

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA DE APLICAȚII UTILIZÂND REȚELE DE SENZORI WIRELESS

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul AUTOMATICĂ
de către

Ing. Cristian Gelu Vașar

Conducător științific: prof.univ.dr.ing. Octavian Proștean
Referenți științifici: prof.univ.dr.ing. Mihail Abrudean
prof.univ.dr.ing. Sergiu Stelian Iliescu
prof.univ.dr.ing. Ioan Filip

Ziua susținerii tezei: 8.12.2009

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Automatică și Informatică Aplicată, din cadrul Universității „Politehnica” din Timișoara.

Cele mai alese gânduri de recunoștință și mulțumire se îndreaptă spre conducătorul științific, domnul profesor dr.ing. Octavian Proștean, care m-a sprijinit constant în activitatea mea didactică, doctorală și științifică, și căruia îi datorez în bună măsură formația mea de cercetător și pedagog. De asemenea, doresc să evidențiez efortul enorm depus și răbdarea de care acesta a dat dovadă în îndrumarea competentă și permanentă pe parcursul elaborării acestei lucrări.

Mulțumesc domnului prof.dr.ing. Ioan Filip care, cu generozitate, răbdare și profesionalism, a îmbogățit permanent conținutul ideatic și științific al cercetărilor mele, dând consistență tezei, precum și pentru sprijinul personal și încrederea pe care mi le-a acordat în întreaga mea carieră universitară.

De asemenea, doresc să mulțumesc tuturor colegilor din laboratorul B027 pentru sprijinul permanent acordat și pentru întreaga colaborare de peste 12 ani, concretizată printr-o lungă listă de realizări comune, atât pe plan didactic, cât și științific, multe dintre ele fiind puncte de referință pentru teza elaborată.

Mulțumesc întregului colectiv al Departamentului de Automatică și Informatică Industrială, din cadrul Universității Politehnica din Timișoara, care a contribuit la formarea mea profesională și colegilor care mi-au oferit sprijinul și prietenia lor.

Aduc de asemenea mulțumiri domnilor prof.dr.ing. Mihail Abrudean (Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca) și prof.dr.ing. Sergiu Stelian Iliescu (Universitatea Politehnica din București), care au răspuns solicitării de a face parte din comisia de analiză a tezei pentru răbdarea de a evalua prezenta teză.

Nu în ultimul rând, doresc să adresez mulțumirile cuvenite tuturor celor care, direct sau indirect, prin sugestiile oferite au contribuit la șlefuirea acestui demers științific și m-au susținut în finalizarea lui.

Timișoara, decembrie 2009

Vașar Cristian Gelu

Vaşar, Cristian Gelu

Contribuții la dezvoltarea de aplicații utilizând rețele de senzori wireless

Teze de doctorat ale UPT, Seria X, Nr. YY, Editura Politehnica, 2009, 196 pagini, 115 figuri, 9 tabele.

ISSN: 1842-5208

ISBN: 978-606-554-025-5

Cuvinte cheie: rețele de senzori wireless, tehnici de agregare a informațiilor, modele Markov, fiabilitate, detecție de erori.

Rezumat

În cadrul acestei lucrări sunt abordate problematici specifice dezvoltării de aplicații cu rețele de senzori wireless. După o succintă trecere în revistă a stadiului actual privind tehnologiile utilizate în domeniu se tratează problema optimizării consumului de energie în cadrul rețelelor de senzori prin tehnici de agregare, respectiv rutare a informațiilor. În continuare se studiază aspecte referitoare la toleranța la defecte a rețelelor de senzori propunându-se metode de modelare a fiabilității acestora bazate pe modele Markov. Se realizează o analiză comparativă a diferitelor structuri de rețele de senzori wireless. În finalul lucrării se prezintă metode de detecție și respectiv tratare a erorilor funcționale care pot apărea în cadrul aplicațiilor cu rețele de senzori.

Cuprins

ABREVIERI. NOTAȚII.	9
1. INTRODUCERE.....	10
1.1 Oportunitatea și obiectivele lucrării	10
1.2. Prezentarea conținutului lucrării.....	11
2. REȚELE DE SENZORI WIRELESS	13
2.1. Preliminarii	13
2.2. Aplicații ale rețelelor de senzori wireless	16
2.3. Arhitectura rețelei de senzori wireless.....	19
2.3.1. Nivelul nod	20
2.3.2. Nivelul rețea.....	23
2.3.3. Nivelul server.....	24
2.3.4. Nivelul client.....	25
2.3.5. Niveluri software	26
2.4. Standarde utilizate în rețele de senzori wireless	27
2.5. Tipuri de topologii	28
2.5.1. Topologia de tip stea	28
2.5.2. Topologia de tip plasă (mesh)	29
2.5.3. Topologia hibridă stea-plasă.....	30
2.6. Rețeaua de tip Xmesh	31
2.7. Tehnologii de programare a senzorilor.....	34
2.7.1. Mediul de operare TinyOS.....	34
2.7.2. Limbajul NesC.....	35
2.7.3. Cygwin.....	36
2.7.4. MoteView	37
2.8. Protocoale de rutare în rețelele wireless	37
2.9. Concluzii	39

3. METODE DE CREȘTERE A AUTONOMIEI DE FUNCȚIONARE A REȚELELOR DE SENZORI WIRELESS....	40
3.1. Preliminarii.....	40
3.2. Metode de creștere a autonomiei de funcționare prin tehnici de agregare a informațiilor	40
3.2.1. Introducere.....	40
3.2.2. Aspecte energetice.....	42
3.2.3. Studii de caz	44
3.2.3.1. Studii de caz privind utilizarea unei singure stații de bază.....	47
3.2.3.2. Studii de caz privind utilizarea stațiilor de bază adiționale.....	52
3.2.4. Concluzii	55
3.3. Metode de creștere a autonomiei de funcționare prin tehnici de rutare.....	56
3.3.1. Preliminarii.....	56
3.3.2. Tehnici de rutare în rețele de senzori wireless.....	58
3.3.3. Aspecte energetice.....	63
3.3.4. Algoritm multi-hop pentru optimizarea consumului de energie	65
3.3.5. Studii de caz	67
3.3.6. Concluzii	71
3.4. Abordări experimentale	72
3.5. Concluzii	78
4. TOLERANȚA LA DEFECTE ÎN CADRUL REȚELELOR DE SENZORI WIRELESS.....	80
4.1. Preliminarii.....	80
4.2. Nivele de toleranță la defecte în rețele de senzori.....	82
4.2.1. Nivelul fizic.....	83
4.2.2. Nivelul hardware	83
4.2.3. Nivelul software de sistem	84
4.2.4. Nivelul middleware.....	84
4.2.5. Nivelul aplicație	84
4.3. Caracteristici ale toleranței la defect în cadrul unor structuri specifice de rețele de senzori	85
4.4. Modelarea și analizarea fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov	88
4.4.1. Modele Markov pentru rețele de senzori fără unități de schimb.....	90

4.4.1.1. Modelul Markov pentru o rețea cu n senzori și fără unități de schimb	90
4.4.1.2. Modelul Markov pentru o rețea hibridă cu N tipuri diferite de senzori și fără unități de schimb.....	93
4.4.2. Modele Markov pentru rețelele de senzori cu unități de schimb dedicate	95
4.4.2.1. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte o unitate de schimb pentru fiecare tip.....	95
4.4.2.2. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte două unități de schimb pentru fiecare tip	98
4.4.2.3. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte k unități de schimb pentru fiecare tip	102
4.4.3. Modele Markov pentru rețelele de senzori cu unități de schimb universale.....	104
4.4.3.1. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și două unități de schimb universale.....	104
4.4.3.2. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și patru unități de schimb universale.....	107
4.4.3.3. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și k unități de schimb universale.....	111
4.4.3.4. Modelul Markov pentru o rețea cu N tipuri de senzori și k unități de schimb universale.....	115
4.4.4. Analiza comparativă a fiabilității unor rețele de senzori cu toleranța la defecte, asigurată cu unități de schimb dedicate/universale.....	118
4.5. Concluzii	121
5. METODE DE DETECȚIE ȘI TRATARE A ERORILOR DE FUNCȚIONARE ÎN REȚELE DE SENZORI WIRELESS	123
5.1. Preliminarii	123
5.2. Tipuri de defecte în cadrul rețelelor de senzori wireless.....	124
5.2.1. Clasificare din punct de vedere funcțional	124
5.2.2. Clasificare după localizarea în structura rețelei de senzori.....	125
5.3. Preliminarii - Metode de detecție a erorilor din cadrul rețelelor de senzori.....	126
5.4. Metode pentru detecția și tratarea erorilor în funcționarea rețelelor de senzori utilizând rețele neuronale.....	127
5.4.1. Abordarea centralizată a detecției erorilor în rețelele de senzori..	128
5.4.2. Abordarea distribuită a detecției erorilor în rețelele de senzori.....	129
5.4.3. Structura de detecție și corecție a erorilor din rețelele de senzori bazată pe rețele neuronale.....	130

5.5. Studii de caz - detecția erorilor la măsurarea presiunii atmosferice.....	131
5.5.1. <i>Detecția erorilor la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații de la un senzor</i>	132
5.5.1.1. Determinarea structurii rețelei neuronale	134
5.5.1.2. Antrenarea și validarea rețelei neuronale.....	143
5.5.1.3. Detecția erorilor pe perioadă lungă și în condiții de lipsa a valorilor măsurate	146
5.5.1.4. Detecția erorilor în cazul unei perturbații aleatoare, de scurtă durată	148
5.5.1.5. Detecția erorilor în cazul funcționării decuplate de sistemul de achiziție de date.....	151
5.5.1.6. Funcționarea sistemului de detecție a anomaliilor funcționale în cazul erorilor consecutive.....	152
5.5.2. <i>Detecția și tratarea erorilor la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații de la senzori redundanți</i>	155
5.6. Concluzii	158
ANEXA 5.1. REȚEAUA DE SENZORI METEOROLOGICI (ASOS).....	160
ANEXA 5.2. STRUCTURA DATELOR ACHIZITIONATE.....	162
6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE.....	166
6.1. CONCLUZII.....	166
6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE	170
6.3. Direcții de cercetare generate de studiile efectuate.....	171
Bibliografie.....	173
A1. LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI	186
A2. LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE (EXCEPTÂND CELE DIN DOMENIUL TEZEI)	188

ABREVIERI. NOTAȚII.

Abrevieri:

RSW – rețea de senzori wireless

BS – stație de bază

Wh – Wati ora

ASOS - Sistemul Automat De Observații De Suprafață

NWS - National Weather Service

FAA - Federal Aviation Administration

DOD - Department of Defense

RN - rețea neuronală

LM - algoritm de propagare a erorii înapoi (backpropagation), de tip Levenberg-Marquardt

Notații:

MTTS – timp mediu de funcționare până la apariția unui defect

$R(t)$ – fiabilitate

δ - factorul de încredere

ε_1 - eroare de estimare

U_{s_i} , valoarea măsurată de senzorul S_i ,

\hat{U}_{s_i} valoarea estimată de către rețeaua neuronală, corespunzătoare de senzorul S_i

$\bar{U}_{s_{23}}$ - valoarea estimată pe baza informațiilor furnizate de senzorii 2 și 3

1. INTRODUCERE

1.1 Oportunitatea și obiectivele lucrării

Această teză își propune analiza specificului dezvoltărilor de aplicații cu rețele de senzori wireless. Oportunitatea acestor cercetări este dată de utilizarea într-o gama din ce în ce mai largă de aplicații a rețelelor de senzori wireless, plecând de la aplicații de monitorizare a habitaturilor naturale (monitorizarea suprafețelor împădurite, a recifurilor oceanice etc.), până la aplicații industriale (monitorizare de ferme eoliene, a halelor industriale etc.) sau chiar domestice (gen „case inteligente”). Această expansiune a rețelelor de senzori a fost posibilă datorită creșterii puterii de procesare locală a datelor, concomitent cu scăderea prețului de cost și creșterea fiabilității componentelor.

În cadrul tezei sunt studiate problematici importante ale rețelelor de senzori wireless cum sunt:

- eficientizarea consumului energetic al nodurilor în scopul prelungirii duratei de viață a rețelei de senzori.
- modelarea, analiza și îmbunătățirea toleranței la defecte și a fiabilității rețelelor de senzori.
- detecția defectelor/erorilor și recuperarea/corecția acestora.

Primele două problematici au o mare importanță în asigurarea unui nivel ridicat de disponibilitate și calitate a serviciilor oferite de rețeaua de senzori, concomitent cu reducerea costurilor de mentenanță a aplicațiilor cu rețele de senzori, luând în considerare faptul că acestea pot fi distribuite în locuri greu accesibile (zone împădurite, zone muntoase, oceane etc), iar înlocuirea bateriilor de alimentare sau chiar a modulelor defecte poate fi dificil de realizat și implică eforturi financiare considerabile.

Detecția și recuperarea defectelor precum și detecția și corecția erorilor din cadrul rețelelor de senzori conduc la creșterea robusteții aplicațiilor cu rețele de senzori, ridicând de asemenea nivelul de calitate al serviciilor oferite de către acestea.

Principalele obiective propuse în lucrarea de față sunt următoarele:

- √ Studiul critic al stadiului actual în dezvoltarea de aplicații cu rețele de senzori wireless. Se realizează studiul arhitecturilor, standardelor și tehnologiilor specifice rețelelor de senzori, precum și integrarea acestora în diferite aplicații.
- √ Dezvoltarea de metode de reducere a consumului de energie al nodurilor rețelei de senzori prin utilizarea unor tehnici de agregare a informațiilor. Se definește o procedură de agregare specifică unor rețele care au ca scop identificarea unor evenimente manifestate prin apariția unor puncte de extrem local distribuite în aria monitorizată de rețeaua de senzori. Se realizează simularea consumului de energie atât în cazul rețelelor de senzori

în care informația nu este agregată cât și în cazul celor care consideră proceduri de agregare.

- √ Dezvoltarea de metode de reducere a consumului de energie al nodurilor rețelei de senzori prin utilizarea unor tehnici de rutare a informațiilor. Se definește un algoritm de multi-hop, care ține cont de energia disponibilă la nivelul fiecărui senzor în vederea reducerii consumului global al rețelei de senzori. Se realizează simularea consumului de energie considerând diferite scenarii de rutare a informațiilor.
- √ Modelarea și analizarea fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov. Se propun diferite structuri de rețele de senzori, care se analizează și modelează cu ajutorul modelelor Markov prin prisma fiabilității acestora. Se consideră utilizarea de unități de schimb atât universale cât și dedicate pentru înlocuirea componentelor defectate.
- √ Elaborarea de metode de detecție a erorilor funcționale din cadrul rețelelor de senzori. Se propun diferite structuri de detecție a erorilor bazate pe rețele neuronale, care sunt implementate și validate pentru un sistem de monitorizare a presiunii atmosferice.

1.2. Prezentarea conținutului lucrării

Conținutul lucrării este dezvoltat pe parcursul a șase capitole.

În primul capitol, sunt prezentate obiectivele principale ale lucrării și modul de structurare al acesteia funcție de obiectivele și problematica abordată.

În capitolul 2 este prezentată o succintă trecere în revista a evoluției și stadiului actual de dezvoltare a aplicațiilor cu rețele de senzori wireless. Se prezintă pe lângă noțiuni preliminare, și aspecte privind arhitectura rețelelor de senzori, standarde, topologii, și protocoale de rutare utilizate în aplicații cu rețele de senzori wireless.

În capitolul 3 se dezvoltă metode de creștere a autonomiei de funcționare a rețelelor de senzori de tip multi-hop, fiind structurat în două părți. În prima parte se prezintă modalități de eficientizare a consumului energetic al nodurilor rețelei de senzori prin utilizarea de tehnici de agregare a informației vehiculate prin rețea. Se realizează un studiu critic al stadiului actual în agregarea informațiilor, se prezintă aspecte energetice privind funcționarea senzorilor wireless, și se realizează diferite scenarii practice, în care se studiază oportunitatea și beneficiile utilizării tehnicilor de agregare asupra reducerii consumului de energie, fără a altera acuratețea datelor transmise de rețeaua de senzori. În partea a doua se dezvoltă o metoda de reducere a consumului de energie de la nivelul nodurilor rețelei de senzori prin utilizarea de tehnici de rutare, prezentându-se algoritmul multi-hop pentru reducerea consumului de energie și validarea acestuia prin simulări realizate pentru diferite scenarii. În cadrul acestui capitol se prezintă și implementarea strategiilor de

optimizare a consumului utilizând tehnici de agregare a informației, considerând o rețea de senzori bazată pe platforma Iris 2.4 GHz, produsă de compania Crossbow.

În capitolul 4 se prezintă noțiuni preliminare referitoare la toleranța la defecte a rețelelor de senzori, iar apoi se modelează și analizează fiabilitatea rețelelor de senzori utilizând modele Markov. Se modelează analitic fiabilitatea și timpul mediu de funcționare de până la apariția defectului considerând diferite structuri de rețele de senzori atât fără unități de schimb, cât și rețele care dispun de unități de schimb redundante, universale sau dedicate. Se realizează o analiză comparativă a fiabilității rețelelor de senzori, considerând diferite scenarii de asigurare a toleranței la defect ale acestora.

Capitolul 5 prezintă o dezvoltare de metode și structuri pentru detecția funcționării defectuoase din cadrul rețelelor de senzori. Se realizează un studiu critic al metodelor utilizate la detecția diferitelor erori în aplicații cu rețele de senzori. Se prezintă o clasificare a defectelor care afectează rețelele de senzori wireless, iar în final se propun structuri de detecție a erorilor funcționale bazate pe rețele neuronale, implementate și validate cu ajutorul datelor referitoare la presiunea atmosferică, colectate de o rețea de senzori meteorologici autonomi.

În finalul lucrării sunt prezentate concluziile, contribuțiile personale și posibile direcții de cercetare în opinia autorului. Teza se întinde pe 182 pagini și conține 115 de figuri, 9 tabele și 159 de titluri bibliografice. O mare parte din contribuții a fost validată prin publicarea a 7 lucrări științifice, la care autorul tezei este coautor, dintre care la 6 este primul autor, după cum urmează:

- 4 lucrări publicate în volumele unor conferințe indexate ISI Proceedings,
- 1 lucrare publicată în volumul unei conferințe indexate Inspec și IEEEExplore,
- 2 lucrări publicate în volumele unor conferințe internaționale neindexate.

2. REȚELE DE SENZORI WIRELESS

2.1. Preliminarii

În cadrul acestui capitol se prezintă elemente generale referitoare la rețelele de senzori wireless (RSW). Se realizează o prezentare a unor aplicații actuale cu rețele de senzori, se prezintă elemente de arhitectură, standarde utilizate, topologii, iar în finalul capitolului se prezintă tehnologii de programare și protocoale de rutare specifice rețelelor de senzori wireless.

Domeniul rețelelor de senzori wireless oferă o bogată arie interdisciplinară de cercetare, cu aplicabilitate în diverse domenii [1].

Rețelele de senzori wireless reprezintă un grup de dispozitive inteligente autonome, distribuite spațial, care cooperează pentru monitorizarea unor parametri fizici ai mediului în care sunt amplasate. [2][3][4]

Elementele rețelei de senzori vor fi referite în cadrul lucrării prin termenii **senzor**, sau **nod**. Dispozitivul care realizează efectiv percepția mărimilor fizice va fi referit în cadrul lucrării prin termenul „*traductor*”, pentru a se evita confuzia cu termenul *senzor* (utilizat în sensul de nod al rețelei).

Nodurile sunt de regulă dispozitive compacte, ușoare, necesită puțină energie pentru operare, și pot fi amplasate/instalate în zona de monitorizat având o funcționare de lungă durată, cu un grad de fiabilitate ridicat. Dimensiunea nodurilor este foarte variată, mergând de la o dimensiune de ordinul zecilor de centimetri și până la dimensiuni mici, de ordinul milimetrilor. Fiecare nod este dotat cu următoarele module:

- **modul de percepție** – dotat cu traductoare pentru monitorizarea parametrilor fizici din mediul înconjurător (cum ar fi temperatură, zgomot, lumină, presiune atmosferică, câmp electromagnetic, accelerație etc);
- **modul de procesare și stocare a informației** – dotat cu microcontroler și cu o unitate de memorie de tip RAM sau flash;
- **modul de comunicație radio** – necesar pentru comunicația de date, de regulă are o rază de acoperire relativ redusă datorită constrângerilor referitoare la energia de alimentare și la gabaritul antenei de transmisie;
- **sursa de alimentare** – necesară furnizării energiei de alimentare. De regulă, este de tip baterie sau acumulator, dar poate conține și celule fotovoltaice sau alte surse de energie alternativă.

Unele noduri pot conține și module de interfațare cu procesul monitorizat/controlat, de exemplu plăci de achiziție sau elemente de execuție.

Dacă sistemele tradiționale de achiziție de date sunt, în general, suficiente pentru a satisface cerințele unei aplicații industriale în care este necesară supravegherea unui echipament sau proces, sau pentru monitorizarea unei incinte,

acestea nu mai sunt însă suficiente pentru aplicații care implică culegerea și prelucrarea de informații prelevate de pe arii mai extinse sau legate de procese mai complexe.

Cercetările inițiale în domeniul rețelelor de senzori wireless au fost motivate, în principal, de aplicații militare. Astfel ideea de a utiliza dispozitive autonome care să coopereze în vederea îndeplinirii unor taskuri comune datează încă din anii 1950, când s-a început programul anti-submarin *Sound Surveillance System* (SOSUS) urmat mai apoi de *Integrated Undersea Surveillance System* (IUSS). [2]

Conceptul de rețele de senzori a fost dezvoltat în anii 1990, de către University of California, Berkeley, SUA (UCB) în cadrul programului „*Smart Dust*” [5] [6] care a implementat o primă generație de noduri, numită *mica* [7] cu abilități de comunicație utilizând mediul optic, punând bazele unui sistem de operare de tip open source în genul sistemului de operare TinyOS1 și respectiv a unui sistem de gestiune a bazelor de date de tip TinyDB. În aceeași perioadă, în cadrul unui alt proiect, numit „*Wireless Integrated Network Sensors*” (WINS) dezvoltat de către University of California, Los Angeles, SUA (UCLA) s-au dezvoltat senzori dotați cu abilități de comunicație radio [8] [9].

În prezent, gama de aplicații ale rețelelor de senzori este largă incluzând aplicații de monitorizarea geofizică, fenomene meteorologice, din domeniul agriculturii, habitatului natural, transporturi, procese industriale, ferme de vânt, domenii în care aceste rețele îndeplinesc cu succes sarcinile de monitorizare. Odată cu dezvoltarea acestui tip de rețele apar și diverse probleme specifice cu referire la proiectarea sistemului de achiziție și transport de date.

Datorită capacității de comunicație a senzorilor, datele achiziționate pot fi transmise direct spre utilizatorul final, sau pot fi partajate cu alte aplicații, utilizând Rețeaua Internet, după cum este prezentat în Figura 2.1.

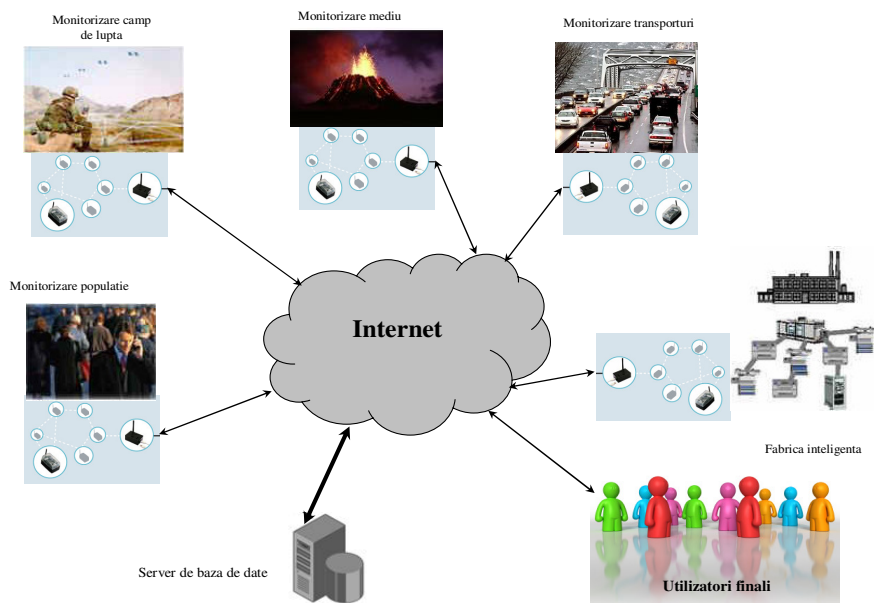


Figura 2.1. Interconectarea rețelelor de senzori wireless

Senzorii rețelei pot fi integrați cu ușurință în mediile care trebuie monitorizate, foarte aproape de fenomenele de observat, datorită faptului că au un

format compact, sunt rezistenți la intemperii și alți factori ostili și nu au nevoie de fire pentru interconectare (având sursa de energie proprie și comunicând wireless). Aceștia pot achiziționa date în timp real, în mod nesupervizat, și datorită capacităților proprii de procesare și stocare pot realiza o pre-procesare a informației înainte de a o transmite prin rețea.

Rețelele de senzori wireless reprezintă un mijloc de legătură între lumea fizică și cea virtuală, care a devenit în ultimul timp, din ce în ce mai atractiv, oferind acces la informație oricând și oriunde pe o anumită arie geografică, colectând, procesând, analizând și distribuind informația achiziționată.

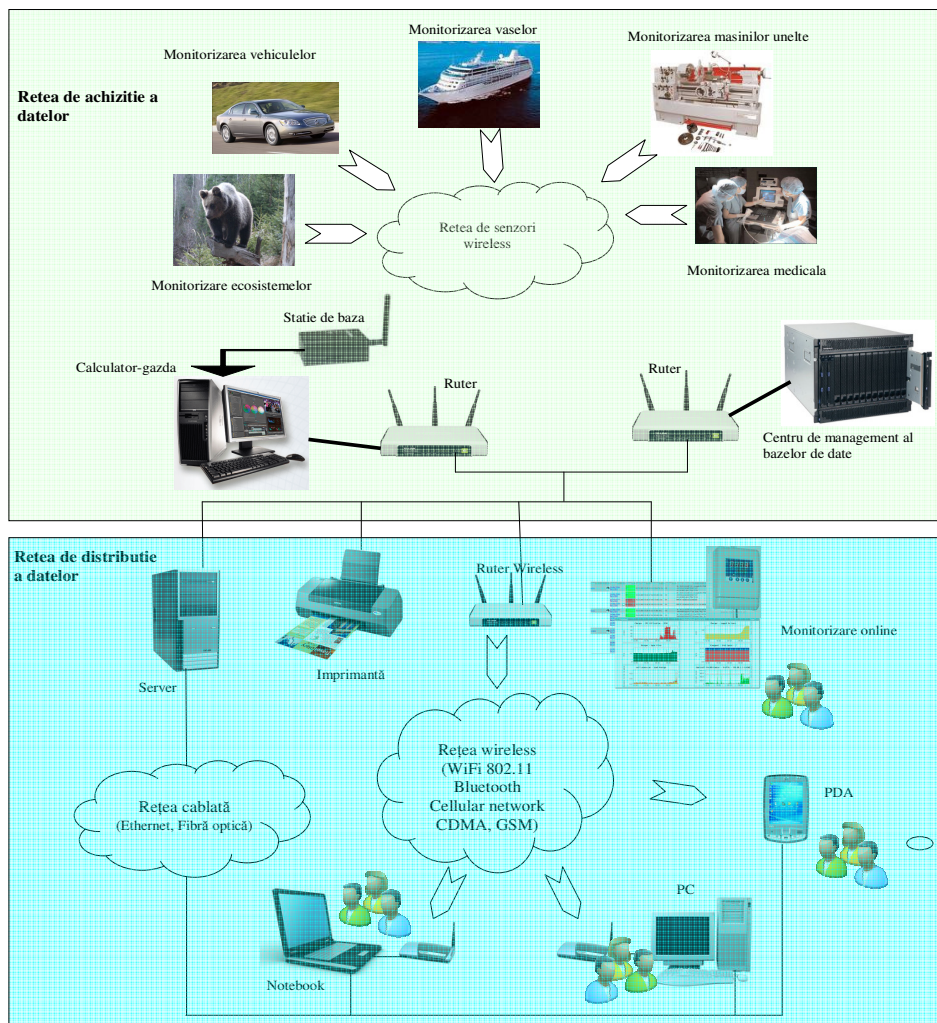


Figura 2.2. Rețea de senzori wireless

Din punctul de vedere al manipulării datelor, în cadrul aplicațiilor cu rețele de senzori wireless se disting două componente distincte, reprezentate în Figura 2.2:

- rețeaua de achiziție a datelor;
- rețeaua de distribuție a datelor.

În cadrul rețelei de achiziție a datelor, elementul principal este reprezentat de rețeaua de senzori wireless. Aceasta este integrată efectiv în mediul care trebuie monitorizat, și pe baza unui program prestabilit efectuează măsurători, prelucrează datele măsurate iar apoi le trimite spre un sistem de calcul dedicat (calculatorul-gazda) pentru procesări mai complexe și respectiv stocare. Comunicarea dintre nodurile rețelei de senzori și calculatorul-gazda se realizează prin intermediul stației de bază, care reprezintă punctul prin care se poate extrage informația din rețeaua de senzori, respectiv prin care se pot transmite comenzi spre senzorii rețelei.

În cazul aplicațiilor care implică un volum mare de date, se utilizează un centru de stocare a datelor, utilizând servere de gestiune a bazelor de date dedicate.

Utilizatorul final, de regulă, accesează datele din afara calculatorului-gazdă, utilizând o aplicație (de exemplu pagina web, email, aplicație software) care rulează pe un server, care de cele mai multe ori nu este dedicat doar pentru acea aplicație. În aceste situații, serverul, la rândul său, accesează datele colectate de rețeaua de senzori fie utilizând calculatorul-gazdă, fie centrul de stocare al bazelor de date prin intermediul unei rețele de transport (poate fi Internet sau o rețea dedicată). Aplicația este accesată utilizând un terminal (calculator personal, laptop, PDA - Personal Digital Assistant, telefon mobil, etc), care se conectează la serverul de aplicații, printr-o rețea cablată (de tip Ethernet, fibra optică etc) sau printr-o conexiune wireless (WiFi, Bluetooth GSM etc).

De asemenea utilizatorul final poate vizualiza datele pe echipamente de monitorizare online dedicate (display-uri) conectată direct la calculatorul-gazdă sau la centrul de stocare al datelor.

Caracteristicile specifice pentru o rețea de senzori wireless includ următoarele [10] [11] :

- Putere limitată disponibilă la nivelul fiecărui senzor;
- Capacitatea de a rezista unor condiții dificile;
- Capacitatea de a rezolva situația unui nod defect;
- Mobilitatea nodurilor;
- Dinamica topologiei rețelei;
- Rezolvarea situației căderii unui traseu de comunicație;
- Diversitatea nodurilor;
- Suprafața de distribuire a nodurilor poate fi foarte mare;
- Nodurile nu trebuie supravegheate;

2.2. Aplicații ale rețelelor de senzori wireless

Deși primele cercetări în domeniul utilizării unor senzori capabili să coopereze în mod autonom au avut un caracter militar, ulterior s-au impus într-o gamă extrem de variată de aplicații: militare, industriale, medicale, automatizări domestice, monitorizarea mediului, transporturi s.a.m.d., datorită faptului că

rețelele de senzori sunt fiabile, precise, flexibile, implică costuri mici, și relativ sunt ușor de dezvoltat. [12] [13]

Odată cu dezvoltarea acestui tip de aplicații au apărut și diverse probleme specifice cu referire la proiectarea sistemelor de achiziție cu rețele de senzori, cum ar fi: asigurarea autonomiei de funcționare, minimizarea consumului de energie, detecția erorilor, toleranța la defecte etc.

Câteva exemple punctuale de aplicații cu rețele de senzori wireless sunt prezentate în continuare:

- Facultatea Harvard a dezvoltat în colaborare cu *AID Networks* și *Center for Integration of Medicine and Innovative Technology (CIMIT)*, un proiect numit **CodeBlue** care constă într-o rețea de senzori capabilă să monitorizeze parametrii medicali ai bolnavilor internați într-un spital, utilizând senzori conectați la oximetre, EKG-uri, aparate de măsurat tensiunea, bazați pe platformele MicaZ, Mica2, Telos. Proiectul a fost susținut de granturi din partea fundațiilor *National Science Foundation*, *National Institute of Health*, *US Army*. [14] [15]
- Aplicația numită **Crackless Egg** reprezintă o modalitate ușoară de control al calității în procesul industrial de prelucrare al ouălor, fiind realizată și patentată de compania *Sensor Wireless Inc.* din Canada. Aplicația constă în confecționarea unui modul de dimensiunea unui ou, compus dintr-o placă prevăzută cu senzori de accelerație pentru detecția șocurilor și un modul radio pentru trimiterea informațiilor. Trecând acest senzor wireless prin toate etapele pe care le parcurge un ou real până ajunge în pachetul final de vânzare, fermierii pot afla în decurs de câteva ore, în care dintre etapele necesare procesării ouălelor, pot apare șocuri care le pot deteriora. Un astfel de modul e prezentat în Figura 2.3. [16]



Figura 2.3.Crackless Egg

- În Figura 2.4 este prezentat un complex industrial al companiei *Rantzows Sports* din Suedia căruia i s-au redus costurile de energie cu 37% prin folosirea modulelor de monitorizare wireless de la *MeshNetics/ZigBee* [17].

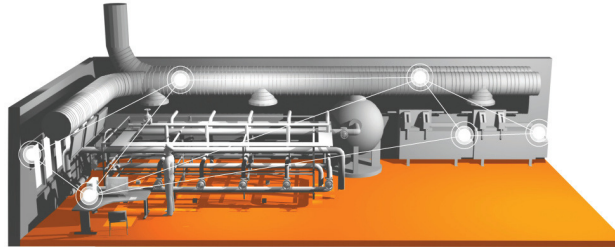
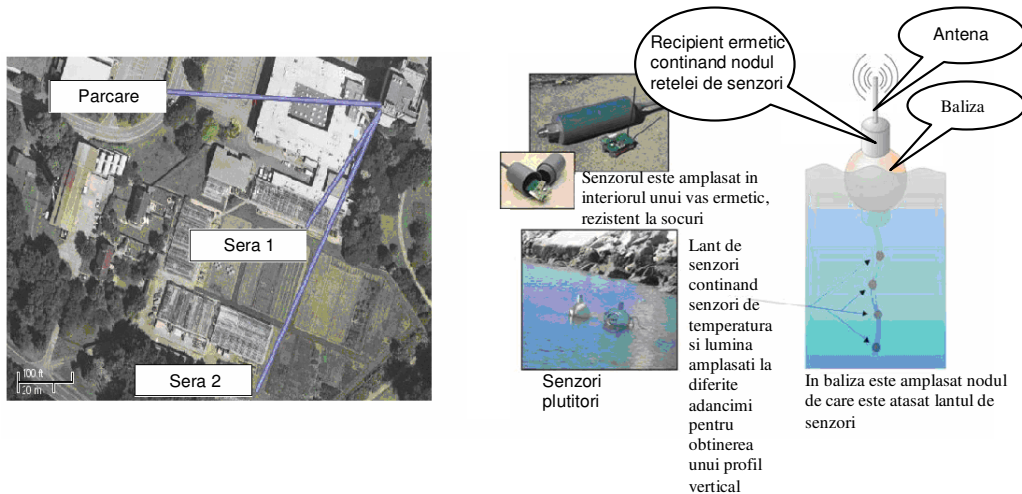


Figura 2.4. Sistem de monitorizare de la MeshNetics

- **Monitorizarea habitatului** reprezintă o categorie de aplicații uzuale ale rețelelor de senzori. Prin amplasarea în diferite spații a unor rețele de senzori, se pot culege pe termen lung, date la scara și rezoluția dorită, de exemplu **sistemul de monitorizare a păsărilor de mare** instalat pe Great Duck Island [18] sau rețeaua de senzori utilizată pentru *monitorizarea podgoriilor* din Oregon [19], folosită de fapt pentru planificarea activităților de întreținere și producție.
- Altă implementare practică a unei rețele de senzori wireless este descrisă în [20], un **sistem de monitorizare a distribuției apei**. Motivarea acestui proiect de monitorizare a rețelei de distribuție locală a apei este de a detecta și deci de a limita la maxim, scăpările conductelor de apă.
- Un alt tip de aplicație în care se pot utiliza cu succes rețelele de senzori sunt **aplicațiile de monitorizare și control al diferitelor echipamente industriale sau mașini de dimensiuni mari**. O aplicație de acest gen este prezentată în [21] și se referă la un sistem bazat pe senzori wireless care au rolul de a transmite date conținând valorile unor parametri mășurați în anumite puncte ale unui motor de avion. Folosind un număr relativ mare de module senzor se pot măsura parametri din diferite puncte ale echipamentului (motorului) permițându-se o analiză mai bună a stării în care se află motorul ca întreg. Utilizând o soluție wireless se reduc atât costurile cât și greutatea suplimentară implicată de cablarea întregului echipament pentru interconectarea modulelor senzor.
- **Coordonarea sistemelor robotizate** poate fi o altă aplicație a rețelelor de senzori. O astfel de aplicație este prezentată în [18]. În acest caz o rețea de senzori este folosită pentru detecția unor echipamente robotizate care încearcă să părăsească un anumit perimetru, precum și informare și ghidarea unor alte echipamente robotizate cu rolul de gardieni. Această aplicație se încadrează în categoria aplicațiilor de detecție și urmărire de obiecte sau ființe și are o largă aplicabilitate practică, începând cu aplicații militare și terminând cu aplicații de monitorizare și fluidizare a traficului.
- **Monitorizarea parametrilor climatici din cadrul serelor**, rețelele de senzori wireless se pretează la monitorizarea parametrilor climatici din cadrul serelor, în Figura 2.5.b prezentându-se un grup de sere monitorizate cu astfel de dispozitive.
- Sistemul **Great Barrier Reef Ocean Observing System** (GBROOS) este un sistem de observări oceanice, amplasat în zona insulei Davies, în nord-estul Australiei. GBROOS este un nod regional al sistemului integrat Australian Integrated Marine Observing System (IMOS), destinat studierii influenței

curenților oceanici calzi și reci asupra stratului de corali. Senzorii sunt amplasați în recipiente ermetice și rezistente la șocuri, scufundate în apa oceanului, iar antenele radio plutesc cu ajutorul unor balize (Figura 2.5.b.) [22]



a) Monitorizarea condițiilor din sere

b) Monitorizarea apei oceanelor

Figura 2.5. Exemple de rețele de senzori wireless

Printre **companiile producătoare** de echipamente componente pentru rețele de senzori wireless se numără: *Crossbow* [23], *MicroStrain* [24], *Sensor Wireless*, *Spinwave Systems*, *RFM*, *Dust Networks*. Alianța *ZigBee* este o asociație a unor companii ce conlucrează cu scopul obținerii unor produse wireless robuste și eficiente din punct de vedere financiar, pentru monitorizare și control.

Crossbow este o firmă de renume în lumea senzorilor inteligenți. Fondată în 1995, a avut ca principiu de bază ideea că senzorii de dimensiuni reduse, inteligenți și robusți vor revoluționa domeniile măsurătorilor și al controlului. În ziua de azi, *Crossbow* este unul dintre furnizorii principali în tehnologia senzorilor wireless și al celor de inerțiali pentru navigație și control. *Crossbow* implementează și plăci de achiziție, respectiv de interfațare (gateways), pentru diferite tipuri de platforme.

2.3. Arhitectura rețelei de senzori wireless

O rețea de senzori wireless este o rețea fără fire de interconectare, compusă din dispozitive autonome de detecție și măsurare, folosite pentru monitorizarea condițiilor fizice sau de mediu.

O posibilă stratificare a rețelelor de senzori wireless, din punct de vedere al arhitecturii acestora, este prezentată în figura 2.6., cuprinzând 4 nivele:

- nivelul nod;
- nivelul rețea;
- nivelul server;

- nivelul aplicație.

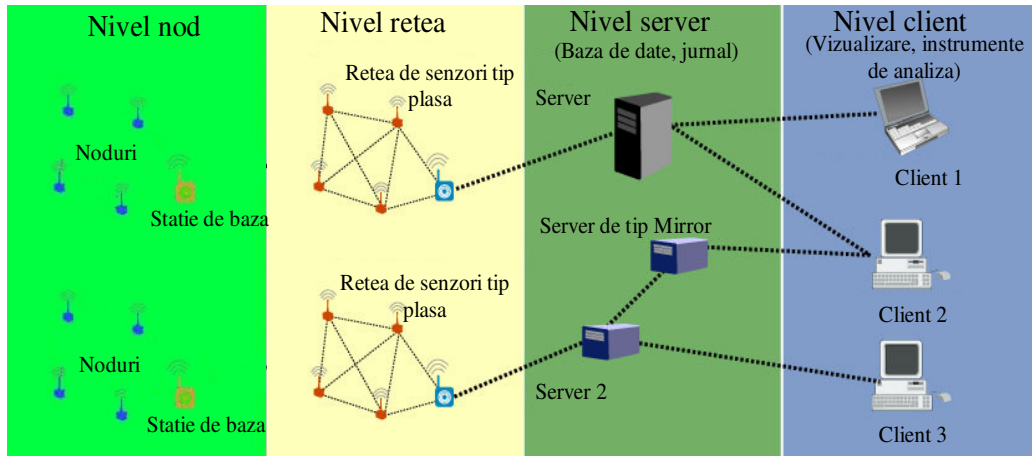


Figura 2.6. Structura unei rețele wireless de senzori.

O rețea de senzori este în general o rețea de tipul ad-hoc, în care fiecare senzor suportă algoritmul de rutare multi-hop. Acest algoritm presupune existența mai multor noduri care pot trimite mai departe datele primite de la celelalte noduri.

2.3.1. Nivelul nod

Nivelul nod, este cel mai de jos nivel din structura rețelelor de senzori, fiind alcătuit din nodurile rețelei, considerate individual. Un nod reprezintă elementul de bază al unei rețele de senzori, și poate fi privit ca un mic calculator, în care unitatea de procesare are putere computațională limitată iar memoria și sursa de energie sunt de asemenea limitate.

Fiecare nod colectează date din mediul înconjurător, continuu sau periodic, din imediata lui vecinătate. Prin mediul înconjurător, se referă atât mediul natural cât și la orice alt proces sau echipament casnic, industrial sau de altă natură care afectează nodul curent.

Datele colectate vor fi procesate local sau vor fi transmise către o stație de bază (posibil într-o manieră multi-hop) și ulterior stocate într-o bază de date. În calea de transmitere, unele noduri acționează în calitate de relee, combinând datele colectate (și procesate) local cu datele primite de la alți senzori –procedeu poartă numele de agregare a informației. La nivelul serverului de aplicație, se analizează datele recepționate, și se decide dacă este cazul să se genereze o alarmă sau dacă se stochează datele într-o bază de date.

Pe lângă modulul de procesare, un nod din rețea este echipat cu un dispozitiv radio de emisie-recepție, o memorie externă, o sursă de energie care în general este o baterie și unul sau mai multe transductoare, conectate prin intermediul unui convertor analog-numeric la microprocesor. Nodul, cunoscut și sub denumirea de **mote**, are arhitectura prezentată în Figura 2.7.a. În figura 2.7.b. este prezentat un nod funcțional echipat cu senzori de presiune, lumină, temperatură și accelerație.

Nodurile trebuie să fie de dimensiuni mici, cu resurse puține și cu un consum mic de energie, impunându-se tratarea problemei consumului de energie la toate nivelele, începând de la arhitectura hardware până la protocoalele de comunicație utilizate.

Pe lângă necesitatea de a construi platforme pentru senzori ieftine, ușor de programat și de interconectat într-o topologie de rețea, este crucial pentru dezvoltarea de aplicații, capacitatea platformei de a integra diferitele modele de traductori existenți pentru a se putea forma nodul de colectare.

Pentru mulți parametri fizici există tehnologie de achiziție ce se poate adapta și integra într-un nod al unei rețele de senzori wireless. Unele din cele mai utilizate traductoare sunt cele de temperatură, umiditate, lumină din spectrul vizibil sau infraroșu, acustice, de vibrație (de exemplu pentru detectarea perturbațiilor seismice), presiune, senzori pentru diverși compuși chimici (gaze sau chiar solide – compoziția solului), pentru tensiunile mecanice, traductoare de câmp magnetic (pentru detecția vehiculelor), potențial chiar și radar.

Pe baza acestor platforme care suprapun capacitățile traductoarelor și acționărilor cu un nucleu de procesare de date și transmitere a acestora, se pot construi multe aplicații.

În Figura 2.8.a se prezintă un modul dotat cu senzori de temperatură, lumină, umiditate, presiune și accelerație, cod MTS 420, produs de firma Crossbow. În Figura 2.8.b în partea superioară se prezintă modulele componente de procesare, comunicație radio și modulul dotat cu senzori, iar în cea inferioară se prezintă nodul gata asamblat.

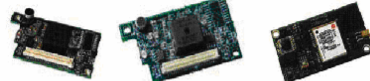
MTS 420



- Temperatura și umiditate
- Umiditate (acuratețe <3,5%)
- Temperatura (acuratețe <0,5°)
- Presiune
- Sensor pentru lumina
- Accelerator pe 2 axe

a)

Placa cu senzori



Modul radio + Procesare



Nod = placa cu senzori + modul wireless

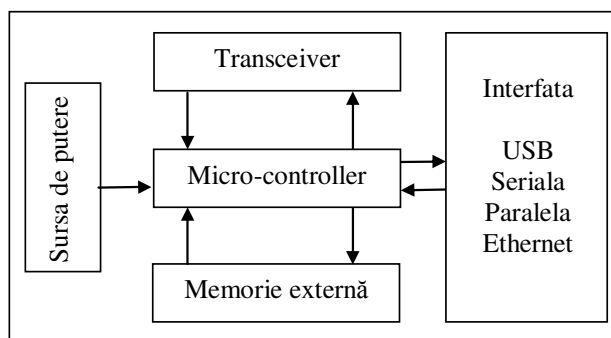
b)

Figura 2.8 Senzori produși de firma Crossbow

Aceste dispozitive sunt ușor de organizat în rețele de senzori, fără a fi nevoie de control uman, ele detectează, evaluează și acționează în mediile în care sunt amplasate și se pot organiza singure, ad-hoc, adaptându-se pentru a face față în diverse aplicații. Fiecare nod sensor are posibilități de comunicare wireless și poate realiza procesare de semnal și distribuire de informații.

Un tip aparte este stația de bază, care se comportă ca o interfață între senzori și utilizator. Astfel, o rețea de senzori wireless constă într-un număr de senzori wireless distribuiți într-o anumită arie geografică, și o stație de bază. Fiecare astfel de senzor poate comunica wireless și are un anumit nivel de inteligență pentru procesarea semnalelor și transmiterea în rețea a datelor recepționate.

Arhitectura stațiilor de bază (prezentată în Figura 2.9), diferă de cele ale nodurilor rețelei, prin aceea că în locul interfeței cu procesul, se găsește o interfață cu sistemul de calcul care deservește rețeaua de senzori. Aceasta interfață poate implementa diferite protocoale, de regulă este USB sau Ethernet (RJ45), dar poate fi și WiFi, Bluetooth, RS232, paralelă etc.



a. Schema bloc

b. Stație de bază funcțională

Figura 2.9. Arhitectura unei stații de bază dintr-o rețea wireless de senzori

2.3.2. Nivelul rețea

Mai multe noduri dotate cu traductoare, care cooperează pentru realizarea de obiective comune, în aceeași zonă geografică formează o rețea de senzori.

La nivel conceptual, componentele unei rețele de senzori wireless pot fi clasificate în următoarele categorii [25]:

- *Puncte terminale (endpoints)* : integrează traductori și elemente de execuție, sunt folosite doar pentru preluarea datelor de la traductoarele proprii și nu pot funcționa pe post de repeater, deci nu pot trimite mai departe informații primite de la alți senzori. În contextul rețelelor de senzori bazate pe protocolul ZigBee, acestea sunt numite și dispozitive cu funcționalitate redusă - RFDs (Reduced Functional Devices).
- *Repeater (sau rutere)*: sunt noduri care extind aria de acoperire a rețelei, permit informației propagate prin rețea să ocolească obstacolele și furnizează trasee de rezervă pentru cazul defectării unor dispozitive sau a congestării traficului. În contextul rețelelor de senzori bazate pe protocolul ZigBee, acestea sunt numite și dispozitive cu funcționalitate completă - FFDs (Full Functional Devices). În anumite situații, repeaterul pot acționa ca și puncte terminale.

- *Stația de bază* (sau *Gateway*): reprezintă interfața dintre noduri și calculatorul-gazdă sau rețeaua de transport a datelor, permițând monitorizarea performanțelor nodurilor din rețea (a senzorilor), și de asemenea este folosită la configurarea parametrilor rețelei, respectiv la transmiterea datelor.
- *Software-ul de sistem*: furnizează protocolul rețelei, pentru a realiza auto-configurarea și auto-organizarea rețelelor de tip ad-hoc.

În cadrul anumitor tipuri de rețele, cum sunt de exemplu rețelele de tip plasă, nu se face diferența între RFD și FFD, toate nodurile fiind dotate cu traductori și capabile de redirectarea informației prin rețea.

Topologia de rețea reprezintă dispunerea fizică în teren a elementelor care compun rețeaua (topologie=graf). Topologia unei rețele afectează direct performanțele acesteia. Nodurile implicate într-o topologie de rețea pot fi echipamente de interconectare sau terminale.

O importantă caracteristică a rețelelor de senzori o reprezintă dimensiunea maximă traseelor informației prin rețea, care reprezintă numărul maxim de salturi dintre oricare două noduri din rețea. În forma ei simplificată, o rețea de senzori formează o rețea cu un singur salt, în care fiecare comunică direct cu oricare alt nod din sistem.

Într-o rețea wireless de senzori nodurile sunt de obicei organizate în una din următoarele trei tipuri de topologii (văzute ca grafuri, topologiile diferă prin modul de amplasare a nodurilor): tip stea, plasă (mesh) sau stea-plasă.

2.3.3. Nivelul server

Nivelul server este reprezentat de echipamentele care asigură în orice moment extragerea, respectiv stocarea informațiilor din cadrul rețelei. Acesta furnizează puntea de legătură între rețeaua de senzori și aplicațiile-utilizator.

Din această categorie face parte și aplicația XServe, care reprezintă principala legătură dintre rețelele wireless de senzori și aplicațiile care interacționează cu rețeaua de tip plasă. [26] În forma sa de bază XServe oferă servicii de rutare a datelor spre și dinspre rețeaua de tip plasă cu un nivel ridicat de servicii de analiză, transformare și procesare a datelor care vor fi trimise spre aplicație.

XServe furnizează servicii diferite[26] în funcție de cum este configurat și instalat.

- *Serial Forwarder*: În forma sa de bază XServe oferă rețelei de senzori servicii de rutare de bază. Ca și serial forwarder, XServe permite mote-urilor să comunice direct cu aplicația. Aplicațiile trimit și primesc date brute direct la, respectiv de la, rețeaua de senzori fără un nivel ridicat de analiză, conversie sau procesare.
- *Application Server*: XServe se poate comporta ca un server de aplicație ce furnizează servicii de nivel înalt cum ar fi analiza, transformarea și procesarea datelor în timpul funcționării. Datele primite de la senzori, în formatul brut utilizat de acestea, pot fi transformate într-un set de date cu

valori grupate după denumiri. În timpul analizei, datele pot fi convertite, comasate sau separate la nivel de bit.

În cadrul acestui nivel se operează cu date stocate în trei formate diferite, și anume [26]:

- *Formatul brut (Raw Format)*: datele sunt afișate în forma lor binară, afișând fiecare bit al datei ca pe o pereche de numere în hexazecimal. Acest format este util pentru debug deoarece datele sunt afișate nealterat, în același format transmis de mote-uri.
- *Formatul analizat (Parsed Format)*: datele sunt afișate ca seturi de perechi nume-valoare. XServe analizează datele primite în formatul brut și extrage câmpurile individuale de date asociindu-le cu numele câmpului.
- *Formatul convertit (Converted Format)*: datele sunt afișate de asemenea ca perechi nume-valoare, dar fiecare câmp a fost convertit din forma sa brută în unitatea de măsură corespunzătoare câmpului.

2.3.4. Nivelul client

La acest nivel se situează aplicațiile utilizator concepute pentru a realiza o interfață, între un utilizator final și o rețea de senzori wireless. Acestea oferă instrumentele necesare pentru a simplifica implementarea și monitorizarea rețelelor de senzori prin ușurința cu care se pot configura anumiți parametri ai rețelelor de senzor și respectiv genera vizualizări și rapoarte utilizând date provenite de la senzorii rețelei.. De asemenea, facilitează și conectarea la o bază de date pentru a analiza și a afișa sub formă grafică datele citite de la senzori.

O aplicație uzuală care se situează la acest nivel este MoteView [27] care permite configurări avansate ale nodurilor rețelei, privind modul de operare al senzorilor și de rutare a informației, precum și o interfață grafică ușor de utilizat, care permite generarea de vizualizări grafice utilizând atât date culese direct din rețea cât și date vechi, luate de la serverul de baze de date care deservește rețeaua de senzori wireless. MoteView suportă toate plăcile de achiziții de date și toți senzorii Crossbow, precum și platformele radio-procesor IRIS, MICA2, MICA2DOT sau MICAz, după cum este prezentat în Tabelul 2.1.

