183] Manuel A. Jimenez, Rogelio Palomera, and Isidoro Couvertier. Introduction to embedded systems: Using microcontrollers and the msp430. 2013.
- [184] Jonathan W. Valvano. Introduction to embedded systems. 2016.
- [185] Kai Qian, David den Haring, and Li Cao. Introduction to embedded systems. *Embedded Systems Design using the MSP430FR2355 LaunchPad™*, 2009.
- [186] Julio Sanchez and M. P. Canton. Microcontroller programming: The microchip pic. 2006.
- [187] Muhammad Ali Mazidi, Sarmad Naimi, and Sepehr Naimi. The avr microcontroller and embedded systems : using assembly and c / muhammad ali mazidi, sarmad naimi, sepehr naimi. 2011.
- [188] Manas Kumar Parai, Banasree Das, and Gautam Das. An overview of microcontroller unit: From proper selection to specific application. 2013.
- [189] Dung Dang, Daniel J. Pack, and Steven F. Barrett. *Introduction to Microcontrollers and the MSP432*, page 1–21. Springer International Publishing, 2017.

BIBLIOGRAFIE

- [190] Du-Hwi Kim, Ji-Hye Jang, Liyan Jin, Pan-Bong Ha, and Young-Hee Kim. Design of an eeprom for a mcu with the wide voltage range. *Journal of Semiconductor Technology and Science*, 10:316–324, 2010.
- [191] Farzin Asadi. *LCD and EEPROM*, page 161–177. Apress, 2023.
- [192] E. White. *Making Embedded Systems: Design Patterns for Great Software, Second Edition*. Oreilly and Associate Series. O’Reilly Media, Incorporated, 2024.
- [193] Arun Kumar Rana, Nitin Goyal, Sharad Sharma, and Suman Lata Tripathi. *Internet of things*. CRC Press, Boca Raton, January 2022.
- [194] Joseph Yiu. *The Definitive Guide to ARM Cortex-M3 and Cortex-M4 Processors*. Newnes, 2013.
- [195] Swivano Agmal, Jalu Ahmad Prakosa, and Chifayah Astuti. Measurement uncertainty analysis of the embedded system of microcontroler for an accurate timer/stopwatch. *2021 7th International Conference on Electrical, Electronics and Information Engineering (ICEEIE)*, pages 290–294, 2021.
- [196] Laurențiu Dimitriu, Mihai Lucanu, Cristian Aghion, and Ovidiu Ursaru. Control with microcontroller for pwm single-phase inverter. *Signals, Circuits and Systems, 2003. SCS 2003. International Symposium on*, 1:265–268 vol.1, 2003.
- [197] Steven F. Barrett and Daniel J. Pack. *Timing Subsystem*, page 151–204. Springer International Publishing, 2019.
- [198] Jonathan Bartlett. Introduction to microcontrollers. *Electronics for Beginners*, 2020.
- [199] Esp32-DevKitC V4 Getting Started Guide - ESP-IDF Programming Guide v5.2.2 documentation — docs.espressif.com. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/stable/esp32/hw-reference/esp32/get-started-devkitc.html>. [Accessed 16-07-2024].
- [200] D. A. Godse and A. P. Godse. *Microcontrollers*. Amazon Digital Services LLC - KDP Print, November 2020.

- [201] Abdul Haseeb, Muhammad Faizan, Muhammad Faisal Khan, and Muhammad Iqrar. Microprocessors and microcontrollers: Past, present, and future. *Functional Reverse Engineering of Machine Tools*, 2019.
- [202] J. T. Wunderlich. Focusing on the blurry distinction between microprocessors and microcontrollers. https://web.archive.org/web/20240415144702/http://users.etown.edu/w/wunderjt/ITALY_2009/MicrocontrollerPaper_Highlited%202.pdf. [Accessed 16-07-2024].
- [203] Alessio Sipala. *Development and characterization of a USB communication between two microcontrollers general purpose STM32 to analyze the digital IP in order to improve its performance*. PhD thesis, Politecnico di Torino, 2022.
- [204] Renzo Mischianti. i2c, SPI and UART compared — mischianti.org. <https://mischianti.org/i2c-spi-and-uart-compared/>, 2022. [Accessed 16-07-2024].
- [205] Laboratorul 5: SPI (Serial Peripheral Interface) [CS Open CourseWare] — ocw.cs.pub.ro. <https://ocw.cs.pub.ro/courses/pm/lab/lab5-2021>. [Accessed 16-07-2024].
- [206] Douglas H. Summerville. *Serial Communication*, page 77–111. Springer International Publishing, 2009.
- [207] Aditya Gupta. *Exploitation Using I2C and SPI*, page 81–107. Apress, 2019.
- [208] Cheng Shion Shieh. Innovative and rapid design for i2c (inter-integrated circuit) interface communication of fpga chips. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 658(1):012002, October 2019.
- [209] Peter Dawoud and Dawoud Shenouda Dawoud. *Microcontroller and Smart Home Networks*. River Publishers, September 2022.
- [210] G. Delbergue, C. Jegou, J.P. Diguët, F. Pêcheux, F.V.), B.L. Gal, M. Burton, Gironde). École doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur (Talence, and Gironde). Laboratoire de l'intégration du matériau au système (Talence. *Advances in SystemC/TLM virtual platforms: configuration, communication and parallelism*. 2017.