Tabel 2.1. Platforme suportate de MoteView

Mote Platforms	Model Number(s)	RF Frequency Band(s)
IRIS	XM2110	2400 MHz to 2483.5 MHz
	M2110	2400 MHz to 2483.5 MHz
MICAz	MPR2400	2400 MHz to 2483.5 MHz
	MPR2600	2400 MHz to 2483.5 MHz
MICA2	MPR400	868 MHz to 870 MHz; 903 MHz to 928 MHz
	MPR410	433.05 to 434.8 MHz
	MPR420	315 MHz (for Japan only)
	MPR600	868 MHz to 870 MHz; 903 MHz to 928 MHz
MICA2DOT	MPR510	868 MHz to 870 MHz; 903 MHz to 928 MHz
	MPR510	433.05 to 434.8 MHz
	MPR520	315 MHz (for Japan only)

2.3.5. Niveluri software

Din punctul de vedere al software-ului specific unei aplicații cu rețele de senzori wireless se disting 3 nivele la care se realizează programarea, prezentate în Figura 2.10:

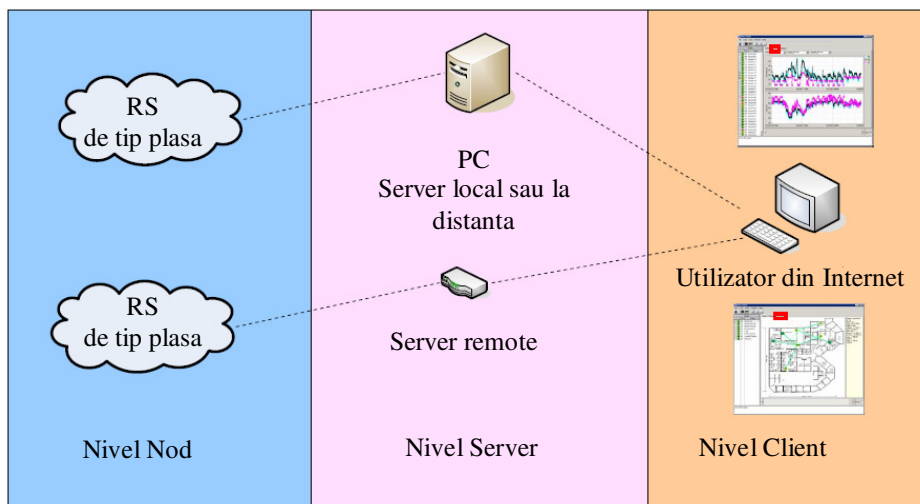


Figura 2.10. Structura de niveluri software a unei rețele wireless de senzori

Primul nivel reprezintă stratul Nod. Nodurile rețelei sunt programate cu aplicații (de tip Xmesh sau TinyOS), pentru a realiza un task specific: de exemplu detecția intrușilor, monitorizarea temperaturii într-o încăpere.

Al doilea nivel este cel de tip Server, care furnizează serviciile de stocare și transmitere a datelor. Acesta este nivelul în care informațiile citite de la senzori sunt trimise către stația de bază și sunt salvate pe calculator sau pe server. O implementare uzuală este dată de aplicația Xserve, furnizată de firma Crossbow.

Ultimul nivel, nivelul client, este compus din instrumente software pentru vizualizarea, monitorizarea, analiza și interpretarea datelor primite de la senzori.

O implementare uzuală este dată de aplicația MoteView, furnizată de firma Crossbow.

Un exemplu, particularizat pentru o rețea de senzori wireless, de tip Crossbow, de aplicații software structurate pe cele trei nivele prezentate în Figura 2.10 este următorul [25]:

- *Nivelul nod*, prin aplicațiile Xmesh, reprezintă soft-ul care rulează pe toate mote-urile din rețea. Softul Xmesh furnizează algoritmi de rețea necesari realizării unei comunicații robuste între noduri și server.
- *Nivelul server* este o facilitate care tratează transmiterea și depozitarea datelor ce vin dinspre rețeaua wireless și reprezintă legătura dintre mote-urile wireless și clienții de internet. Aplicații care pot rula la acest nivel sunt XServe și Xotap.
- *Nivelul client* pune la dispoziție utilizatorului softul de vizualizare și interfața grafică pentru coordonarea rețelei. Crossbow furnizează un soft gratis pentru interfața cu utilizatorul, numit MoteView.

2.4. Standarde utilizate în rețele de senzori wireless

Standardul de bază al rețelelor wireless este 802, stabilit de către Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [28]. În cadrul acestui standard se diferențiază:

- 802.11 caracterizează WLAN (Wireless Local Area Network)
- 802.15 caracterizează WPAN (Wireless Personal Area Network), rețea ce leagă dispozitive ca telefonul mobil, PDA (Personal Digital Assistant), console de jocuri, etc.

Din 802.15 se desprinde 802.15.4, ce se referă la tehnologia ZigBee, și 802.15.1, ce se referă la tehnologia Bluetooth.

Există câteva standarde care ori sunt aprobate, ori sunt propuse pentru rețele wireless de senzori:

ZigBee este un standard pentru o rețea de tip plasă, care a fost conceput a fi folosit în domeniul controlului industrial, măsurători embedded, colectarea datelor medicale, automatizarea clădirilor. Protocolul de comunicație folosit de platforma IRIS este ZigBee [29]

WirelessHART este o extensie a protocolului HART pentru automatizarea industrială. A fost inclus în protocolul HART, ca și specificația HART 7, aprobată de către fundația HART în iulie 2006. [30]

Aceste standarde menționate mai sus se bazează pe IEEE802.15 din 2005.

6lowpan este un acronim pentru Internet Protocol Version 6 (IPv6) pentru rețele wireless, personale, de putere mică. A fost propus ca și standard dar nu a fost încă aprobat. [31]

2.5. Tipuri de topologii

Așa cum s-a mai menționat deja, există câteva arhitecturi care pot fi implementate pentru o rețea wireless de senzori, printre acestea figurând cele de tip stea, plasă și varianta hibridă stea-plasa. Fiecare dintre aceste topologii prezintă avantaje și dezavantaje, însă alegerea unei configurații trebuie să realizeze un compromis.

2.5.1. Topologia de tip stea

În topologia tip stea, fiecare nod se conectează direct la gateway, distanța față de aceasta fiind în cele mai multe cazuri între 30-100 de metri. Toți senzorii sunt identici, iar gateway-ul servește la transmiterea datelor către noduri și comanda acestora, precum și la transmiterea informațiilor spre un sistem superior de monitorizare. Nodurile nu pot comunica direct unele cu altele; atunci când un nod vrea să comunice cu un alt nod, el trimite către nodul central datele, care la rândul lui va retrimite apoi aceste date către nodul destinație (sau, mai simplu dar mai puțin performant, către toate celelalte noduri). Schematic, o rețea de senzori în topologie de tip stea este prezentată în Figura 2.11.

Avantajul principal al folosirii acestei topologii este consumul redus de energie. Un alt avantaj este faptul că este simplu de instalat și administrat. O defecțiune undeva în rețea sau a unui nod, scoate din funcțiune un singur nod, dar rețeaua locală rămâne operațională.

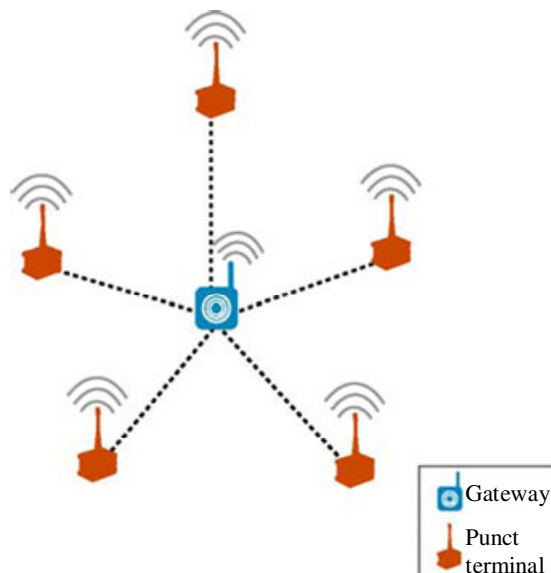


Figura 2.11. Topologia de tip stea

Un dezavantaj al acestei topologii privește toleranța la defecte a rețelei, funcționarea corectă a nodului central fiind critică pentru întreaga rețea. În timp ce eșecul unei legături individuale duce numai la izolarea unui singur nod, defecțiunea

nodului central duce la pierderea legăturii dintre toate nodurile. Mărimea rețelei este limitată de numărul de conexiuni pe care nodul central poate să le suporte. Alte dezavantaje constau în limitarea distanței nodurilor față de gateway și a nesiguranței comunicației datorită faptului că nu există trasee de rezervă. Acest tip de sistem se numește sistem single-hop.

2.5.2. Topologia de tip plasă (mesh)

Topologia de tip plasă (mesh), este un sistem multi-hop în care toate nodurile sunt identice, toate sunt rutere, și comunică între ele și cu gateway-ul. Propagarea datelor obținute de la senzori prin acest tip de topologie, permite teoretic adăugarea unui număr infinit de noduri. [25]

În topologia tip plasă un nod se poate conecta la mai multe noduri din rețea și transmite datele prin cea mai sigură cale disponibilă (există cel puțin 2 căi între oricare două noduri). Nodurile senzori individuale comunică și se coordonează unele cu altele. Schematic, o rețea de senzori în topologie de tip plasă este prezentată în Figura 2.12.

Datorită acestei topologii se poate dispune de conexiuni continue chiar dacă există legături deteriorate sau blocate. Într-o rețea de tip plasă dacă toate nodurile sunt interconectate, rețeaua se numește *complet conectată* (fully connected). Rețelele de tip plasă pot fi văzute ca rețele de tip ad-hoc.

Rețeaua de tip plasă wireless este cea mai frecventă topologie utilizată în zilele de azi, având evoluții semnificative în ultimii zece ani. Aceasta este și configurația standard pentru aplicația de tip Xmesh.

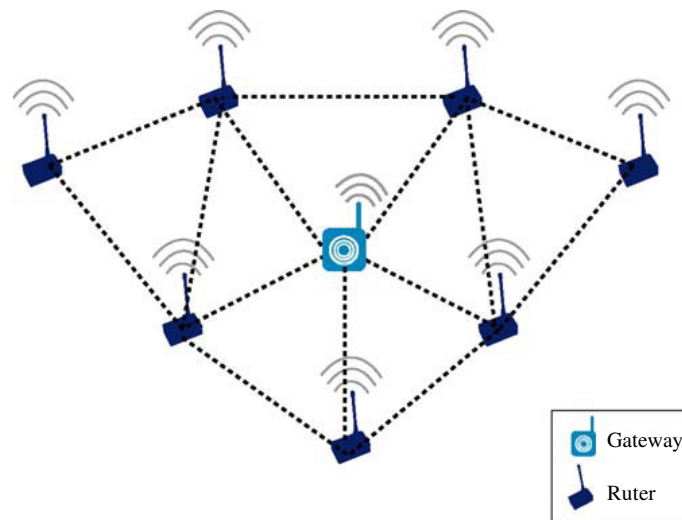


Figura 2.12. Topologie de tip plasă

Avantaj: numărul mare de conexiuni (redundanță) conduce la o fiabilitate ridicată: informația de la un nod senzor este primită de către alte noduri și retransmisă,

oricât de departe este poziționat senzorul. Topologia oferă căi redundante prin rețea astfel încât dacă se defectează un nod, un altul va prelua traficul.

Dezavantaje: În cazul în care rețeaua are un număr mare de noduri, aflate la distanțe relativ mari între ele, pot apărea latențe în rețea, iar consumul de energie poate deveni semnificativ.

2.5.3. Topologia hibridă stea-plasă

Este o rețea cu topologie mixtă compusă din mai multe rețele de topologii diferite (în acest caz stea și plasă) interconectate din necesitatea de a acoperi o arie mai mare.

Principiul este următorul: nodurile sunt organizate într-o topologie de tip stea, în jurul unor rutere. Rolul acestora este de a oferi posibilitatea extinderii nelimitate a rețelei, și de a acoperi situația congestiunii sau defectării unei căi de comunicație. Deoarece senzorii wireless pot comunica cu diverse rutere, în cazul în care un ruter nu mai funcționează corespunzător din diverse motive, rețeaua se reconfigurează singură în jurul ruterele rămase în funcțiune. [25]

Schematic, o rețea de senzori în topologie de tip stea-plasă este prezentată în Figura 2.13.

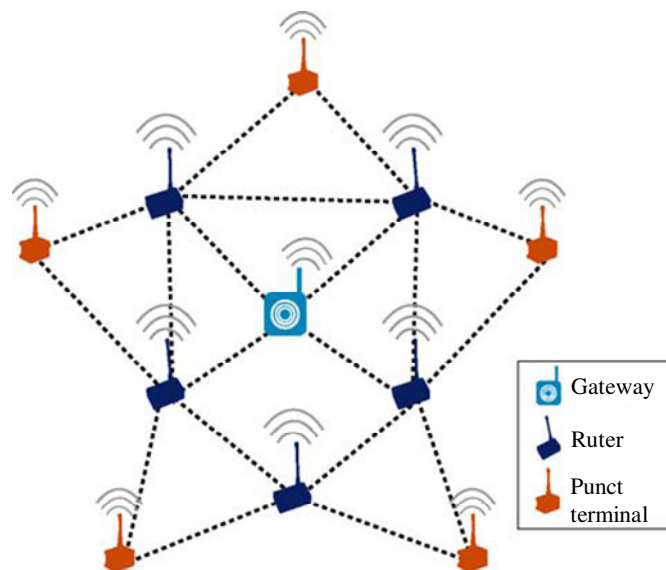


Figura 2.13. Topologia de tip stea-plasă

Această topologie dorește cumulara avantajelor celor două topologii prezentate anterior, și eliminarea dezavantajelor menționate.

2.6. Rețeaua de tip Xmesh

În ultima perioadă s-au dezvoltat rețele de rază mică de comunicație, bazate pe arhitectura rețelelor wireless de tip plasă. Odată cu apariția acestor rețele cu auto-organizare, aria aplicațiilor a fost mult dezvoltată.

Pot fi menționate în acest sens, câteva exemple: senzori de detecție a mișcării folosiți pe câmpul de luptă; senzori de detecție a temperaturii folosiți pentru a asigura menținerea unei temperaturi constante necesare transportului de produse farmaceutice sau păstrarea alimentelor; în medicină, sub forma senzorilor de monitorizare a semnelor vitale ale pacienților etc.

Desigur există o gamă largă și variată de aplicații, dar toate sistemele care au la bază o rețea wireless de tip plasă, îndeplinesc același set de caracteristici calitative, dintre care cele mai importante sunt [25]:

- **Consum minim de putere:** această cerință este deosebit de importantă în contextul în care senzorii fiind wireless, sunt alimentați de la baterii care la rândul lor trebuie să fie ușoare și compacte;
- **Ușor de folosit:** protocolul rețelei permite auto-inițializarea acesteia într-un mod ad-hoc și cu auto-organizare.
- **Scalabilitate:** rețeaua de senzori trebuie să se adapteze imediat la creșterea numărului de senzori și să poată suporta oricând o viitoare creștere de acest gen, fără implicația unei creșteri exponențiale a timpului de procesare și reacție.
- **Timpul de răspuns:** descoperirea topologiei nodurilor trebuie să fie eficientă, în special în cazul aplicațiilor în care senzorii sunt mobili, de genul mașinilor sau echipamentelor mobile folosite la detecția condițiilor meteorologice.
- **Raza semnalului radio:** din punct de vedere al consumului de energie este mult mai eficientă transmiterea unui semnal la o distanță scurtă, către un senzor care se comportă ca un repetor de semnal, decât trimiterea directă la un senzor aflat la o distanță semnificativ mai mare. Acest lucru este valabil datorită faptului că pentru distanțe mai lungi, semnalul trebuie să fie mai puternic, iar pentru distanțe mici, semnalul poate fi de o intensitate mai redusă.
- **Comunicare bidirecțională:** comunicarea bidirecțională este necesară pentru că, adițional funcției de colectare a informației de la senzori, stația de bază are rolul de a trimite diverse informații senzorilor, cum ar fi de exemplu reglarea unor parametri.
- **Robustețea :** robustețea este întotdeauna importantă, dar poate fi critică în cazul monitorizării medicale.
- **Construcție de dimensiuni reduse:** aceasta cerință trebuie să fie îndeplinită datorită faptului că senzori folosiți trebuie să poată fi atașați sau poziționați în diverse sisteme.

XMesh [25] este un protocol de rețea complex, multi-hop, ad-hoc, dezvoltat de firma Crossbow pentru rețelele de senzori wireless pe principiul topologiei de tip plasă. O rețea XMesh consistă într-un număr de noduri care comunică wireless între ele și sunt capabile să transmită mesaje radio unei stații de bază, de unde sunt transmise către un calculator sau către un alt client final. Modul de transmitere a informațiilor extinde efectiv banda de comunicație radio și reduce puterea necesară transmiterii mesajelor.

Prin transmiterea datelor în acest mod, XMesh prezintă două avantaje importante: îmbunătățește acoperirea radio și crește fiabilitatea. Două noduri, pentru a comunica, nu trebuie să fie în aceeași zonă de acoperire. Un mesaj poate fi livrat unuia sau mai multor noduri de altele intermediare care vor ruta datele. De asemenea, dacă este o legătură radio proastă între două noduri, obstacolul poate fi depășit prin re-rutarea datelor pe lângă zona cu probleme.

Întreaga rețea XMesh, prezentată în Figura 2.14, este compusă din [25]:

- Unul sau mai multe noduri dotate cu traductoare, și capacitate de rutare;
- Un nod de tip stație de bază pentru extragerea informației;
- Un calculator sau un alt client care primește date și trimite comenzi în rețea.

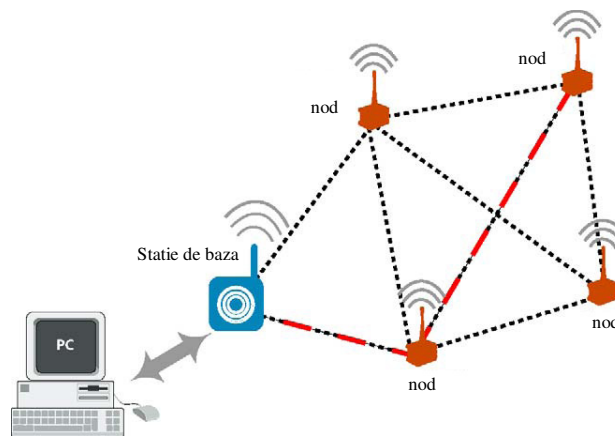


Figura 2.14. Structura de rețea XMesh

XMesh poate fi configurat în mai multe moduri de putere: HP(high power), LP(low power), ELP(extended low power).

Toți senzorii și toate plăcile de achiziție de date Crossbow care pot forma o rețea de senzori wireless suportă aplicația XMesh.

Printre caracteristicile rețelei Xmesh se enumeră următoarele [25]:

- TrueMesh - reprezintă capacitatea nodurilor de a căuta dinamic trasee pentru livrarea pachetelor în situația unei interferențe radio sau a unei funcționări necorespunzătoare a unor noduri intermediare. O rețea ad-hoc se poate forma prin simpla plasare a nodurilor la o anumită distanță unele de altele. Nodurile se vor recunoaște între ele și vor construi o structură arborescentă de rutare, bazată pe legăturile estimate ale mediului radio din care fac parte. Astfel nodurile dintr-o rețea Xmesh se organizează și se „vindecă” singure.
- Multiple servicii de transport – Xmesh pune la dispoziție diverse servicii de transport pentru comunicații între noduri. Acestea sunt:
 - Upstream : livrarea pachetelor dinspre nod spre stația de bază
 - Downstream: livrarea pachetelor dinspre stația de bază spre unul sau mai multe noduri
- Multiple servicii de calitate (Multiple Quality of Service (QoS) Modes)- cuprind următoarele:

- Cel mai mare grad de efort depus: confirmare la nivel de legătură, în care nodurile încearcă de un număr mare de ori să trimită un mesaj vecinului apropiat
- Livrare garantată: confirmare și la un capăt și la celălalt, în care un mesaj e trimis upstream sau downstream și un mesaj de confirmare e trimis la expeditor
- Multiple moduri de putere - Xmesh poate fi configurată să funcționeze în diverse regimuri de putere. Aceste sunt:
 - Putere mare (HP) cu următoarele atribute:
 - TrueMesh
 - Toate nodurile din rețea pot ruta date
 - bandă largă de comunicație radio, latență scăzută
 - modulele radio ale nodurilor sunt tot timpul în funcțiune
 - Putere sczută (LP)cu următoarele atribute:
 - TrueMesh
 - Toate nodurile din rețea pot ruta date
 - Bandă redusă, latență ridicată
 - Nodurile stau normal într-o stare de dormitare, și se trezesc periodic pentru a verifica traficul radio
 - Putere redusă și limitată (ELP) :
 - Sunt nodurile de la capătul rețelei
 - Nu pot ruta date
- Diagnostic de funcționare - Într-o rețea Xmesh nodurile pot trimite către base station informații privitoare la starea nodurilor și a rețelei. Aceste informații cuprind traficul radio, nivelul bateriei, indicatorul de putere a semnalului radio (Radio Signal Strength Indicator: RSSI). Aceste informații pot fi vizualizate pe calculator prin rularea programului MoteView
- Sincronizarea timpului - Xmesh-LP suportă o sincronizare globală la nivel de rețea, la +/-1msec. Perioadele de timp sunt folosite pentru sincronizarea mesajelor radio, dar poate fi folosit de utilizatori pentru sincronizarea măsurătorilor.
- Over the Air Programming (OTAP) - Xmesh oferă posibilitatea reprogramării nodurilor, fără ca acestea să fie conectate direct la calculatorul-gazdă. OTAP folosește o strategie de tip downstream ce permite trimiterea de imagini de cod către noduri. Astfel pot fi programate doar nodurile dorite, sau toate nodurile, dacă este cazul.

2.7. Tehnologii de programare a senzorilor

2.7.1. Mediul de operare TinyOS

TinyOS este un sistem de operare open-source, conceput special pentru rețele wireless de senzori. Are o arhitectură bazată pe componente, care facilitează atât implementarea rapidă a codului, cât și minimizarea acestuia, atât de necesară datorită limitărilor de memorie.[32][33] Librăria TinyOS-ului include protocoale de rețea, servicii de distribuție, drivere pentru senzori și utilitare pentru sisteme de achiziție a datelor [34].

TinyOS diferă de un sistem de operare tradițional, este un cadru de programare pentru sisteme embedded bazat pe componente, folosind nesC ca limbaj de programare. De asemenea, nu are sistem de fișiere și suportă doar alocare statică de memorie, dar își organizează componentele software în straturi, la fel ca și celelalte sisteme de operare. Straturile inferioare sunt mai apropiate de hardware, iar cele superioare sunt mai apropiate de aplicație.

O aplicație reprezintă un graf realizat din componente care constituie entități independente, dar conectate prin interfețe [34].

Componentele au trei concepte computaționale:

- comenzi
- evenimente
- taskuri

Comenzile și evenimentele sunt mecanisme folosite în comunicarea dintre componente, în timp ce *taskurile* exprimă concurența din timpul rulării componentelor.

O *comandă* reprezintă o cerere adresată unei componente pentru a realiza un serviciu. Un exemplu tipic prin care este evidențiată diferența dintre comandă și eveniment este următorul: comanda pornește citirea unui senzor, în timp ce evenimentul semnalează sfârșitul acestei acțiuni. Evenimentele pot fi și asincrone, datorită întreruperilor hardware sau a mesajelor. O cerere pentru un serviciu este împărțită în două faze. Prima fază reprezintă comanda, iar faza a doua este finalizarea acesteia (evenimentul).

Un *task* reprezintă o funcție executată de schedulerul sistemului TinyOS. Taskurile aplică principiul rulării până la final, și reprezintă concurența internă în cadrul unei componente, putând accesa informații doar din cadrul componentei respective. Schedulerul sistemului TinyOS folosește politica de planificare non-preemptivă, de tip FIFO (primul intrat, primul ieșit).

Toate librăriile și aplicațiile sistemului de operare TinyOS sunt scrise în limbajul de programare nesC. Acesta este un limbaj structurat pe componente, conceput pentru a fi folosit în sisteme embedded, de tipul rețelelor de senzori. NesC-ul are o sintaxă asemănătoare cu cea a limbajului C, dar suportă structurile, denumirile și legăturile specifice sistemului de operare TinyOS. Scopul principal este libertatea de se construi componente independente, realizate de designeri diferiți, dar care legate între ele să constituie un program viabil.

TinyOS definește o serie de concepte care sunt exprimate în limbajul nesC. Principalele concepte sunt prezentate în cele ce urmează: [35].

- **Aplicatie** :

O aplicație TinyOS/nesC este constituită din una sau mai multe componente, legate între ele pentru a forma un program robust.

- **Componentă (Component)**:

Componentele sunt blocuri pentru aplicații nesC. O componentă poate de asemenea să furnizeze sau să folosească interfețe. Există două tipuri de componente:

- module (*modules*)
- configurații (*configurations*)

- **Modul**:

Un modul este o componentă care implementează una sau mai multe interfețe. De asemenea, modulele implementează specificația unei componente folosind cod C.

- **Configurație**:

Configurație este o componentă care realizează legătura dintre acestea, conectând interfețele lor, atât cele utilizate cât și cele furnizate.

- **Interfața**:

Rolul unei interfețe este de a furniza o definiție abstractă a interacțiunii dintre două componente. Acest concept este asemănător cu cel aplicat în Java datorită faptului că nici în acest limbaj de programare o interfață nu trebuie să conțină cod sau legături. [34] Într-o interfață se declară un set de funcții de implementat de către cel care furnizează interfața (comenzile), și un set de funcții de implementat de către cel ce utilizează interfața (evenimentele). Prin aceasta, interfețele din nesC sunt diferite de cele din Java, deoarece în Java există doar o direcție de apel a unei interfețe, în timp ce în nesC interfețele sunt bidirecționale. Dacă o componentă apelează comenzile unei interfețe, trebuie să implementeze evenimentele interfeței respective. O componentă poate cere sau furniza multiple interfețe și multiple instanțe ale aceleiași interfețe. Aceste interfețe sunt singura modalitate de acces la componentă.

2.7.2. Limbajul NesC

Limbajul nesC reprezintă o extensie a limbajului C, conceput pentru a încapsula conceptele structurale și de execuție ale sistemului TinyOS. Conceptele de bază ale acestui limbaj sunt următoarele: [35]

- Separarea structurii și a componentelor:

Programele sunt alcătuite din componente legate între ele. Componentele au două module, unul pentru specificație (configurația) și unul pentru implementare (modulul). De asemenea componentele recunosc concurența internă sub formă de task-uri.

- Specificarea comportamentului componentelor prin intermediul interfețelor:

Interfețele pot fi furnizate sau folosite de către o componentă. Interfețele furnizate reprezintă funcționalitatea furnizată de către componentă utilizatorului, iar interfețele folosite reprezintă funcționalitățile de care componenta are nevoie pentru a-și îndeplini propria funcțiune.

- Interfețele sunt bidirecționale:

Interfețele sunt bidirecționale prin stabilirea atât a comenzilor, cât și a evenimentelor. Această reprezentare complexă a interacțiunii dintre componente este foarte importantă datorită faptului că toate comenzile lungi, a căror execuție durează o perioadă mai îndelungată, sunt neblocabile și finalizarea lor e evidențiată doar de către evenimente.

Prin specificarea unei interfețe, o componentă nu poate să apeleze o comandă dacă nu implementează și finalizarea acestei comenzi. În mod obișnuit comenzile apelează de „sus în jos”, de la aplicație spre nivelul hardware, în timp ce evenimentele apelează de „jos în sus”, de la nivelul hardware la nivelul aplicației.

- Componentele sunt static legate între ele prin interfețe.

Datorită acestui fapt, crește eficiența la rulare, design-ul este mai robust și este permisă o mai bună analiză statică a programului.

- Taskuri și întreruperi

Un task este o funcție care nu are argumente și nu returnează nimic. Se declară astfel:

```
task void myTask{ ... };
```

sau

```
task void myTask();
```

Concurența în nesC se bazează pe taskuri care rulează până la terminare, și pe întreruperi.

2.7.3. Cygwin

Cygwin este un mediu gen Linux conceput și realizat de firma Red Hat pentru a rula funcții specifice Linux, sub Windows [23]. Este alcătuit din două părți:

- Un DLL (cygwin1.dll) care conține funcții de Linux compilate pentru a putea rula și pe Windows.
- O colecție de tool-uri care creează aspectul și impresia de Linux.

Dezvoltarea Cygwin a început în 1995 de către compania Cygnus Solutions, cu modificarea compilatorului gcc și a celorlalte instrumente necesare generării și interpretării codului obiect nativ Win32. Cygnus Solutions au fost preluați între timp de compania Red Hat Software. În aprilie 2000 a avut loc prima lansare a unui program executabil *setup.exe*, pentru instalarea și actualizarea fiecărui pachet separat. De atunci a suferit numeroase și continue îmbunătățiri.

În contextul rețelei de senzori wireless, Cygwin constituie o interfață opțională cu utilizatorul, pentru compilarea și descărcarea aplicațiilor mote în MoteWorks [27].

2.7.4. MoteView

MoteView este conceput pentru a fi un „client tier”, între un utilizator și o rețea de senzori wireless. Mote-urile sunt programate cu aplicații Xmesh sau TinyOS, pentru a realiza un task specific: de exemplu detecția intrușilor, monitorizarea climei într-o încăpere, s.a.m.d.

Oferă instrumente software pentru vizualizarea, monitorizarea, analiza și interpretarea datelor primite de la senzori.

2.8. Protocoale de rutare în rețelele wireless

Deoarece un nod are o bandă de transmisie limitată, trimiterea unui mesaj în afara acestei arii presupune ca nodul să solicite unuia sau mai multor vecini să transmită mesajul mai departe până ajunge la destinație. Această tehnică se numește *comunicare multi-hop* și este reprezentată principal în Figura 2.15.

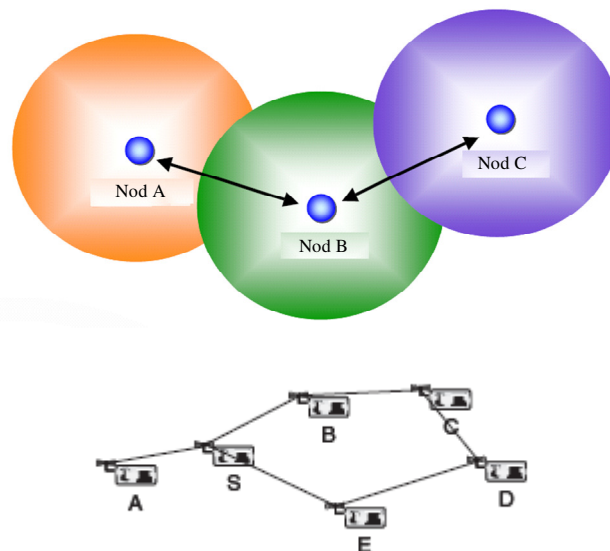


Figura 2.15. Comunicare multi-hop

Într-o rețea multi-hop, nodurile intermediare trebuie să transmită pachete de la sursă la destinație. Nodurile intermediare trebuie să decidă cărui vecin de ordin 1 îi va fi retransmisă informația, dacă nodul intermediar nu este destinația finală. Se folosesc tabele de rutare (de tipul celor prezentate în Figura 2.16) care enumeră vecinii cei mai semnificativi pentru retransmisia de pachete. Construcția și întreținerea acestor tabele este sarcina protocoalelor de rutare. [36]

Deoarece acest subiect va fi discutat pe larg în lucrare în capitolul 3, aici se vor face doar câteva considerații de ordin general.

Cea mai simplă cale de transmitere a pachetelor este **inundare rețelei** (flood) prin transmiterea pachetului la toți vecinii. Cât timp sursa și destinația sunt în aceeași componentă interconectată a rețelei, pachetul va ajunge cu siguranță la destinație. Pentru a evita circulația continuă a pachetelor, nodul trebuie să retransmită pachetul o singură dată, necesitând prezența unor mecanisme de identificare a sursei și a secvenței pachetului. Este de asemenea necesară implementarea unei forme de expirare la nivelul pachetului, pentru a evita propagarea nenecesară dacă destinația nu este disponibilă.

Destinație	Vecin următor	Cost	Destinație	Vecin următor	Cost
A	A	1	A	S	2
D	A	3	D	C	2
D	B	3	D	S	3
D	E	2	E	A	2
E	E	2	E	C	3

(a)Tabela de rutare a nodului S (b)Tabela de rutare a nodului B

Figura 2.16. Exemplu de tabele de rutare într-o topologie posibilă de rețea de senzori (S->D)

O alternativă o oferă **transmisia pachetului către un vecin arbitrar**. Această metodă, cunoscută în literatura de specialitate ca "*gossiping*" rezultă într-o traversare aleatoare a pachetului prin rețea către destinație. În mod clar, întârzierile sunt mari în acest caz. Alternativ, sursa ar putea transmite mai multe copii ale pachetului pe căi aleatoare, sau fiecare nod intermediar ar înainta mai multe copii unui subset de vecini, utilizând un protocol de control topologic.

Aceste metode, deși simple de implementat produc performanțe slabe. Din această cauză se preferă utilizarea de protocoale de rutare complexe, a căror sarcină o constituie construcția tabeli de rutare, identificarea vecinilor favorabili, și transmiterea mai departe în consecință.

Rețelele se senzori wireless de tip ad-hoc reprezintă o mulțime de noduri autonome care comunică unul cu celălalt formând o rețea radio multi-hop și menținând conectarea într-o manieră descentralizată. Fiecare nod are atât funcții de gazdă cât și funcții de ruter, controlul rețelei fiind distribuit. În general nodurile sensor folosesc dispozitive emițătoare-receptoare wireless de radio frecvență, iar comunicația între noduri este realizată folosind legături wireless multi-hop.

Fiecare nod din rețea se comportă ca un ruter, rutând pachete pentru nodurile vecine. Rețelele ad-hoc trebuie să facă față la schimbări frecvente de topologie. Aceasta se întâmplă deoarece nodurile sensor sunt predispuse eșecurilor și de asemenea, noduri noi se pot alătura rețelei și astfel se poate compensa apariția nodurilor defecte și se poate chiar maximiza eficiența rețelei.

Datorită acestor caracteristici o problemă esențială în proiectarea unei rețele de senzori este dezvoltarea de protocoale de rutare dinamice care să găsească traseele cele mai eficiente pentru comunicarea între nodurile rețelei.

În general într-o rețea de senzori adresarea se face de tip data-centric și folosirea protocoalelor tradiționale nu este întotdeauna potrivită și eficientă. Folosirea protocoalelor de rutare tradiționale este nepotrivită pentru rețelele de senzori deoarece senzorii nu pot întreține tabele de rutare și pe deasupra, acestea nu sunt întotdeauna necesare într-o rețea de senzori. Mai degrabă nodurile senzor pot coopera interactiv pentru a găsi o cale către utilizator. Astfel, un protocol de rutare într-o rețea de senzori trebuie să fie robust, eficient din punct de vedere al energiei consumate, să folosească un timp cât mai scurt de a găsi traseele și să creeze cât mai puțin trafic în rețea.

Cerințele de comunicare într-o rețea de senzori sunt în mod semnificativ diferite de cele dintr-o rețea cablată sau o rețea wireless de calculatoare, ceea ce duce la o serie de **constrângeri de proiectare**.

Caracteristicile ce trebuiesc avute în vedere la proiectarea unei rețele de senzori sunt:

- *Data-centric* : spre deosebire de rețelele tradiționale un nod senzor nu are identitate (o adresă specificată). Astfel, într-o aplicație bazată pe o rețea de senzori este puțin probabil să apară o întrebare de tipul: "Care este temperatura în zona senzorului 27?" Mai degrabă aplicațiile se axează pe informațiile generate de noduri. Informațiile sunt denumite prin intermediul atributelor și aplicațiile necesită ca informația să corespundă unor anumite valori ale atributelor. Deci primitiva de comunicație într-o rețea de senzori este o cerere(interogare): "Unde sunt nodurile a căror temperatură a trecut de 30 de grade?".
- *Specific aplicației*: În rețelele de senzori aplicațiile se bazează pe acumularea și stocarea de date.

O problemă comună protocoalelor ad-hoc este necesitatea inundării cu mesaje de control pentru explorarea topologiei rețelei și identificarea nodurilor destinație.

Desigur, protocoalele menționate mai sus au ca obiectiv principal eficiența energetică și pornesc de la presupunerea că traficul de date nu are constrângeri legate de livrarea pachetelor. Transmiterea cu succes a datelor în acest caz necesită un management al rețelei atât din punct de vedere al consumului energetic cât și al calității.

2.9. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a realizat un studiu critic asupra problematicilor generale ale rețelelor de senzori wireless. S-au definit termeni și s-au introdus noțiuni care vor fi ulterior utilizate pe parcursul lucrării.

S-a introdus o structurare pe nivele arhitecturale a rețelelor de senzori, punctând elementele de baza specifice fiecărui nivel.

S-a realizat un studiu critic asupra principalelor tehnologii software utilizate la dezvoltarea aplicațiilor cu rețele de senzori wireless.

S-a realizat un studiu critic asupra protocoalelor de rutare utilizate în cadrul aplicațiilor cu rețele de senzori wireless.

3. METODE DE CREȘTERE A AUTONOMIEI DE FUNCȚIONARE A REȚELELOR DE SENZORI WIRELESS

3.1. Preliminarii

În cadrul acestui capitol sunt prezentate soluții care permit creșterea duratei de viață a senzorilor prin optimizarea consumului de energie la nivelul acestora. În rețelele de senzori distribuite pe arii mari, distanțele dintre senzori și stația de bază depășesc raza maximă de comunicație radio. Astfel, pentru a putea realiza comunicația dintre senzorul emițător și stația de bază, senzorii intermediari, poziționați între ei, în cadrul rețelei de senzori, trebuie să îndeplinească și o sarcină suplimentară, și anume cea de retransmisie a informației primite de la senzorul anterior. Acești senzori sunt practic utilizați pe post de stații intermediare de retransmisie fiind numiți în acest context *repeater* sau relee. În cadrul lucrării se va utiliza termenul de *repeater*. Astfel de rețele de senzori wireless în care între nodul sursă și stația de bază sunt necesare repeater sunt denumite *rețele de senzori wireless de tip multi-hop*.

Utilizarea suplimentară a senzorilor și pe post de repeater are ca efect reducerea autonomiei proprii de funcționare, afectând îndeplinirea propriilor sarcini de monitorizare și crescând costurile de mentenanță a întregii rețele.

Constrângerile referitoare la energia de alimentare a senzorilor au un impact major asupra funcționării rețelelor de senzori și duratei de viață a bateriilor de alimentare a lor, ceea ce conduce la creșterea costurilor de funcționare, implicit la limitarea cantității de informație care este transferată prin rețea.

Principalele **metode** prin care se poate optimiza consumul de energie, fără a duce la o diminuare a calității transmisiei datelor din rețea sunt:

- Utilizarea unor tehnici adecvate de **agregare a informației**, cu beneficiul scăderii volumului informației transmise prin rețea, pe baza creșterii volumului de procesare a datelor de la nivelul senzorilor rețelei.

- Utilizarea unor tehnici adecvate de **rutare a informației**, caz în care se asigură utilizarea de trasee optime, sau chiar trecerea în stare de așteptare a anumitor senzori, fără a periclita interconectivitatea rețelei

- Utilizarea combinată atât a tehnicilor de agregare cât și a celor de rutare.

3.2. Metode de creștere a autonomiei de funcționare prin tehnici de agregare a informațiilor

3.2.1. Introducere

Progresele realizate în ultimii ani în domeniul integrării procesoarelor de tip "tiny embedded", interfețelor wireless și al senzorilor de dimensiuni mici pentru diverse mărimi (presiune atmosferică, temperatură, umiditate, curent flux

electromagnetic etc), au condus la diversificarea aplicațiilor rețelelor de senzori wireless (RSW). Acestea sunt de cele mai multe ori utilizate pentru monitorizarea unor parametri fizici ai mediului înconjurător, prin utilizarea în mod ad-hoc a unor dispozitive inteligente de mici dimensiuni, dotate cu senzori și facilități de comunicație radio.

În mod uzual, așa cum s-a mai menționat, o rețea de senzori wireless reprezintă o mulțime de senzori eterogeni integrați în noduri complexe, care au în general capacități limitate de comunicație, procesare și stocare a datelor.[37]

Majoritatea aplicațiilor în care rețelele de senzori ocupă un loc important sunt legate de monitorizarea mediului interior sau exterior.

Principalele provocări întâlnite în utilizarea rețelelor de senzori wireless sunt date de cerințele lor specifice, referitoare la dimensiunea mică a nodurilor, numărul lor mare și prețul de cost scăzut, simultan cu supunerea nodurilor la puternice constrângeri referitoare la raza de comunicație radio, abilitățile de procesare și consumul de energie.

Modul de operare al rețelelor de senzori wireless diferă în mod apreciabil de cel al rețelelor tradiționale de calculatoare, datorita integrării lor în mediul fizic monitorizat.

Corelând ieșirile mai multor senzori, rețeaua de senzori, privită ca o entitate, poate furniza funcționalități pe care un singur nod nu le poate realiza. [38]

Comunicația wireless prezintă multiple avantaje în raport cu soluția de comunicație cablată.

Dintre dezavantajele majore ale comunicației realizate prin fire se pot enumera [39]:

- costul ridicat al realizării cablării - imaginând un număr ridicat de noduri ale rețelei, interconectarea lor ar presupune un număr mult mai ridicat de cabluri.
- mulțimea de cabluri din aria supravegheată ridică probleme majore de mentenanță și poate să disturbe procesele care au loc în respectiva arie.
- cablurile împiedică mobilitatea entităților rețelei de senzori și pot împiedica de asemenea apropierea senzorilor sau elementelor de execuție de fenomenele reale, pe care trebuie să le monitorizeze sau controleze.

În consecință, comunicația radio între nodurile rețelei devine o necesitate inevitabilă în cele mai multe aplicații.

Pe de altă parte, și comunicația fără fir prezintă dezavantaje importante - în speță consumă de regulă mai multă energie decât comunicația realizată prin cabluri electrice/optice. În plus, comunicația radio este consumatoare de energie în comparație cu procesarea locală a informației, în [40] afirmându-se că transmiterea unui singur bit pe canalul de radiofrecvență este mai energofagă decât execuția unei instrucțiuni la nivel local în nodul rețelei.

Această observație conduce la ideea că se pot realiza importante economii de energie la nivelul rețelei de senzori prin agregarea informațiilor în interiorul rețelei.

Rețelele de senzori wireless sunt utilizate pentru monitorizarea și detecția de evenimente semnificative care au loc în diferite medii, pe arii largi. În aceste scenarii, fiecare senzor primește informații de la mediul înconjurător, efectuează

procesări de bază ale acestora și apoi le transmite către utilizatorul final, utilizând infrastructura rețelei.

O abordare simplă se bazează pe comunicația periodică între senzori și un punct central (numit *stație de bază - SB*) unde datele achiziționate pot să fie stocate și procesate. [40]

Dezavantajul principal al acestei metode este dat de cantitatea excesivă de date transmise, care conduc la utilizarea intensă a bateriilor de alimentare a nodurilor. Apare astfel, ca o necesitate, optimizarea volumului de date comunicate pentru îmbunătățirea raportului dintre eficiența energetică și acuratețea datelor.

Uzual se aplică metode de reducere a volumului de date comunicate în rețea bazate pe protocoale de rutare de tip multi-hop. Astfel, pentru a reduce numărul de pachete care se propagă prin rețeaua de senzori, datele de la mai mulți senzori sunt combinate împreună și apoi retransmise spre stația de bază. Astfel, stația de bază devine rădăcina arborelui de rutare, iar nodurile rețelei sunt organizate în ramuri, iar informația este vehiculată de la senzori spre stația de bază de-a lungul acestui arbore de rutare.

Numărul de mesaje propagate prin rețea este astfel redus, dar cu prețul creșterii dimensiunii mesajelor care ajung la stația de bază. [41] Această creștere de dimensiune poate fi compensată prin utilizarea unor funcții de agregare potrivite.

3.2.2. Aspecte energetice

Importanța minimizării consumului de energie al rețelelor de senzori wireless este evidentă luând în considerare faptul că senzorii din cadrul rețelelor utilizează baterii de alimentare cu capacitate limitată. Mărirea duratei de viață a bateriilor este crucială pentru extinderea perioadei de funcționare a senzorilor și reducerea costurilor de mentenanță a fiecărui senzor al rețelei. Aceasta poate fi obținută prin optimizarea numărului de procesări de informație și transmisiuni de date efectuate la nivelul fiecărui nod.

În cadrul lucrării de față s-a realizat un studiu de caz, considerând un senzor de tip Iris, produs de firma Crossbow [42], pentru care s-au imaginat două moduri de funcționare [43]:

- **modul 1:** în care senzorul funcționează „normal”, cu o medie de procesare a datelor de 1 % din totalul de cicluri de procesare și respectiv cu o medie de 1.3 % cicluri de comunicare activă;
- **modul 2:** în care cantitatea de date comunicată este scăzută, iar capacitatea de procesare este crescută, fapt care corespunde modului de realizare a agregării datelor (procesarea datelor ocupa 1.3 % din timpul de procesare, iar comunicația de date este activă în 0.4 % din timpul total de funcționare).

Curentul consumat de către senzor, conform datelor de catalog în cele două moduri de funcționare este prezentat în tabelul 3.1. [42]

TABEL 3.1. Necesarul de curent pentru un senzor de tip Iris în diferite regimuri de operare

Curent consumat			Cicluri de funcționare	
Mod operare	valoare	Unitate masura	Mode 1	Mode 2
Microprocesor (Atmega128L)				
Procesare	8	mA	1	1.3
In asteptare	8	μ A	99	98.7
Modul Radio				
Receptie	16	mA	1	0.3
Emitere	17	mA	0.3	0.1
In asteptare	1	μ A	98.7	99.6
Modul Senzor				
Operare	5	mA	1	1
In asteptare	5	μ A	99	99

Pentru a se putea evalua durata de viață a bateriilor care echipează doi senzori Iris, care funcționează în cele două moduri prezentate anterior, s-a realizat o simulare considerând baterii de alimentare a căror capacitate a variat între 250 și 3000 mA-h. Rezultatul este prezentat în Figura 3.1. Toate calculele s-au efectuat considerând o pierdere de capacitate anuală a bateriei de 3%.

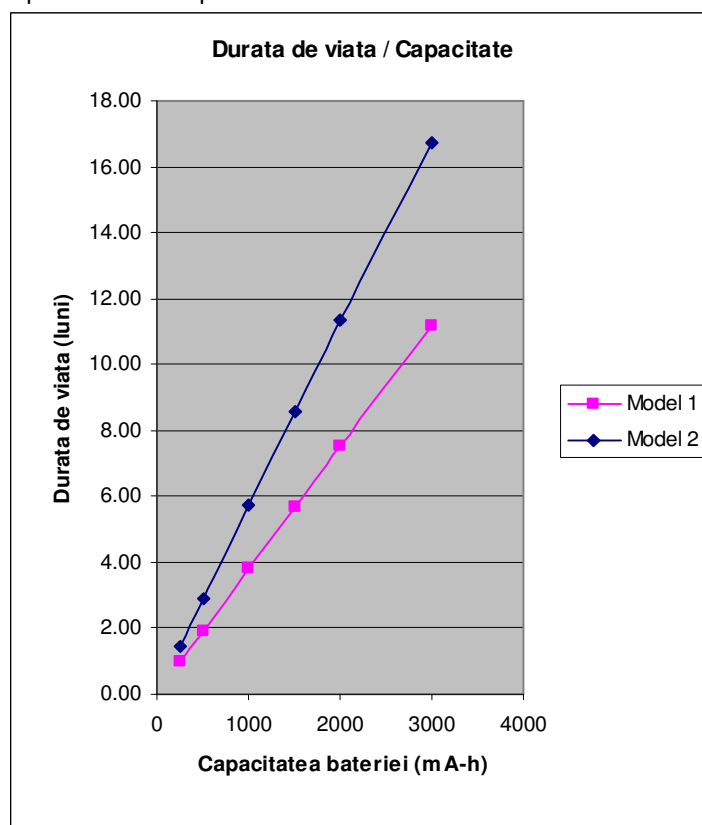


Figura 3.1. Autonomia energetică a unui senzor de tip Iris în diferite regimuri de funcționare

După cum se poate observa în Figura 3.1, se pot obține importante extensii ale duratei de viață a bateriei prin reducerea comunicației din cadrul rețelei de senzori, chiar dacă aceasta este făcută pe seama creșterii volumului de procesare locală a datelor de la nivelul senzorilor. Acesta corespunde cazului utilizării metodelor de agregare a datelor. De exemplu, în cazul unei baterii de capacitate mare (3000 mA-h), durata de viață se extinde cu mai mult de 5 luni.

Impactul pozitiv, semnificativ, al utilizării metodelor de agregare a datelor asupra economisirii energiei consumate de senzorii rețelei a fost confirmat și teoretic. [44]

3.2.3. Studii de caz

În cadrul acestui paragraf se prezintă studii de caz, efectuate în scopul determinării impactului utilizării tehnicilor de agregare a informației asupra energiei consumate la nivelul rețelei de senzori. Practic, economia de energie se realizează pe baza reducerii volumului de date care se transmit prin rețeaua de senzori. S-a studiat, și influența caracteristicilor aleatoare ale valorilor măsurate de senzorii rețelei (distribuție) asupra energiei totale consumate la extragerea lor din rețea. S-a dovedit că, în situațiile în care se dispune de informații „apriori” despre caracteristicile acestor valori se pot obține reduceri semnificative ale energiei consumate, prin adaptarea metodei de agregare și amplasarea judicioasă a stației de bază.

De asemenea, se studiază oportunitatea utilizării de stații de bază adiționale și impactul acestora asupra energiei totale consumate la nivel de rețea, precum și asupra timpilor de extragere a informațiilor din cadrul rețelei de senzori.

În simulările efectuate s-a considerat o rețea de senzori wireless de tip plasă, cu nodurile distribuite sub forma unei matrici, conform figurii 3.2. Toate informațiile de la senzori trebuie să ajungă la nivelul stației de bază (SB). Stația de bază are și ea o capacitate limitată de comunicație radio, dar poate fi integrată într-un sistem de procesare puternic, care să permită prelucrări complexe de date.

Datorită limitărilor de putere a comunicației radio rezultă o limitare a distanței fezabile dintre emițător și receptor. Această restricție, referitoare la raza de comunicație radio, face să nu fie posibilă, în toate situațiile, comunicarea directă între sursă și destinație, în special în aplicațiile în care rețeaua de senzori trebuie să acopere arii largi (de exemplu aplicații agricole sau monitorizare de habitaturi largi) sau în cazuri în care rețeaua operează în medii puternic perturbate (de exemplu cu obstacole, atenuări sau zgomote care afectează comunicația radio).

Pentru a putea rezolva problemele cauzate de limitarea distanțelor dintre noduri o metodă uzuală constă în utilizarea de repeatere, caz în care pachetele de date parcurg trasee multi-hop de la sursă spre destinație. [45]

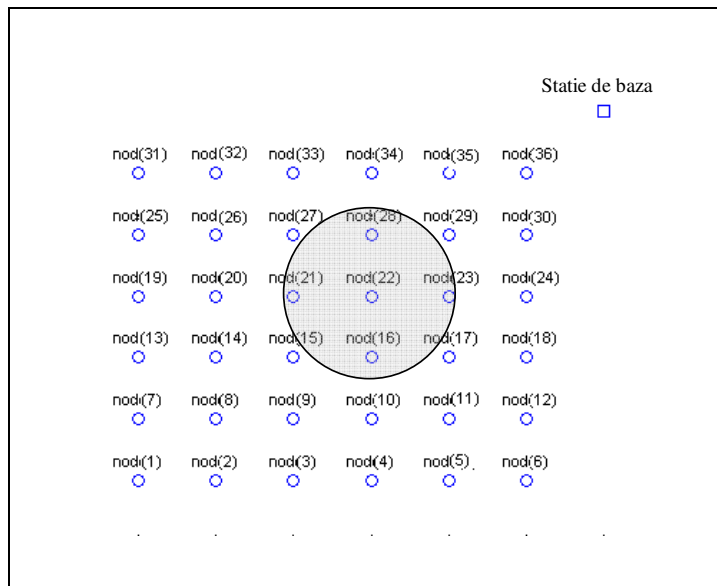


Figura 3.2. Amplasarea nodurilor rețelei de senzori

Pentru a se putea acoperi o arie cât mai largă, distanțele dintre noduri sunt maximizate, dar nu pot depăși raza de comunicație radio. După cum este reprezentat în Figura 3.2, un nod poate comunica direct doar cu cei 4 vecini ai săi. De exemplu, s-a colorat cu gri aria de comunicație radio corespunzătoare nodului cu numărul 22.

În aceste circumstanțe, transmisiunile de la orice nod al rețelei, diferit de nodul 36, către stația de bază vor implica utilizarea altor noduri intermediare pe post de repeatere și astfel, comunicația va necesita un număr crescut de transmisiuni, respectiv recepționări, conducând la creșterea energiei consumate, pe măsură ce distanța dintre nod și stația de bază crește. Nodul cu numărul 36 poate comunica direct cu stația de bază.

Dacă comunicația de date se realizează de-a lungul unor trasee minimizate, costul energetic este optimizat. Acest lucru se poate obține prin definirea unor arbori de rutare optimali.

O posibilitate o oferă rutarea tuturor pachetelor spre nodul cel mai apropiat de pe diagonala principală și apoi de-a lungul acesteia spre stația de bază. Un arbore eficient din punct de vedere energetic poate fi construit incremental, conectând fiecare sursă la punctul cel mai apropiat al arborelui existent. [46]

Considerând arborele de rutare minimal prezentat anterior, un exemplu privind numărul necesar de transmisiuni de la nodul sursă la stația de bază, în cazul unei rețele având 36 noduri dispuse în formă de matrice 6X6 este prezentat în Figura 3.3 – unde cu tx s-a notat numărul de transmisiuni directe generat de fiecare nod al rețelei la transmiterea valorilor proprii spre stația de bază.