BIBLIOGRAFIE

- [211] NXP. I2s bus specification. <https://www.nxp.com/docs/en/user-manual/UM11732.pdf>. [Accessed 16-07-2024].
- [212] Marcel J. M. Pelgrom. *Analog-to-Digital Conversion*, page 325–418. Springer New York, October 2012.
- [213] Hemlata Dalmia and Sanjeet K. Sinha. Analog to digital converters (adc): A literature review. *E3S Web of Conferences*, 184:01025, 2020.
- [214] Analog to digital converter. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v4.2/esp32/api-reference/peripherals/adc.html>. [Accessed 16-07-2024].
- [215] Ezio Biglieri and Giorgio Taricco. Transmission and reception with multiple antennas: Theoretical foundations. *Foundations and Trends™ in Communications and Information Theory*, 1(2):183–332, 2004.
- [216] Murat Kuscü, Ergin Dinc, Bilgesu A. Bilgin, Hamideh Ramezani, and Ozgur B. Akan. Transmitter and receiver architectures for molecular communications: A survey on physical design with modulation, coding, and detection techniques. *Proceedings of the IEEE*, 107(7):1302–1341, July 2019.
- [217] Zheng Yang, Zimu Zhou, and Yunhao Liu. From rssi to csi: Indoor localization via channel response. *ACM Computing Surveys*, 46(2):1–32, November 2013.
- [218] Jiao Liu, Guanlong Teng, and Feng Hong. Human activity sensing with wireless signals: A survey. *Sensors*, 20(4):1210, February 2020.
- [219] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frédéric Chaxel, and Fernand Meyer. Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*, pages 197–202, 2018.
- [220] Amine Rghioui, Sandra Sendra, Jaime Lloret Mauri, and Abedlmajid Oumnad. Internet of Things for Measuring Human Activities in Ambient Assisted Living and e-Health. *Network Protocols & Algorithms*, 8:15–28, 2016.

- [221] Daniele Croce, Michele Gucciardo, Giuseppe Santaromita, Stefano Mangione, and Ilenia Tinnirello. Performance of LoRa technology: link-level and cell-level performance. In *LPWAN Technologies for IoT and M2M Applications*, pages 181–197. Elsevier, 2020.
- [222] Daniele Croce, Michele Gucciardo, Stefano Mangione, Giuseppe Santaromita, and Ilenia Tinnirello. Impact of LoRa Imperfect Orthogonality: Analysis of Link-Level Performance. *IEEE Communications Letters*, 22(4):796–799, 2018.
- [223] Aloÿs Augustin, Jiazi Yi, Thomas Clausen, and William Townsley. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. *Sensors*, 16(9):1466, September 2016.
- [224] Alexandru Lavric and Valentin Popa. Internet of Things and LoRa™ Low-Power Wide-Area Networks: A survey. *2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, pages 1–5, 2017.
- [225] Jonathan de Carvalho Silva, Joel J. P. C. Rodrigues, Antonio M. Alberti, Petar Solic, and Andre L. L. Aquino. Lorawan — a low power wan protocol for internet of things: A review and opportunities. In *2017 2nd International Multidisciplinary Conference on Computer and Energy Science (SpliTech)*, pages 1–6, 2017.
- [226] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara. Low Power Wide Area Networks: An Overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873, Secondquarter 2017.
- [227] Danco Davcev, Kosta Mitreski, Stefan Trajkovic, Viktor Nikolovski, and Nikola Koteli. IoT agriculture system based on LoRaWAN. *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*, pages 1–4, 2018.
- [228] J. Haxhibeqiri, A. Karaagac, F. Van den Abeele, W. Joseph, I. Moerman, and J. Hoebeke. Lora indoor coverage and performance in an industrial environment: Case study. In *2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, pages 1–8, 2017.
- [229] Jetmir Haxhibeqiri, Floris Van den Abeele, Ingrid Moerman, and Jeroen Hoebeke. LoRa Scalability: A Simulation Model Based on Interference Measurements. *Sensors*, 17(6), 2017.