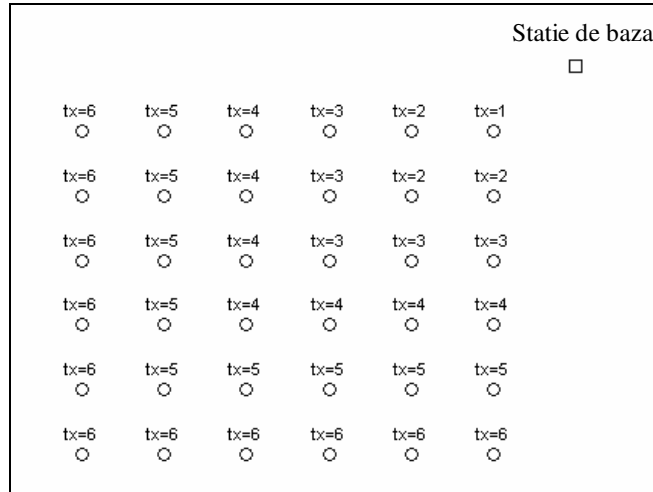


Figura 3.3. Numărul de transmisii directe asociat fiecărui nod al rețelei de senzori

Chiar dacă nodul din colțul dreapta sus poate comunica datele proprii printr-o singură transmisie, își va epuiza primul sursă de energie, întrucât este utilizat pe post de *repeater final* în toate transmisunile celorlalte noduri ale rețelei.

Considerând ca la un moment dat trebuie extrase toate cele 36 de valori măsurate de senzorii rețelei, conform figurii 3.3 va fi necesar un număr de 161 de transmisii, datorită comunicației de tip multi-hop. Acest număr de transmisii totale crește exponențial pe măsură ce crește dimensiunea rețelei de senzori, după cum se poate observa în Figura 3.4. Pe abscisă este reprezentată dimensiunea rețelei de senzori n , iar pe ordonată este reprezentat numărul total de transmisii necesare utilizând arbori de rutare minimali, în cadrul unei rețele de senzori de dimensiunea $n \times n$.

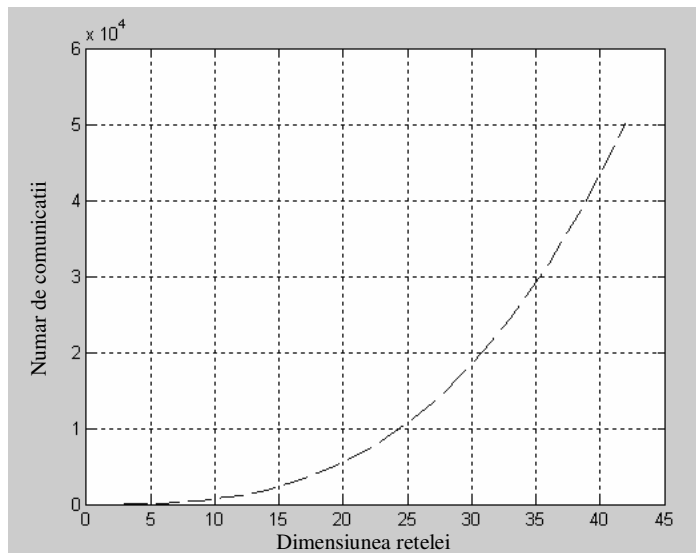


Figura 3.4. Numărul total de transmisii în funcție de dimensiunea rețelei

Pentru determinarea impactului cantitativ al utilizării agregării datelor asupra energiei totale consumate în rețeaua de senzori, prin intermediul numărului de comunicații radio care sunt efectuate, s-au considerat următoarele ipoteze de operare:

- elementele rețelei de senzori sunt amplasate într-o matrice pătratică, de forma celei prezentate în Figura 3.2, iar poziția lor este statică;
- valorile măsurate de senzori sunt convertite în valori normalizate (*p.u. - per units*) – de exemplu de tipul celor prezentate Figura 3.5;
- obiectivul principal al aplicației cu rețea de senzori este extragerea maximului global, iar obiectivul secundar constă în extragerea tuturor valorilor maxime locale din aria monitorizată.

Acesta este cazul aplicațiilor de exemplu de tipul celor pentru detectarea focarelor de incendiu din zone împădurite, unde este important să se detecteze atât maximul global cât și orice maxim local care poate indica un posibil început de incendiu. De asemenea, această situație se poate regăsi în numeroase aplicații privind mentenanța, unde este important să se detecteze și monitorizeze zonele expuse la solicitări puternice.

O abordare clasică ar presupune comunicarea tuturor valorilor măsurate de senzorii rețelei spre stația de bază, urmând ca punctele de extrem să fie identificate la un nivel superior rețelei de senzori – adică la un sistem de calcul, conectat la stația de bază, care prezintă o capacitate de stocare a datelor și de procesare net superioare rețelei de senzori. De asemenea, autonomia energetică a acestuia nu mai este o problemă, el putând fi alimentat direct de la rețea, și poate prelua toate datele furnizate de stația de bază.

În acest caz, numărul de comunicații care au loc în interiorul rețelei de senzori la o transmitere integrală a tuturor valorilor măsurate la un anumit moment de timp, considerând că rutarea se face utilizând arbori de rutare minimali, este dat de Figura 3.4. Este evident că în cazul utilizării unei rutări ad-hoc, în care pachetele urmează diferite drumuri de la o aceeași sursă spre stația de bază, numărul total de comunicații directe este mult mai mare, și astfel energia consumată în cadrul rețelei pentru comunicarea datelor crește, conducând la o consumare prematură a bateriilor.

3.2.3.1. Studii de caz privind utilizarea unei singure stații de bază

Considerând o rețea de senzori wireless formată din 900 de noduri (amplasate într-o matrice 30 X 30) ale cărei valori normalizate au o distribuție uniformă, prezentată în Figura 3.5, rezultă un număr total de 18.445 comunicații directe la fiecare moment de eșantionare – pentru comunicarea celor 900 de valori achiziționate.

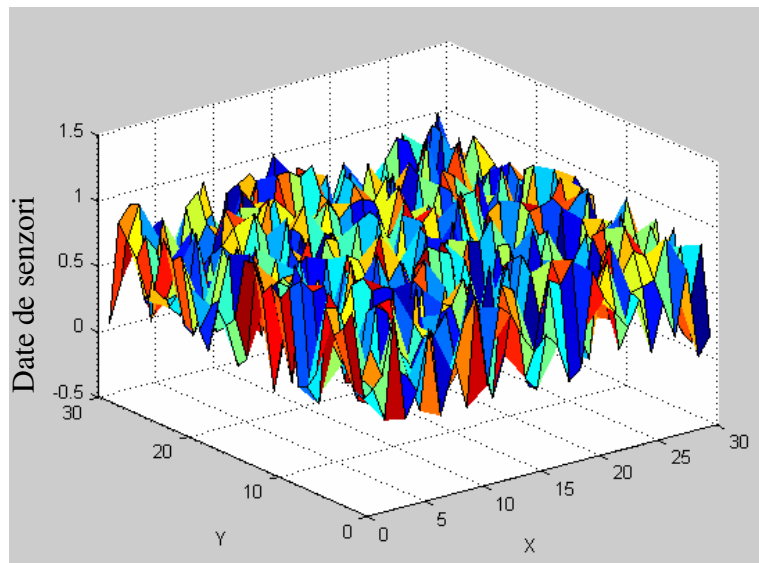


Figura 3.5. Măsurători normalizate provenite din rețeaua de senzori

Pentru a reduce acest număr de comunicații, fără a pierde din acuratețea determinării punctelor de extrem globale sau locale, se pot considera următoarele reguli de funcționare:

- comunicația va începe din punctul situat în poziția cea mai îndepărtată de stația de bază;
- comunicația este efectuată pe rânduri, în sensul spre stația de bază;
- toate nodurile rețelei reușesc să comunice datele achiziționate în intervalul de timp de eșantionare;
- un nod va primi și stoca datele comunicate de vecinii săi imediați (care pot fi maxim 4) și va transmite propria valoare în rețea, doar în cazul în care valoarea proprie este mai mare decât valoarea maximă dintre valorile comunicate de vecini, altfel nu va iniția propria comunicație și va aștepta următorul moment de eșantionare.

Practic, ultima regulă realizează agregarea datelor de tip „*in-network*” utilizând o funcție de tip *max*. Utilizând această metodă de agregare, pentru cazul în care valorile achiziționate de senzorii rețelei sunt aleatoare, uniform distribuite, rezultă un număr total de comunicații redus aproape la jumătate, extinzând cu 90% durata de viață a bateriilor nodurilor rețelei (numărul de comunicații totale este aproximativ 9700 în comparație cu 18445 cât erau necesare în lipsa utilizării metodei de agregare).

Acest număr variază, în funcție de distribuția punctelor de extrem și a gradientului suprafeței corespunzător valorilor măsurate, după cum se poate observa în Figura 3.6, în care se prezintă numărul total de comunicații directe necesar pentru determinarea punctelor de extrem utilizând o rețea de 900 senzori, pe un interval de 50 pași de eșantionare, știind că de fiecare dată valorile achiziționate de senzori erau aleatoare, uniform distribuite.

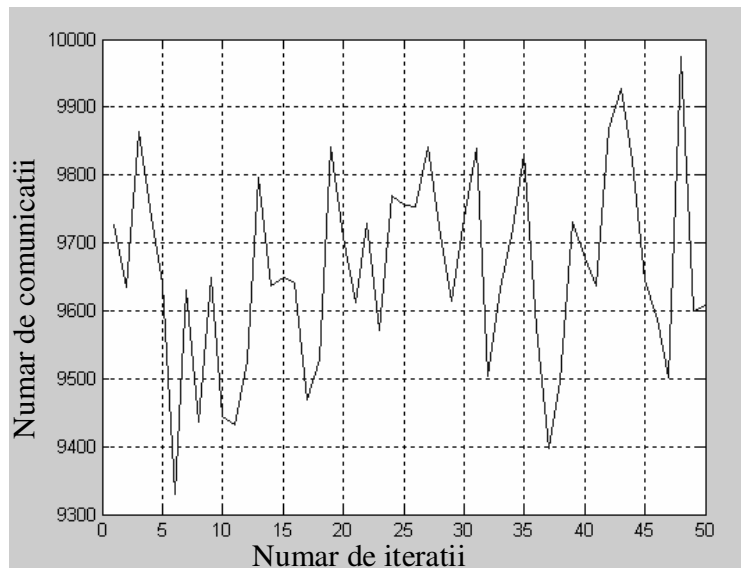


Figura 3.6. Numărul total de comunicații directe

Acest număr de comunicații directe poate fi diminuat și mai mult, dacă se realizează agregarea informației de-a lungul unor clustere definite pe arborele de rutare. Prin cluster se înțelege un grup de senzori, care operează împreună formând o singură entitate. De exemplu, extrăgând maximum pe fiecare linie și apoi agregând pe ultima coloană, rezultă un număr de doar 900 de comunicații directe, dar în acest caz se determină numai maximumul global, cele locale nefiind detectate.

Dacă se dispune de informații apriori despre punctele de extrem locale, cum ar fi distanța între 2 puncte de extrem, probabilitatea de a se afla într-o anumită zonă etc, se pot dezvolta noi strategii care să conducă la reducerea numărului de comunicații, sub cel prezentat în Figura 3.6, fără a pierde informațiile referitoare la punctele de extrem locale. Informațiile care ajung la stația de bază, chiar dacă nu corespund unor puncte de extrem pot fi utilizate pentru identificarea nodurilor defecte și eventuale calibrări.

Pentru a studia influența utilizării metodei de agregare asupra numărului total de comunicații directe, în funcție de dimensiunea rețelei de senzori, s-a realizat un studiu de caz, în care s-au considerat 40 de rețele diferite, având între 9 și 1764 de noduri amplasați în matrici pătratice (de la dimensiunea 3X3 până la 42X42).

În fiecare caz s-au realizat 25 de iterații, iar valorile medii obținute, pentru numărul total de comunicații directe necesare în fiecare caz, sunt prezentate în Figura 3.7. În toate situațiile valorile achiziționate de senzori s-au considerat a fi aleatoare, uniform distribuite. Pe abscisă este reprezentată dimensiunea n a rețelei de senzori, considerând că toate rețelele au n^2 elemente, amplasate în matrici de forma $n \times n$.

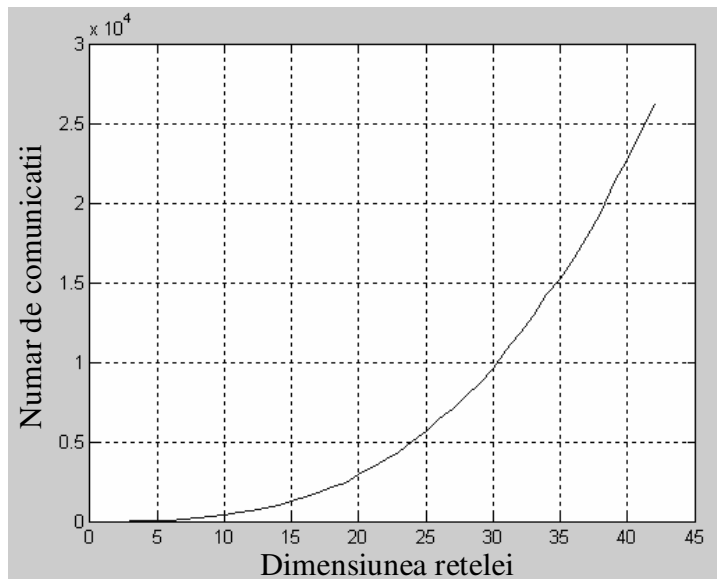


Figura 3.7. Numărul mediu de comunicații directe

Un alt studiu de caz s-a realizat considerând o rețea de senzori alcătuită din 625 noduri, amplasate într-o matrice pătratică de forma 25 X 25, care achiziționează date aleatoare, uniform distribuite, de tipul celor din Figura 3.8.

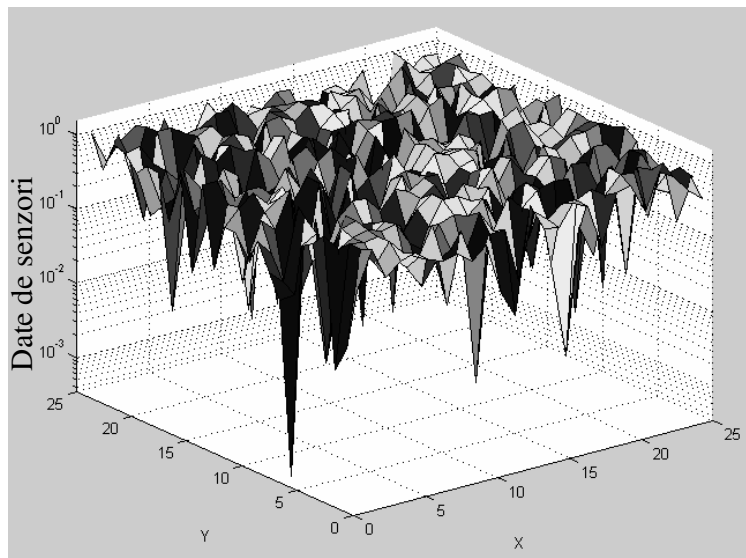


Figura 3.8. Datele achiziționate de rețeaua de senzori wireless (25x25)

Variația numărului total de comunicații directe, pe un interval de 40 pași de eșantionare este reprezentată în Figura 3.9. Se poate observa că și în acest caz, numărul total de comunicații directe este redus la jumătate, media numărului de

comunicații directe fiind de aproximativ 5650, față de 10725 cât se înregistrează dacă nu se utilizează agregarea datelor.

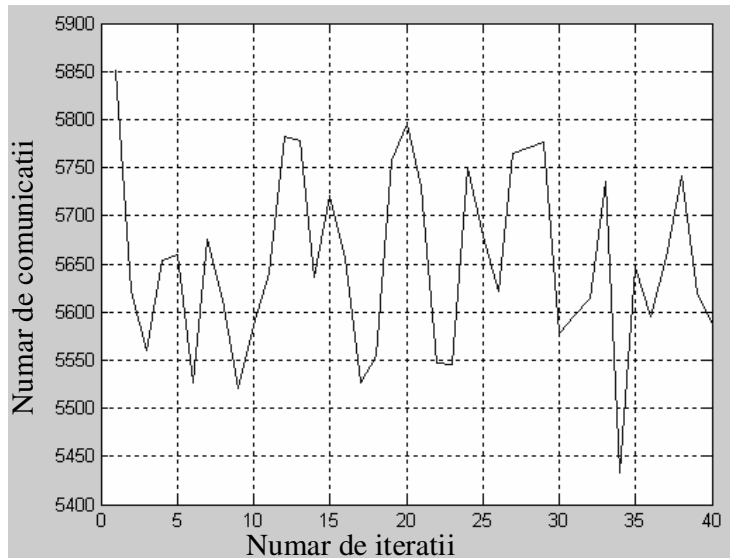


Figura 3.9. Variația numărului total de comunicații directe

Pentru a studia influența distribuției valorilor măsurate asupra numărului de comunicații directe rezultate în urma agregării informației, s-a considerat o distribuție de forma celei din Figura 3.10, în care se disting un număr limitat de puncte de extrem local.

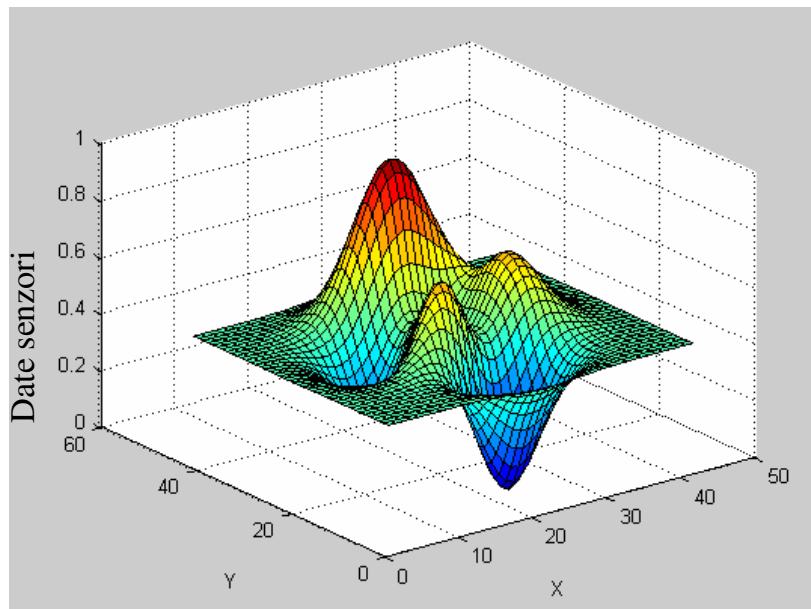


Figura 3.10. Date achiziționate de rețeaua de senzori (p.u.)

Aceste valori au fost achiziționate de asemenea considerând un număr de 40 de rețele de senzori diferite, cu dimensiune cuprinsă între 3 X 3 și 42 X 42 elemente.

Numărul total de comunicații directe rezultate în acest caz este reprezentat în Figura 3.11 (cu linie continuă). Se poate observa că, în acest caz, contrar așteptărilor, efectul agregării este mai redus în comparație cu distribuția uniformă a valorilor (prezentată în Figura 3.7), chiar dacă numărul de puncte de extrem este redus.

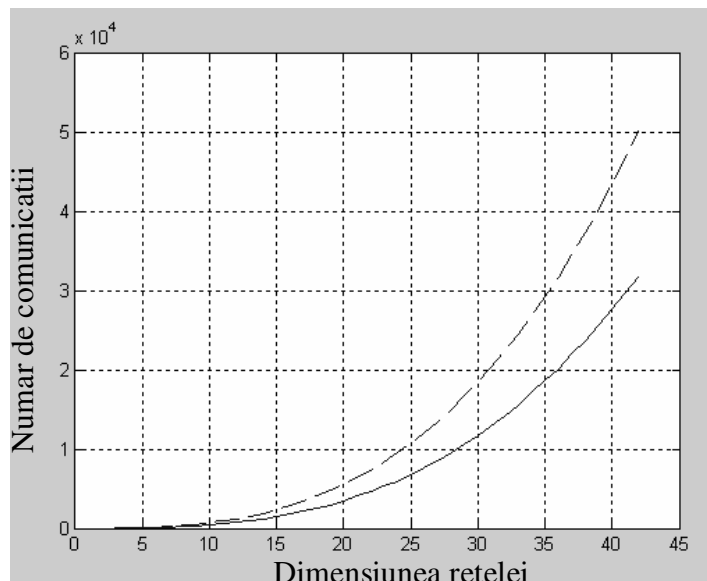


Figura 3.11. Numărul mediu de comunicații directe

Totuși și în acest caz, prin utilizarea tehnicilor de agregare, numărul de comunicații directe (reprezentat cu linie continuă în Figura 3.11) este redus cu 40 % față de cazul rețelei fără agregare (caz reprezentat cu linie întreruptă în figură), iar efectul este benefic pentru prelungirea duratei de viață a bateriei senzorilor rețelei.

3.2.3.2. Studii de caz privind utilizarea stațiilor de bază adiționale

Un alt studiu a vizat oportunitatea utilizării de stații de bază adiționale pentru extragerea datelor agregate din rețeaua de senzori wireless. Stațiile de bază adiționale sunt legate prin cabluri de stația de baza principală și astfel nu sunt supuse unor constrângeri referitoare la raza de comunicație radio, sau la durata de viață a bateriilor.

În Figura 3.12 este prezentat cazul în care se utilizează o stație de bază adițională amplasată în partea opusă rețelei de senzori, față de stația de bază principală.

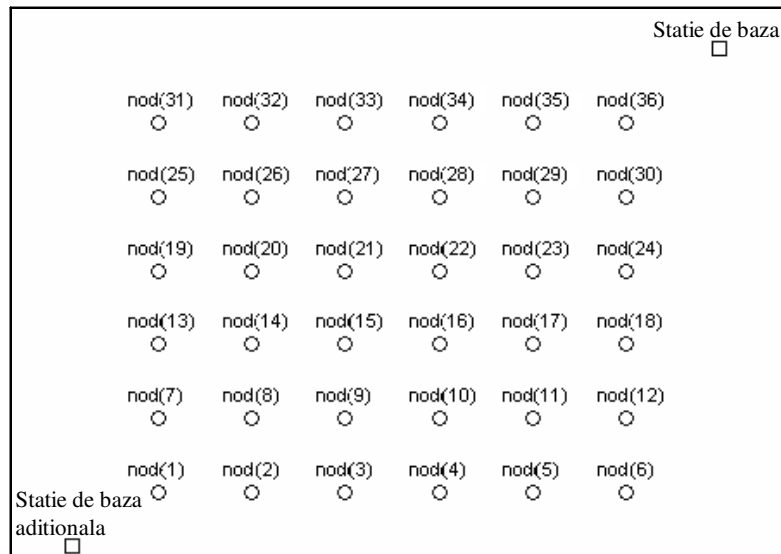


Figura 3.12. Rețea de senzori wireless cu stații de bază adiționale

Cea mai semnificativă reducere a numărului total de comunicații directe se obține prin utilizarea a două stații de bază, plasate de-o parte și de alta a rețelei de senzori, de-a lungul celei mai mari distanțe a rețelei. În Figura 3.13 este reprezentat numărul total de comunicații directe pentru rețelele cu două stații de bază amplasate optimal, fără a utiliza agregarea informațiilor (cu linie întreruptă). Pe abscisă este trecută dimensiunea n a rețelei de senzori, considerând rețele de senzori de forma unei matrici pătratice de dimensiune $n \times n$.

Comparând rezultatul obținut prin utilizarea a două stații de bază cu cel din Figura 3.4, în care s-a utilizat o singură stație de bază, se poate observa o reducere relativ importantă a numărului total de comunicații directe (cu aproximativ 25%), chiar dacă nu se utilizează tehnici de agregare a informației (de exemplu în cazul unei rețele compuse din 1600 noduri, numărul de comunicații directe este redus de la 4.2×10^4 la 3.2×10^4).

Un alt aspect important care trebuie avut în vedere în acest caz este creșterea toleranței la defecte prin posibilitatea de a extrage informațiile prin mai multe trasee optimale, și chiar posibilitatea de a „balansa” consumul energetic, evitând epuizarea prematură a unor noduri prin utilizarea de trasee alternative.

De exemplu, nodul din cel mai apropiat de stația de bază principală (amplasată în partea superioară a figurii 3.12) va fi utilizat pe post de *repeater final* doar de jumătate din nodurile rețelei (astfel, în cazul acestui nod, numărul de comunicații este redus cu 50%, efectul fiind mai pronunțat decât reducerea înregistrată la nivelul întregii rețele), în timp ce cealaltă jumătate a rețelei de senzori va utiliza pe post de *repeater final* stația de bază adițională (amplasată în partea inferioară a figurii 3.12).

Aplicându-se și în cazul utilizării a două stații de bază, aceeași metodă de agregare a datelor utilizată și în cazul anterior, a rezultat un total de comunicații directe, care este reprezentat cu linie continuă în Figura 3.13.

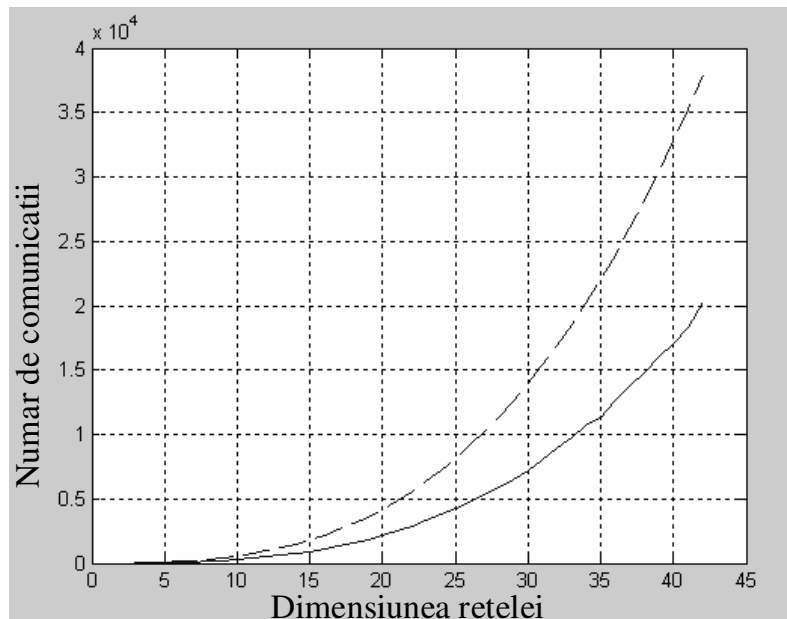


Figura 3.13. Numărul total de comunicații directe

Rezultatul a fost obținut considerând că valorile măsurate de senzorii rețelei au fost aleatoare, uniform distribuite, de tipul celor prezentate în Figura 3.5. Se poate observa o reducere de 46% față de cazul în care nu se utilizează agregarea datelor.

Ca o remarcă, se poate observa că și în cazul utilizării a două stații de bază, raportul numărului de comunicații directe obținute în cazul în care se utilizează agregarea datelor și cel din cazul unei rețele de senzori fără agregare, este similar cu cel din cazul anterior, în care s-a considerat o singură stație de bază.

În *concluzie*, în cazul unei rețele de senzori formată din 1600 de noduri, amplasați într-o matrice având 40 linii și 40 coloane, utilizând două stații de bază, amplasate conform figurii 3.12, utilizând și agregarea datelor, numărul total de comunicații directe, la fiecare pas de eșantionare se situează în jurul valorii de 1.7×10^4 , în timp ce aceeași rețea, dacă are o singură stație de bază, și nu utilizează agregarea datelor, va efectua 4.3×10^4 comunicații directe la fiecare pas de eșantionare. Îmbunătățirea adusă este de aproximativ 62 %, fapt care conduce la triplarea duratei de viață a bateriilor și reducerea astfel a costurilor de mentenanță a rețelei de senzori wireless.

Numărul de stații de bază adiționale trebuie să fie și mai ridicat, dacă numărul nodurilor rețelei este semnificativ, sau dacă timpul de răspuns, sau constrângerile energetice sunt critice pentru aplicația considerată. Explicația constă în faptul că de obicei, costul unei stații de bază este comparabil cu costul unui nod al rețelei și faptul că aceasta comunică cu nivelul superior printr-un canal de comunicație net superior din punct de vedere al lățimii de bandă și eficienței energetice față de canalele de comunicație radio din cadrul rețelei de senzori.

Aceste stații de bază adiționale pot fi utilizate pe post de rădăcini ale unor *arbori de rutare de test*, care pot fi utilizați pentru a verifica periodic starea de sănătate a rețelei de senzori și respectiv consistența datelor furnizate de către aceasta.

3.2.4. Concluzii

În cadrul acestui paragraf s-a demonstrat că prin utilizarea unei tehnici de agregare a datelor adecvată, conjugate cu utilizarea mai multor stații de bază se pot aduce îmbunătățiri majore în reducerea volumului de date comunicate prin canalul radio în interiorul rețelei, în cazul unor rețele de senzori multi-hop, conducând la importante economii de energie, la nivelul surselor de alimentare ale nodurilor rețelei de senzori. Tehnicile de agregare sunt recomandate în special în cazul rețelelor de senzori cu resurse foarte limitate (în ceea ce privește lățimea de bandă, energia de alimentare etc).

Prin utilizarea acestor tehnici de agregare, calitatea datelor extrase din rețea nu este depreciată, nepierzându-se informațiile importante referitoare la fenomenul monitorizat de rețea.

Se poate concluziona astfel că printr-o alegere corectă a tehnicilor de agregare a datelor în cadrul unei rețele de senzori se poate îmbunătăți raportul „*acuratețea datelor – durata de viața a bateriilor*” conducând la o utilizare mai eficientă a rețelei de senzori wireless.

Metoda de agregare propusă a condus, în cadrul studiului de caz, la o reducere la jumătate a volumului de date comunicate în cadrul rețelei. Această reducere poate fi și mai mare în cazul combinării acestei metode cu altele, cum ar fi utilizarea de stații de bază adiționale, clustere etc.

Un dezavantaj al *metodei* constă în toleranța relativ redusă la defecte, în cazul utilizării de *trasee statice*, minimalizate, datorită faptului că dacă un nod al rețelei se defectează, întreaga rețea va avea o funcționare defectuoasă.

Dezavantajul poate fi înlăturat prin utilizarea de *trasee dinamice*, dar în acest caz apare un volum suplimentar de date comunicate prin rețea, necesare sincronizărilor între noduri/trasee, care reduc din eficiența energetică a rețelei.

Adăugarea de stații de bază adiționale aduce îmbunătățiri semnificative toleranței la defecte a rețelei, printr-un adaos de preț de cost relativ scăzut. Soluția este recomandată și datorită reducerilor de trafic de comunicație.

Simulările s-au realizat în mediul Matlab, prin intermediul unor programe de concepție proprie, utilizând date de catalog de la firma Crossbow, producătoare de componente de rețele de senzori wireless. Rezultatele au fost comunicate la 3 conferințe internaționale, din care 2 cu recunoaștere ISI. [43] [47] [48]

Datele suplimentare furnizate de rețeaua de senzori (de exemplu valorile achiziționate care nu corespund unor puncte de extrem local) pot fi utilizate, la nivelul ierarhic superior pentru verificări de consistență a datelor, sau la identificarea de noduri defecte coroborate cu adaptarea dinamică a arborilor de rutare afectați.

3.3. Metode de creștere a autonomiei de funcționare prin tehnici de rutare

3.3.1. Preliminarii

Rețelele de senzori wireless au o mare capacitate de adaptabilitate la aplicații, asigurată de posibilitatea programării și stocării datelor măsurate. Există însă și limitări ale acestora, de care trebuie să se țină seama, cum ar fi energia disponibilă pentru funcționare, puterea de calcul, lățimea de bandă de comunicație, etc.

O cerință majoră de care trebuie să se țină seama la proiectarea unei aplicații cu rețele de senzori wireless este aceea de a asigura în permanență o bună conectivitate în cadrul rețelei, pentru a se putea extrage în orice moment informațiile de la nodurile sursă. Acest fapt presupune menținerea în stare de funcționare a nodurilor care sunt utilizate pe post de repeater, rezultând un consum de energie suplimentar.

Prelungirea duratei de viață a întregii rețele necesită considerarea unor tehnici de gestionare a energiei consumate la nivelul fiecărui nod al rețelei. Fiecare nod al rețelei de senzori este echipat cu o sursă de energie limitată, și realizează atât procesarea locală a datelor cât și comunicarea lor în mediul wireless, motiv pentru care este esențial să se utilizeze forme de comunicare și procesare orientate spre conservarea energiei. [49]

Un factor important care trebuie luat în considerare la proiectarea unei aplicații cu rețele de senzori wireless este minimizarea consumului de energie la nivelul nodurilor rețelei, cu asigurarea, în același timp, a unei interconectivități adecvate, permițând în orice moment, extragerea datelor din orice punct al rețelei. Această cerință de interconectivitate poate fi satisfăcută prin menținerea în stare de funcționare a unor noduri, care sunt utilizate pe post de repeater, rezultând însă per ansamblul rețelei, un consum de energie suplimentar. Din acest motiv este necesar să fie considerate politici de management a energiei implementate la nivelul fiecărui nod, pentru prelungirea duratei de viață a întregii rețele de senzori.[50]

În cadrul acestui capitol se vor considera rețele distribuite de senzori, având un singur punct de extragere a informației și anume stația de bază (SB), pentru a detecta evenimente predefinite, care pot să apară în zonele monitorizate. O astfel de rețea de senzori este prezentată în Figura 3.14. Nodurile rețelei sunt echipate cu senzori și au capacități de procesare și comunicație radio limitate. Toate măsurătorile efectuate în cadrul rețelei de senzori sunt necesare la nivelul aplicației finale, care rulează în afara rețelei de senzori, pe un sistem de calcul performant.

Din punctul de vedere al comunicației, totul se încheie odată ce informația a ajuns la stația de bază. Stația de bază are de asemenea o capacitate limitată de comunicație radio (atât din punctul de vedere al lățimii de bandă, cât și al ariei de acoperire), dar poate fi integrată într-un sistem de calcul puternic, în vederea efectuării unei procesări complexe a datelor măsurate, și întrucât, în general, este situată la marginea rețelei de senzori, poate fi conectată la o sursă de energie de capacitate mare, sau chiar la rețeaua electrică de alimentare.

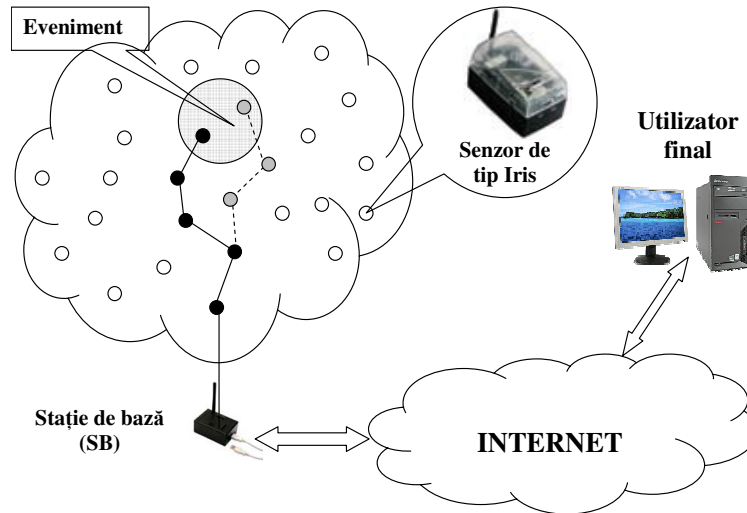


Figura 3.14. Rețea de senzori distribuită wireless

După cum s-a menționat în paragraful 3.2.4., datorită puterii limitate a semnalului de radiofrecvență, rezultă implicit o limitare a distanței fezabile de comunicație dintre nodul emițător și cel receptor, făcând deseori imposibilă comunicația directă între nodul sursă și stația de bază.

Pentru rezolvarea problemei limitării distanței de comunicare, metoda uzuală este utilizarea unor noduri de retransmisie (repeater) a pachetelor de date, caz în care se vorbește despre comunicație de tip „*multi-hop*”, iar livrarea pachetelor de date se face considerând un număr finit de comunicații directe (transmisii/recepții) realizate între două noduri adiacente.

În aceste condiții, utilizarea tehnicilor de rutare (de tip „*packet forwarding*”) devine strict necesară. Valoarea razei maxime de transmisie radio, a nodurilor rețelei, afectează în mod considerabil topologia rețelei de senzori, și respectiv consumul global de energie al acesteia. O rază de transmisie mai mare poate crește viteza de propagare a pachetelor prin rețea, prin reducerea numărului de retransmisii necesare unui pachet pentru a ajunge la destinație, dar aceasta se realizează cu un consum mărit de energie la transmisia pachetului. Pe de altă parte, o rază de transmisie mai mică conduce la reducerea cantității de energie consumată de redirectarea informației spre următorul repeater, dar în general este nevoie de un număr mai mare de repeater pentru ca informația să ajungă la destinație. [51]

Se prognozează că noile generații de dispozitive de tip „*embedded*” vor trebui să aibă o durată de funcționare foarte mare, utilizând surse de energie din ce în ce mai mici și mai afectate de diverse constrângeri. În acest sens proiectarea sistemelor optimizând energia consumată, și în particular realizării comunicației optimizată energetic, vor fi factori cheie în dezvoltarea noii generații de dispozitive de tip „*embedded*”. [52]

3.3.2. Tehnici de rutare în rețele de senzori wireless

Rutarea informației în cadrul rețelelor de senzori este o problemă relativ complexă, datorită caracteristicilor intrinseci prin care aceste rețele de senzori se disting de alte tipuri de rețele wireless, cum ar fi rețelele mobile ad-hoc sau rețelele celulare. Protocoalele bazate pe clasicul protocol IP nu se pot aplica în cazul rețelelor de senzori datorită faptului că, din cauza numărului relativ mare de noduri, este dificil de construit scheme globale de adresare, iar gestionarea Id-urilor necesită un mare efort de procesare. În plus, nodurile rețelei de senzori care sunt distribuite într-o manieră ad-hoc trebuie să aibă capacitate de auto-organizare, pentru a stabili interconexiuni în cadrul rețelei și a coopera, în condițiile în care funcționează în regim nesupervizat.

Proiectarea protocoalelor de rutare pentru rețele de senzori wireless este influențată de mai mulți factori cu impact negativ, a căror influență trebuie minimizată în scopul realizării unei comunicații eficiente în cadrul rețelei.

La proiectarea algoritmilor de rutare pentru rețele de senzori trebuie luate în considerare probleme de bază, care au un impact major, și anume: [53][54][55]

- **distribuția nodurilor**: amplasarea nodurilor rețelei de senzori poate fi deterministă sau stohastică și este strict dependentă de aplicațiile avute în vedere, afectând în mod direct performanțele comunicației din rețea.

În cazul distribuției deterministe, nodurile sunt amplasate de regulă manual, iar rutarea informației se poate face utilizând căi pre-definite și optimizate.

În cazul distribuției stohastice, nodurile sunt amplasate aleatoriu, constituind o infrastructură în manieră ad-hoc, de obicei neuniformă și impunând utilizarea de clustere optimale pentru a asigura conectivitatea completă în rețea și a permite o funcționare eficientă din punct de vedere energetic.

Datorită constrângerilor de lățime de bandă sau de autonomie energetică, raza de comunicație este redusă, fapt care conduce la utilizare de trasee de tip multi-hop;

- **consumul de energie**: un aspect important este minimizarea consumului de energie fără a afecta însă acuratețea datelor. Nodurile sunt dotate cu o sursă de energie limitată, fapt care implică necesitatea utilizării de tehnici de comunicație și procesare a datelor care să minimizeze consumul local de energie. Durata de viață a unui nod (senzor) este în strictă relație cu durata de viață a bateriei. [41] În cazul unei rețele de senzori de tip multi-hop, fiecare nod are un rol dublu, fiind atât generator și transmițător de date colectate de senzorii proprii, cât și repeater pentru informația generată de alte noduri din rețea. În aceste situații, funcționarea defectuoasă a unor noduri, cauzată de energia de alimentare insuficientă, cauzează schimbări semnificative ale topologiei și necesită reorganizarea întregii rețele și modificarea căilor de rutare a pachetelor de date. Un obiectiv major al proiectării unei aplicații cu rețele de senzori este acela de a realiza comunicația datelor în contextul prelungirii duratei de viață a nodurilor rețelei și de a evita degradarea conectivității în rețea, prin utilizarea de tehnici adecvate de management al energiei;

- **toleranța la defecte**: uneori unele dintre nodurile rețelei de senzori pot să își întrerupă temporar sau definitiv funcționarea sau conectivitatea la rețea datorită lipsei energiei de alimentare, a unui defect fizic, sau a interferențelor cauzate de mediul înconjurător, și cu toate acestea, funcționarea globală a rețelei nu trebuie să fie alterată, iar sarcinile îndeplinite să nu fie compromise.

În cazul în care mai multe noduri devin indisponibile, protocolul de acces la mediu (**MAC** - Medium Access Control) și protocelele de rutare trebuie să permită formarea de noi legături pentru rutarea datelor colectate în rețea spre stația de bază. Aceasta poate să necesite o ajustare dinamică a puterii de emisie a nodurilor implicate în comunicație, precum și a ratelor de transfer de-a lungul conexiunilor existente, în scopul reducerii consumului de energie suplimentar, sau re-rutarea pachetelor prin regiunile rețelei de senzori care au un volum mai ridicat de energie disponibilă. Din aceste motive, în cadrul unei rețele de senzori cu toleranță la defecte sunt necesare mai multe nivele de redundanță;

- **scalabilitatea:** numărul senzorilor amplasați în zonele monitorizate este de regulă mare, de ordinul sutelor sau miilor de bucăți (uneori chiar mai mare). În consecință orice schemă de rutare utilizată trebuie să fie capabilă să gestioneze acest număr uriaș de noduri. În plus, orice protocol de rutare a informației în rețelele de senzori wireless trebuie să prezinte scalabilitate, pentru o mai bună reacție la evenimentele care au loc în spațiul monitorizat. Până la apariția unui eveniment, majoritatea senzorilor rămân, de regulă, în starea de adormire (*sleep*), restul senzorilor furnizând date din proces și asigurând o suficientă calitativă și cantitativă a procesului de monitorizare. În starea adormire un nod este izolat de rețea, modulul de comunicație radio fiind oprit, dar își păstrează în stare de funcționare modulul de procesare a datelor și respectiv pe cel de achiziție a valorilor înregistrate de la traductorii proprii;

- **mediul de transmitere:** în rețelele de senzori wireless de tip multi-hop, comunicația între două noduri se realizează printr-un mediu wireless. Problemele tradiționale asociate cu aceste canale de comunicație wireless (cum ar fi rata mare de eroare de comunicație, zonele de „umbră” din spatele obiectelor metalice, bruiaj, atenuare, etc) pot de asemenea să afecteze funcționarea întregii rețele de senzori. În general, lățimea de bandă necesară transmiterii datelor de la senzorii rețelei este scăzută, de ordinul 1-100Kb/s (excepție făcând transmiterea de imagini). În strânsă relație cu mediul de transmitere a informațiilor se afla proiectarea protocolului de acces la mediu MAC. O abordare uzuală a MAC, în cazul rețelelor de senzori wireless, constă în utilizarea protocelelor bazate pe TDMA, care asigură o economie de energie comparativ cu protocele de tip CSMA (cum ar fi de exemplu IEEE 802.11). De asemenea se pot utiliza și tehnologii bazate pe Bluetooth. [153]

Protocolul **TDMA** (Time Division Multiple Access) este un protocol de acces la canalul de comunicație pentru rețele, care partajează un mediu de comunicație, permițând ca mai mulți utilizatori să folosească același canal de frecvență, divizând semnalul în diferite cadre de timp.[56] Utilizatorii transmit într-o succesiune rapidă, unul după altul, fiecare utilizând un cadru de timp propriu, permițând astfel mai multor noduri să partajeze același canalul de radio-frecvență. TDMA este utilizat și în sistemul digital 2G de telefonie mobilă GSM (Global System for Mobile Communications), IS-136, Personal Digital Cellular (PDC), iDEN, și respectiv în standardul Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT) pentru telefoane portabile. De asemenea este utilizat pe scară largă și în sistemele de comunicații prin satelit.

Protocolul **CSMA** (Carrier Sense Multiple Access) este un protocol de acces la mediu de tip probabilistic, în care un nod verifică absența oricărui alt trafic înainte de a iniția transmisia proprie prin mediul de transmitere partajat.[57] "Carrier Sense" semnifică faptul că emițătorul „ascultă” linia de comunicație și încearcă să detecteze prezența unui semnal purtător generat de un alt emițător, înainte de a

începe transmisiunea proprie. Dacă acesta este detectat, emițătorul așteaptă ca transmisiunea în desfășurare să se încheie înainte de a iniția propria transmisie. "Multiple Access" semnifică faptul că mai multe stații transmit și recepționează date utilizând același mediu. Transmisiunile unui nod sunt în general receptate de către toate celelalte noduri conectate la mediu. [58] Două dintre cele mai uzuale implementări ale CSMA sunt: CSMA – CD (Carrier Sense Multiple Access With Collision Detection) utilizată în rețele de tip Ethernet, și respectiv CSMA - CA (Carrier Sense Multiple Access With Collision Avoidance) utilizată la rețele de tip Wireless LAN 802.11. [59]

De asemenea, pentru realizarea comunicației din cadrul rețelelor de senzori se mai utilizează și tehnologia **Bluetooth**, care este un protocol wireless deschis pentru schimbul de date pe distanțe scurte între dispozitive fixe și mobile, creându-se așa-numitele rețele personale PAN (Personal Area Network). La origine a fost conceput ca o alternativă la cablurile de date de tip RS232 și permite conectarea diverselor dispozitive, rezolvând problemele de sincronizare dintre acestea. [60] [61]

În ultimii ani s-a impus și protocolul ZigBee (IEEE 802.15.4) [62] în special datorită prețului de cost scăzut al echipamentelor, și chiar a devenit un standard al rețelelor wireless de mică putere de tip plasa (mesh). Acest protocol a fost dezvoltat de către ZigBee Alliance care a inclus la început 9 companii: Philips, Honeywell, Mitsubishi Electric, Motorola, Samsung, BM Group, Chipcon, Freescale și respectiv Ember. Scopul inițial era de a deveni un standard pentru comanda la distanță, wireless, în mediul industrial, dar țintește și spre alte aplicații care nu presupun rate ridicate de transmisie de date, dar care trebuie să aibă un preț de cost scăzut și dispun de resurse energetice limitate. Specificațiile acestui protocol au fost adoptate în 2004. [63]

- **conectivitatea:** densitatea relativ mare de noduri din rețelele de senzori wireless împiedică nodurile de a deveni complet izolate unele față de altele. Din acest motiv se presupune că o rețea de senzori este puternic interconectată. Acest fapt nu poate preveni schimbări în topologia rețelei și nici reducerea dimensiunii acesteia datorită defectării unor noduri (de exemplu). În plus conectivitatea rețelei depinde într-o foarte mare măsură de distribuția nodurilor, care de multe ori este aleatoare;

- **acoperirea:** un senzor al unei rețele de senzori obține și furnizează anumite informații specifice asupra mediului monitorizat. Acestea sunt limitate atât din punctul de vedere al distanței fizice cât și a acurateții datelor – un senzor poate doar să acopere o arie limitată din zona supravegheată. Din acest motiv, gradul de acoperire reprezintă un factor extrem de important în proiectarea aplicațiilor cu rețele de senzori wireless. În plus, se vorbește de acoperire și la comunicația radio, știind că și raza de acțiune a stației de emisie este limitată;

- **agregarea datelor:** întrucât mai mulți senzori sunt distribuiți într-o zonă și monitorizează aceleași mărimi fizice, ei pot furniza date redundante. Dacă pachetele similare provenite de la mai multe surse sunt agregate în cadrul rețelei, numărul total de transmisiuni este mai redus. Agregarea datelor este procedeul de combinare a datelor provenite de la surse diferite, în concordanță cu o funcție de agregare prestabilită (de exemplu suprimarea duplicatelor, valoare minimă, maximă sau medie, etc). Această tehnică se utilizează pentru a obține o eficientizare a energiei consumate în cadrul rețelei, precum și a optimizării volumului de date transferate în numeroase protocoale de rutare. De asemenea se pot utiliza metode specifice de procesare de semnale pentru agregarea datelor, de exemplu în cazuri în

care se utilizează datele de la senzorii învecinați pentru a reduce zgomotul din datele măsurate de senzorul curent;

- **calitatea serviciului:** în unele aplicații datele măsurate de senzorii rețelei trebuie livrate spre utilizatorul final în timp real, într-o anumită limită de timp, iar datele care ajung cu o întârziere mai mare este posibil să nu mai fie utilizabile. Din acest motiv, întârzierile de propagare a informațiilor prin rețea sunt condiții suplimentare importante pentru aplicațiile de timp real. Cu toate acestea, în majoritatea aplicațiilor, conservarea energiei, care este în relație directă cu durata de viață a rețelei, este considerată relativ mai importantă decât calitatea datelor furnizate de rețeaua de senzori. Pe măsura ce energia disponibilă se epuizează, se poate cere ca rețeaua să reducă calitatea datelor furnizate în scopul reducerii energiei disipate la nivelul nodurilor, și astfel să își prelungească durata de viață. În acest scop se utilizează protocoale de rutare care țin cont de energia disponibilă a rețelei și de consumul de energie al fiecărui nod implicat în comunicație.

În funcție de structura rețelei de senzori, **protocoalele de rutare** se pot clasifica în următoarele categorii:[64]

- *flat-based*, în care toate nodurile rețelei au aceleași roluri sau funcționalități - se utilizează în special la rețele cu un număr ridicat de noduri, în care este dificil de gestionat fiecare nod în parte;
- *hierarchical-based*, în care nodurile rețelei au atribuite roluri diferite, pe baza unei ierarhii prestabilite - permite efectuarea de rutare eficientă din punct de vedere energetic, deoarece admite ca nodurile cu energie ridicată să fie utilizate pe post de repeatere, iar nodurile cu energie scăzută să fie utilizate doar pentru detectarea evenimentelor din zona monitorizată;
- *location-based*, în care pentru a se stabili traseul pachetului de informație prin rețeaua de senzori se utilizează informații referitoare la poziția nodurilor în rețeaua de senzori.

În funcție de modul în care se determină traseul unui pachet de la sursă spre destinație, protocoalele de rutare se pot împărți în următoarele categorii:

- *proactive*, în care toate traseele posibile sunt calculate înainte de a fi nevoie de rutarea propriu-zisă a pachetului de informații;
- *reactive*, în care traseele sunt determinate la nevoie
- *hibride*, care reprezintă o combinație a primelor două.

În situațiile în care nodurile sunt statice, iar poziția lor nu se modifică pe parcursul funcționării rețelei, se recomandă utilizarea de protocoale bazate pe tabele de rutare statice. În aceste cazuri se evită utilizarea de protocoale de rutare reactive, deoarece sunt energofage, consumând cantități semnificative de energie la descoperirea traseelor posibile și respectiv la inițializarea traseului curent.

O altă categorie de protocoale de rutare sunt așa-numitele *protocoale cooperative*, în care toate nodurile transmit datele spre un nod central, unde acestea sunt agregate și eventual procesate, reducând costul rutării propriu-zise.

Pentru a economisi energia de alimentare a nodurilor rețelei, anumite protocoale localizate presupun trecerea în modul adormire a nodurilor dacă în zonele acestora nu se înregistrează evenimente. Maximul de energie se economisește dacă numărul de noduri aflate în starea de adormire din rețeaua de senzori este maxim.

Problematika proiectării algoritmului de comutare a nodurilor în starea de adormire într-o manieră localizată este prezentat în [65] [66].

Există o serie de protocoale de rutare propuse în contextul rețelelor de senzori wireless, de la comunicarea directă, în care nodurile rețelei de senzori comunică direct cu stația de bază, și până la algoritmi de rutare complecși, care asigură o minimizare a energiei consumate la realizarea comunicației de date.

În cazul utilizării comunicației directe, fiecare senzor trimite datele proprii direct către stația de bază. Dacă distanța între nod și stația de bază este mare, energia necesară pentru realizarea comunicației este de asemenea considerabilă, fapt care va duce la epuizarea rapidă a surselor de alimentare cu energie a nodurilor pe măsură ce acestea transmit propriile date. Cu toate acestea, ținând cont de faptul că nu este necesar să se recepționeze date la nivelul nodurilor rețelei, singurul element al rețelei care va consuma energie la recepție va fi stația de bază, și astfel volumul total de energie consumată la recepția datelor la nivelul rețelei de senzori este minimal. Astfel, dacă energia necesară recepționării datelor este ridicată, sau dacă stația de bază este suficient de apropiată de nodurile rețelei, această modalitate de comunicare devine acceptabilă, sau chiar optimală.

O alta abordare a comunicării datelor într-o rețea de senzori wireless este bazată pe protocoale de rutare de tip „*energie minimă*”.

Există o serie de protocoale de rutare care țin cont de energiile necesare pentru efectuarea comunicației, și respectiv de cantitățile de energie disponibile la nivelul nodurilor rețelei de senzori [67] [68] [69] [70] [71]. În toate aceste protocoale, nodurile rutează pachetele de date destinate stației de bază prin intermediul unor noduri intermediare. Astfel, pe lângă funcționalitățile de monitorizare, nodurile intermediare acționează ca și rutere pentru celelalte noduri ale rețelei de senzori. Aceste protocoale diferă între ele prin modul în care se aleg traseele. Astfel, unele protocoale iau în considerare doar energia disponibilă la nivelul nodurilor preferând trasee având ca noduri intermediare noduri cu o cantitate de energie suficient de mare, evitând nodurile cu un nivel energetic scăzut.

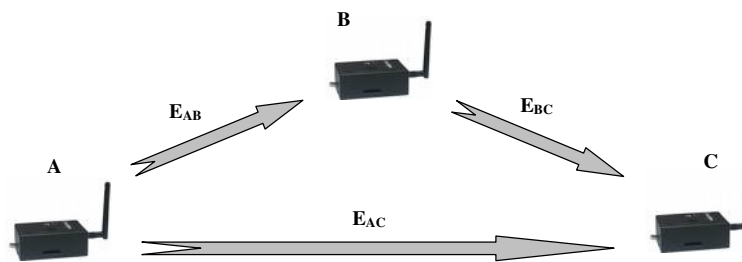


Figura 3.15. Rutare a datelor între 2 senzori

În alte protocoale [67] [69] [70] se consideră doar energia necesară emiterii datelor pentru construirea traseelor, neglijând energia disipată de nodul receptor. Astfel, nodul B este ales ca și nod intermediar în cazul comunicației între nodurile A și C, amplasate conform figurii 3.15, dacă energia necesară transmiterii pachetului de la nodul A la nodul C, notată cu E_{AC} , este mai mare decât suma

energiilor consumate la transmisia de la nodul A la B și respectiv de la B la C, adică dacă

$$E_{AC} < E_{AB} + E_{BC}.$$

În acest caz se neglijează energia disipată de nodurile B și C la recepția pachetelor de date.