BIBLIOGRAFIE

- [230] Semtech. LoRa™ Modulation Basics (Application Note). <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>, 2019.
- [231] Jetmir Haxhibeqiri, Adnan Shahid, Martijn Saelens, Jan Bauwens, Bart Jooris, Eli De Poorter, and Jeroen Hoebeke. Sub-Gigahertz Inter-Technology Interference. How Harmful is it for LoRa? *2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–7, 2018.
- [232] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui, and T. Watteyne. Understanding the Limits of LoRaWAN. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40, 2017.
- [233] Luis Manuel Fernández-Ahumada, Jose Ramírez-Faz, Marcos Torres-Romero, and Rafael López-Luque. Proposal for the Design of Monitoring and Operating Irrigation Networks Based on IoT, Cloud Computing and Free Hardware Technologies. *Sensors*, 19(10):2318, May 2019.
- [234] Rashmi Sharan Sinha, Yiqiao Wei, and Seung-Hoon Hwang. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. *ICT Express*, 3(1):14–21, 2017.
- [235] Altair-semi. Designing low power IoT applications? Ask the experts part 2: LPWA technology features and data management. <https://altair-semi.com/designing-low-power-iot-applications-ask-the-experts-part-2-lpwa-technology-features-and-data-management/>, 2019. accesat la 12.03.2018.
- [236] Lluís Casals, Bernat Mir, Rafael Vidal, and Carles Gomez. Modeling the Energy Performance of LoRaWAN. *Sensors*, 17(10), 2017.
- [237] What is LoRa Geolocation. <https://gridlocate.com/blog/lora-geolocation/>, 2019.
- [238] Kais Mekki, Eddy Bajic, Frederic Chaxel, and Fernand Meyer. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1):1–7, March 2019.
- [239] SigFox. Where is your company based? <https://buy.sigfox.com/buy>, 2019.

- [240] B. Vejlgard, M. Lauridsen, H. Nguyen, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, and M. Sorensen. Coverage and Capacity Analysis of Sigfox, LoRa, GPRS, and NB-IoT. In *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, 2017.
- [241] A. Lavric, A. I. Petrariu, and V. Popa. Long Range SigFox Communication Protocol Scalability Analysis Under Large-Scale, High-Density Conditions. *IEEE Access*, 7:35816–35825, 2019.
- [242] Carles Gomez, Juan Carlos Veras, Rafael Vidal, Lluís Casals, and Josep Paradells. A Sigfox Energy Consumption Model. *Sensors*, 19(3), 2019.
- [243] Mahmoud Mahmoud and Auday Mohamad. A Study of Efficient Power Consumption Wireless Communication Techniques/ Modules for Internet of Things (IoT) Applications. *Advances in Internet of Things*, 06:19–29, 01 2016.
- [244] Ahmed Dridi, Salma Sassi, and Sami Faiz. Towards a Semantic Medical Internet of Things. In *2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA)*. IEEE, October 2017.
- [245] Lishan Bao, Lei Wei, Chengling Jiang, Weiwei Miao, Bo Guo, Wei Li, Xiangdong Cheng, Rui Liu, and Jun Zou. Coverage Analysis on NB-IoT and LoRa in Power Wireless Private Network. *Procedia Computer Science*, 131:1032 – 1038, 2018. Recent Advancement in Information and Communication Technology:.
- [246] U-blox. LTE Cat M1. <https://www.u-blox.com/en/lte-cat-m1-old>, 2019.
- [247] Link-Labs. LTE eDRX and PSM Explained for LTE-M1. <https://www.link-labs.com/blog/lte-e-drx-psm-explained-for-lte-m1>, 2019.
- [248] Min Chen, Yiming Miao, Yixue Hao, and Kai Hwang. Narrow Band Internet of Things. *IEEE Access*, 5:20557–20577, 2017.
- [249] Y. E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, and H. S. Razaghi. A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 55(3):117–123, 2017.

BIBLIOGRAFIE

- [250] Richard Edgar. Threats to Precision Agriculture. <https://www.wi-fi.org/beacon/richard-edgar/wi-fi-6-is-set-to-change-the-future-of-iot-here-s-why>, 2020.
- [251] I Ketut Agung Enriko and Fikri Nizar Gustiyana. Wi-fi halow: Literature review about potential use of technology in agriculture and smart cities in indonesia. In *2024 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)*. IEEE, January 2024.
- [252] Le Tian, Serena Santi, Amina Seferagić, Julong Lan, and Jeroen Fa-maey. Wi-fi halow for the internet of things: An up-to-date survey on ieee 802.11ah research. *Journal of Network and Computer Applications*, 182:103036, May 2021.
- [253] Víctor M. G. Martínez, Moisés R. N. Ribeiro, and Vinícius F. S. Mota. Wi-fi faces the new wireless ecosystem: a critical review. *Annals of Telecommunications*, 79(5–6):397–413, November 2023.
- [254] Muhammad Asif Khan, Wael Cherif, Fethi Filali, and Ridha Hamila. Wi-Fi Direct Research - Current Status and Future Perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 93:245–258, September 2017.