3.3.3. Aspecte energetice

S-a menționat deja importanța minimizării consumului de energie al rețelelor de senzori wireless având în vedere faptul că senzorii din cadrul rețelelor utilizează baterii de alimentare cu capacitate limitată. Mărirea duratei de viață a bateriilor este crucială pentru extinderea perioadei de funcționare a senzorilor și reducerea costurilor de mentenanță a fiecărui senzor al rețelei. Aceasta poate fi obținută prin optimizarea numărului de procesări de informație și transmisiuni de date efectuate la nivelul fiecărui nod.

Din punct de vedere funcțional, un nod al rețelei de senzori poate să se afle în una dintre următoarele stări:

- **activ**, când ia parte la comunicația din cadrul rețelei, transmițând și recepționând date prin infrastructura rețelei;
- **în așteptare (idle)**, când nu transmite nimic, dar este capabil să recepționeze date din rețea;
- **în adormire (sleep)**, când modulul propriu de comunicație radio este închis, nodul fiind practic izolat de restul rețelei de senzori.

Cantitatea de energie consumată în cele 3 stări este diferită, dar în toate situațiile, energia consumată în modul adormire este semnificativ mai mică decât în modul activ sau așteptare. Cantitatea de energie consumată în modul activ este comparabilă cu cea din modul în așteptare, dar în anumite circumstanțe, când de exemplu distanța dintre noduri este mai mare, transmiterea pachetelor de date necesită mai multă energie decât recepționarea acestora. [45] [72]

Un studiu de caz s-a realizat considerând un senzor de tip Iris, produs de firma Crossbow, pentru care s-au imaginat trei moduri de funcționare:

- **modul 1**: în care senzorul funcționează „normal”, cu o medie de procesare a datelor de 1 % din totalul de cicluri de procesare și respectiv, cu o medie de 1 % cicluri de achiziție date de la senzorii proprii. Comunicația este în permanentă activă, nodul aflându-se în permanentă în starea activă sau în așteptare;
- **modul 2**: se păstrează procentajul de 1% pentru procesarea datelor și respectiv achiziționarea acestora de la senzorii proprii, dar se reduce timpul cât nodul este în așteptare. Durata în care nodul este în stare activă a rămas aceeași cu cea din modul anterior;
- **modul 3**: se păstrează procentajul de 1% pentru achiziționarea datelor de la senzorii proprii, se dublează numărul de cicluri de procesare a datelor și se reduce timpul în care nodul este în așteptare sau activ. În

acest caz nodul este izolat de restul rețelei pentru mai mult timp, dar își păstrează capacitatea de a efectua aceleași taskuri la nivel local ca și în celelalte moduri. Creșterea procentajului de procesare locală se datorează și algoritmilor de comutare în starea adormire/activă.

Curentul consumat de către senzor, conform datelor de catalog în cele trei moduri de funcționare este prezentat în tabelul 3.2. [42]

TABEL 3.2. Necesarul de curent pentru un senzor de tip Iris în diferite regimuri de operare

Curent consumat			Cicluri de funcționare		
Mod operare	valoare	Unitate măsura	Mod 1	Mod 2	Mod 3
Microprocesor (Atmega128L)					
Procesare	8	mA	1	1	27
Așteptare	8	μA	99	99	98
Modul Radio					
Recepție	16	mA	90	10	1
Emitere	17	mA	10	10	1
Așteptare	1	μA	0	80	98
Modul Senzor					
Operare	5	mA	1	1	1
Așteptare	5	μA	99	99	99

Pe baza considerentelor enunțate anterior, se poate determina autonomia de funcționare a senzorilor, corespunzătoare celor trei moduri de funcționare prezentate în tabelul 3.2. Aceasta este reprezentată în Figura 3.16, considerând o pierdere de capacitate anuală a bateriei de 3%.

Presupunând că timpul în care nodul rețelei este utilizat pe post de repeater pentru transmisiunile efectuate de celelalte noduri ale rețelei, este mai mic de 10% din timpul total de funcționare, rezultă o reducere a timpului cât nodul se află în starea în așteptare de la 90% la numai 10% (corespunzător Modulului 2 din tabelul 3.2). În acest mod se obțin reduceri semnificative ale energiei consumate de către acesta, conducând la o creștere semnificativă a duratei de viață a nodului (după cum se poate observa în Figura 3.16) fără a deprecia performanțele rețelei de senzori.

Utilizând algoritmi de rutare adecvați, și realizând o sincronizare a comunicațiilor din cadrul rețelei de senzor, se pot obține reduceri semnificative ale numărului de pachete transmise, respectiv recepționate în cadrul rețelei de senzori. În acest fel, se poate ajunge în Modul 3 de funcționare, în care, utilizând o baterie de capacitate mare (3000 mAHr), durata de viață a nodului este de 7 luni și 7 zile, în comparație cu un nod care se află în Modul 1 de funcționare, a cărui durată de viață este aproximativ de 7 zile. Această extindere a duratei de viață se realizează chiar dacă volumul de procesare locală este crescut datorită algoritmilor de selecție a regimului de funcționare a nodului, care determină dacă nodul poate trece în starea de adormire sau respectiv în așteptare.

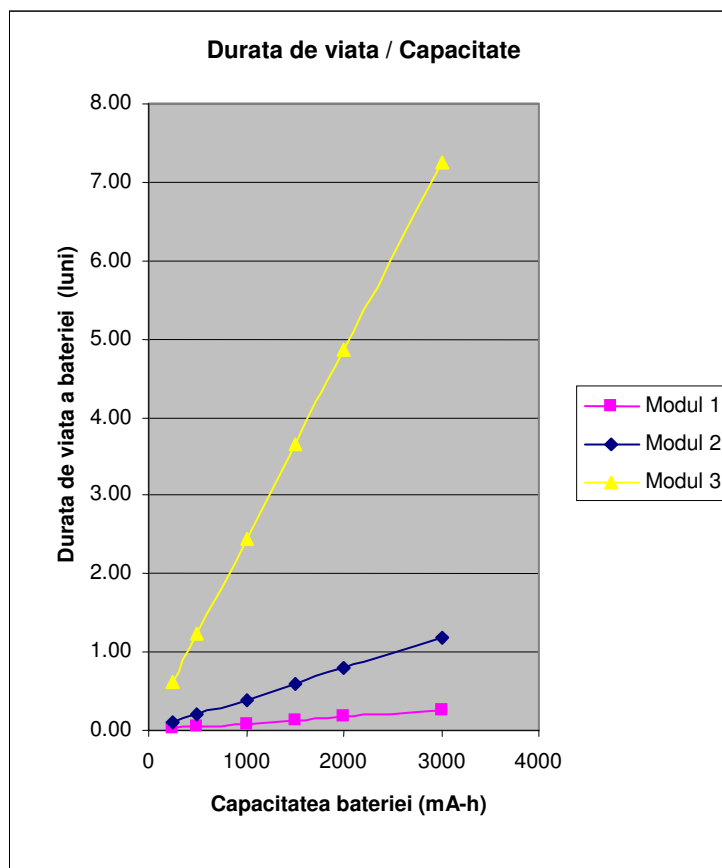


Figura 3.16. Autonomia energetică a unui senzor de tip Iris în diferite regimuri de funcționare

3.3.4. Algoritm multi-hop pentru optimizarea consumului de energie

După cum se poate observa din Figura 3.16, maximizarea timpilor în care nodurile rețelei sunt în starea în adormire, are efecte benefice asupra consumului de energie al acestora. Cu toate acestea, trecerea unui nod în starea în adormire trebuie făcută cu precauție, întrucât aceasta duce la diminuarea toleranței eterogene la defecte a rețelei și poate crea de asemenea dificultăți în transmiterea datelor prin rețeaua de senzori.

Astfel, trebuie avute în vedere următoarele aspecte, la trecerea unui nod în starea în adormire:

- nodurile vecine nu trebuie să rămână izolate de stația de bază,
- nodul va continua să monitorizeze valorile măsurate de proprii senzori și își va comuta starea în modul activ, la detectarea unui eveniment prestabilit,

- frecvența de comutare între starea în adormire și respectiv în așteptare trebuie să fie scăzută, întrucât necesită energie suplimentară, atât pentru comutarea propriu-zisă cât și pentru algoritmul de validare a stării în adormire.

Din punct de vedere formal, problematica coordonării trecerii nodurilor unei rețele de senzori în starea în adormire, pentru economisirea energiei, poate fi formulată pornind de la următoarele premise:

- rețeaua de senzori este de tip ad-hoc constituită din N noduri care formează un graf interconectat;
- fiecare nod i al rețelei de senzori are la momentul inițial o cantitate de energie finită și cunoscută, notată cu E_i ;
- un nod consumă o cantitate finită de energie (în unitatea de timp), în funcție de starea curentă, notată cu E_S , E_D , E_T sau E_R , corespunzând stărilor adormire, așteptare, transmisie sau respectiv în recepție. După cum s-a mai arătat anterior, E_S este semnificativ mai redusă în comparație cu E_D , E_T sau E_R .

Se poate enunța **teorema pentru trecerea în starea în adormire**:

Un nod poate trece în starea în adormire dacă și numai dacă există un traseu care conectează toate nodurile vecine aflate în starea activă sau în așteptare, iar toți vecinii care sunt în starea în adormire au cel puțin un vecin aflat în starea activă sau în așteptare. [73]

Teorema stabilește condițiile necesare și suficiente pentru ca un nod să treacă în starea în adormire, menținând în același timp interconectivitatea rețelei de senzori. Astfel, în orice moment, toate nodurile rețelei de senzori care sunt în stările în așteptare sau sunt active, împreună cu stația de bază, formează o rețea interconectată, care permite oricărui nod să comunice cu stația de bază. Necesitatea ca fiecare nod aflat în starea în adormire să aibă cel puțin un vecin care să nu se afle în această stare permite, ca imediat ce nodul trece în starea activă, să poată iniția comunicația spre stația de bază prin intermediul unui vecin aflat în așteptare.

Luarea deciziei de trecere în starea în adormire a unui nod, utilizând doar informație locală, disponibilă la nivelul respectivului nod, este o sarcină relativ dificilă. Schimbarea stării chiar și a unui singur nod al rețelei de senzori poate avea un impact potențial major asupra celorlalte noduri ale rețelei din punctul de vedere al conectivității și consumului de energie al acestora. Astfel, trebuie determinat în ce condiții un anumit nod al rețelei poate trece în starea de adormire, garantând că rețeaua rămâne în continuare interconectată.

În simulările efectuate în cadrul acestui paragraf, s-a considerat un algoritm pentru selectarea nodurilor active/în așteptare, celelalte noduri trecând automat în starea de adormire pentru a-și conserva propria energie de alimentare. După trecerea unui interval de timp, stabilit a priori, de la ultima selecție, toate nodurile sunt evaluate și participă activ la noua procedură de selecție. [74] Frecvența de comutație între starea în adormire și starea activă/în așteptare trebuie să fie relativ scăzută din cauza consumului adițional de energie datorat realizării comutării propriu-zise a stării nodului. [75]

3.3.5. Studii de caz

În cadrul studiilor realizate în acest capitol s-a considerat o rețea de senzori wireless de tip plasă, având senzorii poziționați într-o matrice de forma celei prezentate în Figura 3.17. Pentru a putea acoperi suprafețe întinse de teren, distanțele dintre nodurile rețelei de senzori au fost maximizate, dar acestea nu pot depăși raza de comunicație radio a nodurilor. După cum se poate observa în figură, un nod poate comunica direct numai cu nodurile situate în imediata sa vecinătate. Pentru a comunica cu stația de bază, pachetele de date provenite de la nodurile rețelei trebuie să fie rutate cu ajutorul unor noduri intermediare, excepție făcând nodurile notate în figura cu etichetele „N1”, „N2” și respectiv „N9”, care pot comunica direct cu stația de bază - zona de comunicație radio acoperită de stația de bază fiind marcată cu verde. Faptul că pe lângă nodul „N1” mai există alte 2 noduri care pot comunica direct cu stația de bază, duce la evitarea epuizării premature a bateriei nodului „N1” – acesta nefiind singurul nod terminal al rețelei de senzori.

În cazul în care se produce un eveniment în zona marcată cu culoare roșie în Figura 3.17, care este detectat de senzorii „N47”, „N48”, „N55” și „N56”, pentru realizarea comunicației dintre nodul care a detectat evenimentul și stația de bază vor mai fi implicate încă 10-11 noduri intermediare. În cadrul lucrării de față, prin eveniment se înțelege modificarea parametrilor monitorizați față de valoarea lor staționară.

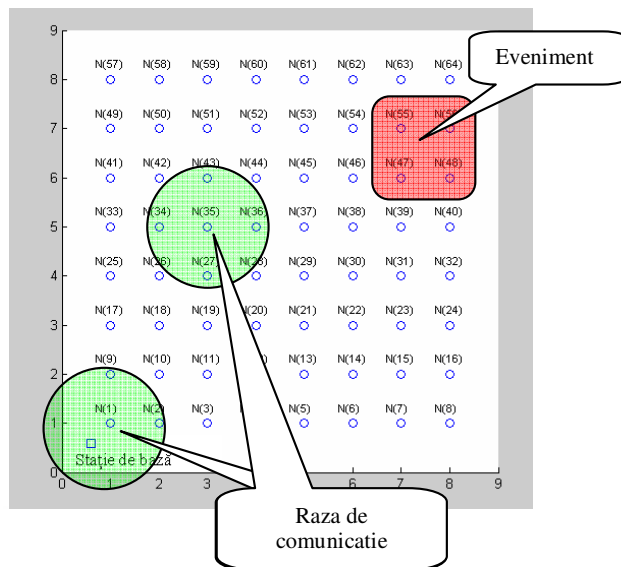


Figura 3.17. Rețea de senzori wireless

Pentru a putea determina influența utilizării algoritmului de coordonare a trecerii în starea de adormire a nodurilor asupra consumului de energie total înregistrat în rețeaua de senzori, prin evidențierea numărului total de transmisii/recepții de pachete de date, s-au considerat următoarele ipoteze de operare:

- elementele rețelei de senzori sunt amplasate într-o matrice, conform Figurii 3.17, iar poziția lor este statică;
- valorile măsurate de senzorii rețelei sunt convertite în unități normalizate.

În cadrul studiului sunt prezentate în Figura 3.18 valorile achiziționate de la rețeaua de senzori, exprimate în unități normalizate (exemplu valorile prezentate în Figura 3.18).

Obiectivul principal al aplicației considerate este detectarea și transmiterea la nivelul stației de bază a informațiilor referitoare la evenimentele care au apărut în zonele monitorizate. Nu se transmit informații dacă valorile parametrilor monitorizați nu se modifică.

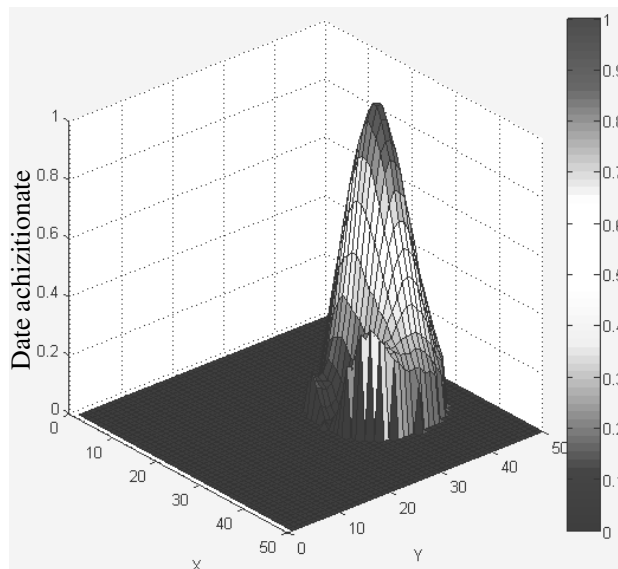


Figura 3.18. Valorile achiziționate de rețeaua de senzori, convertite în unități normalizate

Acestea sunt cazuri relativ des întâlnite în practică, cum ar fi de exemplu: detecția incendiilor, unde este important să se detecteze orice variație de temperatură care poate indica un potențial focar de incendiu, și nu este important să se măsoare și să se comunice valorile temperaturilor care sunt staționare sau în aplicații pentru mentenanță, în care este important să se identifice zonele expuse la stres ridicat, și care pot ceda prematur, s.a.m.d.

O primă abordare presupune menținerea tuturor nodurilor rețelei de senzori în stare activă sau în așteptare, fiind astfel capabile să măsoare și să comunice toate valorile măsurate spre stația de bază. Detecția evenimentelor se poate realiza la nivelul stației de bază, pe calculatorul conectat direct la aceasta, considerând că posedă suficientă capacitate de procesare și stocare a informației, și în plus, este alimentat de la o rețea de alimentare cu energie, practic nepunându-se problema autonomiei de funcționare. În acest caz, numărul de comunicații care se realizează

în cadrul rețelei de senzori este foarte mare, chiar și dacă se utilizează un arbore de rutare minimizat, predefinit.

În cazul unei comunicații ad-hoc, unde pachetele de date parcurg trasee diferite de la același nod sursă la stația de bază, numărul de comunicații directe necesare este mult mai mare decât în cazul traseelor minimale predefinite.

Un alt scenariu considerat constă în menținerea în stare activă sau în așteptare a tuturor senzorilor rețelei, dar se transmit doar variațiile înregistrate ale parametrilor monitorizați, ceea ce asigură în permanență deplina interconectivitate în cadrul rețelei de senzori.

Soluția propusă în cadrul paragrafului constă în menținerea unui număr minimal de noduri în stare în așteptare sau activă, păstrând însă deplina interconectivitate în cadrul rețelei de senzori, în timp ce restul nodurilor trec în starea de adormire (acestea continuă să monitorizeze parametrii prin traductorii proprii, la nivel local, izolat de restul rețelei de senzori). Dacă un nod izolat detectează un eveniment, trece în starea activă și inițiază comunicația evenimentului către stația de bază.

Pentru a permite oricărui nod al rețelei, aflat sau în starea de așteptare sau în cea de adormire, ca la detectarea unui eveniment să îl poată comunica imediat spre stația de bază, trebuie menținute în cadrul rețelei un număr minimal de noduri în starea de așteptare, care vor servi pe post de repeatere în rutarea informației spre stația de bază. În Figura 3.19 sunt prezentate numărul total de noduri, numărul maxim de noduri care pot trece în starea de adormire la un moment dat, precum și numărul minim de noduri care trebuie menținute în starea în așteptare, pentru a asigura interconectivitatea rețelei de senzori, sunt prezentate. Dimensiunea rețelei de senzori a variat de la 3x3 la 35x35 senzori.

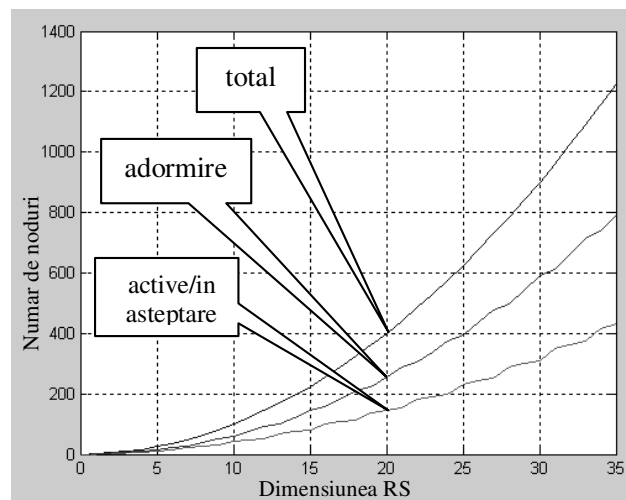


Figura 3.19. Numărul total de noduri, numărul de noduri aflate în așteptare/adormire

Un prim studiu de caz a vizat influența dimensiunii zonei în care se manifestă evenimentul, asupra consumului de energie necesară comunicației datelor spre stația de bază. S-a considerat o rețea de senzori compusă din 2500 de senzori

wireless, iar evenimentele s-au presupus a fi localizate în zone circulare, cu raza variind între $2r$ și $18r$, unde r este raza maximă de acoperire radio a nodurilor.

Evenimentele s-au produs la fiecare 2 minute, iar centrul zonei afectate de eveniment a fost considerat în apropierea celui de-al 30-lea nod, numărat de la stația de bază de-a lungul diagonalei principale a rețelei de senzori.

Energia totală consumată de rețeaua de senzori, măsurată în Wh, în cazul în care toate nodurile sunt menținute în starea de așteptare este prezentată în Figura 3.20, cu linie întreruptă. Energia consumată de rețeaua de senzori, dacă se aplică algoritmul de coordonare a stării de adormire a nodurilor este mult redusă, și este prezentată în Figura 3.20 cu linie continuă.

În situațiile în care nu este importantă menținerea deplinei interconectivități în cadrul rețelei, consumul energetic poate fi chiar mai mic, prin definirea de clustere și păstrarea deplinei interconectivități în cadrul acestora.

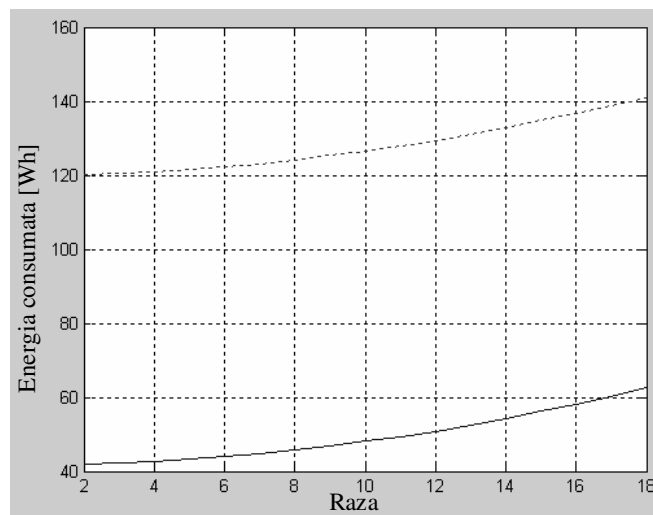


Figura 3.20. Energia consumată în funcție de raza evenimentului

Un alt studiu de caz a fost considerat pentru a analiza influența utilizării algoritmului de coordonare a stării de adormire a nodurilor, asupra energiei totale consumate de rețeaua de senzori, în funcție de dimensiunea rețelei. S-au utilizat rețele de senzori având între 100 de senzori (amplasați într-o matrice de forma 10×10) și 2500 de senzori (amplasați într-o matrice de forma 50×50), realizându-se un număr de 30 de iterații pentru fiecare rețea în parte.

Rezultatele sunt prezentate în Figura 3.21, unde cu linie întreruptă s-a reprezentat consumul energetic realizat de o rețea de senzori, în care s-au menținut în așteptare toate nodurile, iar cu linie continuă este consumul înregistrat de o rețea căreia s-a aplicat algoritmul de coordonare al trecerii în starea de adormire a nodurilor. Pe abscisă este dimensiunea n a rețelei de senzori, considerând că rețeaua are n^2 senzori amplasați într-o matrice de forma $n \times n$, iar pe ordonată este energia totală consumată de rețea, măsurată în Wh. Evenimentele s-au considerat a fi localizate în centrul rețelei de senzori, având o rază de acoperire egală cu $4r$ (unde r este raza de comunicație radio a nodurilor rețelei de senzori), iar frecvența de apariție a lor este de 1 eveniment la fiecare 2 minute.

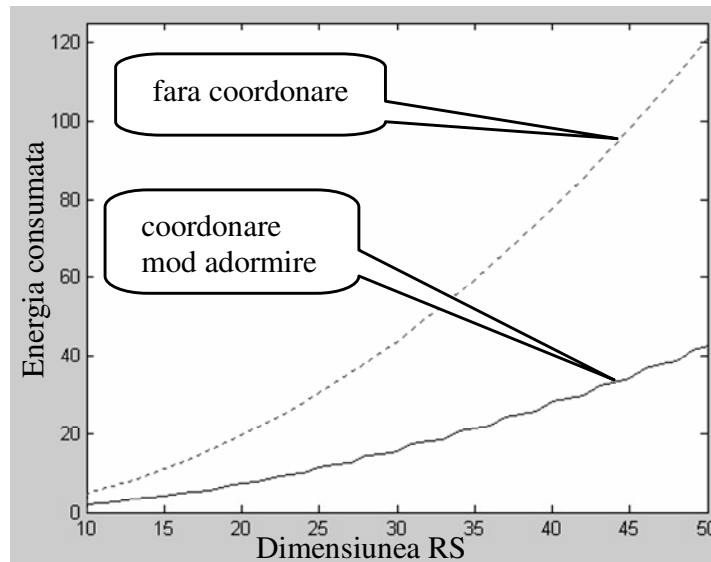


Figura 3.21. Energia consumată în funcție de dimensiunea rețelei de senzori

S-a constatat că volumul total de energie consumată de rețeaua de senzori este redus substanțial (aproape la o treime față de cazul în care toate nodurile sunt menținute în așteptare), extinzând durata de viață a bateriilor de aproape 3 ori.

Nodurile active utilizate pe post de repeatere au fost rotite periodic, în scopul echilibrării consumului energetic în cadrul rețelei de senzori, astfel că, nu întotdeauna traseele au fost minimale.

Numărul de noduri active poate fi redus chiar mai mult, dacă crește raza de acoperire radio a nodurilor, permițând comunicarea directă și cu vecinii situați în diagonală, dar în acel caz apare o creștere ușoară a energiei consumate la emiterea pachetelor de date.

3.3.6. Concluzii

Studiile realizate în cadrul acestui paragraf demonstrează faptul că utilizarea unei strategii adecvate pentru comutarea stării nodurilor rețelei din starea „în așteptare” în starea „în adormire” poate conduce la importante economii de energie la nivelul nodurilor rețelei de senzori, fără a afecta interconectivitatea din cadrul rețelei, îmbunătățind astfel raportul dintre durata de viață a bateriilor și acuratețea datelor furnizate de rețeaua de senzori.

După cum s-a arătat, se obțin importante economii de energie, chiar dacă numărul total de comunicații directe este crescut având în vedere ca nu întotdeauna se pot utiliza trasee minimale datorită indisponibilității anumitor noduri intermediare. Se recomandă utilizarea acestei metode de optimizare a consumului energetic în special în cazul rețelelor de senzori care au resurse locale foarte limitate (de exemplu capacitate baterie, lățime de bandă etc).

Algoritmul propus permite reducerea consumului de energie înregistrat la nivelul întregii rețele de senzori sub 40% față de cazul în care toate nodurile sunt menținute în așteptare. De asemenea, permite balansarea consumului între nodurile rețelei, pentru a preveni epuizarea energiei de alimentare la anumite noduri, în vreme ce nodurile învecinate dispun de importante rezerve de energie. Consumul de energie global, poate fi redus și mai mult prin combinarea metodei considerate cu alte tehnici, cum ar fi agregarea datelor sau clustering.

Un avantaj al metodei propuse este dat de toleranța ridicată la defecte a rețelei, în cazul în care un nod se defectează, algoritmul permite utilizarea de trasee alternative și astfel, comunicația din interiorul rețelei de senzori nu are de suferit, nerămânând zone izolate în interiorul acesteia.

Utilizarea de stații de bază adiționale, și redefinirea corespunzătoare a arborilor de rutare, pot de asemenea să reducă volumul de comunicații realizat în interiorul rețelei de senzori, și de asemenea să conducă la creșterea toleranței la defecte a întregii rețele de senzori.

Direcții de cercetare viitoare privesc posibilitatea de a utiliza informații disponibile apriori referitoare la procesele monitorizate, în proiectarea strategiilor de optimizare a consumului de energie al rețelei de senzori - de exemplu prin definirea unor arbori de rutare minimali, în corespondența cu probabilitățile de producere a evenimentelor în diferite zone ale rețelei de senzori, sau prin determinarea numărului și amplasamentului optim al stațiilor de bază adiționale.

3.4. Abordări experimentale

În cadrul acestui paragraf s-a realizat implementarea practică a metodei de reducere a traficului de transmisie a datelor (și implicit a energiei consumate) pentru o rețea de senzori wireless. S-au utilizat mai multe echipamente produse de firma Crossbow, dotate cu module de tip Iris de 2.4 GHz, operând integrat.

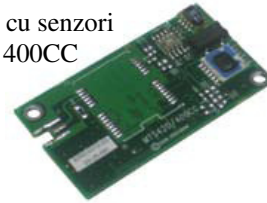
În Figura 3.22.a. se prezintă un **nod** al rețelei de senzori utilizate, compus din următoarele componente:

- *placa cu senzori MTS 400CC* (prezentată în Figura 3.22.b), dotată cu traductori de lumină, temperatură, umiditate, presiune atmosferică și respectiv traductori de accelerație (pe doua axe)
- *modul de comunicație wireless XM 2110CA* (prezentat în Figura 3.22.b), dotat cu microcontrolerul ATmega1281, memorie Flash (pentru programe, respectiv măsurători), memorie RAM, Convertor analog-numeric pe 10 biți și 8 canale, interfețe digitale, respectiv un transceiver în bandă de frecvențe 2405-2480 MHz - realizează atât comunicația de date cât și procesarea și stocarea locală a acestora,
- *carcasa* - pentru protecția nodului, include și bateriile de alimentare (impunându-se o optimizare a consumului de energie).



a. Nod SN 21140

Placa cu senzori
MTS 400CC



Modul comunicatie
wireless
XM2110CA



b. Module componente

Figura 3.22. Nodul rețelei de senzori

Pentru interfațarea cu sistemul de calcul s-au utilizat doua **stații de bază** de tip BU 2110, prezentate în Figura 3.23.a., compuse din următoarele:

- *modul de comunicație wireless XM 2110CA* (prezentat în Figura 3.23.b), care realizează atât comunicația de date, cat și procesarea și stocarea locală a acestora, identic cu cel utilizat în cadrul nodurilor.
- *interfața USB MIB520CB* – realizând interfața dintre portul USB al calculatorului gazdă și modulul de comunicație wireless XM 2110CA. Acesta integrează două porturi distincte – unul utilizat la comunicația datelor din/spre rețeaua de senzori, iar al doilea este utilizat pentru programarea nodurilor.
- *carcasa* – pentru protecția stației de bază.



a. Stație de baza tip BU 2110

Interfața USB
MIB520CB



Modul comunicatie
wireless
XM2110CA



b. Module componente

Figura 3.23. Stația de bază

Un modul de tip stație de bază nu are sursa de energie proprie, ci se alimentează direct prin portul USB al calculatorului gazdă, nefiind supus nici unei constrângeri energetice.

Rețeaua de senzori utilizată la implementarea metodei de agregare a fost constituită din 4 noduri (fiecare nod fiind dotat cu traductoare) și două stații de bază, notate în Figura 3.24 cu N1,..., N4, respectiv SB1, SB2. Stația de baza SB1 are rolul de a extrage valorile măsurate de senzorii rețelei în vederea stocării lor pe sistemul de calcul. Stația de bază SB2 a fost utilizată pentru a monitoriza comunicația din cadrul rețelei de senzori (neintervenind în funcționarea rețelei), având doar rolul de a intercepta toate pachetele de date comunicate wireless de către celelalte elemente ale rețelei. Nodurile N1, N2, N3 și N4 monitorizează lumina din mediul înconjurător, respectiv comunică spre stația de bază SB1 valorile achiziționate de către aceștia.

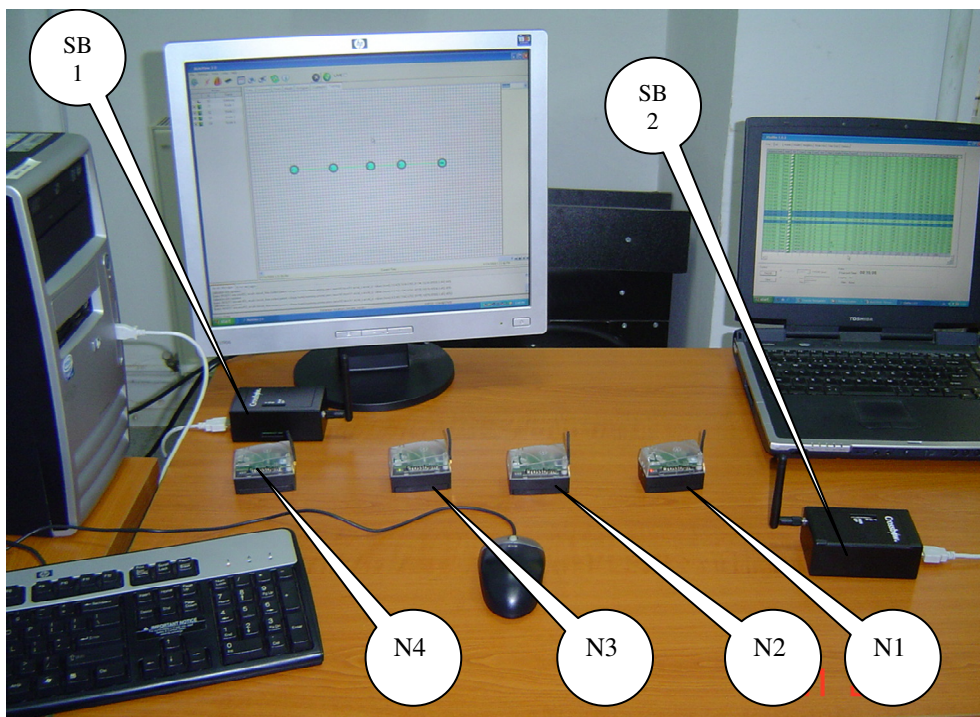


Figura 3.24. Rețeaua de senzori

Comunicația se realizează dinspre nodul N1 spre N4, și apoi spre SB1. Din motive de spațiu, nodurile au fost amplasate pe o suprafață redusă. Deși oricare nod poate comunica direct cu stația de bază SB1, s-a implementat o *comunicație de tip multi-hop*, pentru a se justifica aplicarea agregării datelor. Astfel fiecare nod „ascultă” pachetele de date comunicate prin rețea și ignoră pachetele care nu îi sunt adresate (și care în cazul unei rețele reale distribuite pe o suprafață mare nu ar fi fost accesibile) considerând următoarele reguli:

- nodul N1 ignoră toate pachetele de date comunicate prin rețea, inițiind măsurarea luminii și respectiv comunicarea valorii măsurate pe baza unui timer intern;
- nodurile N2, N3 și N4 ignoră pachetele care nu provin de la nodurile din amonte, situate în imediata lor vecinătate (adică N1, N2 respectiv N3).
- Stația de bază SB1 ignoră pachetele a căror sursă este diferită de N4.

Obiectivul aplicației este de a comunica spre stația de bază cea mai mare valoare a intensității luminoase înregistrate de senzorii rețelei. Pentru aceasta s-au programat toți senzorii rețelei astfel încât să realizeze citirea valorii intensității luminoase la fiecare 10 secunde, și apoi să compare valoarea cu ultima valoare comunicată de vecin, după care să transmită mai departe valoarea maximă și ID-ul nodului care a înregistrat-o. S-a utilizat un timer, pornit cu o secvență de tipul următor:

```
command result_t StdControl.start() {
    return call Timer.start(TIMER_REPEAT, 10000);
}
```

Iar declanșarea operațiilor de citire măsurători și comunicare au fost generată de evenimentul:

```
event result_t Timer.fired()
{
    call Leds.redToggle();
    call PhotoControl.start();
    call Light.getData();
    return SUCCESS;
}
```

Odată cu finalizarea operațiunii de citire a informației referitoare la intensitatea luminoasă se compară cu valoarea primită de la vecinul din amonte:

```
async event result_t Light.dataReady(uint16_t data) {
    atomic {
        if (max_data < data) {
            pack->light = data;
            pack->vref = NODE_ID_CURENT;
        }
        else {
            pack->light = max_data;
            pack->vref = max_vec;
        }
    }
    post SendData();
    call Leds.yellowToggle();
    return SUCCESS;
}
```

Excepție face nodul N1, care nu mai realizează compararea, ci comunică imediat propria valoare măsurată. Secțiunea atomic, a fost utilizată pentru realizarea excluderii mutuale la accesarea structurilor de date în mod concurent.

Întrucât nodurile nu sunt sincronizate, pentru a nu genera trafic suplimentar în rețea s-au implementat două abordări, pentru a evita o funcționare defectuoasă cauzată de agregarea unor informații recente (măsurate de nodul curent), cu informații mai vechi (întârziate datorită comunicației din cadrul rețelei sau datorită nesincronizării dintre noduri).

O primă variantă, a fost o implementare de tipul celei din Figura 3.25.

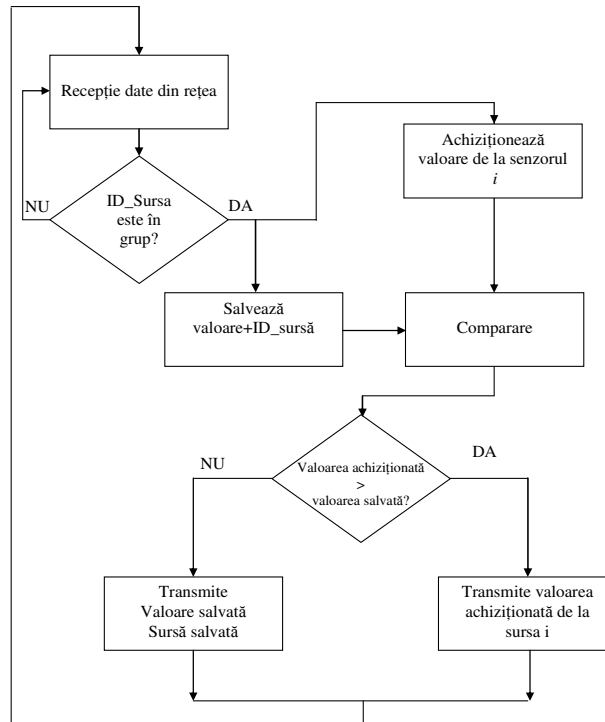


Figura 3.25. Algoritmul cu sincronizare implementat în cadrul rețelei de senzori

Algoritmul a fost implementat la nivelul nodurilor N2, N3, și N4. Astfel măsurătorile, la nivelul nodului curent, se realizează imediat ce acesta primește informații de la nodurile din amonte. În acest caz, se realizează practic o sincronizare între măsurători prin intermediul valorilor comunicate. Programul de la nivelul nodului N1 este mult mai simplu, acesta trebuind doar să efectueze măsurători și să le comunice imediat, pe baza evenimentelor generate de timer-ul intern.

Dezavantajul algoritmului este că în cazul în care un nod nu mai funcționează, întreaga rețea rămâne într-o stare de blocaj așteptând informații de la nodurile blocate din amonte.

Pentru a evita blocajul întregii rețele în cazul în care anumite noduri nu mai funcționează s-a propus algoritmul prezentat în figura 3.26.

În acest caz, se definește o variabilă *contor*, care permite utilizarea valorilor recepționate din rețea pentru un număr limitat de ori, și permite detectarea defectelor care se produc în interiorul rețelei și se manifestă prin încetarea transmiterii valorilor măsurate prin rețea.

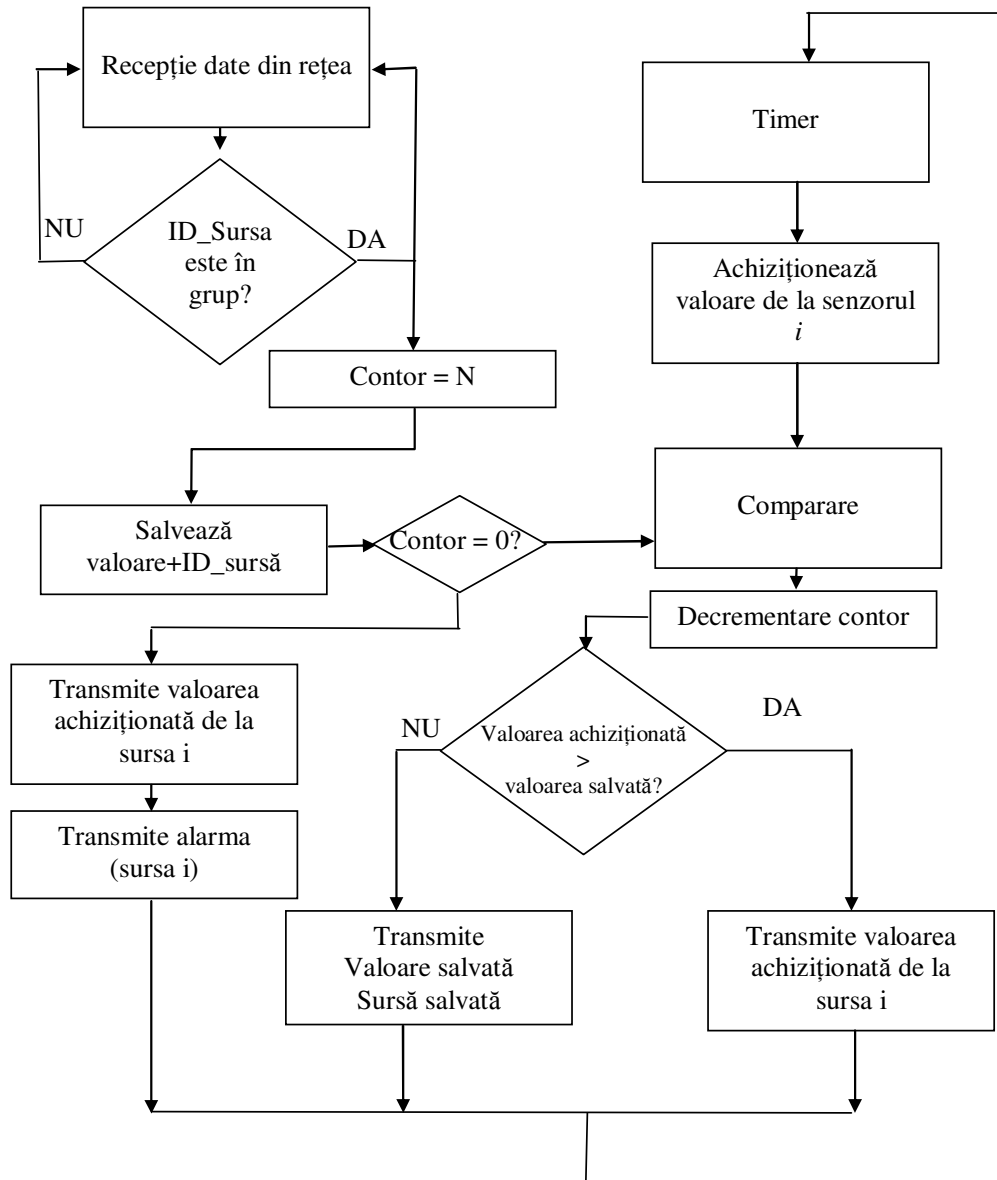


Figura 3.26. Algoritm implementat în cadrul rețelei de senzori

În cazul în care timpii de propagare a datelor prin rețea sunt relativ mici în comparație cu perioada de efectuare a măsurărilor, valoarea acestui contor este indicat să fie 1-2. Dacă perioada de efectuare a măsurărilor este comparabilă cu durata de propagare a informației prin rețea sau dacă la transmitere se înregistrează durate cu o variație mare (datorită erorilor de comunicație, modificării rutelor, trecerii în adormire a anumitor noduri etc) valoarea contorului poate fi

crescută peste 3, dar o valoare mare a acesteia poate duce la o creștere a „inerției” cu care se determină valoarea maximă din cadrul rețelei de senzori.

În cazul în care contorul ajunge la 0 se transmite valoarea detectată de senzorul curent și se semnalează faptul că a încetat comunicația cu nodurile din amonte printr-un mesaj de eroare.

Implementarea practică a confirmat studiile efectuate în cadrul acestui capitol, și a dovedit că prin agregarea datelor se poate obține o diminuare a traficului din rețea, fără a conduce la o depreciere a datelor extrase din rețea (din punctul de vedere al întârzierii acestora sau al pierderii de informație utilă - în cazul de față valorile maxime).

3.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-au dezvoltat două metode de creștere a autonomiei de funcționare a rețelelor de senzori wireless, atât prin utilizarea tehnicilor de agregare a informației în interiorul rețelei cât și prin utilizarea unor algoritmi de rutare a datelor între nodurile rețelei de senzori.

S-a demonstrat, prin simulări realizate pe calculator, că utilizarea unei metode de agregare adecvate a datelor, precum și utilizarea mai multor stații de bază aduce îmbunătățiri majore în reducerea volumului de date comunicate prin canalul radio în interiorul rețelei, în cazul unor rețele de senzori multi-hop, conducând la importante economii de energie la nivelul surselor de alimentare ale nodurilor rețelei de senzori wireless. Aceste fapte recomandă utilizarea acestor metode, în special în cazul rețelelor de senzori cu resurse foarte limitate (în ceea ce privește lățimea de bandă, energia de alimentare etc).

De asemenea, s-a dovedit că prin utilizarea acestor metode, calitatea datelor extrase din rețea nu este depreciată, nepierzându-se informațiile importante referitoare la fenomenul monitorizat de rețea.

Se poate concluziona astfel că printr-o alegere corectă a metodelor de agregare a datelor în cadrul unei rețele de senzori se poate îmbunătăți raportul „*acuratețea datelor – durata de viața a bateriilor*” conducând la o utilizare mai eficientă a rețelei de senzori wireless.

Metoda de agregare propusă în cadrul acestui capitol a condus în cadrul studiului de caz la o reducere la jumătate a volumului de date comunicate în cadrul rețelei. Această reducere poate fi și mai mare în cazul combinării acestei metode cu altele, cum ar fi utilizarea de stații de bază adiționale, cluster etc.

Un dezavantaj al metodei constă în toleranța relativ redusă la defecte, în cazul utilizării de trasee statice, minimalizate, dacă un nod al rețelei se defectează, întreaga rețea va avea o funcționare defectuoasă. Acest dezavantaj poate fi înlăturat prin utilizarea de trasee dinamice, dar în acest caz apare un volum suplimentar de date comunicate prin rețea, necesare sincronizărilor între noduri/trasee, care reduc din eficiența energetică a rețelei. Totuși, adăugarea de stații de bază adiționale aduce îmbunătățiri semnificative toleranței la defecte a rețelei, printr-un adaos de preț de cost relativ scăzut. Soluția este recomandată și datorită reducerilor de trafic de comunicație dovedite în paragraful de față.

S-a dovedit că prin utilizarea unui mecanism de rutare adecvat și a unei strategii corespunzătoare pentru comutarea stării nodurilor rețelei din „în așteptare” în starea „în adormire” poate conduce la importante economii de energie la nivelul nodurilor rețelei de senzori, fără a afecta interconectivitatea din cadrul rețelei,

îmbunătățind astfel raportul dintre durata de viață a bateriilor și acuratețea datelor furnizate de rețeaua de senzori.

După cum s-a arătat în simulările realizate, se obțin importante economii de energie, chiar dacă numărul total de comunicații este crescut datorită faptului că nu întotdeauna se pot utiliza trasee minimale, datorită indisponibilității anumitor noduri intermediare. Aceste fapte recomandă utilizarea acestei metode de optimizare a consumului energetic în special în cazul rețelelor de senzori care au resurse locale foarte limitate (de exemplu capacitate baterie, lățime de bandă etc).

Algoritmul prezentat permite reducerea consumului de energie înregistrat la nivelul întregii rețele de senzori sub 40% față de cazul în care toate nodurile sunt menținute în așteptare, și de asemenea permite balansarea consumului între nodurile rețelei pentru a preveni epuizarea energiei de alimentare la anumite noduri, în vreme ce nodurile învecinate dispun de importante rezerve de energie. Consumul de energie global, poate fi redus chiar mai mult prin combinarea metodei prezentate cu alte tehnici, cum ar fi agregarea datelor sau clustering.

Un avantaj al metodei prezentate este dat de toleranța ridicată la defecte a rețelei, în cazul în care un nod se defectează, algoritmul permite utilizarea de trasee alternative și astfel, comunicația din interiorul rețelei de senzori nu are de suferit, nerămânând zone izolate în interiorul acesteia.

Utilizarea de stații de bază adiționale, și redefinirea corespunzătoare a arborilor de rutare, pot de asemenea să reducă volumul de comunicații realizat în interiorul rețelei de senzori, și de asemenea conduce la creșterea toleranței la defecte a întregii rețele de senzori.

Direcții posibile de cercetări viitoare sunt următoarele:

- posibilitatea de a utiliza informații disponibile apriori referitoare la natura valorilor achiziționate de rețeaua de senzori (distribuție, domeniu de variație etc) în vederea utilizării de metode de agregare optime din punctul de vedere al optimizării consumului de energie total al rețelei de senzori, fără a afecta calitatea datelor furnizate (de exemplu de a defini arbori de rutare în concordanță cu probabilitățile de a apărea puncte de extrem în anumite zone ale rețelei, de a amplasa stații de bază adiționale în apropierea zonelor cu risc maxim etc).
- posibilitatea de a utiliza informații disponibile apriori, referitoare la procesele monitorizate, în proiectarea strategiilor de optimizare a consumului de energie al rețelei de senzori (de exemplu prin definirea unor arbori de rutare minimali, în corespondența cu probabilitățile de producere ale evenimentelor în diferite zone ale rețelei de senzori, sau prin determinarea numărului și amplasamentului optim al stațiilor de bază adiționale).

Simulările s-au realizat în mediul Matlab, prin intermediul unor programe de concepție proprie, utilizând date de catalog de la firma Crossbow, producătoare de componente de rețele de senzori wireless. Rezultatele obținute au fost validate prin publicarea, în calitate de prim autor, a 4 lucrări științifice la conferințe internaționale, din care 3 cu recunoaștere ISI.

4. TOLERANȚA LA DEFECTE ÎN CADRUL REȚELOR DE SENZORI WIRELESS

4.1. Preliminarii

Toleranța la defecte în cadrul rețelelor de senzori wireless presupune următoarele problematice:

- stabilirea/determinarea unor modele pentru defectele care pot să apară în cadrul rețelei de senzori;
- detectarea efectivă a defectelor apărute în rețea (acestea pot fi de diferite tipuri și se pot manifesta la diferite nivele)
- stabilirea unui mecanism de corecție a defectelor apărute, sau cel puțin de limitare a efectelor acestora asupra bunei funcționări a întregii rețele.

Din punctul de vedere al *domeniului afectat* de apariția defectelor se disting de asemenea 4 categorii:

- **componente**: defectele afectează componente ale unui singur nod, dar nodul își păstrează neafectate parte din capabilități (de exemplu este afectată zona de traductori, dar sunt perfect funcționale modulele de comunicație wireless și de procesare a datelor).
- **nod**: un întreg nod este afectat, restul rețelei rămânând funcțională (din aceasta categorie se exclud cazurile în care defectarea unui nod influențează în mod substanțial și alte noduri ale rețelei).
- **rețea**: rețeaua este afectată în situația în care mai multe noduri ale rețelei sunt afectate, chiar dacă defectul se manifestă efectiv la un singur nod (de exemplu în cazul în care nodul defect este utilizat pe post de unic repeater pentru alte noduri și nefuncționarea lui duce la izolarea tuturor nodurilor în amonte de acesta).
- **sistem distribuit**: întregul sistem distribuit este afectat în mod direct de defecte, situație în care funcționarea acestuia este întreruptă total.

Din punctul de vedere al *elementelor nodurilor*, defectele pot fi clasificate în următoarele 6 categorii:

- motorul de procesare
- sistemul de stocare
- sistemul de comunicație
- sursa de energie
- senzori
- elemente de execuție

Unul dintre factorii esențiali ai funcționării unui sistem de calcul, indiferent dacă este unul distribuit sau nu, este reprezentat de fiabilitatea echipamentelor de procesare, de comunicație și respectiv de stocare a datelor. De asemenea, pe măsură ce gradul de complexitate al dispozitivelor enumerate anterior crește, fiabilitatea acestora nu crește intrinsec, iar capacitatea de toleranță la defecte a dispozitivelor joacă un rol tot mai important. Cu toate acestea, deși încă din anii

1950 s-au elaborat tehnici pentru creșterea fiabilității sistemelor de calcul (atât la nivelul procesării și stocării datelor, cât și la nivelul comunicației între dispozitive) atât în mediul academic, cât și în industrie,[76][77] toleranța la defect nu a fost considerată mult timp un obiectiv important în proiectarea majorității sistemelor de calcul. Unul dintre motivele care au condus la această situație poate fi considerat faptul că gradul de fiabilitate al componentelor sistemelor de calcul a înregistrat o creștere continuă pe măsura evoluțiilor înregistrate pe plan tehnologic, atât în ceea ce privește calitatea materialelor utilizate la fabricarea propriu-zisă a dispozitivelor, cât și prin reducerea factorului de stres al componentelor sistemului de calcul. Singurul aspect referitor la creșterea toleranței la defecte a sistemelor de calcul, care a beneficiat de o atenție sporită de către mediul industrial, de-a lungul ultimilor ani a fost testarea off-line a componentelor și a sistemelor de procesare în întregime. [78][79]

Rețeaua Internet, necesită interconexiuni permanente între noduri, și o posibilitate permanentă de transmitere a informației între 2 puncte, chiar dacă aceasta se realizează pe trasee diferite. Din acest motiv, creșterea importanței rolului jucat de Internet atât în mediul privat cât și în cel industrial, a adus în prim plan și capacitățile acestuia de toleranță la defecte, cât și posibile tehnici de „auto-reparare” [80] [81] [82] [83].

Considerând similaritățile dintre rețeaua Internet și o rețea de senzori wireless, se poate estima, ca pe măsură ce gradul de utilizare a acestora din urmă va crește, va crește semnificativ și interesul acordat capacității de toleranță la defecte.

Multe aplicații cu rețele de senzori pot avea un mare impact asupra oamenilor sau a mediului înconjurător, datorită comenzilor care sunt date de către acestea către elementele de execuție subordonate (vezi cazul unei rețele de senzori pentru protecție împotriva incendiilor – care comandă direct pornirea unor dispozitive de stins focul precum și izolarea zonelor cuprinse de incendiu). Ținând cont de faptul că tendința este ca rețelele de senzori, după cum este firesc, să opereze în mod autonom, fără supervizarea directă de către operatori umani, siguranța în funcționare a acestora trebuie să dețină un rol important în proiectarea acestor sisteme.

Cu toate că este evidentă importanța ca rețelele de senzori să fie tolerante la defecte și să posede capacitatea de a se autorepara există numeroși factori care îngreunează atingerea acestor obiective:

- complexitatea și incontrollabilitatea aplicațiilor, fac dificilă predicția tuturor defectelor care pot apărea în sistem. Sunt îngreunate de asemenea testarea off-line, dar mai ales depanarea rețelei, datorită faptului că este problematică reproducerea evenimentelor care au cauzat funcționarea defectuoasă.
- constrângeri energetice - autonomia energetică este probabil una dintre cele mai importante caracteristici ale unei rețele de senzori wireless, fapt care duce la constrângeri foarte dure, atât asupra hardware-ului suplimentar (necesar pentru redundanță, detecție de erori etc), cât și asupra volumului de procesare și de comunicație de date.
- constrângeri legate de prețul de cost - afectează atât calitatea componentelor utilizate în rețeaua de senzori cât și testarea off-line și hardware-ul + software-ul direct implicat în detectarea și asigurarea toleranței la defecte. De notat faptul că testarea aplicației on-line este

relativ costisitoare și necesită o cotă din energia disponibilă la nivelul fiecărui senzor.

- alte constrângeri - aici se pot include aplicațiile care prin natura lor implică un grad ridicat de confidențialitate și securitate a datelor fapt care face imposibilă testarea off-line extensivă a sistemelor implicate.

În aplicațiile în care este esențială optimizarea consumului de energie la nivelul nodurilor rețelei, se studiază energia consumată suplimentar în cazul diferitelor structuri care asigură toleranța la defecte. În aceste situații, se are în vedere că în general energia consumată la comunicația de date este mai mare decât cea necesară procesării locale a datelor, fapt care va conduce spre necesitatea de a dezvolta algoritmi locali de detecție a erorilor, utilizând în principal informații locale și minimizând cantitatea de informații comunicate. În cazul rețelelor de senzori în care energia necesară procesării datelor este semnificativ mai mare decât cea necesară comunicației între noduri, este de preferat să se adopte soluții care să evite pe cât posibil procesarea locală, iar toate informațiile să fie comunicate unui nod cu autonomie energetică mai mare spre procesare, sau să se aleagă o variantă de procesare distribuită, care va evita epuizarea bateriilor unui singur nod.

4.2. Nivele de toleranță la defecte în rețele de senzori

Din punctul de vedere al *nivelelor de abstractizare* la care se poate raporta toleranța la defecte, se pot distinge 4 nivele [84], după cum este reprezentat în Figura 4.1:

- hardware
- software de sistem
- middleware
- aplicație.

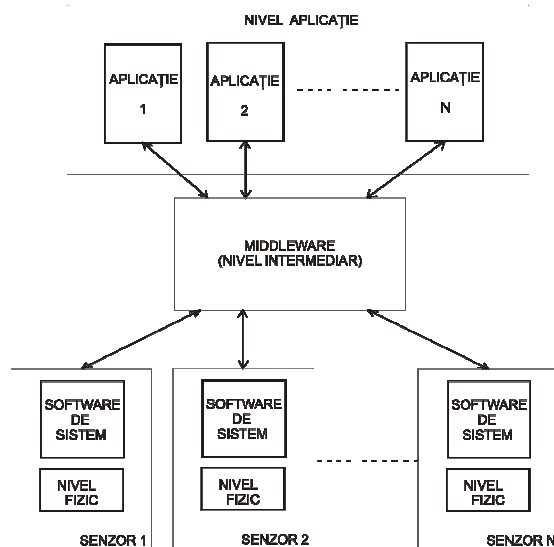


Figura 4.1. Nivele de abstractizare în cadrul rețelelor de senzori wireless

4.2.1. Nivelul fizic

Nivelul fizic asigură transmiterea în rețeaua de senzori prin canalul de comunicație. Acesta include toate specificațiile electrice, mecanice, procedurale și funcționale pentru activarea, menținerea și dezactivarea legăturilor fizice între nodurile rețelei de senzori.

În cadrul acestor caracteristici se încadrează nivelurile de tensiune, sincronizările și temporizările schimbărilor acestor niveluri, ratele de transfer fizice, distanțele maxime la care se poate transmite și alte atribute similare care sunt definite de specificațiile fizice. Pentru aceasta pot fi utilizate diverse medii fizice (radio, cabluri metalice etc). Fiecare dintre ele este definit de lărgimea sa de bandă, întârziere, cost și ușurința de instalare și respectiv de întreținere.

În cazul rețelelor de senzori wireless comunicația se face prin intermediul undelor radio, iar acest nivel include modularea/demodularea, precum și codarea/decodarea semnalelor.

Se utilizează noțiunea de **software radio**, caz în care activități specifice nivelului fizic sunt efectuate utilizând capabilitățile software ale elementelor componente [85]. Prin aceasta se asigură o flexibilitate crescută nivelului fizic, și se permite adaptarea transmisiunii la condițiile momentane din canalului de comunicație.

Utilizarea tehnicilor adaptive în canalul de comunicație îmbunătățește semnificativ performanțele rețelei de senzori, reducând volumul energiei consumate în procesul de comunicație și reducând numărul de erori de comunicație. [86] [87] [88] [89]

4.2.2. Nivelul hardware

Componentele hardware ale unui nod al rețelei de senzori pot fi împărțite în 3 categorii, în funcție de fiabilitatea acestora, și anume:

- componente cu o fiabilitate relativ ridicată: modulul de procesare a datelor, modulul de stocare locală a datelor și modulul de alimentare cu energie al nodului. Atât procesorul cât și memoriile utilizate au de regulă integrate tehnici de detecție a erorilor. Pentru sistemul de alimentare cu energie se pot utiliza surse redundante (baterii acumulate, celule fotovoltaice etc).
- componente a căror bună funcționare este puternic influențată de mediul înconjurător: modulul de comunicație radio – comunicația radio poate fi bruiată sau puternic atenuată de factori din mediul înconjurător. Performanțele acestora pot fi îmbunătățite prin utilizarea de tehnici de corecție a erorilor sau chiar prin retransmiterea datelor.
- componente predispuse la defectare: traductoarele și elementele de execuție – acestea sunt afectate de condițiile de mediu în care sunt integrate.

Fiabilitatea componentei hardware a rețelelor de senzori este relativ ridicată, dar influențată de mediul în care sunt amplasați senzorii, de constrângerile

energetice sub care operează aceștia și de prețul de cost unitar care trebuie să fie scăzut având în vedere numărul mare de senzori componenți.

4.2.3. Nivelul software de sistem

Nivelul software de sistem cuprinde sistemul de operare care rulează la nivelul senzorilor, precum și programele utilitare care îl însoțesc.

Sunt implementate mai multe funcționalități pentru asigurarea toleranței la defecte, cum ar fi: rerutarea informației pe rute alternative în cazul rețelelor de tip multi-hop, recalibrarea traductoarelor și elementelor de execuție. [90][91]

4.2.4. Nivelul middleware

Nivelul middleware al rețelelor de senzori face legătura între sistemul de operare și aplicațiile utilizator, facilitând dezvoltarea, mentenanța și executarea acestora.[92] Include mecanisme de coordonare a senzorilor în vederea distribuirii sarcinilor în cadrul rețelei, de agregare a datelor, de filtrare și extragere a valorilor achiziționate de senzorii rețelei etc.

Există diferite implementări cu facilități specifice de realizare a toleranței la defecte, spre exemplu:

- Cougar, în care se utilizează interogări similare cu cele din limbajul SQL pentru a extrage valori din rețeaua de senzori, asimilată unei baze de date relaționale [93];
- SMP (The Smart Messages Project), în care se utilizează mesaje conținând cod și date [94]
- SCADDS (Scalable Coordination Architectures for Deeply Distributed Systems), care permite atât agregarea cât și livrarea eficientă din punct de vedere energetic a informațiilor furnizate de senzorii rețelei [95]

4.2.5. Nivelul aplicație

Ultimul nivel din cadrul abstractizării este cel de aplicație, care cuprinde interfața cu utilizatorul și interfața cu aplicațiile (gestionează comunicația între aplicații).

Realizarea toleranței la defecte la acest nivel este foarte eficientă, datorită flexibilității oferite de mediul de programare în care se dezvoltă aplicațiile utilizator, dar are dezavantajul că trebuie particularizată pentru fiecare caz în parte.

4.3. Caracteristici ale toleranței la defect în cadrul unor structuri specifice de rețele de senzori

În cadrul acestui capitol sunt considerate diferite structuri de rețele, cu toleranță la defecte, considerând ca ipoteză de lucru posibilitatea ca la un moment dat să apară un singur defect, iar defectele componentelor sunt independente.

Ipoteza nu este foarte restrictivă, având în vedere faptul că două defecte care apar simultan pot fi considerate a fi consecutive. Sunt situații în care există interdependența între defectele manifestate – cum ar fi, de exemplu: fluctuațiile mari de putere sau de temperatură, pot cauza la rândul lor funcționarea defectuoasă a mai multor senzori, dar în continuare se presupune că oricare două defecte sunt independente.

Se poate stipula în consecință că *oricare două defectări (evenimente) sunt disjuncte din perspectiva probabilităților acestora.*

Un aspect calitativ semnificativ care trebuie luat în considerare la dezvoltarea aplicațiilor cu rețele de senzori este reprezentat de conceptul de **fiabilitate**. Caracteristicile specifice, precum și constrângerile puternice ale rețelelor de senzori wireless fac necesară o interpretare diferită a acestui concept, adaptată specificului acestora.

Fiabilitatea se definește ca fiind probabilitatea ca rețeaua să funcționeze corect și continuu în intervalul de timp $[0, \tau]$, presupunând ca la momentul inițial, $t_0 = 0$, sistemul a fost operațional. [96]

Fiabilitatea unui sistem are o variație în timp și se notează cu $R(t)$ (reliability).

În mod similar se poate defini **complementara funcției de fiabilitate** $Q(t)$, care exprimă probabilitatea de defectare a sistemului:

$$Q(t) = 1 - R(t) \quad (4.1)$$

Astfel, întrucât orice rețea de senzori se consideră funcțională la momentul inițial $t_0 = 0$ se poate scrie:

$$R(0) = 1, Q(0) = 0 \quad (4.2)$$

iar, dacă sistemul se defectează la momentul $t_0 = T_f$:

$$R(T_f) = 0, Q(T_f) = 1 \quad (4.3)$$

În cadrul lucrării de față, modelarea fiabilității s-a realizat utilizând modelele Markov. Modelarea considerată se bazează pe două elemente definitorii: *stările posibile ale sistemului și respectiv tranzițiile* dintre acestea.

Un sistem tehnic sau un element component se poate afla la un moment dat în una din următoarele stări: funcționare, avarie sau rezervă.

Starea unui sistem se poate modifica în timp, sistemul evoluând de la o stare la alta. Asemenea modificări ale stărilor unui sistem se numesc *tranziții*. Starea corespunzătoare defectării este notată cu F (failed). Mulțimea M a tuturor stărilor asociate sistemului se poate scrie:

$$M = \{F\} \cup \{H_i \mid i = 1..k\} \quad (4.4)$$

Fiabilitatea unui sistem poate fi definită în acest context ca fiind probabilitatea ca sistemul să se afle în orice stare diferită de F – adică suma tuturor probabilităților asociate celorlalte stări ale sistemului.

$$R(t) = \sum_{i=1}^k P(H_i, t) \quad (4.5)$$

sau din (4.4) și (4.5) rezultă:

$$R(t) = 1 - P(F, t) \quad (4.6)$$

Rata de defectare (*failure rate*) reprezintă frecvența de apariție a defectelor în cadrul sistemului considerat. Aceasta se exprimă prin numărul de defecte pe unitatea de timp, și se notează cu λ [97]:

$$\lambda = \frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} \quad (4.7)$$

Rata de defectare, în mod uzual depinde de timp, variind pe parcursul ciclului de viață al sistemului. Astfel, rata de defectare a unui senzor este mai mare după 3 ani de funcționare, decât a fost în primul an de la data punerii în funcțiune. De regulă aceste rate de defectare ale componentelor care compun rețelele de senzori wireless pot fi determinate din cataloage, sau cu ajutorul diverselor date de testare, puse la dispoziție de fabricanții de componente.

Rețelele de senzori au un grad relativ mare de fiabilitate, de vreme ce o mare parte din componentele utilizate în rețelele de senzori sunt circuite microelectronice integrate care au o rată de defectare foarte scăzută. În literatura de specialitate se specifică că rata de defectare a circuitelor integrate crește foarte puțin, în raport cu complexitatea acestora. [98][99]

Deși în cele mai multe situații, modelarea duratei de viață a componentelor se realizează considerând o rată monotonă de hazard (γ , Weibull), în general la modelarea ciclului de viață a unui produs industrial se disting 3 faze, în care rata de defectare are un comportament diferit.[100][101] Astfel, în prima parte a duratei de funcționare - în perioada *rodajului*, se poate observa o rată de defectare ridicată, care scade pe măsură ce produsele sunt utilizate. Urmează o perioadă normală de funcționare - perioada de *maturitate*, în care rata de defectare rămâne constantă, iar în final, după ce produsul atinge durata limită de funcționare nominală - perioada de *uzură*, *îmbătrânire*, rata de defectare are o creștere semnificativă [102].

În acest caz, modelul are alura din Figura 4.2, și se numește model tip „*cadă de baie*”. [103][104]

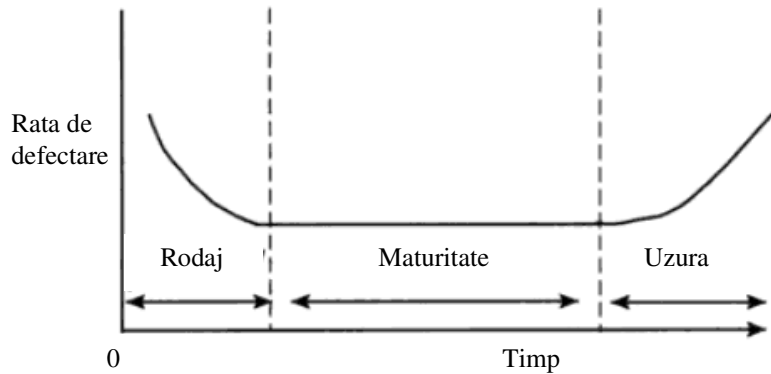


Figura 4.2. Evoluția ratei de defectare pe parcursul duratei de viață a unui senzor

În multe situații, nu este necesară o descriere completă a comportamentului defectuos al sistemului, ci este suficient ca acesta să fie caracterizat printr-un singur parametru, și anume **Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului** MTTF – (mean time to failure), fiind mai ușor de utilizat.

MTTF se determină pe baza observării unui număr mare de elemente de același tip, care funcționează în aceleași condiții de lucru specificate, pe o durată de timp în care nu se defectează toate componentele, și este definit ca:

$$MTTF = \frac{\text{timpul total de funcționare al tuturor componentelor}}{\text{numarul de defecte înregistrate în acest interval de timp}}$$

MTTF este un parametru de sistem important în cazurile în care defectele trebuie să fie gestionate cât mai strict, cum ar fi de exemplu sistemele de siguranță. MTTF apare frecvent ca o cerință de proiectare importantă și de regulă, are un efect imediat în stabilirea frecvenței de efectuare a activităților de mentenanță și inspecții tehnice periodice.

În practică MTTF este deseori utilizat și în locul ratei de defectare. Acesta este un concept care se referă la elemente nereparabile (sau în cazuri în care reparația nu este justificată – de exemplu, datorită costului ridicat al acesteia în raport cu costul total al elementului distrus).

MTTF este denumit uneori impropriu și *timp mediu de funcționare între defecte* (MTBF - Mean Time Between Failures). În cazurile speciale, al așa-numitelor *procese regenerabile*, unde timpul de recuperare după defect poate fi neglijat, și probabilitatea de defectare rămâne constantă în raport cu timpul, MTBF este chiar inversul ratei de defectare:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (4.8)$$

Dacă există informații asupra unei populații cu n elemente, având momentele de apariție a erorilor t_1, t_2, \dots, t_n , atunci MTTF poate fi definit cu ajutorul relației (4.9):

$$\text{MTTF} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (4.9)$$

Considerând pentru defecte modele stohastice și având în vedere că valoarea medie a unei funcții de probabilitate este dată de speranța matematică a variabilei aleatoare, definită pe un interval $a < t \leq b$, rezultă că MTTF este dată de integrala produsului dintre variabila aleatoare (timpul până la apariția defectului) și densitatea de probabilitate a acesteia: [105]

$$\text{MTTF} = E(t) = \int_a^b t \cdot f(t) dt \quad (4.10)$$

Unde prin $f(t)$ s-a notat funcția de densitate de probabilitate

Considerând variația timpului de la 0 la ∞ , și utilizând integrarea prin părți se ajunge la o expresie mai simplă a MTTF [106]:

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (4.11)$$

Știind că transformata Laplace a unei funcții $f(t)$, definită pentru orice număr real $t \geq 0$, este funcția $F(s)$, definită de:

$$F(s) = \mathbf{L} \{f(t)\} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (4.12)$$

rezultă că MTTF poate fi rescris ca:

$$\text{MTTF} = \int_0^{\infty} R(t) dt = R^*(s) \Big|_{s=0} \quad (4.13)$$

unde $R^*(s)$ este imaginea Laplace a funcției $R(t)$

4.4. Modelarea și analizarea fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov

În acest paragraf se propun modele Markov pentru modelarea și analiza fiabilității în rețelele de senzori wireless. Se prezintă aspecte teoretice generale, cât și mărimile specifice sistemelor tolerante la defecte, care pot fi utilizate în descrierea fiabilității rețelelor de senzori. Este realizat un studiu comparativ, prin aplicații vizând diferite structuri de rețele de senzori, utilizând atât componente redundante de tip „hot-swap” dedicate cât și universale. Modelarea Markov prezintă un instrument puternic de analiză a fiabilității. Modelele Markov pentru modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori, atât reparabile cât și nereparabile.

În cazul sistemelor distribuite de mari dimensiuni, o problemă importantă constă în rezolvarea setului de ecuații diferențiale corespunzător modelelor Markov. În lucrarea de față, rezolvarea acestor ecuații s-a realizat utilizând calculul operațional.

Modelarea Markov se bazează pe următoarele ipoteze: [105]

- Probabilitatea de tranziție de la o stare la alta, a sistemului în intervalul finit de timp Δt , este dat de $\lambda \cdot \Delta t$, unde λ este rata de tranziție (rata de defectare, de reparare etc) asociată cu stările Markov.
- Probabilitatea apariției a mai mult de o tranziție într-un interval finit de timp Δt , de la o stare la alta este neglijabilă.
- Toate tranzițiile sunt independente.

O rețea de senzori wireless reprezintă, așa cum s-a menționat deja, un set de dispozitive dotate cu traductori integrați, autonomi, distribuite spațial și necablate, alimentate de baterii, având capabilități de procesare a informațiilor și de comunicare în domeniul radiofrecvenței, de rază scurtă, care monitorizează condițiile fizice (temperatură, sunet, vibrație, presiune, lumina, mișcare, etc), în diferite locații.

Rețelele de senzori sunt de regulă utilizate la monitorizarea și detectarea evenimentelor semnificative care au loc în diferite zone, pe arii întinse. Fiecare senzor colectează informații din mediul lui înconjurător, efectuează operații de procesare de bază asupra acestora, și apoi transmite datele spre utilizatorul final utilizând infrastructura întregii rețele. Rețeaua de senzori trebuie să opereze, în timp real, sub acțiunea interferențelor radio, a diverselor atacuri precum și accidente sau defecțiuni în medii deseori ostile, în plus aceasta este supusă unor puternice constrângeri referitoare la resursele disponibile (energie, lățime de bandă etc), fapt care face ca mecanismele convenționale de protecție la erori, tipice sistemelor informatice să nu fie fezabile în cazul rețelelor de senzori. [107] [108]

Unul dintre factorii cei mai restrictivi, cu impact major asupra funcționalităților rețelelor de senzori este energia de alimentare. Sursa de alimentare (bateria) a tuturor elementelor rețelei este limitată și nu este convenabil ca aceste baterii să fie schimbate frecvent, datorită numărului mare de noduri care alcătuiesc rețeaua de senzori. Considerând faptul că energia consumată pentru comunicația de date wireless este semnificativ mai mare decât cea necesară procesării locale a acestora, devine necesară dezvoltarea de algoritmi care să asigure creșterea toleranței la defecte/erori, care să utilizeze în special date locale și într-o cât mai mică măsură date externe nodului curent. De asemenea este important să se utilizeze structuri de detecție a defectelor/erorilor, care să folosească doar informație disponibilă la nivel local. [84]

Senzorii sunt predispuși la o mare varietate de defecte/erori, de la funcționarea defectuoasă cauzată de hardware sau software, permanentă sau pasageră, posibilă în condiții normale de lucru, până la acelea cauzate de condiții climatice severe (umiditate excesivă, temperaturi ambiante extreme etc) sau de mediul fizic dur în care operează senzorii (incendii, explozii etc). În acest sens, trebuie asociată o probabilitate de defectare, care nu este neglijabilă, fiecărui tip de senzor și este esențial a se construi o rețea de senzori wireless tolerantă la defecte, capabilă să furnizeze continuu serviciile dorite, indiferent de erorile care apar la nivelul senzorilor. [109]

Disfuncționalitățile din cadrul rețelelor de senzori pot fi clasificate în două categorii, în funcție de nivelul la care se manifestă:

- **la nivel de nod** – acestea sunt cauzate, de regulă, din cauza uzurii componentelor, de epuizarea sursei de alimentare cu energie, sau întreruperea temporară a acesteia, de catastrofe naturale etc.
- **la nivel rețea** – acestea sunt cauzate de regulă din cauza coliziunilor între pachetele vehiculate, interferențe sau jamming. [110]

4.4.1. Modele Markov pentru rețele de senzori fără unități de schimb

4.4.1.1. Modelul Markov pentru o rețea cu n senzori și fără unități de schimb

În cadrul acestui paragraf se analizează fiabilitatea unei rețele de senzori, care este funcțională la momentul inițial, și care nu dispune de unități de schimb (elemente aflate în stand-by, capabile să preia sarcinile elementelor rețelei în cazul apariției unui defect).

Observație: în cadrul acestui capitol prin starea de *stand-by* (așteptare) se înțelege starea în care se află o unitate de schimb care nu ia parte activă la funcționarea rețelei, dar este în permanență gata să devină complet operațională în caz de nevoie, spre deosebire de capitolul 3, în care avea semnificația de stare a unui nod care procesează local informația și „ascultă” comunicația wireless din cadrul rețelei.

Se consideră rețeaua de senzori wireless din Figura 4.3, formată din n senzori de același tip.

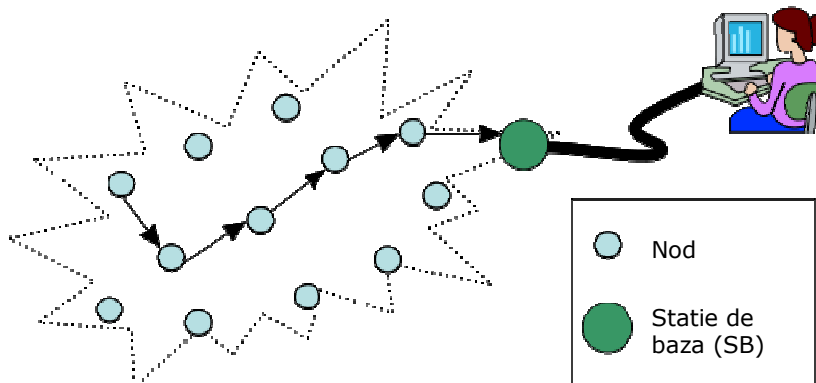


Figura 4.3. Rețea de senzori wireless formată din n senzori de același tip

Luând în considerare incertitudinea care caracterizează apariția defectelor în cadrul unui sistem, devine firesc să se utilizeze tehnici probabilistice pentru modelarea deteriorării sistemului, considerat ca un proces discret stohastic. Modelul Markov corespunzător, considerând că toți senzorii au aceeași rată de defectare λ_s , este cel prezentat în Figura 4.4.

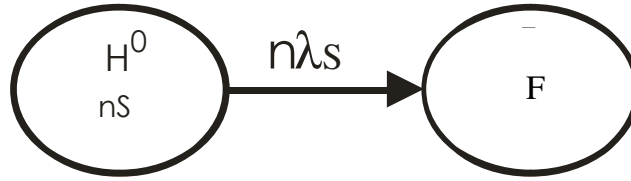


Figura 4.4. Modelul Markov pentru o rețea cu n senzori și fără unități de schimb

În acest caz, se disting doar două stări care se exclud mutual, aparținând mulțimii $\{H_0, F\}$. În prima stare, notată cu H_0 (Healthy), sistemul este funcțional, având n elemente în stare de funcționare, iar în starea a doua, notată cu F (Failed), cel puțin un element este defect, iar sistemul a ieșit din parametrii normali de funcționare.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului, conform modelului Markov de mai sus este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_0(t), P_1(t)] \quad (4.14)$$

Modelul prezentat în Figura 4.4 este descris de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -n \cdot \lambda_s P_0(t) \\ \frac{dP_1}{dt} = n \cdot \lambda_s P_0(t) \end{cases} \quad (4.15)$$

având condițiile inițiale $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0$

Rezolvând sistemul cu ajutorul calculului operațional rezultă:

$$\begin{cases} sP_0(s) - 1 = -n\lambda_s P_0(s) \\ sP_1(s) = n\lambda_s P_0(s) \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} (s + n\lambda_s)P_0(s) = 1 \\ sP_1(s) - n\lambda_s P_0(s) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} P_0(s) = \frac{1}{(s + n\lambda_s)} \\ P_1(s) = \frac{n\lambda_s}{s(s + n\lambda_s)} \end{cases} \quad (4.16)$$

De unde, aplicând inversa transformatei Laplace se deduce valoarea probabilității:

$$P_1(t) = 1 - e^{-n\lambda_s t} \quad (4.17)$$

Conform relației (4.6), rezultă funcția de fiabilitate a sistemului:

$$R(t) = 1 - P_1(t) = 1 - (1 - e^{-n\lambda_s t}) = e^{-n\lambda_s t} \quad (4.18)$$

Studiu de caz:

În Figura 4.5 se prezintă variația funcției de fiabilitate, considerând 7 rețele de senzori diferite, având 1, 4, 9, 16, 25, 36 și respectiv 49 noduri, de același tip, și o rată de defectare de 2.5 defecte la fiecare 10^6 secunde.

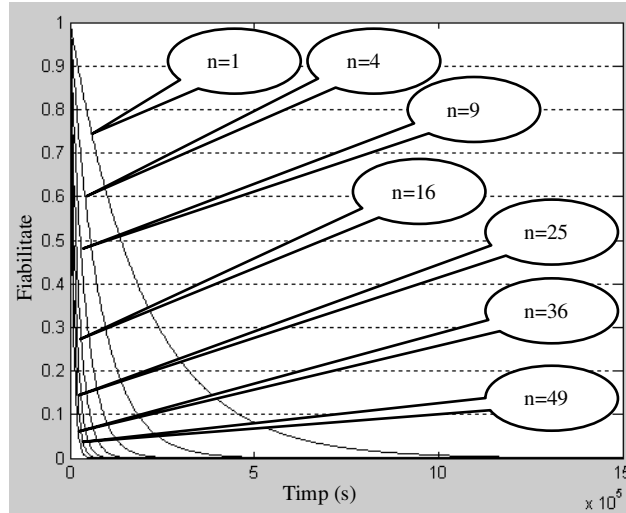


Figura 4.5. Fiabilitatea unor rețele de senzori de diferite dimensiuni

Se observă că fiabilitatea rețelei scade pe măsură ce crește numărul de elemente constitutive ale acesteia.

Pentru a calcula *Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului* (MTTF), pe baza relației (4.13), trebuie calculat în prealabil $R^*(s)$. Aplicându-se transformata Laplace asupra funcției de fiabilitate rezultă:

$$R^*(s) = \frac{1}{s} - P_1(s) = \frac{1}{s} - \frac{n\lambda_s}{s(s+n\lambda_s)} = \frac{1}{s+n\lambda_s} \quad (4.19)$$

și respectiv, *timpul mediu de funcționare până la apariția defectului* este dat de:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = R^*(0) = \frac{1}{n\lambda_s} \quad (4.20)$$

În Figura 4.6 se prezintă variația timpului mediu de funcționare până la apariția defectului, MTTF, pentru rețele de senzori diferite, având între 1 și 49 noduri, de același tip, având o rată de defectare de 2.5 defecte la fiecare 10^6 secunde.

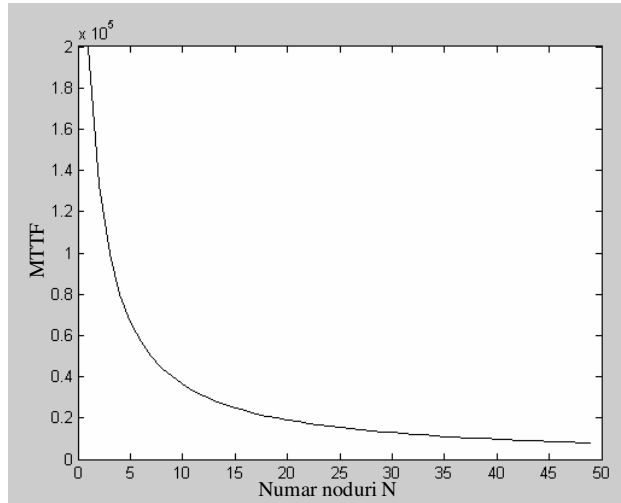


Figura 4.6. Timpul mediu de funcționare fără defecte al unor rețele de senzori de diferite dimensiuni

Se observă, și în acest caz, atât din graficul prezentat cât și din relația (4.20), ca MTTF este maxim în cazul rețelelor de senzori cu număr mic de noduri (la limită, valoarea maximă este atinsă pentru o rețea cu un singur nod - caz improbabil în practică).

4.4.1.2. Modelul Markov pentru o rețea hibridă cu N tipuri diferite de senzori și fără unități de schimb

O rețea de senzori wireless hibridă, alcătuită din N tipuri diferite de senzori, și fără unități de schimb, este reprezentată în Figura 4.7.

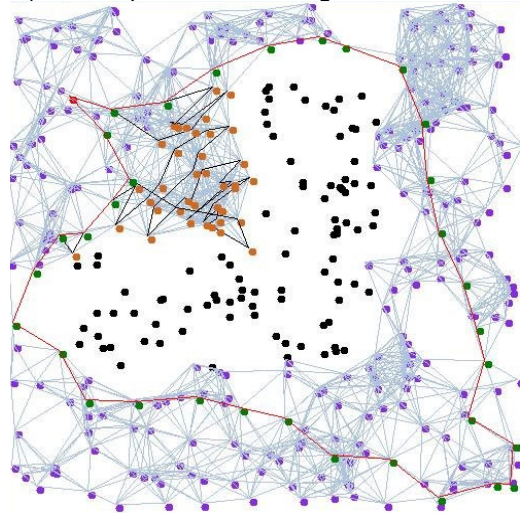


Figura 4.7. Rețea de senzori wireless hibridă

Pentru situațiile în care există n_i senzori de tip S_i , modelul Markov corespunzător este reprezentat în Figura 4.8.

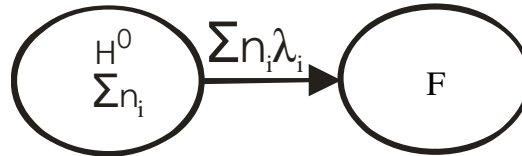


Figura 4.8. Modelul Markov pentru o rețea cu N tipuri de senzori și fără unități de schimb, cu n_i senzori de tip S_i

În acest caz, numărul total de senzori ai rețelei este $\sum_{i=1}^N n_i$.

Dacă se consideră că toți senzorii au aceeași rată de defectare $\lambda_i = \lambda \mid i = \overline{1, n}$, atunci modelul matematic (MM) asociat modelului Markov, prezentat în Figura 4.8, este dat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} \frac{dP_0}{dt} = -\sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda P_0(t) \\ \frac{dP_1}{dt} = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda P_0(t) \end{cases} \quad (4.21)$$

având condițiile inițiale $P_0(0) = 1, P_1(0) = 0$

Rezolvând sistemul (utilizând calculul operațional) rezultă valoarea *probabilității de defectare*:

$$P_1(t) = 1 - e^{-\sum_{i=1}^N n_i \lambda t} \quad (4.22)$$

Conform relației (4.6), rezultă *funcția de fiabilitate a sistemului*:

$$R(t) = 1 - P_1(t) = 1 - (1 - e^{-\sum_{i=1}^N n_i \lambda t}) = e^{-\sum_{i=1}^N n_i \lambda t} \quad (4.23)$$

În mod similar cazului anterior, se calculează *timpul mediu de funcționare până la apariția defectului*, și rezultă:

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \frac{1}{\sum_{i=1}^N n_i \lambda} \quad (4.24)$$

4.4.2. Modele Markov pentru rețele de senzori cu unități de schimb dedicate

4.4.2.1. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte o unitate de schimb pentru fiecare tip

În cadrul acestui paragraf se studiază problema utilizării de elemente de schimb dedicate, care pot înlocui în caz de defectare un element al rețelei de senzori. Aceste elemente de schimb sunt elemente redundante, de tip „hot swap”, care pot înlocui fără întârziere elementele defectate, preluând integral și instantaneu toate funcționalitățile acestora. După ce un astfel de element a preluat locul elementului defect, acesta va avea aceeași rată de defectare ca și elementul substituit.

Un prim caz studiat este cel al unei rețele alcătuite din două tipuri de senzori diferiți, notați în continuare cu A și respectiv B și câte o piesă de rezervă pentru fiecare tip. Elementele de rezervă sunt dedicate și notate cu RA și respectiv RB, în funcție de tipul senzorilor pe care îi pot substitui.

Rețeaua se consideră a fi defectă (nefuncțională) în cazul în care s-a defectat un senzor de un anumit tip și nu mai există rezerve care să îi preia atribuțiile. Aceasta stare este notată cu F.

În acest caz, se disting 5 stări discrete: $\{H_{AB}^2, H_A^1, H_B^1, H^0, F\}$.

În prima stare, notată cu H_{AB}^2 (Healthy), sistemul este funcțional, având n elemente de tip A, m elemente de tip B și câte o rezervă de fiecare tip.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului enumerate anterior, este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_4(t), P_3(t), P_2(t), P_1(t), P_0(t)] \quad (4.25)$$

În Figura 4.9 este prezentat modelul Markov al rețelei de senzori, cu câte un element de schimb de fiecare tip.

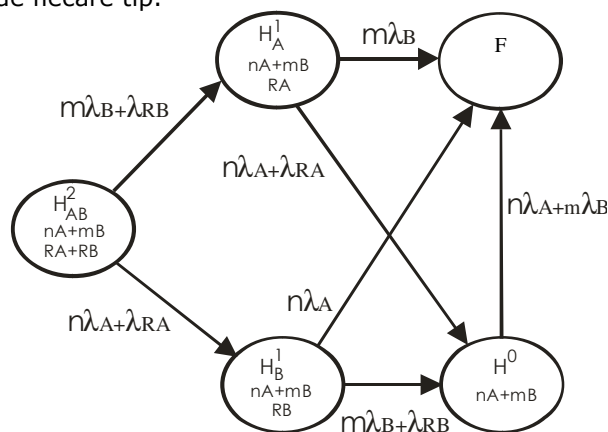


Figura 4.9. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte o unitate de schimb pentru fiecare tip

Considerând că toți senzorii au aceeași rată de defectare $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_{RA} = \lambda_{RB} = \lambda$, modelul matematic asociat modelului Markov din Figura 4.9 este dat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} \frac{dP_4}{dt} = -(m+n+2)\lambda P_4 \\ \frac{dP_3}{dt} = -(m+n+1)\lambda P_3 + (n+1)\lambda P_4 \\ \frac{dP_2}{dt} = -(m+n+1)\lambda P_2 + (m+1)\lambda P_4 \\ \frac{dP_1}{dt} = -(m+n)\lambda P_1 + (m+1)\lambda P_3 + (n+1)\lambda P_2 \\ \frac{dP_0}{dt} = (m+n)\lambda P_1 + m\lambda P_2 + n\lambda P_1 \end{cases} \quad (4.26)$$

Unde condițiile inițiale sunt:

$$P_4(0) = 1, P_3(0) = 0, P_2(0) = 0, P_1(0) = 0, P_0(0) = 0$$

Aplicând transformata Laplace la rezolvarea sistemului (4.26) se obțin soluțiile:

$$\begin{cases} P_4(t) = e^{-(m\lambda+n\lambda+2\lambda)t} \\ P_3(t) = (2n+2) \sinh\left(\frac{1}{2}\lambda t\right) e^{\left(\left(-m\lambda-n\lambda-\frac{3}{2}\lambda\right)t\right)} \\ P_2(t) = (2m+2) \sinh\left(\frac{1}{2}\lambda t\right) e^{\left(\left(-m\lambda-n\lambda-\frac{3}{2}\lambda\right)t\right)} \\ P_1(t) = (n+1)(m+1) \left(e^{-(m\lambda+n\lambda)t} - 2e^{-(m\lambda+n\lambda+\lambda)t} + e^{-(m\lambda+n\lambda+2\lambda)t} \right) \\ P_0(t) = 1 - m \cdot n \cdot e^{-(m+n+2)\lambda t} + (2 \cdot m \cdot n + m + n) e^{-(m+n+1)\lambda t} - (n+1) \cdot (m+1) e^{-(m+n)\lambda t} \end{cases} \quad (4.27)$$

Funcția de fiabilitate rezultă din relația:

$$R(t) = 1 - P_0(t) \quad (4.28)$$

adică:

$$R(t) = nme^{-(n+m+2)\lambda t} - (n(m+1) + m(n+1))e^{-(n+m+1)\lambda t} + (nm+n+m+1)e^{-(n+m)\lambda t} \quad (4.29)$$

sau, adusă la o formă mai simplă:

$$R(t) = (1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1})(1 - (1 - e^{-\lambda t})^{n+1}) \quad (4.30)$$

Studiu de caz:

Pentru a putea evalua influența numărului componentelor active asupra *fiabilității întregii rețele* s-a considerat o rețea de senzori alcătuită din 2 tipuri de elemente: numărul celor de tipul A a variat între 1 și 49, iar de tipul B a fost ales un singur component. Rata de defectare a fost de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde. Rezultatul simulării acestui caz, considerând câte o singură unitate de rezervă de tip stand-by pentru fiecare din cele două tipuri de componente este prezentat în Figura 4.10.

Se poate observa că fiabilitatea rețelei care are cel mai mic număr de componente active (unul de tip A și respectiv unul de tip B) este cea mai ridicată.

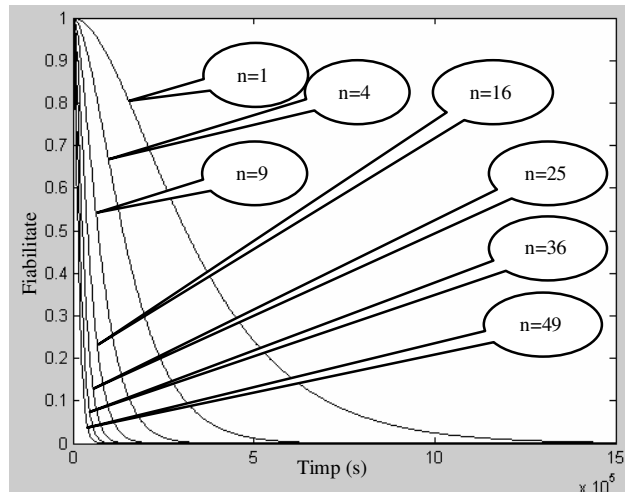


Figura 4.10. Fiabilitatea rețelelor de senzori cu câte o unitate de schimb dedicată

Considerând relațiile (4.11) și respectiv (4.30), rezultă valoarea *timpului mediu de funcționare până la apariția defectului*:

$$\text{MTTF} = \frac{2m^2 + 2n^2 + 6mn + 5m + 5n + 2}{(m + n + 2)(m + n + 1)(m + n)\lambda} \quad (4.31)$$

Pentru a putea evalua influența numărului componentelor active asupra *timpului mediu de funcționare până la apariția defectului* s-au considerat rețelele de senzori din studiul anterior. Rata de defectare a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde. Rezultatul simulării acestui caz, considerând câte o singură rezervă în starea de stand-by pentru fiecare din cele două tipuri de componente este prezentat în Figura 4.11.

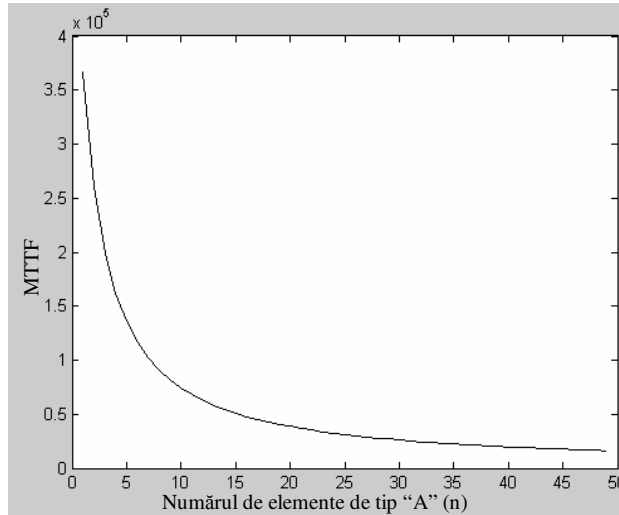


Figura 4.11. Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului pentru o rețea de senzori având câte o unitate de schimb dedicată

Și în acest caz se poate observa că durata medie estimată de funcționare până la apariția defectului este mai mare în cazul rețelei care are mai puține elemente active (respectiv câte un element de tip A și unul de tip B).

4.4.2.2. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte două unități de schimb pentru fiecare tip

Dacă se dublează numărul de unități de rezervă disponibile pentru fiecare tip de componentă a rețelei de senzori, crește numărul total de stări ale sistemului. În acest caz, se disting 10 stări discrete: $\{H_{AB}^4, H_{BA}^3, H_{AB}^3, H_B^2, H_{AB}^2, H_A^2, H_B^1, H^0, H_B^1, F\}$.

În prima stare, notată cu H_{AB}^4 , sistemul este funcțional, având n elemente de tip A, m elemente de tip B și câte două rezerve de fiecare tip.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului enumerate anterior, este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_9(t), P_8(t), P_7(t), P_6(t), P_5(t), P_4(t), P_3(t), P_2(t), P_1(t), P_0(t)] \quad (4.32)$$

În Figura 4.12 este prezentat modelul Markov al rețelei de senzori, cu câte două elemente de schimb de fiecare tip. Se remarcă cele 10 stări discrete enumerate anterior.

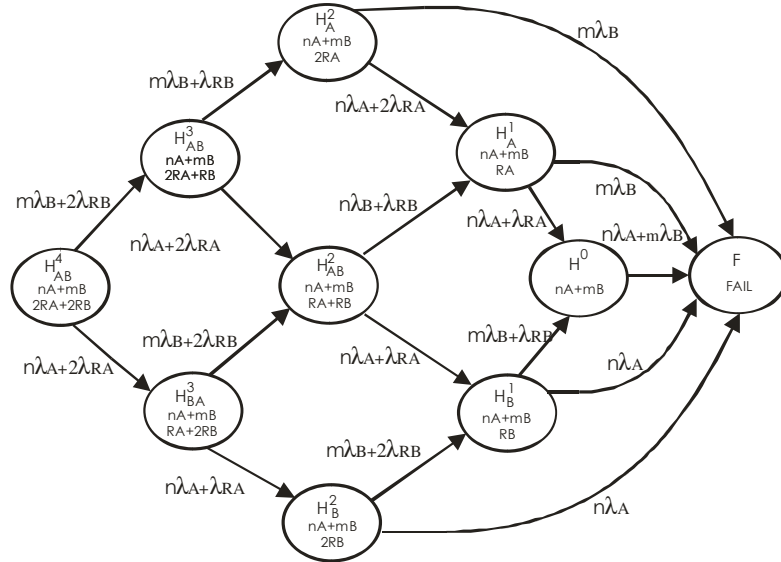


Figura 4.12. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și respectiv câte două unități de schimb pentru fiecare tip

Considerând că toți senzorii rețelei și elementele redundante au aceeași rată de defectare $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_{RA} = \lambda_{RB} = \lambda$, MM asociat modelului Markov prezentat în Figura 4.12 este reprezentat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_9}{dt} = -(m+n+4) \cdot \lambda \cdot P_9 \\ \frac{dP_8}{dt} = -(m+n+3) \cdot \lambda \cdot P_8 + (n+2) \cdot \lambda \cdot P_9 \\ \frac{dP_7}{dt} = -(m+n+3) \cdot \lambda \cdot P_7 + (m+2) \cdot \lambda \cdot P_9 \\ \frac{dP_6}{dt} = -(m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_6 + (n+1) \cdot \lambda \cdot P_8 \\ \frac{dP_5}{dt} = -(m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_5 + (n+2) \cdot \lambda \cdot P_7 + (m+2) \cdot \lambda \cdot P_8 \\ \frac{dP_4}{dt} = -(m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_4 + (m+1) \cdot \lambda \cdot P_7 \\ \frac{dP_3}{dt} = -(m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_3 + (m+2) \cdot \lambda \cdot P_6 + (n+1) \cdot \lambda \cdot P_5 \\ \frac{dP_2}{dt} = -(m+n) \cdot \lambda \cdot P_2 + (n+1) \cdot \lambda \cdot P_1 + (m+1) \cdot \lambda \cdot P_3 \\ \frac{dP_1}{dt} = -(m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_1 + (m+1) \cdot \lambda \cdot P_5 + (n+2) \cdot \lambda \cdot P_4 \\ \frac{dP_0}{dt} = n \cdot \lambda \cdot P_6 + n \cdot \lambda \cdot P_3 + (m+n) \cdot \lambda \cdot P_2 + m \cdot \lambda \cdot P_1 + m \cdot \lambda \cdot P_4 \end{array} \right. \quad (4.33)$$

unde condițiile inițiale sunt:

$$\begin{aligned}
 P_9(0) &= 1, \\
 P_8(0) &= 0, \\
 P_7(0) &= 0, \\
 P_6(0) &= 0, \\
 P_5(0) &= 0, \\
 P_4(0) &= 0, \\
 P_3(0) &= 0, \\
 P_2(0) &= 0, \\
 P_1(0) &= 0, \\
 P_0(0) &= 0
 \end{aligned}$$

Rezolvarea sistemului de ecuații conduce la soluțiile:

$$\left\{ \begin{aligned}
 P_9(t) &= e^{-\lambda(m+n+4)t} \\
 P_8(t) &= 2(n+2)e^{-\frac{1}{2}\lambda(2m+2n+7)t} \sinh\left(\frac{1}{2}t\lambda\right) \\
 P_7(t) &= 2(m+2)e^{-\frac{1}{2}\lambda(2m+2n+7)t} \sinh\left(\frac{1}{2}t\lambda\right) \\
 P_6(t) &= \frac{1}{2}(n+2)(n+1)(-2e^{-\lambda(m+n+3)t} + e^{-\lambda(m+n+2)t} + e^{-\lambda(m+n+4)t} - e^{-\lambda(m+n+4)t}) \\
 P_5(t) &= (m+2)(n+2)(-2e^{-\lambda(m+n+3)t} + e^{-\lambda(m+n+4)t}) \ast \ast \ast \\
 P_4(t) &= \frac{1}{2}(m+2)(m+1)(-2e^{-\lambda(m+n+3)t} + e^{-\lambda(m+n+2)t} + e^{-\lambda(m+n+4)t}) \\
 P_3(t) &= \frac{1}{2}(n+2)(n+1)(m+2)(3e^{-\lambda(m+n+3)t} + e^{-\lambda(m+n+1)t} - e^{-\lambda(m+n+2)t} - e^{-\lambda(m+n+4)t}) \\
 P_2(t) &= \frac{1}{4}(-4e^{-\lambda(m+n+3)t} - 4e^{-\lambda(m+n+1)t} + 6e^{-\lambda(m+n+2)t} + e^{-\lambda(m+n)t} + e^{-\lambda(m+n+4)t})(n+1)(m+2)(m+1)(n+2) \\
 P_1(t) &= \frac{1}{2}(m+1)(m+2)(n+2)(3e^{-\lambda(m+n+3)t} + e^{-\lambda(m+n+1)t} - 3e^{-\lambda(m+n+2)t} - e^{-\lambda(m+n+4)t}) \\
 P_0(t) &= 1 - \frac{1}{2}e^{-\lambda(m+n+2)t} (3m^2n^2 + 6m^2n + m^2 + 6n^2m + n + 1)mn + n + n^2 + \\
 &\quad + \frac{1}{4}(-e^{-\lambda(m+n)t}(n+1)(m+1) + 2(2mn + m + n)e^{-\lambda(m+n+1)t}(n+2)(m+2) + \frac{1}{4}(-(n+1)
 \end{aligned} \right. \quad (4.34)$$

Iar Funcția de fiabilitate rezultă în acest caz:

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 101

$$R(t) = 1 - P_0(t) \quad (4.35)$$

adică:

$$R(t) = \frac{1}{2} e^{-\lambda(m+n+2)t} (3m^2 n^2 + 6m^2 n + m^2 + 6n^2 m + n + 1) mn + n + n^2 + \left(\frac{1}{4} (-e^{-\lambda(m+n)t} (n+1)(m+1) - \frac{1}{2} (2mn + m + n) e^{-\lambda(m+n+1)t}) \right) (n+2)(m+2) + \left(\frac{1}{4} (-e^{-\lambda(m+n+4)t} (n+1)(m+1) - \frac{1}{2} (2mn + 3m + 3n + 4) e^{-\lambda(m+n+3)t}) \right) nm \quad (4.36)$$

Studiu de caz:

S-a efectuat un studiu cu privire variația fiabilității sistemului, în funcție de dimensiunea inițială a rețelei de senzori (numărul de componente active ale rețelei). S-au considerat 7 rețele de senzori diferite, fiecare având un element de tip B, iar n elemente de tip A, unde $n \in \{1, 4, 9, 16, 25, 36, 49\}$. Rata de defectare a tuturor componentelor rețelei a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde.

Fiabilitatea rețelelor considerate este prezentată în Figura 4.13. După cum era de așteptat, se observă că fiabilitatea sistemului în acest caz este mai mare decât a celui prezentat în Figura 4.10. De asemenea, fiabilitatea este mai ridicată în cazul sistemelor cu un număr redus de componente active.

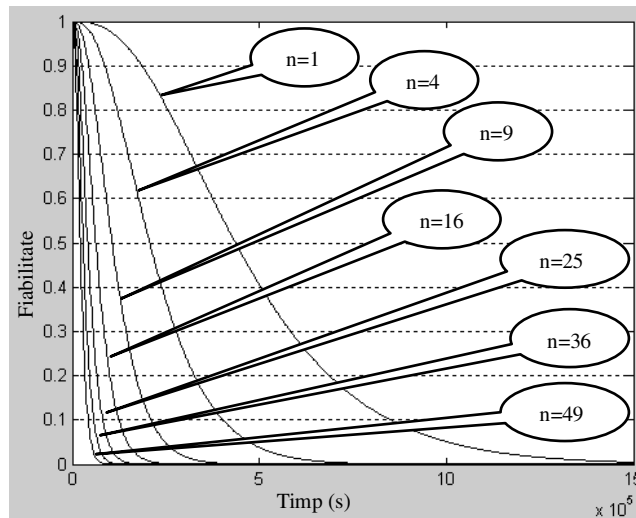


Figura 4.13. Fiabilitatea rețelelor de senzori cu câte două unități de schimb dedicate

Considerând relațiile (4.11) și respectiv (4.36), rezultă valoarea *Timpului mediu de funcționare până la apariția defectului*:

$$MTTF = \frac{3m^4 + 3n^4 + 30m^2n^2 + 15m^3n + 15mn^3 + 27m^3 + 27n^3 + 105m^2n + 105mn^2}{\lambda(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(m+n+1)(m+n)} + \frac{80m^2 + 80n^2 + 190mn + 86m + 86n + 24}{\lambda(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(m+n+1)(m+n)} \quad (4.37)$$

Pentru a putea evalua influența numărului componentelor active din structura rețelei de senzori asupra timpului mediu de funcționare până la apariția defectului, s-a considerat o rețea de senzori alcătuită din două tipuri de elemente, cele de tipul A au variat ca număr între 1 și 49, iar din cele de tipul B a fost aleasă o singură componentă. Rata de defectare a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde. Rezultatul simulării acestui caz, considerând câte două rezerve dedicate de tip stand-by pentru fiecare din cele două tipuri de componente, este prezentat în Figura 4.14.

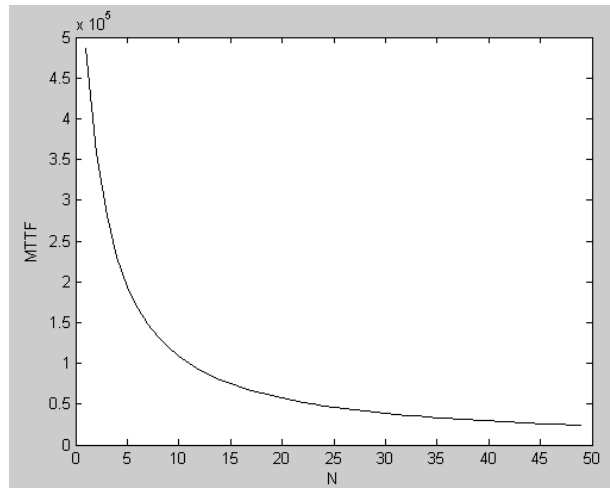


Figura 4.14. Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului (MTTF) pentru o rețea de senzori având câte două unități de schimb dedicate

Chiar dacă profilul funcției de fiabilitate este ușor diferit în acest caz, față de cazul utilizării a unei singure rezerve de un tip, variația MTTF are aceeași alură, cu singura diferență constând în faptul că valorile numerice sunt mai ridicate.

4.4.2.3. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și câte k unități de schimb pentru fiecare tip

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 103

Extrapolând problema prin considerarea unui număr de k unități de rezervă pentru fiecare tip de componente, rezultă un număr crescut de stări discrete posibile, modelul Markov corespunzător fiind prezentat în Figura 4.15.

După cum se poate observa din Figura 4.15, modelul Markov corespunzător cazului utilizării a k rezerve dedicate, pentru fiecare tip de senzori, este bazat pe modelul corespunzător cazului în care se utilizează $(k-1)$ rezerve pentru fiecare tip, căruia i se adaugă un număr de $(2k+1)$ stări suplimentare după cum urmează:

- 1 stare caracterizată de disponibilitatea a k rezerve de fiecare tip,
- k stări, caracterizate de disponibilitatea a k rezerve de tipul B și a i rezerve de tipul A, unde $i=0...(k-1)$,
- k stări, caracterizate de disponibilitatea a k rezerve de tipul A și a j rezerve de tipul B, unde $j=0...(k-1)$.

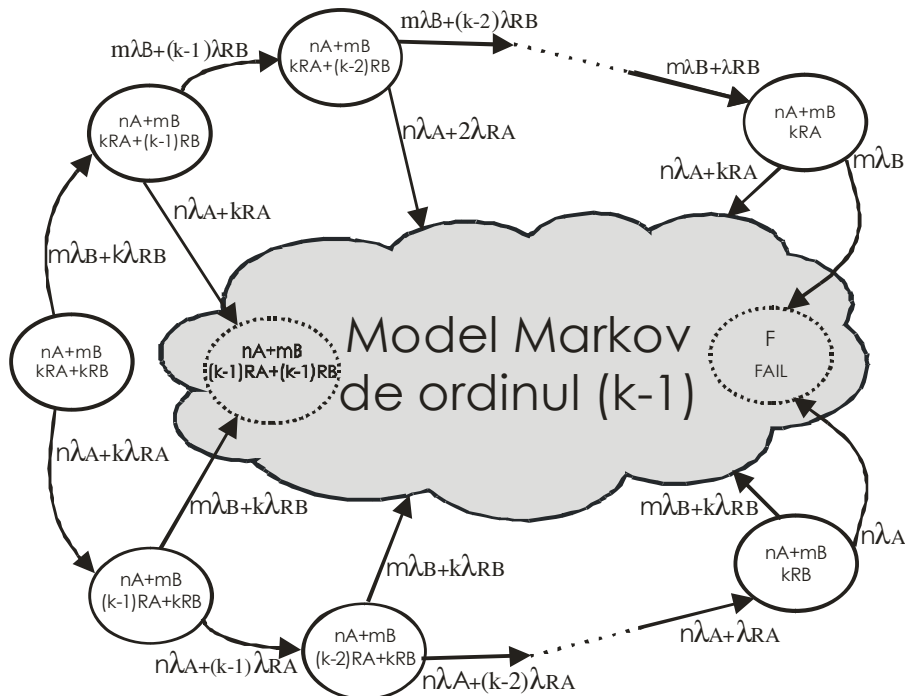


Figura 4.15. Modelul Markov pentru o rețea constituită din două tipuri de senzori și k unități de schimb dedicate pentru fiecare tip.

Bazat pe afirmațiile anterioare, modelul generalizat pentru o rețea de senzori având k rezerve poate fi construit în mod iterativ.

4.4.3. Modele Markov pentru rețele de senzori cu unități de schimb universale

4.4.3.1. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și două unități de schimb universale

În cadrul acestui paragraf se studiază cazul utilizării de elemente de schimb (rezerve) universale, care pot înlocui în caz de defectare orice element al rețelei de senzori. Aceste elemente de schimb sunt elemente redundante, de tip „hot swap” care pot înlocui fără întârziere elementele defectate, preluând integral și instantaneu toate funcționalitățile acestora. După ce un astfel de element a preluat locul elementului defect, acesta va avea aceeași rată de defectare ca și elementul substituit.

Un prim caz studiat este cel al unei rețele alcătuite din două tipuri de senzori diferiți, notați în continuare cu A și respectiv B și două elemente de rezervă universale. Elementele de rezervă sunt dedicate și notate cu R.

Rețeaua se consideră a fi defectă (nefuncțională) în cazul în care s-a defectat un senzor de un anumit tip și nu mai există rezerve care să îi preia atribuțiile. Această stare este notată cu F.

În acest caz, se disting 4 stări discrete: $\{H_{AB}^2, H_{AB}^1, H^0, F\}$.

În prima stare, notată cu H_{AB}^2 , sistemul este funcțional, având n elemente de tip A, m elemente de tip B și câte două rezerve universale. La apariția unui defect, indiferent care dintre elemente s-a deteriorat, una dintre rezerve îi preia atribuțiile și sistemul trece în starea H_{AB}^1 , în continuare rămânând o singură rezervă disponibilă, s.a.m.d.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului enumerate anterior, este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_3(t), P_2(t), P_1(t), P_0(t)] \tag{4.38}$$

Modelul Markov al rețelei de senzori având două unități de schimb universale este prezentat în Figura 4.16.

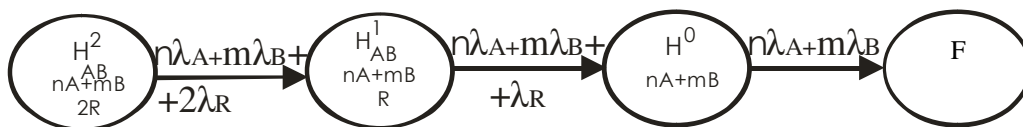


Figura 4.16. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și două unități de schimb universale

Considerând că toți senzorii au aceeași rată de defectare $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_R = \lambda$, MM asociat modelului Markov prezentat în Figura 4.16 este reprezentat de sistemul de ecuații diferențiale:

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 105

$$\begin{cases} \frac{dP_3}{dt} = -(m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_3 \\ \frac{dP_2}{dt} = -(m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_2 + (m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_3 \\ \frac{dP_1}{dt} = -(m+n) \cdot \lambda \cdot P_1 + (m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_2 \\ \frac{dP_0}{dt} = (m+n) \cdot \lambda \cdot P_1 \end{cases} \quad (4.39)$$

unde condițiile inițiale sunt:

$$P_3(0) = 1, P_2(0) = 0, P_1(0) = 0, P_0(0) = 0 \quad (4.40)$$

Rezolvarea sistemului (4.39) conduce la soluțiile:

$$\begin{cases} P_3(t) = e^{-\lambda(m+n+2)t} \\ P_2(t) = 2(m+n+2)e^{-\frac{1}{2}\lambda(2m+3+2n)t} \sinh\left(\frac{1}{2}t\lambda\right) \\ P_1(t) = \frac{1}{2}(e^{-\lambda(m+n+2)t} + e^{-\lambda(m+n)t} - 2e^{-\lambda(m+n+1)t})(m+n+1)(m+n+2) \\ P_0(t) = 1 + e^{-\lambda(m+n+1)t} (m+n)(m+n+2) - \frac{1}{2}(m+n+1)((m+n)e^{-\lambda(m+n+2)t} + (m+n+2)e^{-\lambda(m+n)t}) \end{cases} \quad (4.41)$$

iar funcția de fiabilitate rezultă și acest caz:

$$R(t) = 1 - P_0(t) \quad (4.42)$$

adică:

$$R(t) = \frac{1}{2}(m+n+1)((m+n)e^{-\lambda(m+n+2)t} + (m+n+2)e^{-\lambda(m+n)t}) - e^{-\lambda(m+n+1)t} (m+n)(m+n+2) \quad (4.43)$$

Studiu de caz:

Pentru a studia influența numărului de componente active ale rețelei, asupra fiabilității sistemului s-au considerat 7 rețele de senzori diferite, fiecare având un singur element de tip B, și respectiv n elemente de tip A, unde $n \in \{1,4,9,16,25,36,49\}$. Fiabilitatea rețelelor considerate este prezentată în Figura 4.17.

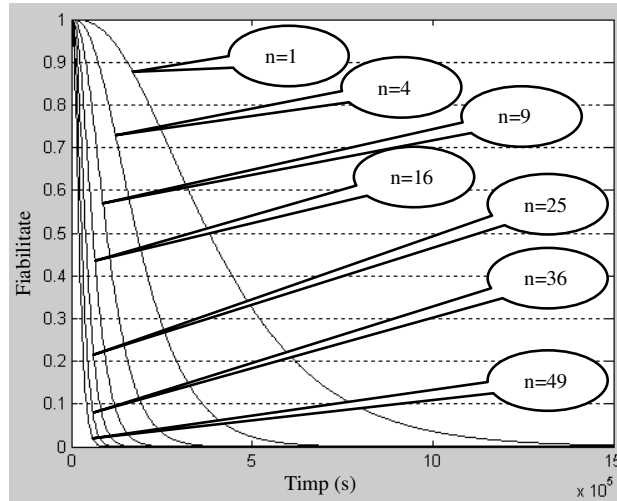


Figura 4.17. Fiabilitatea rețelelor de senzori cu două tipuri de senzori și două unități de schimb universale

Rata de defectare a tuturor componentelor rețelei a fost aleasă a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde. Se observă că fiabilitatea sistemului este mai ridicată în cazul sistemelor cu un număr redus de componente active.

Considerând relațiile (4.11) și respectiv (4.43), rezultă valoarea timpului mediu de funcționare până la apariția defectului:

$$MTTF = \frac{2 + 3n^2 + 6mn + 3m^2 + 6m + 6n}{(m + n + 2)(m + n + 1)(m + n)\lambda} \quad (4.44)$$

Pentru a putea evalua influența numărului componentelor active din structura rețelei de senzori asupra timpului mediu de funcționare până la apariția defectului s-a considerat o rețea de senzori alcătuită din două tipuri de elemente, cele de tipul A au variat ca număr între 1 și 49, iar din cele de tipul B a fost aleasă o singură componentă. Rata de defectare a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde.

Rezultatul simulării acestui caz, considerând câte două rezerve universale de tip stand-by este prezentat în Figura 4.18.

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 107

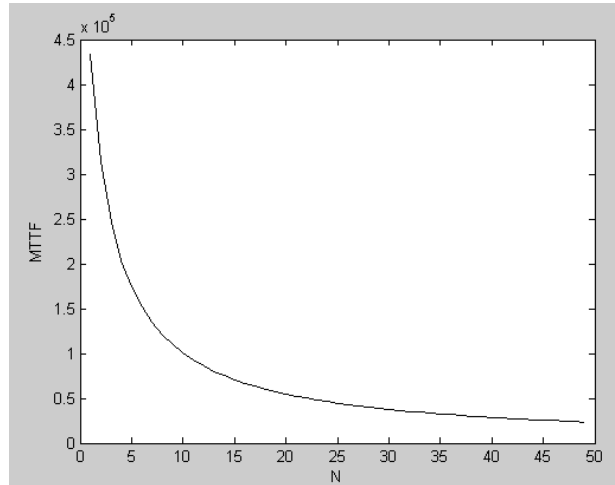


Figura 4.18. Timpul mediu între două defectări (MTTF) pentru o rețea de senzori având două unități de schimb universale

Și în acest caz se poate observa că durata medie estimată de funcționare normală este mai mare în cazul rețelei care are mai puține elemente active (respectiv câte un element de tip A și unul de tip B).

4.4.3.2. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și patru unități de schimb universale

Dacă se dublează numărul de unități de schimb universale disponibile pentru înlocuirea oricărui tip de componentă a rețelei de senzori, crește numărul total de stări ale sistemului.

În acest caz, se disting 6 stări discrete: $\{H_{AB}^4, H_{AB}^3, H_{AB}^2, H_{AB}^1, H^0, F\}$.

În prima stare, notată cu H_{AB}^4 , sistemul este funcțional, având n elemente de tip A, m elemente de tip B și respectiv 4 unități de rezervă universale.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului enumerate anterior, este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_5(t), P_4(t), P_3(t), P_2(t), P_1(t), P_0(t)] \quad (4.45)$$

Modelul Markov corespunzător acestui caz este prezentat în Figura 4.19.

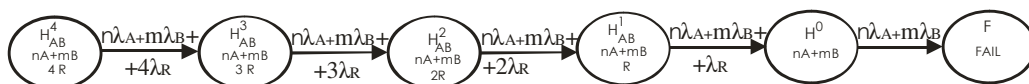


Figura 4.19. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și patru unități de schimb universale

Considerând că toți senzorii au aceeași rată de defectare $\lambda_A = \lambda_B = \lambda_R = \lambda$, MM asociat modelului Markov prezentat în Figura 4.19 este dat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{cases} \frac{dP_5}{dt} = -(m+n+4) \cdot \lambda \cdot P_5 \\ \frac{dP_4}{dt} = -(m+n+3) \cdot \lambda \cdot P_4 + (m+n+4) \cdot \lambda \cdot P_5 \\ \frac{dP_3}{dt} = -(m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_3 + (m+n+3) \cdot \lambda \cdot P_4 \\ \frac{dP_2}{dt} = -(m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_2 + (m+n+2) \cdot \lambda \cdot P_3 \\ \frac{dP_1}{dt} = -(m+n) \cdot \lambda \cdot P_1 + (m+n+1) \cdot \lambda \cdot P_2 \\ \frac{dP_0}{dt} = (m+n) \cdot \lambda \cdot P_1 \end{cases} \quad (4.46)$$

unde condițiile inițiale sunt:

$$P_5(0) = 1, P_4(0) = 0, P_3(0) = 0, P_2(0) = 0, P_1(0) = 0, P_0(0) = 0 \quad (4.47)$$

Rezolvând sistemul (4.46) se obțin soluțiile:

$$\begin{cases} P_5(t) = e^{-(m+n+4)\lambda t} \\ P_4(t) = 2(m+n+4)e^{-\frac{1}{2}\lambda(2m+2n+7)t} \sinh\left(\frac{1}{2}t\lambda\right) \\ P_3(t) = \frac{1}{2}(e^{-(m+n+4)\lambda t} - 2e^{-(m+n+3)\lambda t} + e^{-(m+n+2)\lambda t})(m+n+3)(m+n+4) \\ P_2(t) = \frac{1}{6}(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(-3e^{-(m+n+2)\lambda t} + \\ + 3e^{-(m+n+3)\lambda t} + e^{-(m+n+1)\lambda t} - e^{-(m+n+4)\lambda t}) \\ P_1(t) = \frac{1}{24}(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(m+n+1) \\ (e^{-(m+n+4)\lambda t} - 4e^{-(m+n+3)\lambda t} + 6e^{-(m+n+2)\lambda t} - \\ - 4e^{-(m+n+1)\lambda t} + e^{-(m+n)\lambda t}) \\ P_0(t) = 1 - \frac{1}{4}e^{-(m+n+2)\lambda t}(m+n)(m+n+4)(m+n+3)(m+n+1) + \\ + \frac{1}{24}(4(m+n+1)(m+n)(m+n+4)e^{-(m+n+3)\lambda t} + \\ (- (m+n+1)(m+n)e^{-(m+n+4)\lambda t} + (- (m+n+1)e^{-(m+n)\lambda t} + 4(m+n)e^{-(m+n+1)\lambda t}) \\ (m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)) \end{cases} \quad (4.48)$$

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 109

Funcția de fiabilitate rezultată:

$$R(t) = 1 - P_0(t) \quad (4.49)$$

adică:

$$R(t) = \frac{1}{4} e^{-\lambda(m+n+2)t} (m+n)(m+n+4)(m+n+3)(m+n+1) -$$

$$- \frac{1}{6} (m+n+1)(m+n)(m+n+4) e^{-\lambda(m+n+3)t} + \frac{1}{24} (-m+m+1)(m+n) e^{-\lambda(m+n+4)t} + \quad (4.50)$$

$$(-m+n+1) e^{-\lambda(m+n)t} + 4(m+n) e^{-\lambda(m+n+1)t} (m+m+4)(m+m+3)(m+m+2)$$

Studiu de caz:

S-a efectuat un studiu cu privire la variația fiabilității sistemului, în funcție de dimensiunea inițială a rețelei de senzori (numărul de componente active ale rețelei).

S-au considerat 7 rețele de senzori diferite, fiecare având un singur element de tip B, și respectiv n elemente de tip A, unde $n \in \{1, 4, 9, 16, 25, 36, 49\}$. Rata de defectare a tuturor componentelor rețelei a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde.

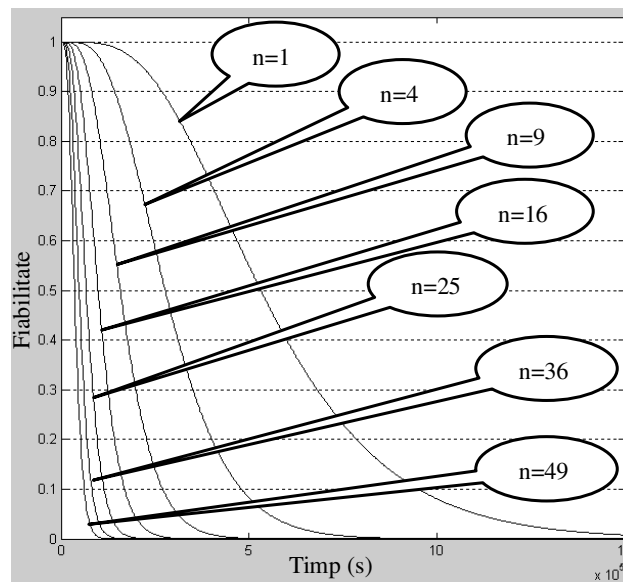


Figura 4.20. Fiabilitatea rețelelor de senzori cu 4 unități de schimb universale

Fiabilitatea rețelelor considerate este prezentată în Figura 4.20. După cum era de așteptat, se observă că fiabilitatea sistemului în acest caz este mai mare decât în cazul utilizării a două rezerve universale (prezentat în Figura 4.17). De asemenea, fiabilitatea este mai ridicată în cazul sistemelor cu un număr redus de componente active.

Considerând relațiile (4.11) și respectiv (4.50), rezultă valoarea timpului mediu de funcționare până la apariția defectului:

$$MTTF = \frac{30m^2n^2 + 120m^2n + 120mn^2 + 40m^3 + 40n^3 + 105m^2 + 105n^2 + 5n^4}{\lambda(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(m+n+1)(m+n)} + \frac{5m^4 + 210mn + 24 + 20m^3n + 100m + 100n + 20mn^3}{\lambda(m+n+4)(m+n+3)(m+n+2)(m+n+1)(m+n)} \quad (4.51)$$

Pentru a putea evalua influența numărului componentelor active din structura rețelei de senzori asupra timpului mediu de funcționare până la apariția defectului (MTTF), s-a considerat o rețea de senzori alcătuită din 2 tipuri de elemente, cele de tipul A au variat ca număr între 1 și 49, iar din cele de tipul B a fost ales o singură componentă. Rata de defectare a fost considerată a fi de 25 defecte la fiecare 10^7 secunde. Rezultatul simulării acestui caz, considerând patru unități de rezervă universale de tip stand-by este prezentat în Figura 4.21.

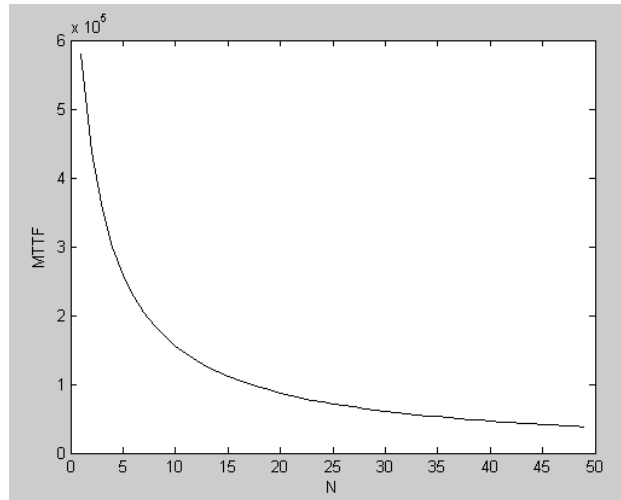


Figura 4.21. Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului (MTTF) pentru o rețea de senzori având două unități de schimb universale

Chiar dacă profilul funcției de fiabilitate este ușor diferit în acest caz, față de cazul utilizării a două unități de rezervă universale, variația MTTF are aceeași alură, singura diferență constând în faptul că valorile numerice sunt mai ridicate.

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 111

4.4.3.3. Modelul Markov pentru o rețea cu 2 tipuri de senzori și k unități de schimb universale

Generalizand procedura de modelare prin considerarea unui număr de k unități de rezervă universale de tip stand-by, care pot prelua atribuțiile oricărei componente active a rețelei, rezultă un număr de $k+2$ stări discrete posibile, notate $\{H_{AB}^k, H_{AB}^{k-1}, \dots, H_{AB}^2, H_{AB}^1, H^0, F\}$, iar modelul Markov corespunzător este prezentat în Figura 4.22.

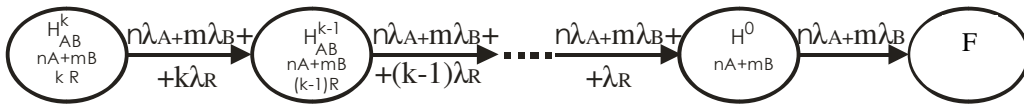


Figura 4.22. Modelul Markov pentru o rețea constituită din două tipuri de senzori diferiți și k rezerve universale.

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului enumerate anterior, este data de vectorul:

$$P(t) = [P_{k+1}(t), P_k(t), P_{k-1}(t), \dots, P_2(t), P_1(t), P_0(t)] \quad (4.52)$$

MM asociat lanțului Markov prezentat în Figura 4.22, este dat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\begin{pmatrix} \frac{dP_{k+1}}{dt} \\ \frac{dP_k}{dt} \\ \frac{dP_{k-1}}{dt} \\ \vdots \\ \frac{dP_1}{dt} \\ \frac{dP_0}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -(n+m+k)\lambda & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ (n+m+k)\lambda & -(n+m+k-1)\lambda & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (n+m+k-1)\lambda & -(n+m+k-2)\lambda & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & (n+m+1)\lambda & -(n+m)\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & (n+m)\lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{k+1} \\ P_k \\ P_{k-1} \\ \vdots \\ P_k \\ P_{k+1} \end{pmatrix} \quad (4.53)$$

Notând $l = n + m + k$ sistemul de ecuații se poate rescrie sub forma:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_k \\ P_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l\lambda & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ l\lambda & -(l-1)\lambda & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (l-1)\lambda & -(l-2)\lambda & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & (l-k+1)\lambda & -(l-k)\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & (l-k)\lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_k \\ P_{k+1} \end{pmatrix} \quad (4.54)$$

unde condițiile inițiale sunt:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = \dots = P_k(0) = P_{k+1}(0) = 0.$$

Aplicând sistemului de ecuații (4.54) transformata Laplace se obțin ecuațiile:

$$\begin{aligned} sP_0(s) - 1 = -l\lambda &\Rightarrow P_0(s) = \frac{1}{s + l\lambda} \\ sP_1(s) - 0 = l\lambda P_0(s) - (l-1)\lambda P_1(s) &\Rightarrow P_1(s) = \frac{l\lambda P_0(s)}{s + (l-1)\lambda} = \frac{l\lambda}{(s + (l-1)\lambda)(s + l\lambda)} \\ \vdots & \\ sP_k(s) - 0 = (l-k+1)\lambda P_{k-1}(s) - (l-k)\lambda P_k(s) &\Rightarrow \\ P_k(s) = \frac{(l-k+1)\lambda P_{k-1}(s)}{s + (l-k)\lambda} = \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)\lambda^k}{(s + l\lambda)(s + (l-1)\lambda)\dots(s + (l-k)\lambda)} &\quad (4.55) \\ sP_{k+1}(s) - 0 = (l-k)\lambda P_k(s) &\Rightarrow \\ P_{k+1}(s) = \frac{(l-k)\lambda P_k(s)}{s} = \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^{k+1}}{s(s + l\lambda)(s + (l-1)\lambda)\dots(s + (l-k)\lambda)} \end{aligned}$$

Pentru a putea calcula expresia fiabilității rețelei, interesează doar probabilitatea ca sistemul să se defecteze, adică :

$$R(t) = 1 - P_{k+1}(t) \quad (4.56)$$

Știind că probabilitatea asociată stării H, rezultată în urma aplicării calculului operational este:

$$P_{k+1}(s) = \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^{k+1}}{s(s + l\lambda)(s + (l-1)\lambda)\dots(s + (l-k)\lambda)} \quad (4.57)$$

probabilitatea în domeniul timp se poate calcula cu ajutorul metodei reziduurilor:

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 113

$$P_{k+1}(t) = \sum_{k=1}^{n_{res}} \text{Res}\{P_{k+1}(s)e^{st}, a_k\} \quad (4.58)$$

unde $a_k \Big|_{k=1, n_{res}}$ reprezintă polii ecuației (4.57).

În cazul unui pol simplu a_k , valoarea rezidului corespunzător se poate calcula cu ajutorul relației: [111]

$$\text{Res}\{P_{k+1}(s)e^{st}, a_k\} = \lim_{s \rightarrow a_k} (s - a_k) P_{k+1}(s) e^{st} \quad (4.59)$$

utilizând relațiile (4.58) și (4.59) rezultă:

$$P_{k+1}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} (s - 0) P_{k+1}(s) e^{st} + \sum_i \lim_{s \rightarrow s_i} (s - s_i) P_{k+1}(s) e^{st} \quad (4.60)$$

unde $s_i = -(l - i)\lambda$, $i = 0 \dots k$, deci rezultă expresia probabilității în domeniul timp devine:

$$P_{k+1}(t) = 1 + \sum_{i=0}^k (-1)^{i+1} \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-i+1)(l-i-1)\dots(l-k)}{(1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot i) \cdot (1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k - i)} e^{-(l-i)\lambda t} \quad (4.61)$$

Din relațiile (4.56) și (4.61) rezultă $R(t)$:

$$R(t) = \sum_{i=0}^k (-1)^i \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-i+1)(l-i-1)\dots(l-k)}{(1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot i) \cdot (1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k - i)} e^{-(l-i)\lambda t} \quad (4.62)$$

Pentru a calcula expresia timpului mediu de funcționare până la apariția defectului, se pleacă de la relația (4.13) și ținându-se cont de relația (4.56) rezultă că:

$$MTTF = \left(\frac{1}{s} - P_{k+1}(s) \right) \Big|_{s=0} \quad (4.63)$$

Considerând ca fiind adevărata aserțiunea matematică: că pentru o funcție continuă și definită într-un punct oarecare din domeniul de valori, limita funcției în respectivul punct este egală cu valoarea funcției în acel punct și ținând cont de relația (4.63) rezultă: [112]

$$MTTF = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{1}{s} - \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^{k+1}}{s(s+l\lambda)(s+(l-1)\lambda)\dots(s+(l-k)\lambda)} \right) \quad (4.64)$$

Adică:

$$MTTF = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(s+l\lambda)(s+(l-1)\lambda)\dots(s+(l-k)\lambda) - l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^{k+1}}{s(s+l\lambda)(s+(l-1)\lambda)\dots(s+(l-k)\lambda)} \quad (4.65)$$

Întrucât numitorul din expresia MTTF din relația (4.65) tinde la 0, valoarea limitei se va calcula considerând teorema lui L'Hospital. Aceasta consideră funcțiile reale $f, g: [a, b] \rightarrow \mathbf{R}$ și un punct $x_0 \in [a, b]$ și garantează existența limitei $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)}$, dacă sunt satisfăcute următoarele condiții: [113]

- f și g sunt derivabile pe $[a, b] \setminus \{x_0\}$ și continue în x_0 ;
- $f(x_0) = 0, g(x_0) = 0$;
- $g'(x)$ nu se anulează într-o vecinătate V a lui x_0 ;
- există limita $\lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f'(x)}{g'(x)} = \lambda$ în $\bar{\mathbf{R}}$.

$$\text{În aceste condiții } \lim_{x \rightarrow x_0} \frac{f(x)}{g(x)} = \lambda$$

Astfel, considerând relația (4.65) se obține:

$$MTTF = \frac{(l-1)\dots(l-k)\lambda^k + l(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^k + l(l-1)\dots(l-k+1)\lambda^k}{l(l-1)\dots(l-k)\lambda^{k+1}} \quad (4.66)$$

adică

$$MTTF = \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{l-1} + \dots + \frac{1}{l-k} \right) \frac{1}{\lambda} \quad (4.67)$$

și ținând cont de expresia lui l , se deduce că *timpul mediu de funcționare până la apariția defectului* este în acest caz:

$$MTTF = \left(\frac{1}{n+m+k} + \frac{1}{n+m+k-1} + \dots + \frac{1}{n+m} \right) \frac{1}{\lambda} \quad (4.68)$$

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 115

4.4.3.4. Modelul Markov pentru o rețea cu N tipuri de senzori și k unități de schimb universale

Se consideră un caz mai general, în care rețeaua de senzori este alcătuită din senzori de N tipuri diferite, știind că există n_i elemente active de tipul T_i .

Modelul Markov asociat acestei rețele, pentru cazul utilizării unui număr de k unități de schimb universale, de tip stand by, este prezentat în Figura 4.23.

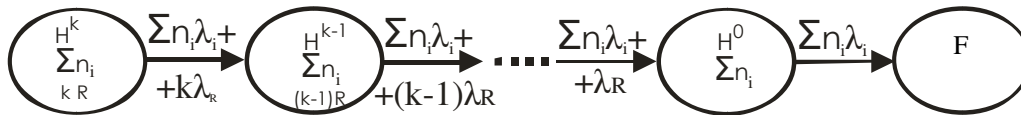


Figura 4.23. Modelul Markov pentru o rețea constituită din N tipuri de senzori diferiți și k unități de schimb universale.

Se observă că în acest caz se pot distinge $(k+2)$ stări discrete posibile, care se exclud reciproc, notate cu $\{H_k, H_{k-1}, \dots, H_1, H_0, F\}$. Pentru simplificare, s-a considerat că atât elementele active cât și cele redundante, aflate în așteptare, au aceeași rată de defectare, notată cu λ ($\lambda_i = \lambda_R = \lambda$, pentru $i = 1 \dots N$).

Distribuția de probabilitate pentru stările sistemului, este dată de vectorul:

$$P(t) = [P_0(t), P_1(t), P_2(t), \dots, P_k(t), P_{k+1}(t)] \quad (4.69)$$

Modelul matematic asociat modelului Markov prezentat în Figura 4.23 este dat de sistemul de ecuații diferențiale:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_k \\ P_{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -l\lambda & 0 & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ l\lambda & -(l-1)\lambda & 0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (l-1)\lambda & -(l-2)\lambda & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & (l-k+1)\lambda & -(l-k)\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 0 & (l-k)\lambda & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ \vdots \\ P_k \\ P_{k+1} \end{pmatrix} \quad (4.70)$$

unde $l = \sum_{i=1}^N n_i + k$.

Iar condițiile inițiale sunt:

$$P_0(0) = 1, P_1(0) = \dots = P_k(0) = P_{k+1}(0) = 0.$$

Rezolvarea sistemului de ecuații conduce la soluțiile:

$$P_0(s) = \frac{1}{s + l\lambda}$$

$$P_1(s) = \frac{l\lambda P_0(s)}{s + (l-1)\lambda}$$

$$\vdots$$
(4.71)

$$P_k(s) = \frac{(l-k+1)\lambda P_{k-1}(s)}{s + (l-k)\lambda}$$

$$P_{k+1}(s) = \frac{(l-k)\lambda P_k(s)}{s}$$

În consecință expresia probabilității asociate stării H este:

$$P_{k+1}(s) = \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-k+1)(l-k)\lambda^{k+1}}{s(s+l\lambda)(s+(l-1)\lambda)\dots(s+(l-k)\lambda)}$$
(4.72)

Aplicând metoda reziduurilor pentru calculul inversei transformatei Laplace rezultă:

$$P_{k+1}(t) = 1 + \sum_{i=0}^k (-1)^{i+1} \frac{l(l-1)(l-2)\dots(l-i+1)(l-i-1)\dots(l-k)}{(1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot i) \cdot (1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot k-i)} e^{-(l-i)\lambda t}$$
(4.73)

iar funcția de fiabilitate poate fi calculată cu:

$$R(t) = 1 - P_{k+1}(t)$$
(4.74)

rezultă funcția de fiabilitate pentru acest caz:

$$R(t) = \sum_{i=0}^k (-1)^{k-i} \frac{\prod_{j=0}^k (l-j)}{(l-i) \cdot (k-i)! \cdot i!} e^{-(l-i)\lambda t}$$
(4.75)

ținând cont de relațiile (4.13) și (4.75), rezultă expresia timpului mediu de funcționare până la apariția defectului:

$$\text{MTTF} = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=0}^k \frac{1}{\sum_{j=0}^N n_j + i}$$
(4.76)

Studiu de caz:

Pentru a studia influența numărului de componente de rezervă asupra fiabilității rețelei, s-a considerat o rețea alcătuită din 90 de senzori de 10 tipuri diferite. Numărul de rezerve redundante de tip stand-by a fost variat între 0 și 8, iar

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 117

rata de defectare a tuturor componentelor a fost considerată a fi de 5 defecte la fiecare 10^6 secunde.

Rezultatul este prezentat în Figura 4.24, și se observă că, în mod natural, fiabilitatea sistemului crește odată cu numărul de unități de schimb disponibile.

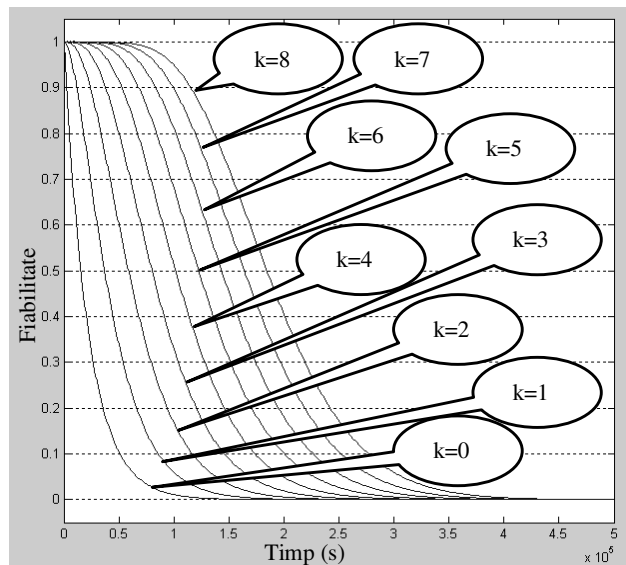


Figura 4.24. Fiabilitatea rețelei având k unități de schimb universale

Aceași structură de rețea de senzori a fost utilizată pentru a investiga influența numărului de rezerve universale asupra duratei medii de funcționare de până la apariția unui defect, iar rezultatul este prezentat în Figura 4.25. Numărul de rezerve a variat, în acest caz, de la 0 la 100.

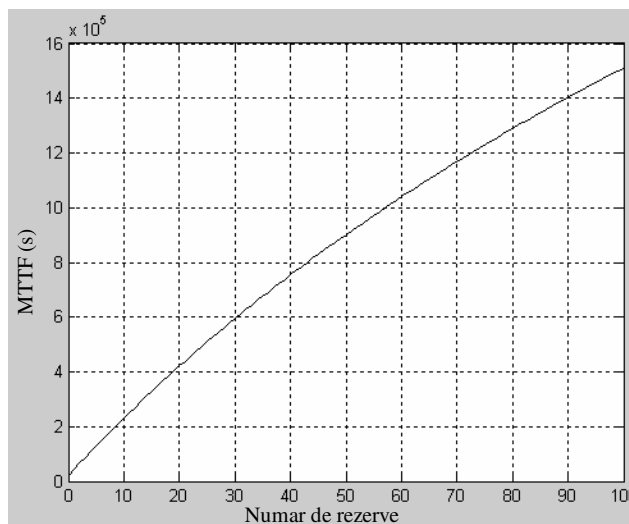


Figura 4.25. Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului pentru o rețea de senzori cu k unități de schimb universale

Pentru a putea analiza și eficiența din punctul de vedere al prețului de cost total al rețelei de senzori, se pot defini următorii indicatori:

- **Raportul de eficiență** se definește ca fiind Raportul dintre timpul mediu de funcționare până la apariția defectului și prețul de cost al rețelei în ansamblu,
- **Coeficientul de câștig relativ** se definește ca fiind Raportul de eficiență curent împărțit la Raportul de eficiență corespunzător unei rețele de senzori fără unități de schimb.

Considerând că toate elementele rețelei au același preț unitar (egal cu 1 u.c.), s-au calculat indicatorii amintiți pentru 5 cazuri: fără rezerve și respectiv cu 1,2,4,10 unități de schimb universale, valorile lor fiind prezentate în Tabelul 4.1.

Tabel 4.1. MTTF și indicatorii de cost

Indicator Nr.unitati de schimb	MTTF [10 ⁵ s]	Cost	Raport de eficiență	Coeficient de castig relativ
Fara unitati de schimb	0.222	100 u.c.	0.002	1
1	0.4420	101 u.c.	0.00437623	2.18811881
2	0.6594	102 u.c.	0.00646470	3.23235294
4	1.0872	104 u.c.	0.01045384	5.22692307
10	2.3184	110 u.c.	0.02107636	10.5381818

4.4.4. Analiza comparativă a fiabilității unor rețele de senzori cu toleranța la defecte, asigurată cu unități de schimb dedicate/universale

Pentru a se putea compara comportamentul unei rețele de senzori, din punctul de vedere al fiabilității, în cazul utilizării a diferite tipuri de unități de schimb, atât dedicate cât și universale, s-a considerat o rețea de senzori alcătuită din doua tipuri de senzori, notate cu A și respectiv B. S-au considerat următoarele 5 cazuri în care:

- nu se utilizează nici o unitate de rezervă.
- se utilizează câte o singură unitate de rezervă de fiecare tip (caz notat cu 1RA1RB în Figura 4.26).
- se utilizează două unități de rezervă universale (caz notat cu 2R în figură).
- se utilizează câte două unități de rezervă de fiecare tip (caz notat cu 2RA2RB în figură).
- se utilizează patru unități de rezervă universale (caz notat cu 4R în figură).

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 119

În Figura 4.26 se prezintă variația fiabilității unei rețele de senzori formată dintr-un sensor de tip A și 9 de tipul B, utilizând diferite unități de schimb, atât dedicate cât și universale.

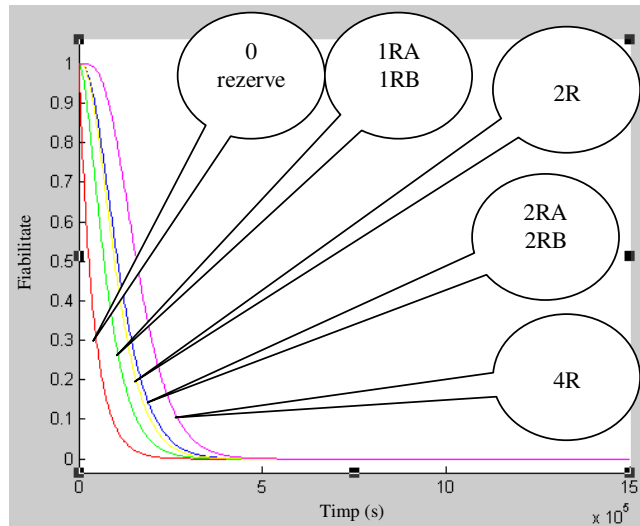


Figura 4.26. Fiabilitatea unei rețele de senzori cu diferite tipuri de unități de schimb

În mod natural fiabilitatea sistemului este îmbunătățită la adăugarea de unități de schimb suplimentare, indiferent de tipul acestora (dedicate sau universale).

Pentru a putea distinge mai bine diferențele înregistrate în cele 5 cazuri, în Figura 4.27 se prezintă evoluția fiabilității celor 5 rețele considerate în primele 4×10^5 secunde de funcționare. Se poate observa că în cazul utilizării unităților de schimb universale, fiabilitatea sistemului este superioară cazului utilizării aceluiași număr de unități de schimb, dar dedicate, chiar dacă toate componentele au o aceeași rată de defectare.

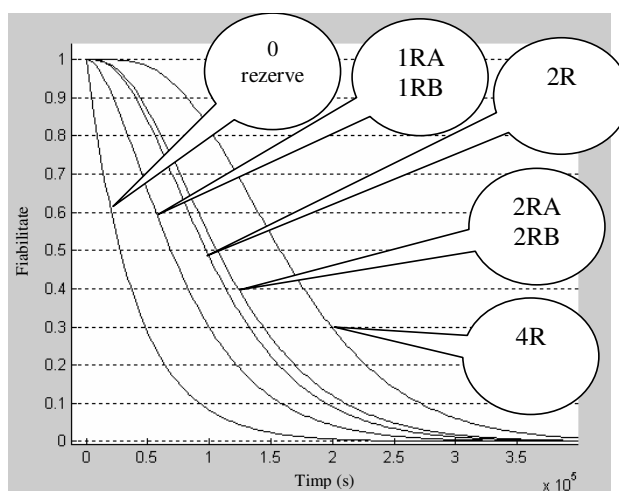


Figura 4.27. Fiabilitatea unei rețele de senzori cu diferite tipuri de unități de schimb

Aceeași concluzie se obține și analizând timpii medii de funcționare până la apariția unui defect, timpii prezentați în Tabelul 4.2. Valorile au fost determinate considerând că toate componentele rețelei se află la maturitate funcțională (au rata de defectare constantă).

Tabel 4.2 MTTF și indicatori de cost

Indicator Nr. unitati de schimb	MTTF [10 ⁵ s]	Cost	Raport de eficiență	Coeficient de castig relativ
Fara unitati de schimb	0.4	10 u.c.	0.04	1
1RA+1RB	0.8182	12 u.c.	0.068183333	1.704583333
2RA+2RB	1.1905	14 u.c.	0.085035714	2.125892857
2R	1.0970	12 u.c.	0.091416667	2.285416667
4R	1.6904	14 u.c.	0.120742857	3.018571429

Pentru a putea analiza și eficiența din punctul de vedere al prețului de cost total al rețelei, se utilizează indicatorii definiți anterior: Raportul de eficiență și respectiv Coeficientul de câștig relativ.

Considerând că toate elementele rețelei au același preț unitar (egal cu 1 u.c.), s-au calculat indicatorii amintiți pentru 5 cazuri: fără rezerve, cu câte o rezerva dedicata de fiecare tip, cu câte 2 rezerve dedicate de fiecare tip și in ultimul rând cu 2, respectiv 4 unități de schimb universale. Aceștia sunt prezentați în Tabelul 4.2.

Pentru a studia influența unităților de schimb redundante asupra fiabilității globale, în cazul unor rețele de senzori de diferite mărimi, s-au considerat 49 de rețele diferite de senzori, alcătuite din două tipuri de senzori, (unul de tip A și N de tipul B, unde N=1,2,3,...,49).

În acest caz, variația timpului mediu de funcționare până la apariția defectului, pentru o rețea de senzori de dimensiune variind între 2 și 50 noduri, este prezentată în Figura 4.28, având redundanța asigurată cu diferite tipuri de unități de schimb după cum urmează:

- nu se utilizează nici o unitate de rezervă.
- se utilizează câte o singură unitate de rezervă de fiecare tip (caz notat cu 1RA1RB în figură).
- se utilizează doua unități de rezerva universale (caz notat cu 2R în figură).
- se utilizează câte două unități de rezervă de fiecare tip (caz notat cu 2RA2RB în figură).
- se utilizează patru unități de rezervă universale (caz notat cu 4R în figură).

4.4. Modelarea și analiza fiabilității rețelelor de senzori utilizând modele Markov 121

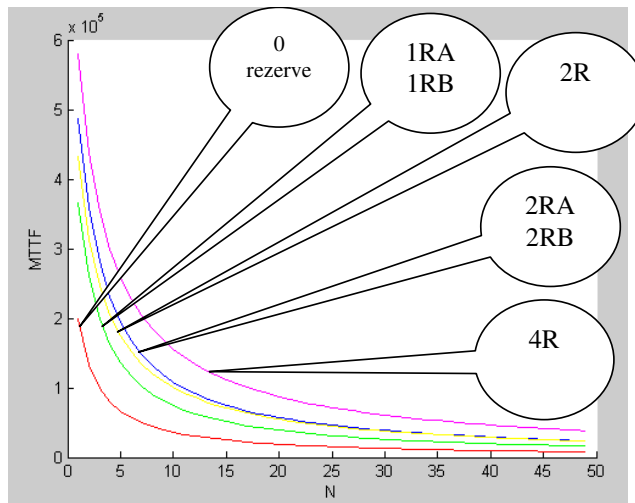


Figura 4.28. Timpul mediu de funcționare până la apariția defectului pentru o rețea de senzori de dimensiune variabilă, cu diferite tipuri de unități de schimb

Acest studiu arată faptul că diferențele înregistrate din punctul de vedere al duratei de funcționare până la apariția defectului, în cele 5 cazuri considerate, se manifestă la toate rețelele, și permite extrapolarea concluziilor din studiul anterior la orice dimensiune a rețelei de senzori.

4.5. Concluzii

În cadrul acestui capitol s-a realizat sintetizarea a noțiunilor principale referitoare la toleranța la defecte în cadrul rețelelor de senzori wireless, a nivelurilor la care se manifestă toleranța la defecte, a fundamentelor teoretice și a mărimilor caracteristice analizării toleranței la defecte în sisteme distribuite.

În continuare s-a efectuat modelarea fiabilității a diferite rețele de senzori, cu ajutorul modelelor Markov, utilizând atât unități de schimb redundante, de tip stand-by, dedicate (care pot înlocui un singur tip de senzori), cât și unități de schimb redundante, de tip stand-by, universale (care pot înlocui orice tip de senzor din structura rețelei de senzori).

Prin analiza realizată s-a dovedit că este indicat să se utilizeze în cadrul aplicațiilor cu rețele de senzori wireless, senzori care au fost rodați în prealabil un timp limitat în afara rețelei, și se recomandă integrarea acestora în aplicație doar după atingerea maturității (intrarea în zona în care rata de defectare este constantă). Altfel, fiabilitatea globală a rețelei de senzori este scăzută, și ținând cont de caracterul distribuit al aplicațiilor, mentenanța va avea un cost relativ ridicat.

Pentru a crește fiabilitatea globală a întregii rețele de senzori wireless se pot recomanda două abordări:

- creșterea calității componentelor utilizate pentru asigurarea unei rate de defectare mai scăzute la nivelul senzorilor;

- creșterea numărului de unități de schimb disponibile, eventual menținerea în permanență a unui număr minimal de unități de rezervă, prin repararea/înlocuirea unităților defecte și trecerea lor în regim de stand-by.

Modelele Markov s-au dovedit foarte utile în modelarea fiabilității rețelelor, datorită caracterului stohastic al defectărilor și al faptului că sistemul evoluează într-un număr finit de stări, care se exclud reciproc. Pentru rezolvarea ecuațiilor diferențiale s-a utilizat calculul operațional. S-a făcut uz de teorema lui L'Hospital pentru rezolvarea nedeterminărilor de tip 0/0.

Analiza fiabilității s-a realizat pe baza funcției de fiabilitate determinată analitic $R(t)$. S-a realizat și o analiză pe baza timpului mediu de funcționare până la apariția defectului (MTTF), care a condus spre aceleași rezultate.

Din studiile de caz realizate se pot desprinde următoarele concluzii:

- în cazul rețelelor de senzori hibride, compuse din diferite tipuri de senzori, utilizarea unităților de schimb universale asigură o fiabilitate sporită față de cazul utilizării unui același număr de unități de schimb dedicate.
- fiabilitatea unei rețele este cu atât mai ridicată cu cât numărul de unități active este mai scăzut.
- fiabilitatea globală a rețelei este maximă în cazul utilizării de elemente mature (care au rata de defectare constantă) și este scăzută în cazul utilizării de elemente care nu și-au terminat etapa de rodaj, sau care au depășit durata medie de viață (uzate).

Rezultatele obținute au fost validate prin publicarea, în calitate de prim autor, a 2 lucrări științifice la conferințe internaționale indexate IEEEExplore / INSPEC. [154][155]

5. METODE DE DETECȚIE ȘI TRATARE A ERORILOR DE FUNCȚIONARE ÎN REȚELE DE SENZORI WIRELESS

5.1. Preliminarii

În cadrul acestui capitol sunt prezentate câteva metode și soluții care permit detectarea și tratarea erorilor de funcționare, care pot apărea în cadrul rețelelor de senzori wireless. Aceste erori (cauzate de diverse defecte) pot fi permanente sau tranzitorii, putând afecta fie un nod, fie o întreagă regiune a rețelei de senzori. Din punct de vedere al stratificării rețelelor de senzori, defectele pot apărea pe diverse nivele, cum ar fi: nivelul fizic (mediul de comunicație), nivelul hardware, nivelul software-ului de sistem sau nivelul middleware (nivel intermediar incluzând aplicațiile utilizator) [84].

Detecția defectelor și tratarea erorilor cauzate de acestea se pot realiza fie într-o manieră distribuită (la nivel de nod sau grupare de noduri), fie la nivelul centralizat (practic la nivelul sistemului de achiziție centralizată a datelor).

Constrângerile energetice (privind energia de alimentare disponibilă la nivelul fiecărui senzor) au un impact major atât asupra tipologiei de proceduri de detecție și tratare a defectelor (implementate la nivelul senzorilor rețelei), cât și asupra traficului suplimentar de informații necesare pentru o detecție la nivel centralizat al acestora. Astfel, este necesară stabilirea unei corelații optime între energia consumată, gradul de acuratețe al diagnosticării erorii, respectiv nivelul de toleranță la defect al rețelei de senzori.

Senzorii componenți ai unei rețele prezintă o probabilitate relativ ridicată de funcționare defectuoasă, datorită distribuției lor, de regulă, în medii necontrolabile, chiar ostile, precum și a prețului de cost relativ scăzut al acestora, suplinind uneori calitatea prin cantitate. În mod natural, rețeaua de senzori trebuie să detecteze și să „izoleze” senzorii defecti, pentru a putea păstra un nivel acceptabil al integrității funcționale, respectiv consistentă și calitatea necesară a datelor furnizate. Identificarea senzorilor defecti este o sarcină relativ dificil de realizat, datorită constrângerilor impuse de calitatea serviciilor furnizate, limitărilor energetice (capacitatea limitată a bateriei de alimentare) precum și a diversității tipurilor de defecte care pot afecta operarea acestora. [114] [115]

Transmiterea spre stația de bază a tuturor informațiilor referitoare la un nod, implicând o detectare centralizată a defectelor din rețea, este relativ scumpă și ineficientă, datorită costului mai ridicat al comunicației fără fir, consumului energetic sporit și al lățimii limitate a benzii de transmisie. În acest context, se preferă utilizarea unor soluții de detecție a defectelor direct la nivel distribuit (nod sau grupare de noduri din cadrul rețelei).

După cum s-a menționat deja, prezentul capitol are drept obiectiv sinteza și validarea unei strategii, din care rezultă câteva metode/soluții propuse, privind detectarea și tratarea unor erori funcționale, care pot apărea în rețelele de senzori.

Soluțiile abordate sunt bazate pe utilizarea unor rețele neuronale, care permit, printr-o predicție adecvată, suplinirea parțială a unor informații eronate/lipsă furnizate de senzorii afectați de anomalii funcționale.

5.2. Tipuri de defecte în cadrul rețelelor de senzori wireless

5.2.1. Clasificare din punct de vedere funcțional

În cadrul rețelelor de senzori, datorită numărului mare de noduri și a faptului că acestea sunt distribuite în medii necontrolabile, pot să apară o gamă variată de defecte.

- O primă *clasificare a defectelor* se poate realiza din punctul de vedere al operabilității (capacității de a fi operațională rețeaua de senzori în ansamblul ei) considerând două categorii distincte:
 - **defecte fizice** - apar în situația în care un element se defectează efectiv și nu mai este apt de funcționare (nu mai este operațional).
 - **defecte funcționale** - apar în situația în care sistemul este operațional dar nu își realizează funcția specificată. Majoritatea defectelor funcționale apar datorită erorilor din faza de proiectare și pot fi la rândul lor permanente sau tranzitorii. O modalitate de obținere a datelor despre defectele funcționale ar fi consultarea fișierelor de diagnosticare automată, care conțin de regulă momentul apariției defectului și tipul defectului.
- O altă posibilă clasificare împarte defectele care afectează nodurile unei rețele de senzori în alte două categorii: [116] [117]
 - **hard fault** - Se consideră ca se înregistrează un defect de tip *hard fault* atunci când un nod nu poate comunica cu alte noduri ale rețelei din diverse cauze. Spre exemplu, comunicația poate fi imposibil de realizat datorita unui defect care afectează modulul de comunicație, epuizarea energiei de alimentare a nodului, ieșirea din aria de acoperire radio a rețelei etc.
 - **soft fault** - Așa-numitul defect de tip *soft fault* se înregistrează atunci când nodul poate continua atât să funcționeze la nivel local, cât și să comunice cu alte noduri ale rețelei (modulele hardware și software implicate în comunicație funcționează normal), dar datele achiziționate și transmise nu sunt corecte.
- Din punctul de vedere al valorilor transmise de senzori (în sensul alterării valorilor furnizate de către aceștia) o altă clasificare este următoarea: [118]
 - **defect „blocat pe 0”** (*stuck-at-zero*) caz în care valoarea furnizată de senzor rămâne 0 începând cu un moment dat de timp t_r , independent de evoluția parametrilor reali ai procesului monitorizat.
 - **defect „blocat pe 1”** (*stuck-at-one*) caz în care valoarea furnizată de senzor rămâne egală cu valoarea maximă pe care o poate furniza senzorul

(capătul de scară), începând cu un moment dat de timp t_f , independent de evoluția parametrilor reali ai procesului monitorizat.

- **defect „blocat pe valoare nenulă”** (*stuck-at-nonzero*) caz în care valoarea furnizată de senzor rămâne constantă, începând cu un moment dat de timp t_f , independent de evoluția parametrilor reali ai procesului monitorizat.
- **defect „furnizare de valori aleatoare”** caz în care valoarea furnizată de senzor este aleatoare, independent de evoluția parametrilor reali ai procesului monitorizat, începând cu un moment dat de timp t_f .
- **defect „furnizare de valori eronate/decalate”** caz în care valoarea furnizată de senzor este decalată față de valoarea reală pe baza unei funcții (având ca și parametri valoarea prag a senzorului și constante de amplificare/timp) începând cu un moment dat de timp t_f .

Astfel, pe baza celor anterior menționate, pot fi sintetizate două modele de comportament defectuos:[119]

- *independent de evoluția parametrilor reali* ai procesului monitorizat (cazul în care senzorul este blocat pe o valoare oarecare, sau furnizează valori aleatoare). În acest caz, identificarea erorilor este relativ ușor de realizat, dar corecția acestora este dificilă, de regulă valorile furnizate de senzorii afectați sunt ignorate, fiind neutilizabile.
- *dependent de evoluția parametrilor reali* ai procesului monitorizat (cazul furnizării de valori decalate temporal sau cantitativ). Detecția erorilor este mult mai dificilă decât în cazul anterior, dar spre deosebire de acesta, valorile eronate identificate pot fi relativ ușor corectate prin diferite tehnici (ajustări bazate pe tendința de evoluție, beamforming, etc).

5.2.2. Clasificare după localizarea în structura rețelei de senzori

Luând ca și criteriu localizarea senzorului în structura rețelei, o posibilă clasificare împarte defectele în:

- **defecte la nivelul unui nod** al rețelei, caz în care pot fi afectați senzorii nodului în cauză, modulul de procesare/stocare a datelor, partea de comunicație radio sau combinații ale acestora.
- **defecte la nivelul unei zone** ale rețelei, caz în care sunt afectate mai multe noduri care se află în aceeași vecinătate.
- **defecte la nivelul întregii rețele de senzori**, caz în care sunt afectate majoritatea nodurilor rețelei de senzori, iar stațiile de bază nu pot extrage nici un fel de informații din rețea.

Defectele de la nivelul nodurilor pot apărea ca urmare a unei game largi de factori cauzatori cum ar fi: [120]

- defectarea unui modul (de comunicație, procesare etc) al nodului;
- probleme în procesul de fabricație al nodului – fisuri, lipituri reci, greșeli de proiectare etc;
- factori de mediu – umiditate sau temperaturi excesive, vibrații, vânt etc;
- atacuri inamice – realizate atât prin interfața radio, sau chiar atacuri fizice (lovituri, explozii, incendiere etc);
- epuizarea bateriei care asigură energia de funcționare a nodului;
- ieșirea nodului din aria de acoperire radio a rețelei de senzori.

În continuare s-a considerat un defect localizat la nivelul unui nod al rețelei de senzori, evaluat prin prisma corectitudinii datelor furnizate de acesta.

5.3. Preliminarii - Metode de detecție a erorilor din cadrul rețelelor de senzori

Deși printre primele rețele de senzori wireless au fost utilizate în scopuri militare încă din anii 1970 (în cadrul războiului din Vietnam - pentru detecția inamicilor) interesul pentru acestea a început să se manifeste abia în anii 1990 când s-au dezvoltat aplicații cu rețele de senzori wireless UCLA (University of California, Los Angeles) în cadrul unor proiecte de cercetare. [121] Prima generație de senzori inteligenți (atât hardware cât și software), apte pentru a fi amplasate în mediul real, a fost lansată și testată în anii 1996 demonstrând fezabilitatea rețelelor de senzori wireless de tip multi-hop. Ulterior, într-un proiect de dezvoltare comun cu compania Rockwell Science Center, s-au dezvoltat dispozitive realizate modular care au permis sinteza și implementarea unor algoritmi din ce în ce mai evoluți pentru partea de comunicație în rețea și respectiv de procesare de semnale, fără a se pune mare accent însă pe conservarea/economisirea energiei de alimentare a senzorilor [122]. În cadrul experimentelor efectuate ulterior, s-a evidențiat importanța separării funcționalităților de timp real (care trebuie optimizate pentru a necesita o putere scăzută de alimentare), de funcționalitățile de nivel superior, care necesită o procesare extensivă, dar nu sunt apelate la nivelul de procesare scăzut (cod mașină). [123] [124] [125]

Începând cu anii 2000, pe lângă problematica legată de constrângerile energetice, a început să fie luată în calcul și problema toleranței la defecte, respectiv problema detecției acestora. În [126] se afirmă că sistemele distribuite dotate cu microsenzori wireless trebuie să asigure monitorizarea, respectiv generarea de comenzi în condițiile unei fiabilități sporite, tolerante la defecte în majoritatea aplicațiilor dezvoltate, fără ca aceasta să ducă la epuizarea prematură a surselor de energie disponibile la nivelul rețelei de senzori.

În [127] se propun modele specifice de rețele pentru asigurarea unui nivel ridicat de fiabilitate și performanță - doi factori importanți care trebuie luați în considerare în cadrul sistemelor de monitorizare. S-a considerat o schemă concurentă de detecție a defectelor și recuperare după defect, prin redirectionarea informațiilor de-a lungul unor legături redundante (sub constrângeri de timp real). Totodată s-a dovedit că degradarea performanțelor rețelei, datorită creșterii toleranței la defecte este acceptabilă, spre deosebire de degradarea performanțelor rețelei fără recuperare după defect.

În [128] se prezintă o metodă on-line de detectare a anomaliilor/erorilor din cadrul măsurătorilor realizate de senzorii rețelei, care poate fi aplicată oricărui sistem de monitorizare cu senzori eterogeni, permițând detectarea oricărui tip de defect apărut și asigurând un raport optim între acuratețea și latența datelor furnizate.

O altă abordare prezentată în literatura de specialitate [129] [130] propune un model pentru determinarea fiabilității rețelelor de senzori, având ca premisă diferite ipoteze de defectare. Se pot exploata topologiile rețelelor de senzori pentru a detecta și corecta actele benigne sau malițioase produse în rețeaua de senzori. În acest sens s-a propus o metodă bazată pe grafuri, care permite monitorizarea pe orizontală și verticală a rețelelor de senzori ad-hoc, permițând stabilirea de topologii capabile să asigure cerințele de fiabilitate și corectitudine în funcționare impuse.

Întrucât durata de viață a senzorilor reprezintă un factor important în proiectarea aplicațiilor cu rețele de senzori, în [131] se vorbește despre o redundanță optimală, care să asigure o gestiune eficientă a defectelor. Se propune de asemenea un protocol de gestiunea descentralizată a defectelor, plecând de la o rețea de senzori cu arhitectură de tip „peer-to-peer”.

În [132] se propune o metodă statistică care permite distingerea datelor eronate de cele malițioase, în cadrul unei rețele de senzori. Diferențierea dintre defecte și atacuri malițioase este necesară pentru a putea iniția măsuri de recuperare adecvate. Abordarea se bazează pe utilizarea de modele Markov cu legături ascunse (HMM – Hidden Markov Models). Metoda a fost testată și validată utilizând date reale, colectate pe parcursul unei luni, de către senzorii amplasați în Great Duck Island (SUA).

Metodele care asigură o creștere a „gradului de supraviețuire” a unei rețele de senzori wireless pe baza unui răspuns de tip *timeout*, s-au dovedit a fi eficiente din punctul de vedere al consumului energetic, permițând o reconfigurare a punctelor de acces active (AP – Access Point) pentru preluarea sarcinilor AP defecte. [133]

5.4. Metode pentru detecția și tratarea erorilor în funcționarea rețelelor de senzori utilizând rețele neuronale

Metodele de detectare a erorilor de funcționare din cadrul unor rețele de senzori, propuse în cadrul acestui capitol, au ca particularitate de bază faptul că sunt aplicabile în cazul rețelelor de senzori utilizate pentru monitorizarea unor fenomene cu o evoluție predictibilă, pentru care poate fi identificat un model comportamental. Astfel, este necesară sinteza prealabilă a unui model comportamental al procesului monitorizat de către rețeaua de senzori, care poate predicta/genera valori estimate (pentru un anumit orizont de timp limitat) ale mărimilor reale măsurate.

Principiul de bază pentru detectarea unei anomalii funcționale, constă în compararea valorile estimate de o rețea neuronală antrenată cu cele reale, furnizate de senzorii rețelei, iar în cazul în care diferențele depășesc o anumită valoare prag, se consideră ca s-a produs o eroare funcțională în rețeaua de senzori.

Rețelele neuronale sunt sisteme cu procesare distribuită alcătuite din neuroni, structurați în straturi, care interacționează între ei prin intermediul unor

legături ponderate, prezentând capabilitatea de a învăța și modela comportamentul sistemelor neliniare complexe, prin ajustarea propriilor parametri pe parcursul unor etape de antrenare bazate pe date reale culese din procesele modelate. [134] [135] [136]

Datorită acestei capabilități, plaja de aplicabilitate a rețelelor neuronale este foarte largă, fiind utilizate la diverse aplicații, din diferite domenii, cum ar fi: în industria nucleară [137], [138], [139], în modelarea și supravegherea proceselor chimice [140], [141], în domeniul producerii de energie electrică [142], [143], s.a.m.d..

În cadrul capitolului de față se propune, sintetizează, implementează și validează o strategie de utilizare a rețelelor neuronale pentru detecția și tratarea anomaliilor funcționale din cadrul unor rețele de senzori care monitorizează fenomene meteorologice.

Din punctul de vedere al localizării algoritmului de detecție (rețeaua neuronală + logica aferentă) a unei erori funcționale, în cadrul lucrării se propun două tipuri de abordări:

- *abordarea centralizată;*
- *abordarea distribuită.*

5.4.1. Abordarea centralizată a detecției erorilor în rețelele de senzori

În cazul abordării centralizate a detecției erorilor din cadrul rețelelor de senzori, modulul de detecție a funcționării eronate este, situat în exteriorul rețelei de senzori, după cum este prezentat în Figura 5.1 – realizându-se practic o validare a datelor la recepție.

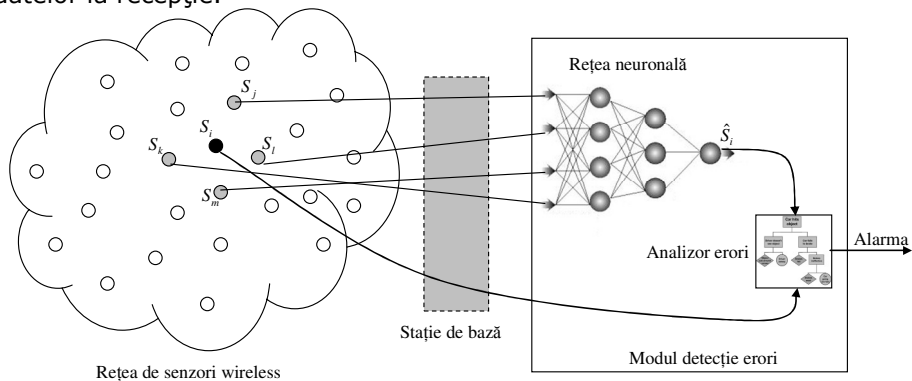


Figura 5.1 Detecția centralizată a erorilor funcționale utilizând rețele neuronale

Detecția centralizată a erorilor de funcționare implică extragerea valorilor reale din rețea (așa cum au fost ele achiziționate de senzori), respectiv testarea validității acestora la un nivel superior, pe un sistem de calcul conectat la rețeaua de senzori. Rețeaua neuronală realizează practic în acest caz o interpolare, și furnizează valoarea estimată \hat{S}_i , corespunzătoare sensorului i , pe baza informațiilor culese de la senzorii situați în vecinătatea sensorului i . Interpolarea poate fi extinsă

astfel încât să țină cont de istoricul variațiilor înregistrate de senzorii din vecinătatea considerată. Valoarea estimată \hat{S}_i este comparată în cadrul unui bloc *Analizor de eroare* cu valoarea reală S_i furnizată de senzor, iar dacă nu se încadrează în marja admisă de eroare, se generează o alertă, semnalizându-se posibilitatea existenței unei erori.

Avantajele acestei abordări constau în:

- posibilitatea utilizării unor rețele neuronale de complexitate mare (cu număr mare de neuroni, cu un grad de recurență ridicat), și a implementării unor algoritmi complecși la nivelul blocului *Analizor de eroare*, datorită faptului că se pot utiliza sisteme de calcul dedicate, cu o putere de procesare și o autonomie de funcționare ridicată.
- realizarea de economii de energie la nivelul senzorilor, datorită neimplicării acestora în mecanismul propriu-zis de detecție al erorilor.
- posibilitatea de a corecta erorile detectate, prin utilizarea valorii estimate de către rețea în locul celei furnizate de senzor.
- detecția unor eventuale anomalii generate de o transmitere defectuoasă a datelor prin rețea.

Dezavantajul abordării este dat de volumul relativ ridicat de date care sunt extrase din rețea, și a faptului că nu se pot aplica tehnici de agregare a informației, fiind necesare, la un nivel superior rețelei, date individuale de la fiecare senzor al rețelei. Acest aspect devine foarte important în cazul rețelelor de tip multi-hop cu un număr mare de noduri, unde metoda nu este practic aplicabilă.

5.4.2. Abordarea distribuită a detecției erorilor în rețelele de senzori

În cazul *detecției distribuite* a erorilor funcționale cu ajutorul rețelelor neuronale, detecția este realizată în interiorul rețelei de senzori, mecanismul de detecție fiind implementat în fiecare nod al rețelei de senzori, utilizatorul final, recepționând doar valorile care au fost în prealabil validate/corectate la nivelul nodului unde au fost achiziționate, după cum este prezentat în Figura 5.2– realizându-se practic o validare a datelor înainte de transmiterea lor.

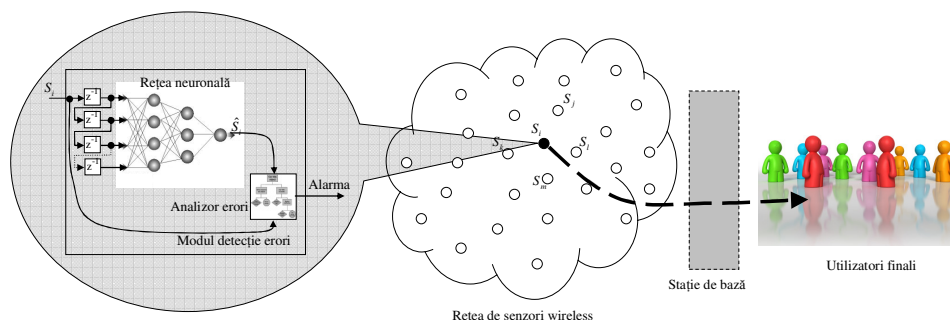


Figura 5.2 Detecția distribuită a erorilor funcționale utilizând rețele neuronale

Datorită acestui fapt, volumul de procesare corespunzător rețelei neuronale și algoritmului *Analizorului de eroare*, trebuie limitat la minim, pentru a se putea

încadra în resursele de procesare oferite de nodurile rețelei și a nu epuiza prematur bateriile de alimentare ale nodurilor. Astfel, dezavantajul acestei abordări constă în faptul că se pot implementa doar modele de o complexitate mai redusă, care să furnizeze valori estimate pe o durată de timp cu orizont limitat (chiar pe un singur pas de eșantionare), dar *avantajele majore* sunt:

- reducerea traficului de date prin rețea - valorile eronate nu mai propagându-se și neconsumând inutil energie și lățime de bandă de comunicație.
- posibilitatea agregării informației în rețea, datorita eliminării valorilor eronate la nivelul nodului sursă al rețelei.

În cazul în care mecanismul de detecție este implementat la nivelul nodului, nu este posibilă detecția și corectarea erorilor care apar datorită transmisiunii defectuoase prin rețea. Acest lucru se poate realiza, doar dacă algoritmul este implementat la un nivel ierarhic superior, pe baza exclusiv a datelor recepționate prin rețea de la senzorul vizat.

În practică se pot utiliza și soluții mixte, în care să se realizeze o detecție primară a erorilor la nivelul senzorilor și una mult mai laborioasă la nivel centralizat, în acest fel putându-se asigura un nivel de calitate a datelor superior.

5.4.3. Structura de detecție și corecție a erorilor din rețelele de senzori bazată pe rețele neuronale

Principial, o structură pentru detecția erorilor, utilizând un model neuronal al procesului supervizat, asigurând totodată și o corecție primară a acestora, este prezentată în Figura 5.3.

Trebuie menționat faptul ca rețelele neuronale de tip feed-forward nu pot surprinde dinamica proceselor, datorită faptului că nu prezintă dinamică proprie. [144] Din acest motiv, un tip de rețele neuronale care se pretează celor anterior menționate este cel al rețelelor neuronale recurente (Elman, de exemplu), [156][159] sau utilizarea de rețele neuronale de tip feed-forward, la care se realizează o recurență după intrare, în exteriorul rețelei (după cum este prezentat în detaliul din Figura 5.2).

O structură de principiu, prezentând integrarea modelului neuronal cu partea propriu-zisă de detecție a erorilor (modulul analizor) este prezentată în Figura 5.3, observându-se ca blocul analizor de eroare compară valoarea semnalului U_{si} , furnizat de senzorul S_i , cu valoarea corespunzătoare estimată de către rețeaua neuronală, notată cu \hat{U}_{si} , iar în cazul în care diferența dintre cele două valori, notată cu \mathcal{E}_i , are o valoare mai mare decât un prag impus se generează o alertă, semnalizând funcționarea defectuoasă a senzorului S_i și concomitent furnizând spre nivelul ierarhic superior valoarea estimată de rețeaua neuronală în locul celei achiziționate de senzor.

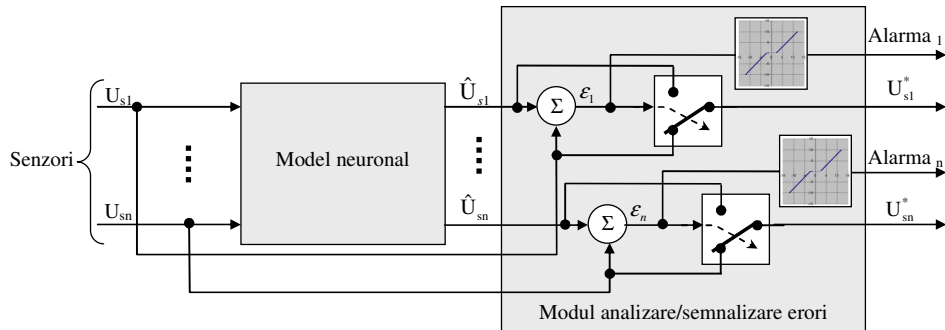


Figura 5.3 Detecția defectelor utilizând rețele neuronale

În continuare metoda detecție a anomaliilor funcționale propusă este particularizată și validată pentru un fenomen meteorologic, constând în monitorizarea presiunii atmosferice cu ajutorul unei rețele de senzori dedicați pentru efectuarea de observații meteorologice.

5.5. Studii de caz - detecția erorilor la măsurarea presiunii atmosferice

În cadrul acestui paragraf sunt realizate studii de caz privind detecția defectelor înregistrate la măsurarea parametrilor meteorologici în cadrul unei rețele de senzori distribuite la nivelul continentului american. Măsurătorile sunt efectuate automat de către Sistemul Automat De Observații De Suprafață (Automated Surface Observing System ASOS). Toate valorile măsurate sunt transmise spre un punct central și apoi stocate într-o bază de date accesibilă în primul rând pentru uz aviatic, dar nu numai. S-au utilizat date din cadrul sistemului ASOS, întrucât, acesta a reprezentat singură sursă de date distribuite la nivelul unei suprafețe geografice rezonabile, cu acces gratuit, identificată de către autor, după multiple căutări realizate, și dialoguri prin email cu diferite autorități meteorologice, în vederea obținerii de date reale, valide, înregistrate de o rețea de senzori privind parametrii asociați fenomenelor meteorologici.

Informații suplimentare referitoare la rețeaua de senzori meteorologici ASOS sunt prezentate în Anexa 5.1.

Datele achiziționate de la punctele de observare meteo, se stochează în baza de date în 2 tabele distincte [145] [146]:

- DATA SET 6405 (DSI-6405) - ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 1 DATA
- DATA SET 6406 (DSI-6406) - ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 2 DATA

Structura acestor tabele, precum și semnificația datelor stocate sunt prezentate în Anexa 5.2.

Se propun soluții de detecție a defectelor și se vor propune modalități de corecție a erorilor prin utilizarea de rețele neuronale, pentru măsurători vizând presiunea atmosferică într-un amplasament monitorizat de ASOS.

Presiunea atmosferică este măsurată în fiecare stație meteorologică utilizând 3 senzori distincți. La nivelul fiecărui senzor se măsoară efectiv valoarea presiunii atmosferice la fiecare 10 secunde. La nivelul stației meteorologice, se calculează valoarea medie a presiunii atmosferice, pentru fiecare senzor în parte, prin medierea ultimelor șase valori măsurate. Valorile sunt exprimate în inch coloană de mercur.

5.5.1. Detecția erorilor la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații de la un senzor

În cadrul acestui paragraf se sintetizează, implementează și validează o metodă de detectare a defectelor care pot să apară la nivelul unui senzor de presiune din cadrul unui punct de observație meteorologică al rețelei ASOS. O anomalie apărută în funcționarea acestuia poate cauza furnizarea de valori eronate pentru valoarea presiunii atmosferice.

Metoda propusă pentru detecția defectelor la senzorul de presiune se bazează pe estimarea unei valori a presiunii, la un moment dat de timp, și compararea acesteia cu valoarea reală furnizată de senzor. În funcție de rezultatul comparării se calculează un *factor de încredere* δ asociat măsurătorii curente. Acest factor este definit pe baza erorii relative dintre valoarea reală a presiunii și cea estimată, conform relației (5.2). Când valoarea acestuia se află sub un nivel prag impus, se consideră că senzorul este afectat de un defect (anomalie funcțională), putându-se utiliza valoarea presiunii atmosferice estimate, în locul celei furnizate de senzor. Dacă la pasul următor de achiziție, factorul de încredere δ revine în zona de valori admisă, se consideră că defectul a fost tranzitoriu, nefiind necesară intervenția unui operator pentru mentenanță. Dacă are loc o apariție sporadică a defectului (un defect la n măsurători), soluția propusă permite corectarea valorilor afectate de erori, după cum este dovedit de studiile de caz considerate. Dacă defectele se repetă frecvent, sau au o durată mare, pot prevesti defectarea permanentă a senzorului, impunându-se inițierea unor algoritmi localizare și identificare a defectului, eventual și de recalibrare a senzorului mai complecși decât cel de detecție al erorilor care face obiectul paragrafului de față. Aceștia sunt de regulă bazați pe sisteme expert și sunt rulați la un nivel ierarhic superior senzorului susceptibil de defectare.

În Figura 5.4 se prezintă structura pentru detectarea defectelor funcționale care realizează și calculul factorului de încredere asociat măsurătorii curente. Rețeaua neuronală este antrenată să furnizeze valoarea curentă a presiunii atmosferice pe baza a n observații anterioare ale acesteia. Blocul de calcul al factorului de încredere δ , primește atât valoarea măsurată a presiunii atmosferice de la senzorul stației meteo, cât și valoarea estimată pentru aceasta, iar rezultatul este calculat pe baza relației (5.2).

Blocul analizor de defect furnizează valoare corectă a presiunii atmosferice pe baza valorii măsurate și a factorului de încredere sau generează alarme în cazul în care aceasta nu poate fi determinată, sau defectul înregistrat la nivelul senzorului necesită operațiuni de mentenanță imediate.

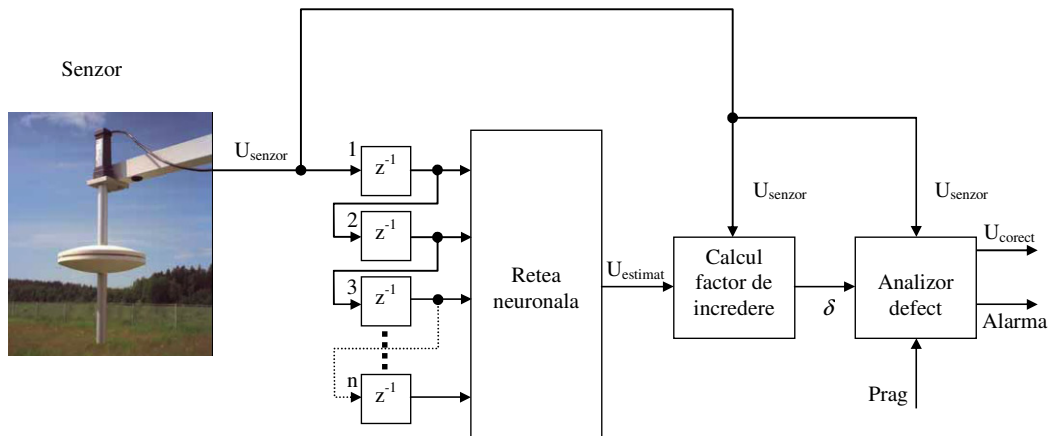


Figura 5.4. Schema bloc pentru structura de detectare a defectelor funcționale la nivelul unui singur senzor

Efectuând estimarea valorii presiunii atmosferice la momentul curent de timp t , pe baza a n eșantioane anterioare, se obține o valoare aproximativă notată cu $U_{estimat}$, iar eroarea absolută de estimare este dată de formula:

$$|\Delta U| = |U_{estimat} - U_{senzor}| \quad (5.1)$$

Factorul de încredere se definește pe baza erorii relative ponderate cu prin relația:

$$\delta = 1 - k \cdot \frac{|\Delta U|}{U_{estimat}} \quad \text{unde } k \text{ este factorul de ponderare.} \quad (5.2)$$

În practică, valoarea factorului de ponderare se alege în funcție de sensibilitatea dorită pentru detectarea unei diferențe valorice, care să impună luarea unei decizii de considerare a existenței unei anomalii de funcționare. În cazul de față, pentru factorul de ponderare, s-a ales valoarea 3.

Pentru procesul meteo considerat, privind măsurarea presiunii atmosferice cu o rețea de senzori, s-au considerat rețele neuronale de tip feed-forward cu unu și respectiv două straturi ascunse. Rețelele neuronale s-au antrenat utilizându-se o structură de tipul celei din Figura 5.5. Setul de date de antrenare a fost constituit din valori anterioare înregistrate de către senzorul de presiune, a căror acuratețe a fost verificată și probată în prealabil. După încheierea procesului de învățare, într-o etapă de validare se testează capacitatea rețelei neuronale de a extinde cunoștințele dobândite în faza de învățare asupra unor date din afara setului de antrenare.

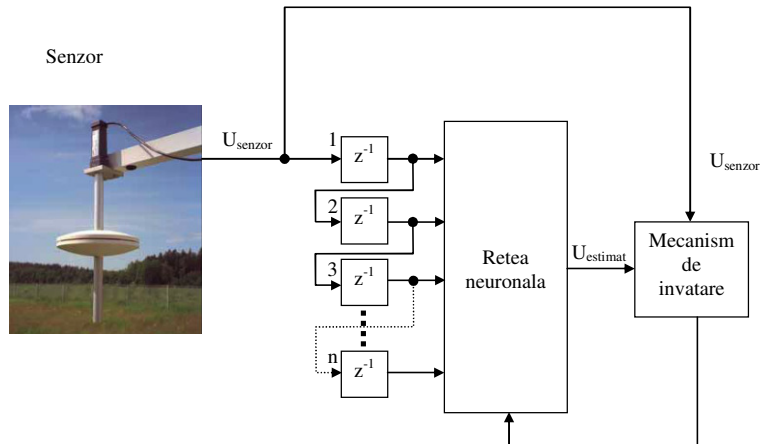


Figura 5.5. Schema bloc pentru antrenarea rețelei neuronale

În continuare se prezintă un studiu de caz, în care s-au considerat valorile presiunii atmosferice înregistrate la stația meteo cu indicativul 0K0J4, amplasată în zona aeroportului Florala din statul Alabama (vezi Figura 5.6), în lunile aprilie – mai anul 2009.

Figura 5.6 Date identificare amplasament senzori
(http://weather.noaa.gov/cgi-bin/nsd_lookup.pl?station=K0J4)

5.5.1.1. Determinarea structurii rețelei neuronale

Un prim studiu efectuat a determina numărul optim de neuroni în stratul ascuns al rețelei neuronale utilizate. Acesta trebuie să fie cât mai mic, având în vedere faptul că rețeaua neuronală trebuie implementată la nivelul nodurilor rețelei de senzori, pentru a putea realiza detecția distribuită a funcționării defectuoase a acestora. Pe de alta parte, acuratețea estimării realizate de rețeaua de senzori

conduce la un număr minim de neuroni în stratul ascuns, sub care calitatea estimării devine necorespunzătoare.

Pentru estimarea valorilor corecte ale presiunii s-au considerat 15 rețele neuronale diferite, toate având un strat ascuns, cu neuroni cu funcție de activare neliniară de tip tangenta hiperbolică, iar în stratul de ieșire s-a utilizat un neuron cu funcție de activare liniară, conform figurii 5.7. Numărul de neuroni din stratul ascuns, notată în figura cu n_a , a fost variat de la 1 la 15.

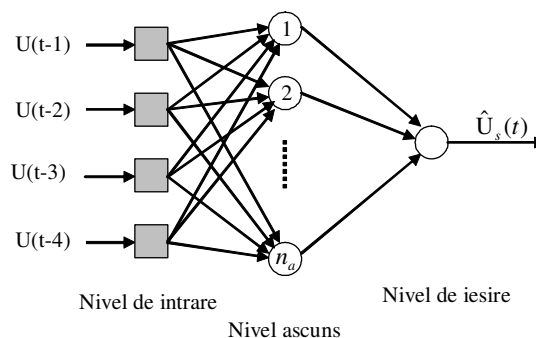


Figura 5.7. Structura rețelei neuronale

Întrucât rețelele de tip feed-forward nu au dinamică proprie, s-a realizat o recurență în exteriorul rețelei, pentru a putea surprinde dinamica procesului, conform figurii 5.4, unde s-a considerat o recurență de ordinul 4 după mărimea de intrare.[157][158]

Pentru antrenarea rețelei s-a utilizat structura prezentată în Figura 5.5, și un set de date colectat în stația meteorologică anterior menționată, în data de 01 Aprilie 2009, de la ora 10:10 până la ora 15:10.

Antrenarea rețelei s-a realizat utilizând metoda de propagare a erorii înapoi (backpropagation), de tip Levenberg-Marquardt (LM) datorită particularității acesteia de a utiliza, după caz, învățarea de tip newtonian, sau respectiv cea de tip gradient descendent.[147]

Algoritmul de ajustare a parametrilor rețelei neuronale de tip LM utilizează o aproximare a matricii Hessiene, în mod asemănător algoritmului de tipul Newton – implementat de funcția *trainbfg* (Broyden, Fletcher, Goldfarb, și Shanno (BFGS)), rezultând o relație de formă [148][149]:

$$x_{k+1} = x_k - (J^T J + \mu \cdot I)^{-1} J^T e \quad (5.3)$$

Unde:

x_k - este vectorul curent al ponderilor și pragurilor rețelei neuronale,

J - reprezintă matricea Jacobiana care conține derivatele erorilor rețelei neuronale corespunzătoare ponderilor și valorilor de prag,

e - este vectorul erorilor rețelei neuronale,

μ - reprezintă parametru de antrenare.

Când parametrul μ din relația (5.3) are valoarea 0 rezultă o învățare de tip Newtonian, iar când acesta are o valoare mare, metoda devine una de gradient descendent cu pas mic. Metoda Newton este mai rapidă și mai precisă în jurul unui punct de eroare minimă, astfel încât este de dorit să se revină cât mai repede posibil la aceasta, prin scăderea parametrului μ , după fiecare epocă de antrenare încheiată cu succes. μ este crescut numai dacă pasul curent ar cauza o creștere a funcției obiectiv (suma pătratelor erorii). În acest mod se asigură o scădere a funcției obiectiv la fiecare iterație a algoritmului. [150]

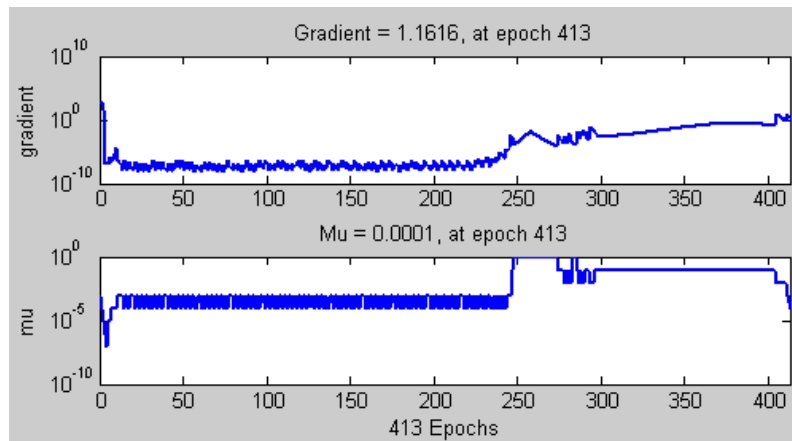


Figura 5.8. Evoluția parametrilor de învățare pe parcursul antrenării rețelei neuronale

Oportunitatea utilizării algoritmului LM în cadrul aplicației curente este justificată de evoluția gradientului și respectiv a parametrului μ , pe parcursul procesului de antrenare, reprezentate în Figura 5.8, coroborat cu evoluția erorii medii pătratice din Figura 5.9.

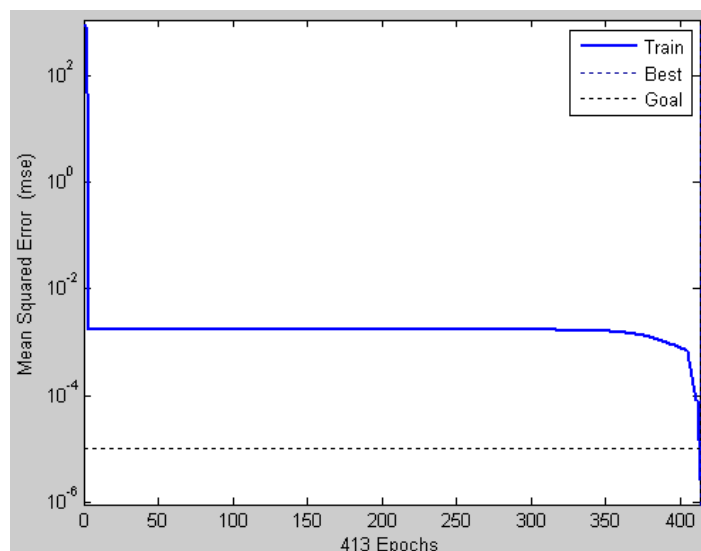


Figura 5.9. Evoluția funcției criteriu pe parcursul antrenării rețelei neuronale

Aceste variații, au fost înregistrate în cazul unei rețele neuronale având 6 neuroni în stratul ascuns, dar situații similare s-au înregistrat și în cazul celorlalte rețele neuronale considerate.

După 250 de epoci de antrenare, în care eroarea medie pătratică nu a mai putut fi scăzută, se observă o creștere a lui μ între epocile 250 și 300, fapt care determină o creștere a gradientului, urmată de o scădere a funcției obiectiv (prezentată în Figura 5.8) și implicit o îmbunătățire a calității procesului de învățare a rețelei neuronale, eroarea medie pătratică scăzând brusc, după primele 400 de epoci, sub nivelul dorit, antrenarea finalizându-se în epoca 413.

Pentru fiecare din cele 15 structuri de rețea neuronală considerate, având între 1 și 15 neuroni în stratul ascuns, s-au realizat câte 50 de antrenări diferite, plecând de la ponderi inițializate arbitrar. Numărul de antrenări care s-au finalizat cu succes (rețelele neuronale reușind să învețe dinamica procesului) a diferit în funcție de dimensiunea stratului ascuns, după cum este prezentat în Figura 5.10. Se poate observa că nu s-a reușit învățarea dinamicii procesului de către o rețea având un singur neuron în stratul ascuns, iar rețelele cu mai puțin de 5 neuroni în stratul ascuns au eșuat în mai mult de jumătate din antrenări.

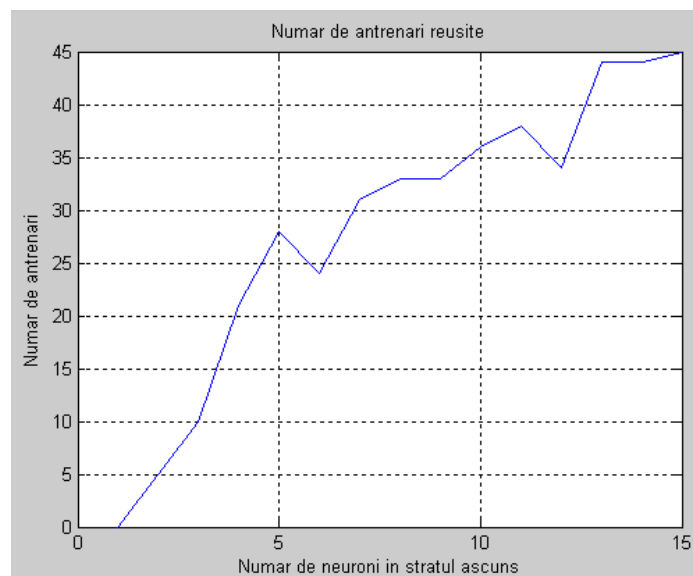


Figura 5.10. Numărul de antrenări reușite

Pentru a putea analiza din punct de vedere calitativ rezultatele obținute de rețelele neuronale antrenate, s-a calculat pentru fiecare rețea neuronală în parte, eroarea medie pătratică pe întreaga luna Aprilie. În Figura 5.11 se prezintă performanțele obținute de cele mai bune rețele, pentru fiecare caz considerat. Se observă că un raport optim calitate/dimensiune-rețea a fost obținut în cazul utilizării a 6 neuroni în stratul ascuns.

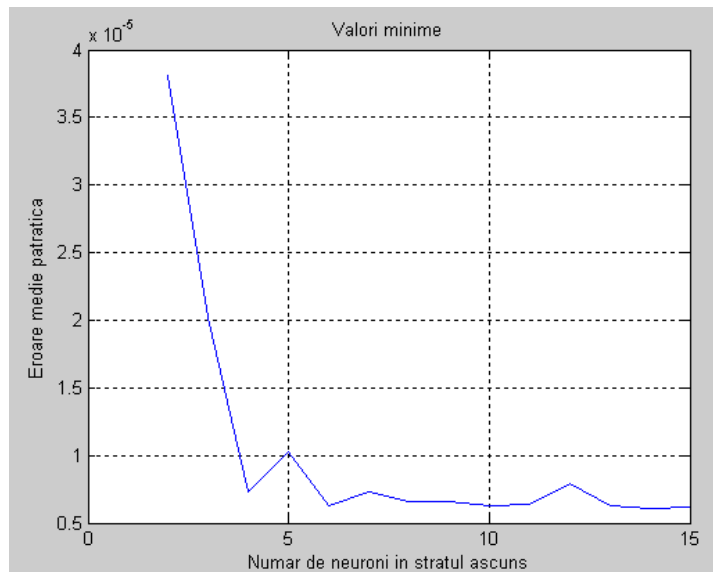


Figura 5.11. Eroarea medie pătratică în funcție de dimensiunea rețelei neuronale

În continuare s-a calculat, pentru toate rețelele neuronale de aceeași dimensiune care au reușit să învețe dinamica procesului considerat, o valoare medie a erorii medii pătratice realizate de rețea pe întreaga luna Aprilie. Variația acestei valori medii, în funcție de dimensiunea rețelei este prezentată în Figura 5.12.

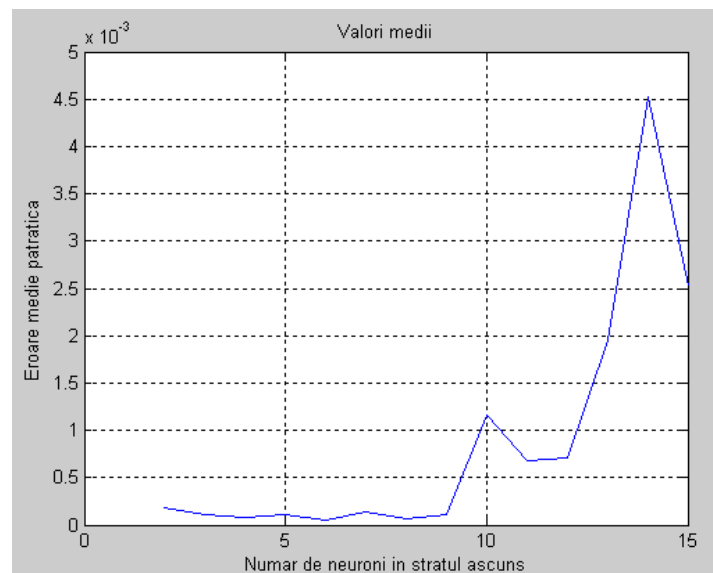


Figura 5.12. Numărul de antrenări reușite

Se poate observa că în general, rețele având un număr de neuroni mai mare decât 10 în stratul ascuns, au prezentat o capacitate mai scăzută de a surprinde dinamica procesului de variație a presiunii atmosferice.

Pe baza celor prezentate, dintre cele 750 de antrenări efectuate a fost selectată rețeaua care a avut randamentul optim între calitate și respectiv dimensiunea stratului ascuns. Astfel a rezultat o rețea având 6 neuroni în stratul ascuns.

Un alt **studiu de caz** s-a considerat, pentru estimarea valorilor corecte ale presiunii atmosferice, o rețea neuronală de tip feed-forward, având două straturi ascunse, cu neuroni având funcția de activare de tip tangentă hiperbolică, iar în stratul de ieșire s-a utilizat un neuron cu funcție de activare liniară. Întrucât rețelele de tip feed-forward nu au dinamica proprie, s-a realizat o recurență în exteriorul rețelei, pentru a putea surprinde dinamica procesului, conform figurii 5.4, considerându-se o recurență de ordinul 4 la intrarea rețelei neuronale.

Un prim caz a vizat determinarea numărului optim de neuroni în straturile ascunse ale rețelei neuronale utilizate. Acesta trebuie să fie cât mai mic, având în vedere faptul că rețeaua neuronală trebuie implementată la nivelul nodurilor rețelei de senzori, pentru a putea realiza detecția distribuită a funcționării defectuoase a acestora. Pe de altă parte, acuratețea estimării realizate de rețeaua de senzori conduce la un număr minim de neuroni în stratul ascuns, sub care calitatea estimării devine necorespunzătoare.

Pentru estimarea valorilor corecte ale presiunii s-au considerat 15 rețele neuronale diferite, toate având două straturi ascunse, primul strat având $n_a = 2 \cdot n_b$ neuroni, iar al doilea n_b neuroni cu funcție de activare neliniară de tip tangentă hiperbolică. În stratul de ieșire s-a utilizat un neuron cu funcție de activare liniară, conform figurii 5.13. Numărul de neuroni din al doilea strat ascuns, notat în figura cu n_b , a fost variat de la 1 la 15, rezultând 15 structuri de rețele neuronale diferite.

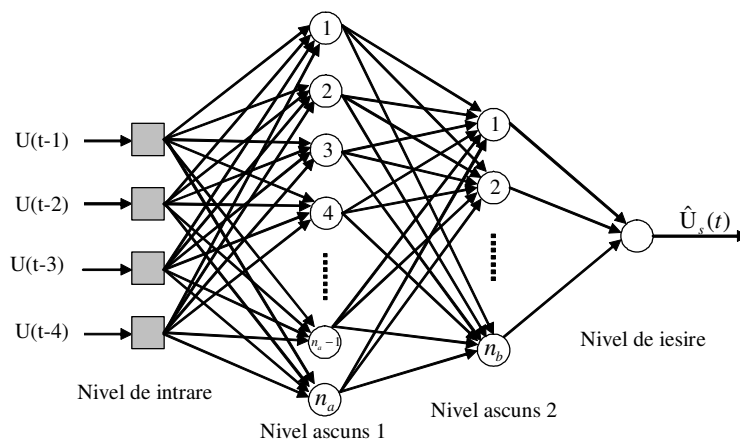


Figura 5.13. Structura rețelei neuronale cu două straturi ascunse

Pentru antrenarea rețelei s-a utilizat structura prezentată în Figura 5.5, și un set de date colectat în stația meteorologică anterior menționată în data de 01 Aprilie 2009, de la ora 10:10 până la ora 15:10.

S-au realizat 50 de antrenări diferite pentru fiecare tip de rețea neuronală considerat, în vederea determinării structurii optime, din punct de vedere al raportului număr de neuroni/calitate.

Pentru fiecare din cele 15 structuri de rețea neuronală considerate, având între 1 și 15 neuroni în al doilea strat ascuns, s-au realizat câte 50 de antrenări diferite, plecând de la ponderi inițializate arbitrar. Numărul de antrenări care s-au finalizat cu succes (rețelele neuronale reușind să învețe dinamica procesului), a diferit în funcție de dimensiunea straturilor ascunse, după cum este prezentat în Figura 5.14.

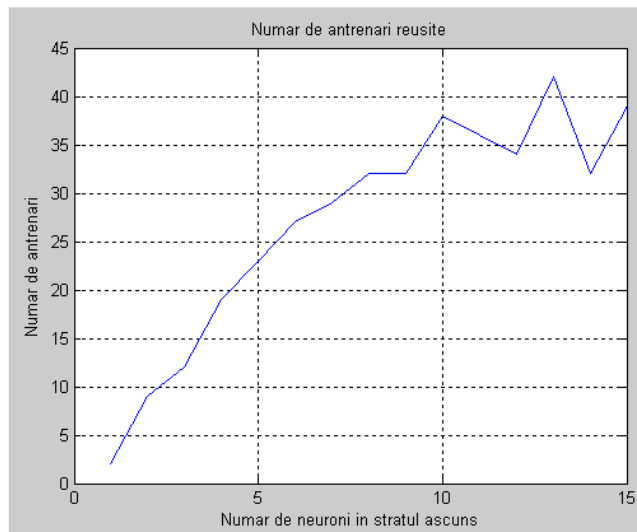


Figura 5.14. Numărul de antrenări reușite

Se poate observa că doar două rețele având un neuron în al doilea strat ascuns au fost capabile să învețe dinamica procesului, în vreme ce rețelele neuronale având peste 6 neuroni în stratul ascuns au înregistrat o rată de succes de peste 50 %.

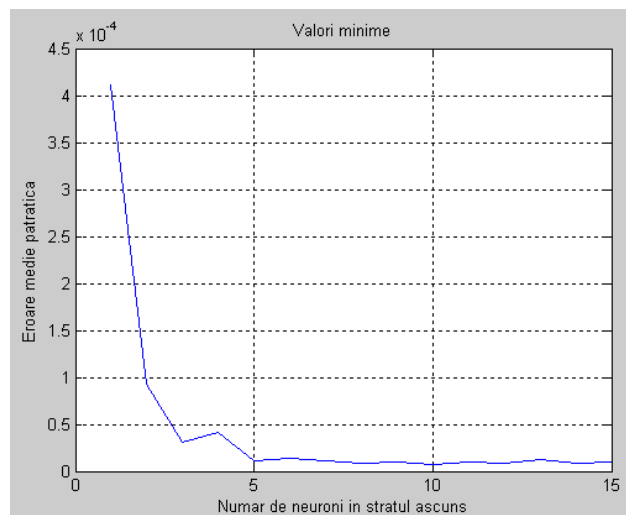


Figura 5.15. Eroarea medie pătratică în funcție de dimensiunea rețelei neuronale

S-a calculat pentru fiecare rețea neuronală în parte, eroarea medie pătratică pe întreaga luna Aprilie (nu doar pentru perioada utilizată la antrenare) în vederea analizei din punct de vedere calitativ a rezultatelor obținute de diferitele structuri de rețele neuronale antrenate. În Figura 5.15 se prezintă performanțele obținute de cele mai bune rețele, pentru fiecare caz considerat. Se observă că un raport calitate/dimensiune-rețea optim a fost obținut în cazul utilizării a 5 neuroni în al doilea strat ascuns (respectiv 10 neuroni în primul strat ascuns).

Pentru fiecare categorie de rețele (având același număr de neuroni în straturile ascunse) s-a calculat media aritmetică a tuturor valorilor erorii medii pătratice pe întreaga luna aprilie. Rezultatele sunt prezentate în Figura 5.16. Se poate observa că rețelele având 10, respectiv 5 neuroni în straturile ascunse au avut un comportament bun, valoarea medie a erorilor medii pătratice a celor 23 de rețele care au reușit să surprindă dinamica procesului fiind la nivelul atins de cele mai performante dintre rețele studiate.

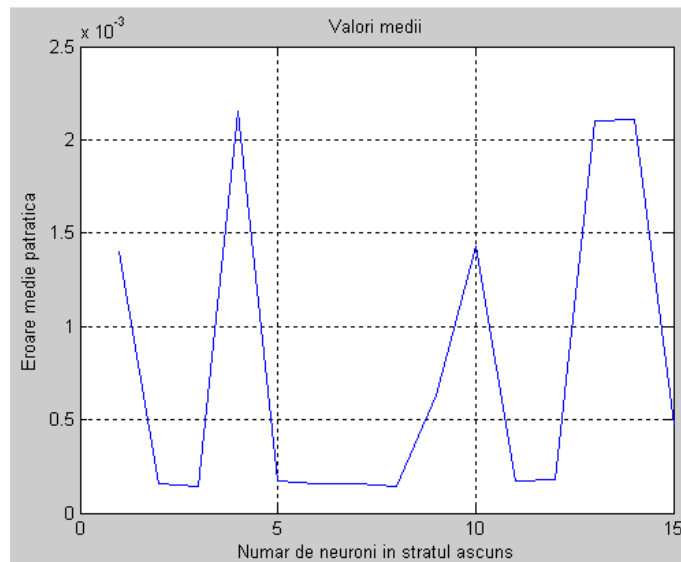


Figura 5.16. Eroarea medie pătratică în funcție de dimensiunea rețelei neuronale

Un alt studiu a vizat posibilitatea de a reduce numărul de intrări în rețeaua neuronală, pentru a putea scădea efortul de calcul necesar la nivelul acesteia, pentru estimarea valorilor corecte ale presiunii atmosferice.

S-a considerat o rețea neuronală de tip feed-forward, cu un strat ascuns, având 6 neuroni cu funcție de activare de tip tangentă hiperbolică, iar în stratul de ieșire s-a utilizat un neuron cu funcția de activare liniară. S-a realizat și în acest caz, o recurență în exteriorul rețelei, pentru a putea surprinde dinamica procesului, conform figurii 5.4, unde s-a considerat o recurență, la intrarea rețelei neuronale, de ordinul 3, iar apoi s-a încercat limitarea acestuia la ordinul 2.

Pentru antrenarea rețelei s-a utilizat structura prezentată în Figura 5.5, și un set de date colectat în stația meteorologică considerată și în cazurile anterioare, în data de 01 Aprilie 2009, de la ora 10:10 până la ora 15:10 (prezentat în Figura 5.19). Antrenarea rețelei s-a realizat utilizând metoda de propagare a erorii înapoi (backpropagation), de tip Levenberg-Marquardt.

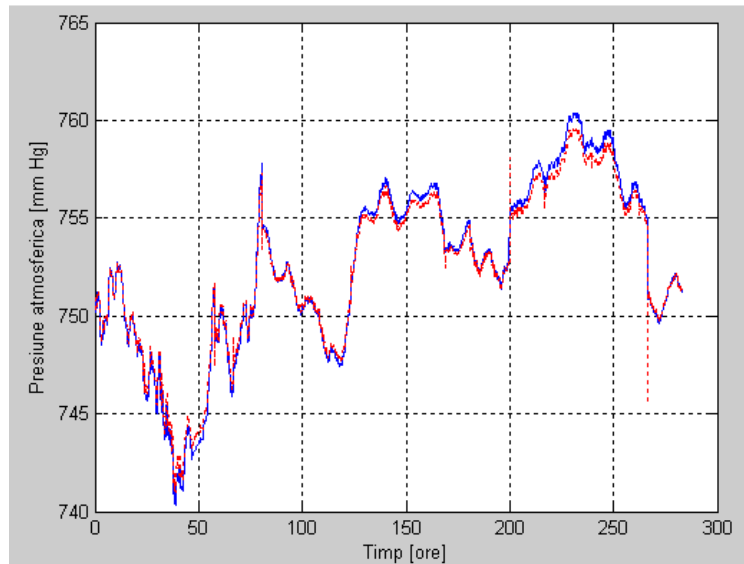
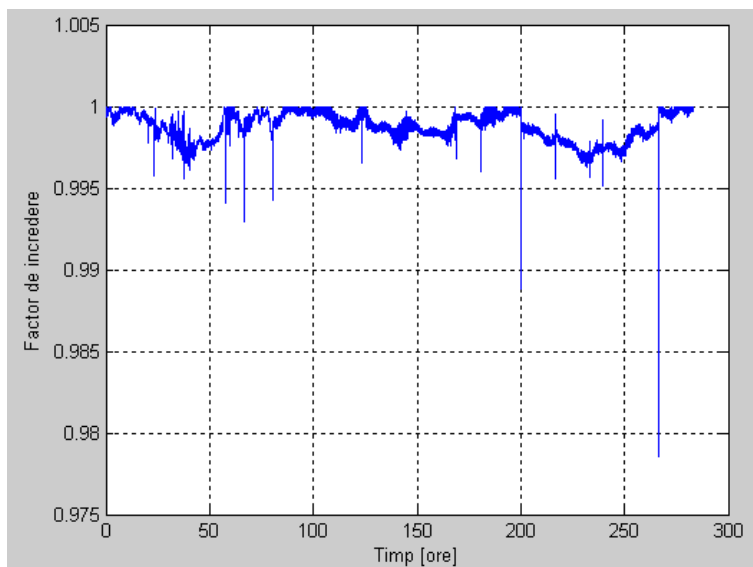


Figura 5.17. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate

Rezultatele furnizate de rețeaua neuronală, pentru primele 300 de ore din luna Aprilie 2009, sunt prezentate în Figura 5.17. Se poate observa că se asigură un nivel de calitate rezonabil, considerând o recurență de ordinul 3 la intrare.

Variația factorului de încredere, după cum se poate observa în Figura 5.18, a înregistrat, în acest caz, valori relativ ridicate, dar sub nivelul celor din cazul sistemului cu recurență de ordinul 4 studiat anterior (care au fost prezentate în Figura 5.25).

Figura 5.18. Variația factorului de încredere δ

Prin studiile efectuate, considerând rețele neuronale având o recurență de ordinul 2 la intrare, s-a observat că ordinul 2 nu asigură o funcționare corespunzătoare, ordinul minim suficient pentru a putea estima corect valoarea presiunii atmosferice, este 3, iar rezultate bune se obțin în cazul recurenței de ordinul 4. Creșterea ordinului peste aceasta valoare nu aduce îmbunătățiri semnificative, dar implică creșterea semnificativă a resurselor de calcul necesare pentru implementarea algoritmului de detecție.

5.5.1.2. Antrenarea și validarea rețelei neuronale

După cum se poate observa în Figura 5.19, rețeaua selectată, având 6 neuroni neliniari în stratul ascuns, a fost capabilă să învețe corect dinamica procesului considerat, furnizând valori estimate pentru presiunea atmosferică foarte apropiate de cele reale. Timpul este exprimat în ore, ora 0 fiind ora 00:00 din data de 01 Aprilie 2009.

Cu linie continuă, de culoare albastră s-a reprezentat variația reală a presiunii atmosferice, măsurată în mm coloana de mercur, iar cu linie întreruptă de culoare roșie s-au reprezentat valorile estimate de către rețeaua neuronală.

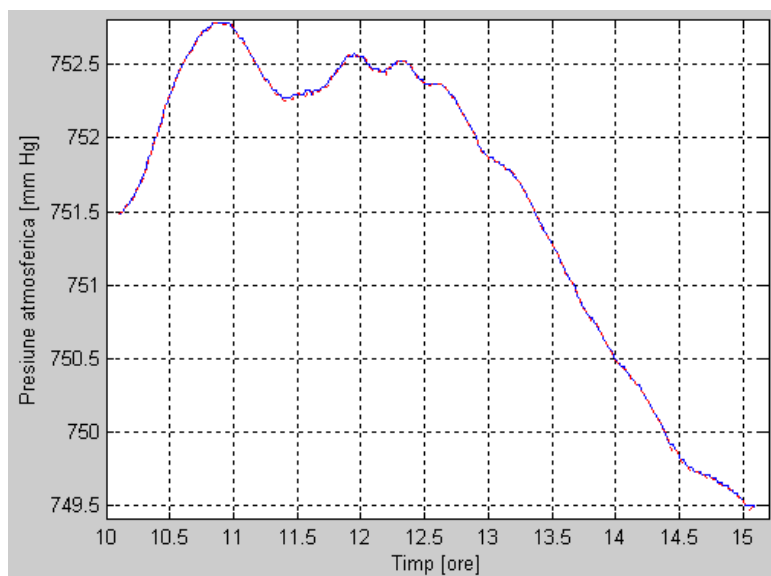


Figura 5.19. Date utilizate la antrenarea rețelei neuronale

Pentru validarea rețelei neuronale și pentru a putea aprecia modul cum aceasta poate extinde capacitatea de predicție în afara perioadei din care au fost selectate datele utilizate în faza de antrenare, s-a realizat o simulare a rețelei neuronale pentru primele 4 zile ale lunii Aprilie a anului 2009. Rezultatele au fost bune, după cum se poate observa în Figura 5.20, în care se prezintă evoluția presiunii atmosferice reale (linie continuă, de culoare albastră), respectiv valoarea estimată a acesteia (linie întreruptă, de culoare roșie), în intervalul de timp de la 1 aprilie 2009, ora 00:10 și până în 4 aprilie 2009, ora 04:10.

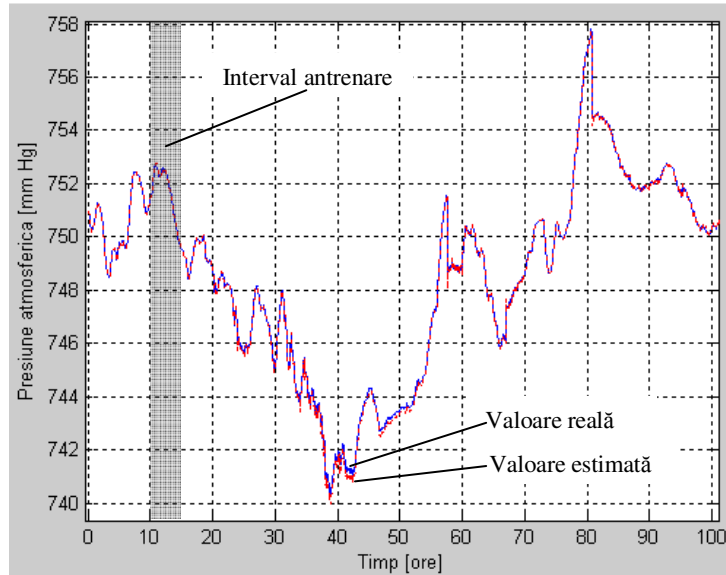


Figura 5.20. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pentru 100 ore

Pentru aceeași perioadă s-a calculat factorul de încredere δ , asociat fiecărei valori estimate, iar variația acestuia este reprezentată în Figura 5.21.

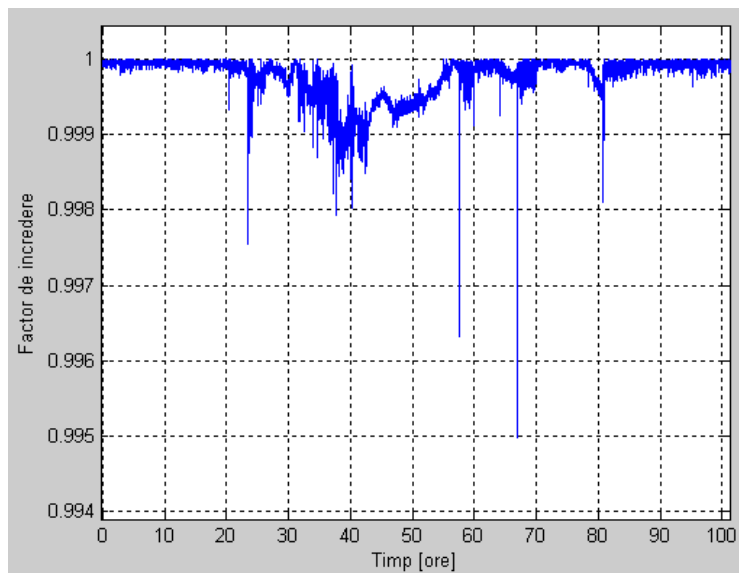


Figura 5.21 Variația factorului de încredere δ pentru 100 ore

Se poate observa că δ are valori ridicate, care conferă un grad de încredere ridicat măsurătorilor (fiind în general peste valoarea 0.998), ceea ce confirmă faptul că valorile achiziționate de senzor sunt precise. Acest lucru era de așteptat, întrucât

valorile presiunii atmosferice sunt neperturbate, și atestă acuratețea estimării realizate de rețeaua neuronală.

Antrenarea rețelelor neuronale alcătuite din două straturi ascunse s-a realizat utilizând metoda de propagare a erorii înapoi, de tip Levenberg-Marquardt, utilizând un set de date colectat în stația meteorologică având indicativul K0J4, utilizată și în studiul de caz anterior, în data de 01 Aprilie 2009, de la ora 10:10 până la ora 15:10.

Pentru validarea rețelei selectate s-a realizat simularea funcționării rețelei neuronale pe un interval de 100 de ore, iar apoi s-au comparat valorile furnizate de rețea pentru presiunea atmosferică cu valorile reale, achiziționate de senzorii stației meteorologice.

Dintre cele 50 de rețele neuronale antrenate, având 10 și respectiv 5 neuroni în straturile ascunse, s-a ales rețeaua care a reușit să învețe cel mai bine dinamica procesului considerat. În Figura 5.22, este reprezentat cu linie continuă, de culoare albastră variația reală a presiunii atmosferice, iar cu linie întreruptă de culoare roșie sunt reprezentate valorile estimate de rețeaua neuronală selectată. Se poate observa că valoarea estimată de către rețeaua neuronală, urmărește relativ bine evoluția reală a presiunii atmosferice înregistrate de senzori, dar valorile estimate de rețeaua neuronală având un singur strat ascuns cu 6 neuroni, a cărei evoluție este prezentată în Figura 5.20, este mai precisă. Simularea s-a realizat pentru primele patru zile ale lunii Aprilie, mai exact pentru intervalul 1 aprilie 2009, ora 00:10 și respectiv 4 aprilie 2009, ora 04:10.

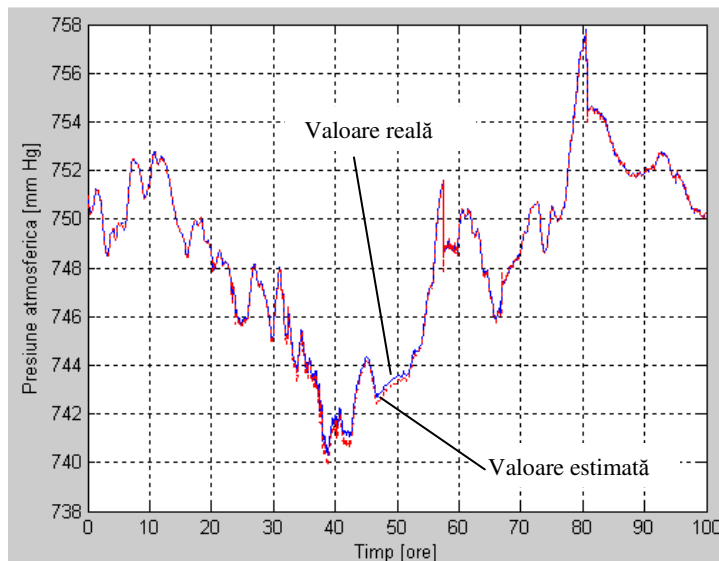
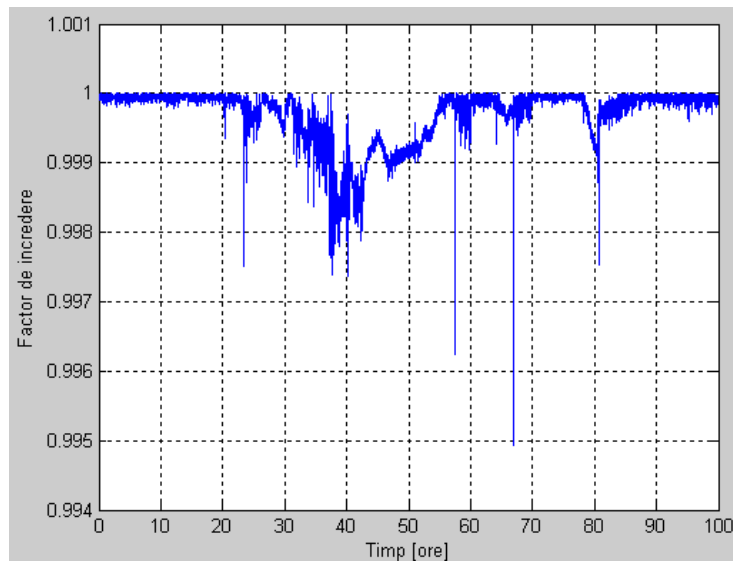


Figura 5.22. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pentru 100 ore

Variația factorului de încredere δ , calculat pentru intervalul de timp considerat, este reprezentată în Figura 5.23. Valorile ridicate ale acestuia confirmă performanțele bune ale rețelei neuronale, având valori situate în general peste valoarea de 0.998.

Figura 5.23. Variația factorului de încredere δ

Comparând valorile factorului de încredere din Figura 5.23, cu cele înregistrate de o rețea având un singur strat ascuns alcătuit din 6 neuroni, prezentate în Figura 5.21 se poate concluziona că în acest caz, performanțele rețelei neuronale cu doua straturi ascunse sunt inferioare celor înregistrate de rețeaua neuronală având un singur strat ascuns, în special în intervalul orar [30, 55]. Pe baza rezultatelor obținute se recomandă utilizarea rețelelor cu un singur strat ascuns în cadrul structurii de detecție a anomaliilor funcționale înregistrate la sistemul de măsurare a presiunii atmosferice.

5.5.1.3. Detecția erorilor pe perioadă lungă și în condiții de lipsa a valorilor măsurate

Se obține aceeași predicție bună și extinzând domeniul de timp pe întreaga luna Aprilie 2009, ora 10:10 AM, după cum este prezentat în Figura 5.24.

De asemenea rezultatele înregistrate atestă faptul că nu este necesară reantrenarea zilnică a rețelei, aceasta putând estima corect presiunea atmosferică pe termen lung mai lung.

În Figura 5.24 se observă trei zone în care eroarea de predicție este mare, dar în acele intervale de timp, sistemul automat de măsurători de suprafață considerat nu a furnizat date, predicția realizându-se cu valori prea vechi și astfel au apărut erorile semnalate.

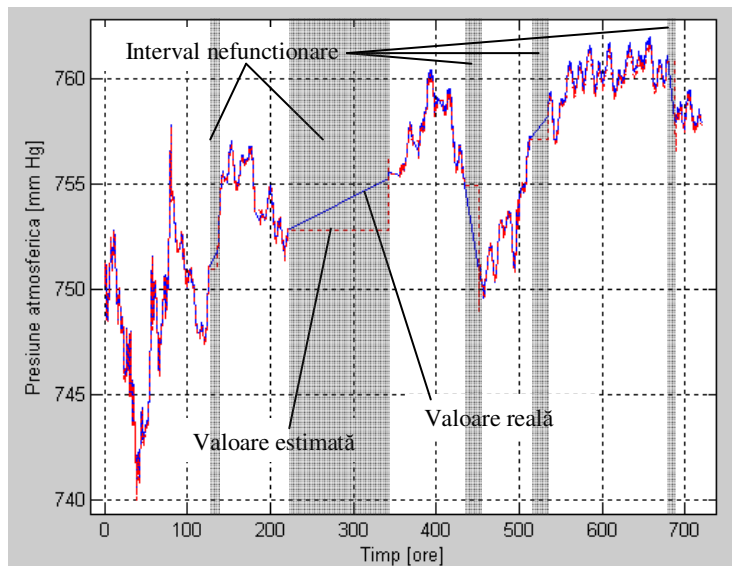


Figura 5.24 Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pe parcursul lunii Aprilie 2009

Aceste erori pot fi evidențiate și din evoluția factorului de încredere (Figura 5.25). În perioada considerată se observă că există puține momente de timp în care factorul de încredere coboară sub nivelul de 0.997, dar fără a depăși un nivel rezonabil de 0.983.

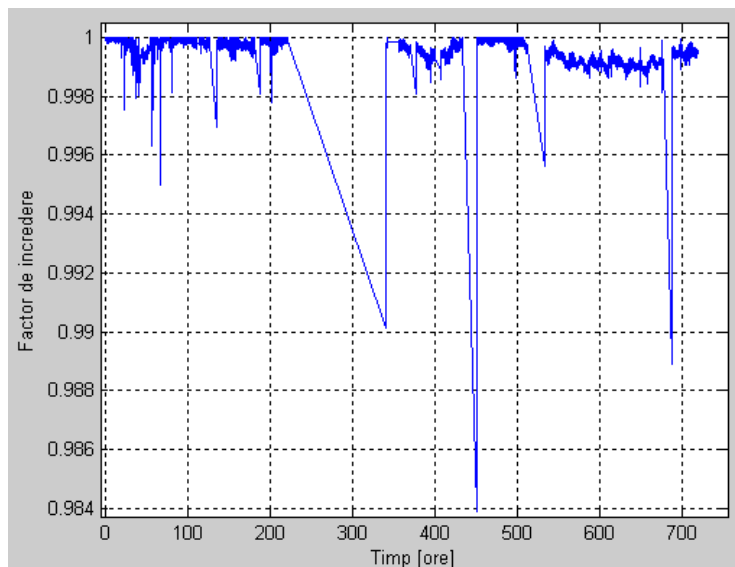


Figura 5.25. Variația factorului de încredere δ pe parcursul lunii Aprilie 2009

În Figura 5.26 se prezintă un detaliu din Figura 5.24, considerând intervalul de timp de la ora 330 la ora 380, scoțând în evidență perioadele de funcționare,

respectiv de nefuncționare ale sistemului ASOS. Se poate observa că senzorul nu a furnizat date pe intervalul de timp cuprins între orele 223 și 343. Imediat ce senzorul a reintrat într-un regim normal de funcționare, transmitând valorile presiunii spre modulul de procesare/transmitere date, rețeaua neuronală a început să furnizeze și ea valori estimate foarte apropiate de cele reale.

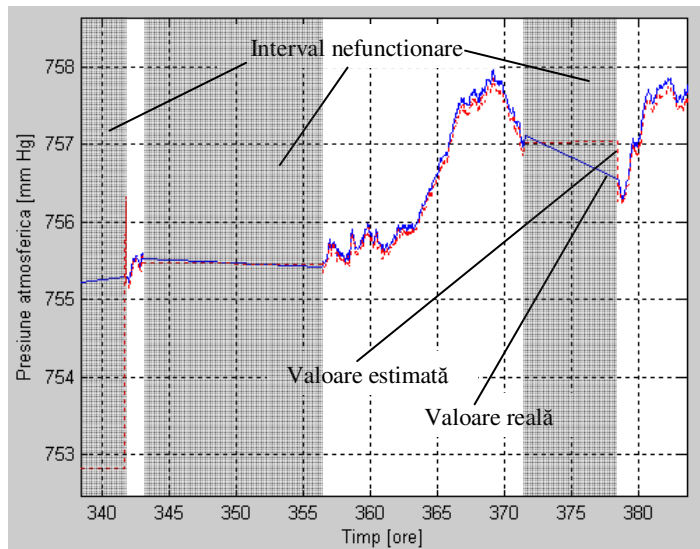


Figura 5.26 Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate după ce se restabilește funcționarea senzorului

Între momentele 344 și 380 mai apar două perioade în care senzorul nu funcționează, dar se observă că predicția reintră într-o marjă de eroare adecvată, fără a fi necesară recalibrarea sistemului.

În general, s-a constatat că în cazul perioadelor de nefuncționare a senzorului mai lungi de 3 minute, primele 2 valori predictate, de după restabilirea funcționării senzorului au o eroare mai mare, după care rețeaua reia predicția corectă a presiunii atmosferice.

5.5.1.4. Detecția erorilor în cazul unei perturbații aleatoare, de scurtă durată

În practică valoarea măsurată de senzor pentru presiunea atmosferică poate să fie perturbată, în consecință s-a considerat un caz de studiu în care semnalul corespunzător presiunii atmosferice a fost perturbat cu un semnal aleatoriu, de scurtă durată, de medie nulă, cu valori uniform distribuite, și un domeniu de variație de $\pm 10\%$ relativ la semnalul util, care se aplică cu intermitențe. Astfel, la fiecare 6 ore (adică 360 de eșantioane) de funcționare s-a aplicat sistematic, o perturbație aleatoare de scurtă durată.

Rezultatul simulării pe o durată de 100 ore, începând cu 1 aprilie 2009, ora 0:10 este prezentat în Figura 5.27.

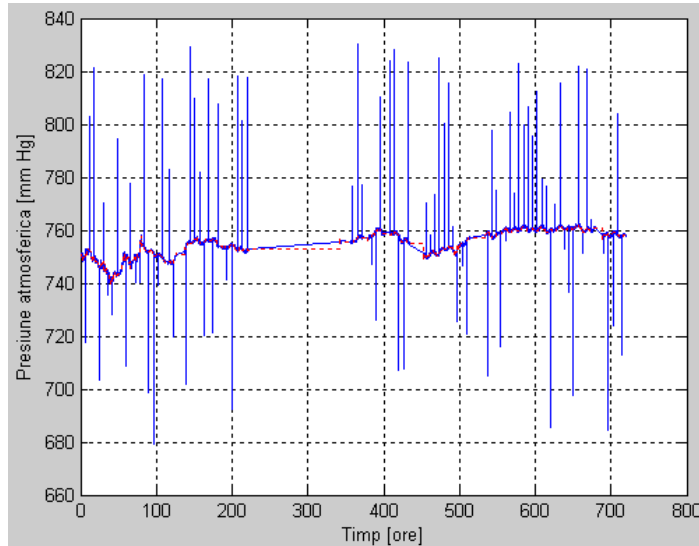


Figura 5.27. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pe parcursul lunii Aprilie 2009

Variația factorului de încredere în acest caz este reprezentată în Figura 5.28. Se observă că sunt corect detectate eşantioanele care sunt determinate cu o eroare mai mare.

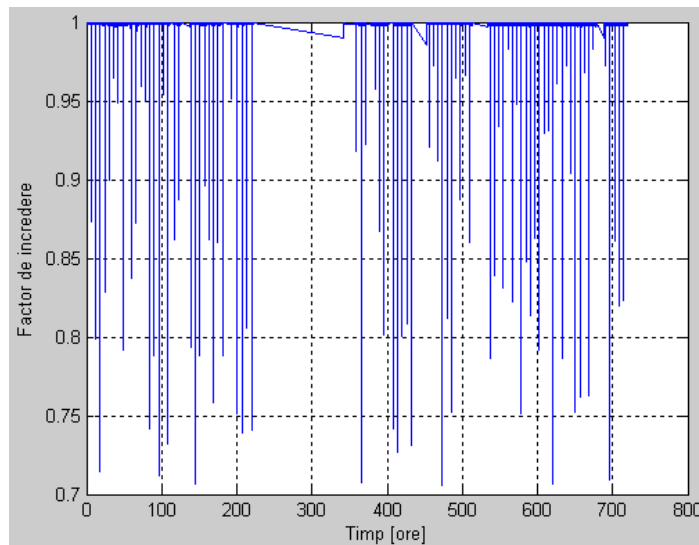


Figura 5.28. Variația factorului de încredere δ pe parcursul lunii Aprilie 2009

În figurile 5.29, a și respectiv b se prezintă un detaliu în intervalul orar 365-371, pentru a putea observa mai bine comportamentul rețelei neuronale imediat după dispariția perturbației.

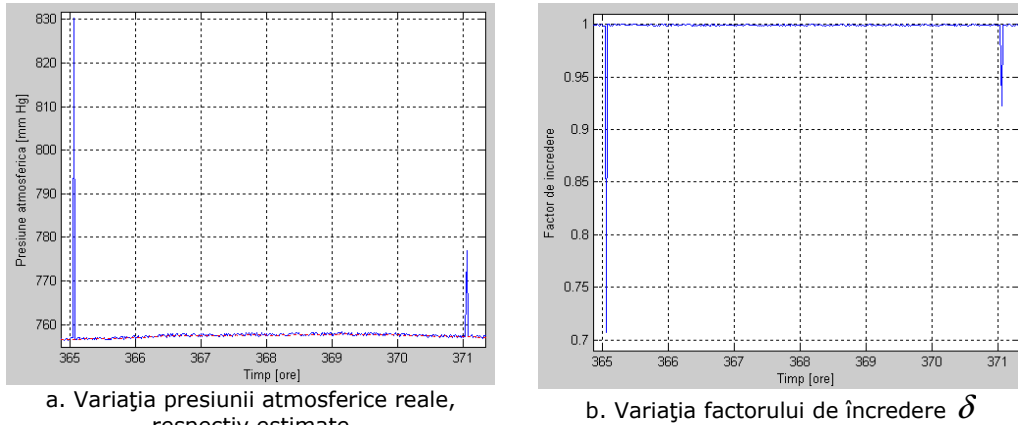


Figura 5.29. Detaliu între orele 365 - 371

Un alt caz de studiu a fost realizat utilizând rețeaua neuronală având două straturi ascunse, în care presiunea atmosferică a fost perturbată cu un semnal aleatoriu intermitent, de medie nulă, cu valori uniform distribuite, având un domeniu de variație de $\pm 10\%$ relativ la semnalul util. Astfel, la fiecare 6 ore (adică 360 de eşantioane) de funcționare s-a aplicat o perturbație aleatoare de scurta durată.

Rezultatul simulării pe o durată de 100 ore, începând cu 1 aprilie 2009, ora 0:10 este prezentat în Figura 5.30.

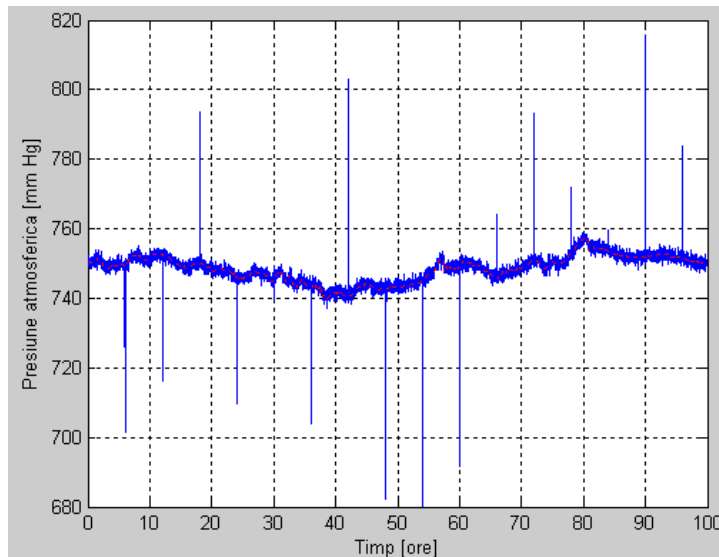


Figura 5.30. Variația presiunii atmosferice măsurate, respectiv estimate pe parcursul luni a 100 ore de funcționare

Pentru a se detecta valorile eronate (înregistrate din 6 în 6 ore) se calculează, cu ajutorul structurii prezentate în Figura 5.4, factorul de încredere δ . Acesta este prezentat în Figura 5.31. Se observă că valoarea factorului de încredere

scade mult în momentul acționării perturbației, permițând practic detectarea valorilor eronate ale presiunii atmosferice.

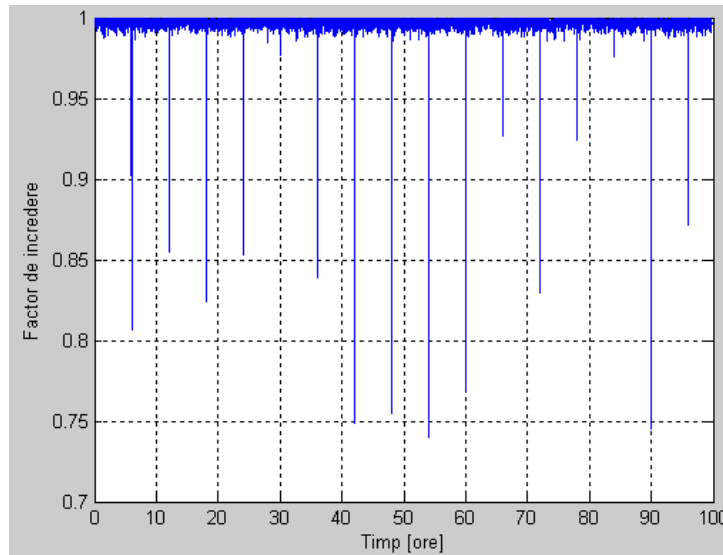
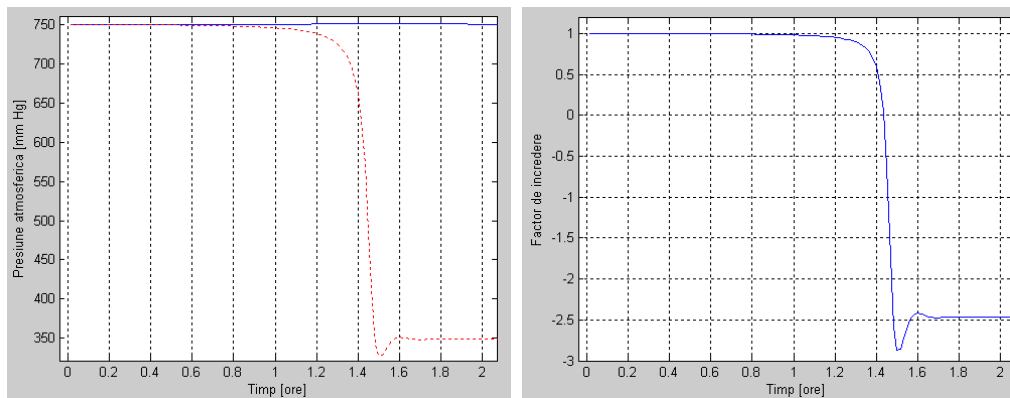


Figura 5.31 Variația factorului de încredere δ în cazul unor anomalii sporadice

5.5.1.5. Detecția erorilor în cazul funcționării decuplate de sistemul de achiziție de date

O soluție posibilă în cazul în care valoarea furnizată de senzori este cu un factor de încredere scăzut, sau lipsește, constă în utilizarea valorii estimate de rețea pe post de valoare corectă pentru presiunea atmosferică curentă. Pentru a verifica această posibilitate s-a realizat un experiment, în care s-a plecat de la 4 valori reale ale presiunii, iar apoi la intrarea rețelei neuronale s-au introdus numai valori estimate de către aceasta, funcționarea rețelei fiind decuplată de procesul real. În acest mod de funcționare, la intrarea rețelei neuronale sunt aduse valori predicționate de către aceasta, în locul valorilor reale măsurate de senzori.

După cum se poate observa din Figura 5.32, după o ora de funcționare în aceste condiții, valoarea estimată converge spre o valoare diferită de cea reală, devenind practic neutilizabilă.



a. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate

b. Variația factorului de încredere δ

Figura 5.32. Estimare bazată exclusiv pe valori estimate anterior

Un detaliu de la începutul funcționării decuplate, arată că practic estimarea este corectă în primele 23 perioade de eșantionare – vezi Figura 5.33, unde cu linie continuă s-a reprezentat evoluția reală a presiunii atmosferice, iar cu cercuri s-au reprezentat valorile estimate pentru aceasta.

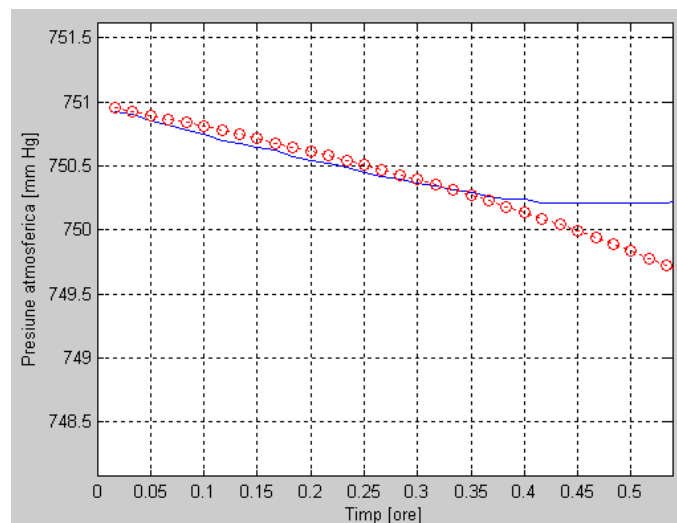
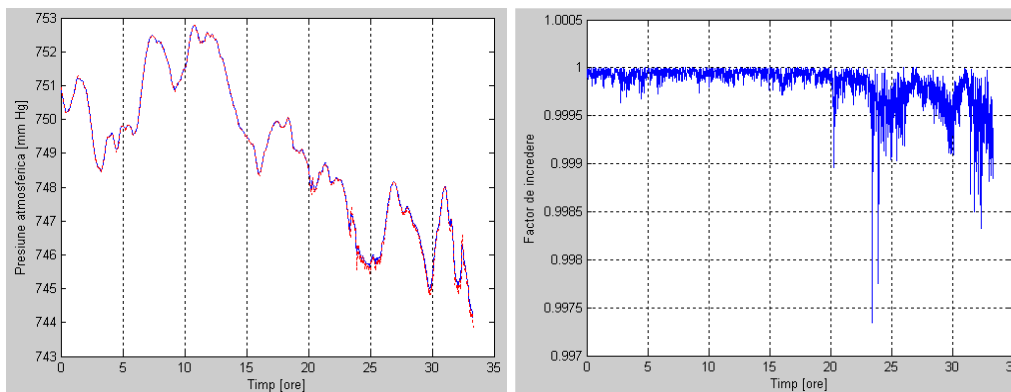


Figura 5.33. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pe parcursul a jumătate de oră de funcționare decuplată de procesul real

5.5.1.6. Funcționarea sistemului de detecție a anomaliilor funcționale în cazul erorilor consecutive

Situația considerată a presupus furnizarea alternativă de către senzor de valori corecte și respectiv eronate. Înlocuind valorile eronate cu cele estimate de către rețeaua neuronală, plecând inițial de la 4 valori reale ale presiunii, rezultă o estimare precisă a presiunii atmosferice, după cum se poate observa în Figura

5.34.a. Valorile factorului de încredere sunt situate peste valoarea de 0.998 (cu excepția a 2 momente de eșantionare, dar nici atunci aceasta nu scade semnificativ), după cum este prezentat în Figura 5.34.b.



a. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate

b. Variația factorului de încredere δ

Figura 5.34. Estimare bazată exclusiv pe valori estimate anterior

În Figura 5.35 este prezentat un detaliu din jurul orei 18, în data de 1 Aprilie 2009, pentru a se putea observa mai bine diferențele dintre valorile reale (linie continuă) și cele estimate de rețeaua neuronală (marcate cu cercuri în figură).

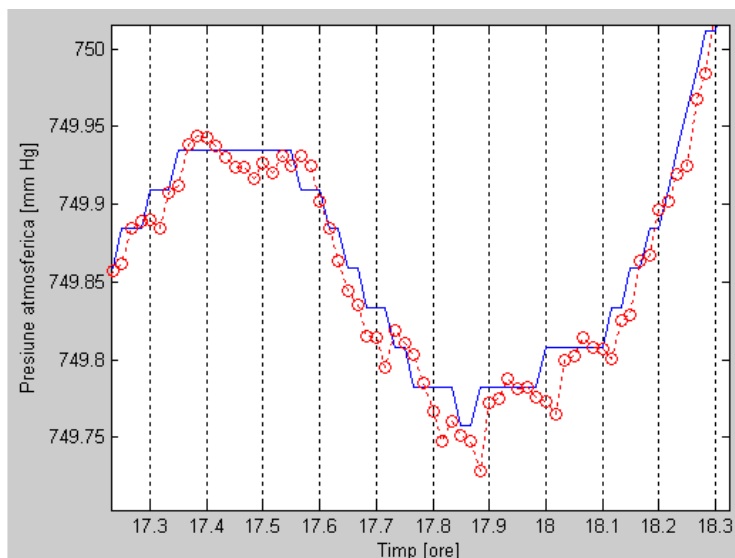


Figura 5.35. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pe parcursul a 60 minute în jurul orei 18

Acest caz de studiu a dovedit faptul că metoda propusă funcționează corect dacă senzorul furnizează alternativ valori corecte și valori eronate.

Un alt studiu s-a realizat pentru a stabili care este numărul de valori eronate consecutive pentru care metoda propusă prezintă încă o funcționare adecvată.

Considerând că senzorul furnizează două valori eronate la fiecare 30 minute, și utilizând la efectuarea predicției valorii curente a presiunii, în locul acestora (detectate ca fiind eronate) valorile estimate anterior, se obține o variație de forma celei reprezentate cu linie albastră în Figura 5.36. Cu linie de culoare roșie s-a reprezentat variația reală a presiunii atmosferice (neafectată de erori).

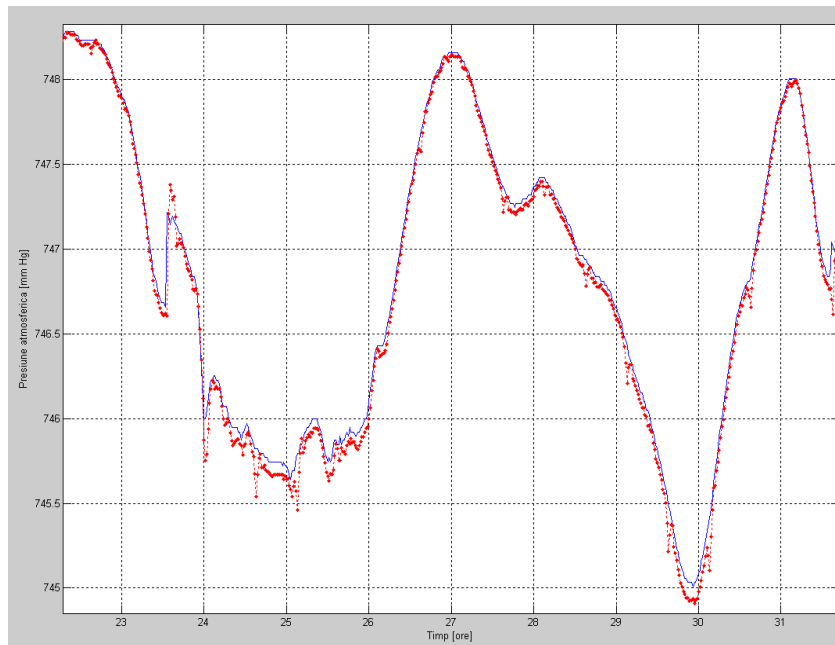


Figura 5.36. Variația presiunii atmosferice reale, respectiv estimate pe parcursul a 10 ore, considerând 2 valori eronate consecutive la fiecare 30 minute

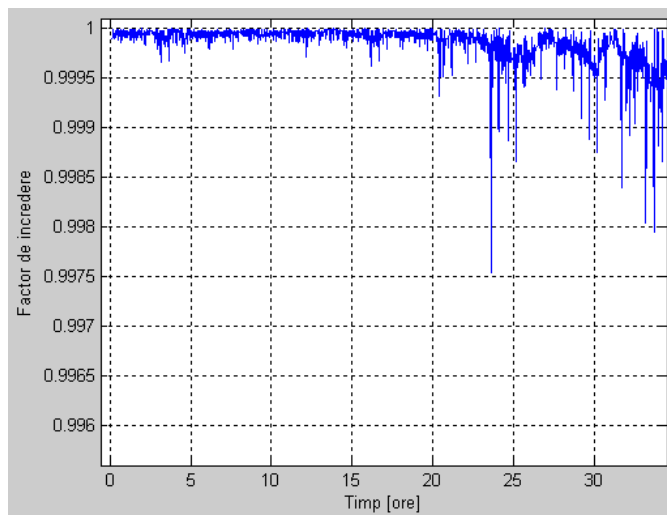


Figura 5.37 Variația factorului de încredere δ considerând 2 valori eronate consecutive la fiecare 30 minute

În figura 5.37 se prezintă factorul de încredere δ calculat pentru valoarea estimată, valorile ridicate ale acestuia arată calitatea bună a predicției realizate de rețeaua neuronală în acest caz.

Studiile efectuate demonstrează utilitatea soluției propuse pentru determinarea valorilor eronate furnizate de funcționarea defectuoasă a senzorului de presiune, în condițiile în care nu apar mai mult de 2 valori eronate consecutive.

Structura propusă în Figura 5.4, poate fi implementată la nivelul nodului rețelei de senzori, pentru a evita propagarea valorilor eronate prin rețea, spre utilizatorul final.

5.5.2. Detecția și tratarea erorilor la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații de la senzori redundanți

Stațiile meteorologice din componenta sistemului ASOS sunt dotate cu 3 senzori pentru măsurarea presiunii atmosferice. Astfel, detecția erorilor la măsurarea presiunii atmosferice la nivelul stației meteorologice poate fi realizată în diverse moduri:

- utilizarea structurii de detecție și corecție a erorilor prezentate în paragraful 5.5.3 pentru fiecare sensor în parte, independent de ceilalți doi senzori redundanți;
- utilizarea valorilor furnizate de către senzorii redundanți la validarea, sau după caz corecția, valorii furnizate de senzorul curent, conform structurii prezentate în Figura 5.38. În acest caz se calculează eroarea ε_1 , ca diferența dintre valoarea măsurată de senzorul curent (notată cu U_{s1}) și valoarea medie calculată pe baza informațiilor furnizate de senzorii 2 și 3 (notată cu \bar{U}_{s23}). Dacă ε_1 are o valoare peste limita admisă, se va genera eroare și se va furniza valoarea \bar{U}_{s23} în locul informației achiziționate de către senzorul 1;

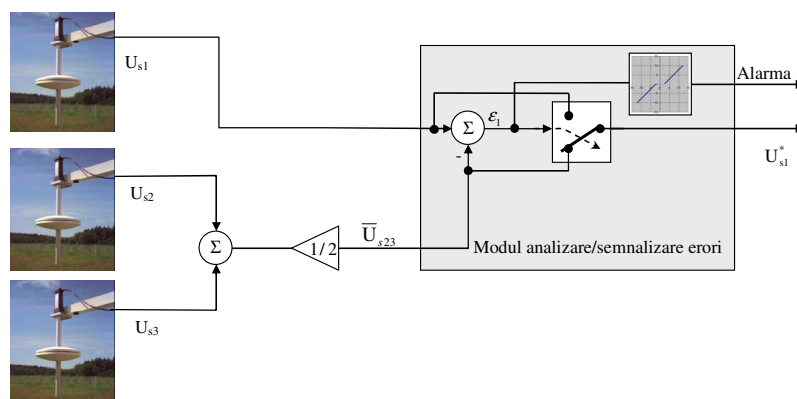


Figura 5.38 Structura pentru detecție și corecție a erorilor bazată pe senzori redundanți

- utilizarea structurii de detecție și corecție a erorilor care să țină cont atât de valorile curente înregistrate de cei 3 senzori, cât și de dinamica acestora, conform structurii prezentate în Figura 5.39.

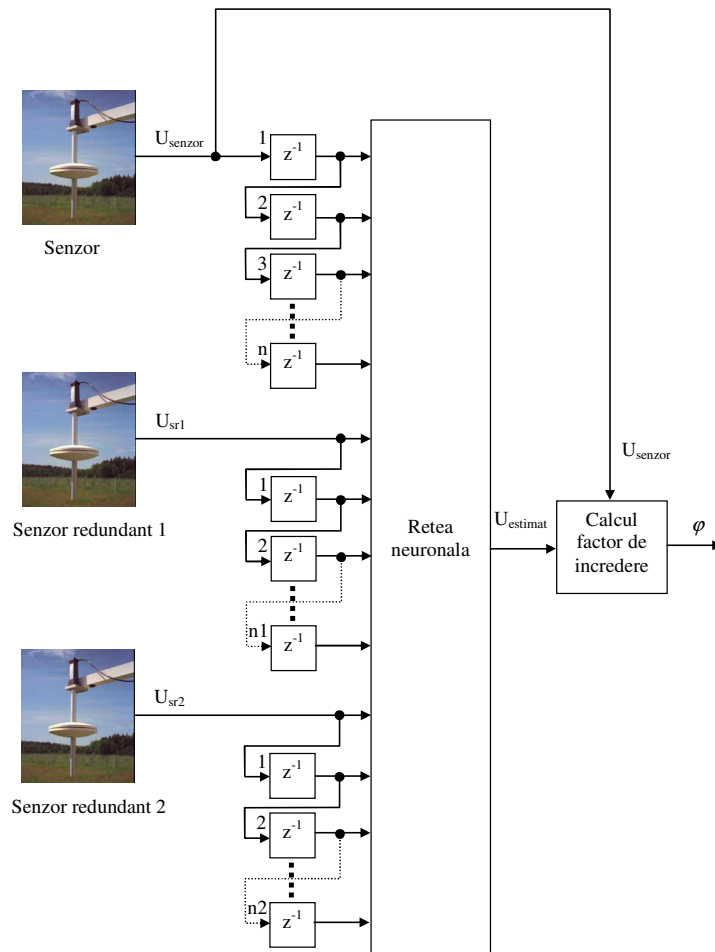


Figura 5.39. Structura pentru detecția și corecția erorilor, a erorilor bazată pe senzori redundanți cu rețea neuronală

Pentru a valida structurile propuse s-au considerat date referitoare la presiunea atmosferică, măsurate pe parcursul lunii aprilie 2009, în stația meteorologică, având indicativul OK0J4. Deși cei 3 senzori ai stației au monitorizat variația presiunii atmosferice în aceeași arie geografică, s-au înregistrat mici diferențe între valorile furnizate de către aceștia, după cum se poate observa în Figura 5.40, unde este reprezentată cu linie de culoare roșie variația presiunii înregistrate de senzorul 1, cu linie albastră presiunea determinată de senzorul 2, respectiv cu linie de culoare verde valoarea înregistrată de senzorul 3. Pentru a se putea observa mai bine diferențele dintre valorile furnizate de către cei 3 senzori s-a reprezentat un detaliu din data de 7 aprilie 2009, între orele 6.00 și 8.00 AM.

Valoarea estimată pentru presiunea atmosferică (determinată pe baza informațiilor de la senzorii 2 și 3, conform Figurii 5.38) este reprezentată cu linie de culoare mov ($\bar{U}_{s_{23}}$). Pentru intervalul de timp considerat, valoarea estimată $\bar{U}_{s_{23}}$ este apropiată de evoluția reală, marcată cu U_{s_1} .

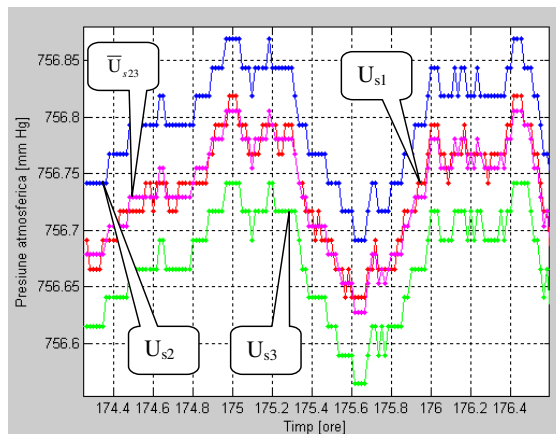


Figura 5.40 Variația presiunii atmosferice în 7 aprilie

S-au înregistrat însă și situații în care diferențele dintre valorile estimate și cele reale ale presiunii atmosferice au fost mai mari, după cum se poate observa în Figurile 41 a și b. Astfel, în data de 17 aprilie, intervalul orar 19-22, senzorii redundanți au furnizat valori mai ridicate decât senzorul curent, rezultând o eroare de estimare relativ ridicată (Figura 41.a). O altă situație în care eroarea de estimare este ridicată s-a înregistrat în data de 24 aprilie, orele 15.00-15.48 (prezentată în Figura 41.b), când ambii senzori redundanți au furnizat valori mai scăzute decât valoarea senzorului curent.

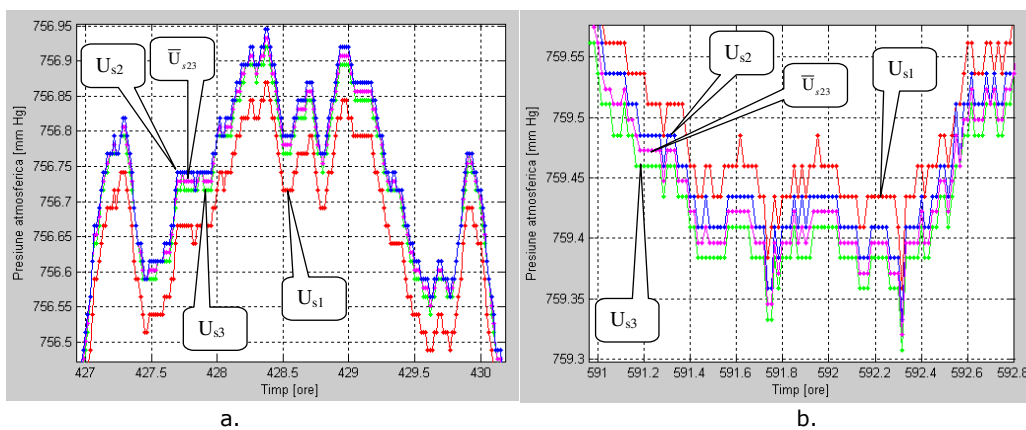
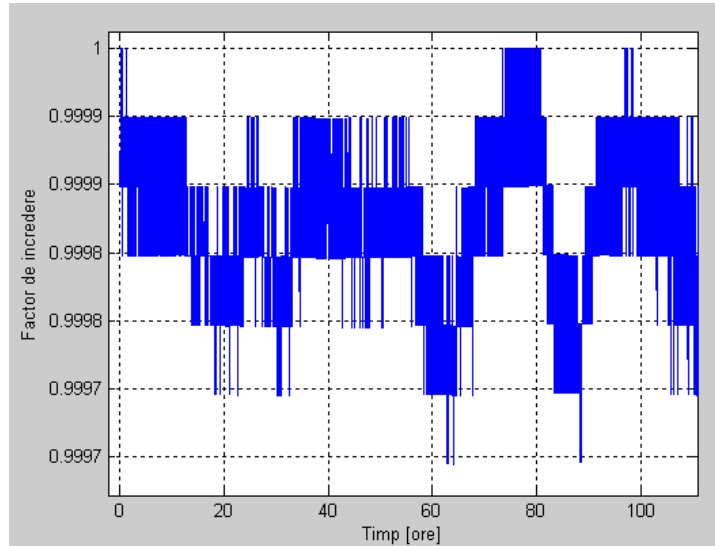


Figura 5.41 Variația presiunii atmosferice

În ansamblu, metoda de detecție propusă a funcționat corect, putând identifica corect valorile eronate, și permițând furnizarea de valori estimate corecte, pentru a substitui valorile eronate ale presiunii atmosferice.

Figura 5.42 Variația factorului de încredere δ

În Figura 5.42, se prezintă variația factorului de încredere δ pentru primele 4 zile ale lunii aprilie, calculată pe baza relației (5.2), considerând valoarea presiunii furnizate de senzorul 1 și respectiv valoarea estimată \bar{U}_{s23} . Prin valorile ridicate ale acestuia se certifică corectitudinea datelor măsurate de către senzorul 1 pentru presiunea atmosferică.

5.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol, într-o primă etapă, s-a elaborat un studiu sintetizator privind problematica detecției erorilor funcționale din cadrul rețelelor de senzori, precum și o clasificare a acestora pe baza a diverse criterii. De asemenea, s-a efectuat o analiză critică asupra celor mai referite/utilizate metode de detecție a erorilor din cadrul rețelelor de senzori. Analiza realizată s-a constituit ca premisa pentru elaborarea unei strategii bazate pe rețele neuronale, propuse, implementate și validate, pentru cazul unei rețele de senzori utilizate la monitorizarea parametrilor meteorologici.

Metoda propusă poate fi generalizată putând fi utilizată și în cazul altor procese supravegheate de rețele de senzori, condiția necesară fiind ca aceste procese să aibă un comportament predictibil, pe un anumit orizont de timp.

Pentru detecția și tratarea erorilor funcționale din cadrul unei rețele de senzori, particularizată aplicativ pentru un sistem de monitorizare a fenomenelor meteorologice, au fost dezvoltate două abordări:

- *o abordarea centralizată* – caz în care structura neuronală este localizată în afara rețelei de senzori - la nivelul sistemului central de stocare și prelucrare a datelor;
- *o abordarea distribuită* – caz în care structura neuronală este implementată la nivelul fiecărui nod al rețelei de senzori.

Structurile de detecție și tratare a erorilor funcționale utilizate în cazul monitorizării presiunii atmosferice (caz particular de studiu), au fost implementate testate și validate utilizând date măsurate și furnizate de către senzori componenți ai sistemului meteorologic ASOS [152] (dimensiunea setului de date avute la dispoziție permițând validarea soluției propuse).

Pentru determinarea structurii rețelei neuronale (ca element principal al strategiei de detecție adoptate), s-au realizat o serie de scenarii de testare, luând în considerare diferite structuri de rețele neuronale (diferind prin numărul de straturi ascunse, numărul de neuroni componenți, ordinul recurenței de la intrare). În urma studiilor realizate s-a determinat un optim structural (corelând acuratețea predicției realizate cu gradul de complexitate al rețelei neuronale), reprezentat de o rețea neuronală având un singur strat ascuns, constituit din 6 neuroni, cu funcție de activare neliniară și o recurență de ordinul 4 pe intrare. Orice creștere a complexității rețelei neuronale (prin adăugare de neuroni suplimentari, de straturi ascunse sau prin creșterea ordinului recurenței) nu aduce îmbunătățiri majore procesului de detecție/tratare a anomaliilor.

Rețeaua neuronală selectată a fost integrată în cadrul structurii de detecție a erorilor – strategia astfel sintetizată fiind testată considerând diferite condiții de operare. Astfel, pentru perioade lungi de timp, structura de detecție a avut o funcționare corectă, identificând cu acuratețe existența unor valori eronate (cauzate de perturbații interne/externe), respectiv generând valori estimate (de substituție) cu o precizie corespunzătoare. Rezultate similare s-au obținut și în cazul în care sistemul de achiziție nu furnizează deloc valori (dar pentru durate scurte de timp - 1-3 minute), lipsa acestora fiind suplinită prin valorile generate predictiv de rețeaua neuronală. În cazul în care perturbația este de lungă durată (mai mult de 5 minute), acuratețea predicției realizate de rețeaua neuronală nu este întotdeauna satisfăcătoare, însă, imediat după restabilirea funcționării corecte a senzorului, structura de detecție reintră în parametri normali de funcționare, estimând și suplینind suficient de precis noile valori eronate/lipsă. S-a realizat, de asemenea, și un studiu de caz privind posibilitatea utilizării structurii de detecție a erorilor decuplată de sistemul de achiziție de date (simulând astfel o cădere totală a acestuia), încercându-se generarea de valori estimate care să suplinească valorile reale lipsă. Rezultatele și în acest caz au fost bune însă doar pe un orizont de timp limitat.

În finalul capitolului, trecându-se abordarea centralizată, s-au sintetizat două structuri de detecție a erorilor înregistrate la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații provenite de la senzori redundanți. Prima dintre structuri este bazată pe o logică de detecție și tratare a erorilor de tip clasic, utilizând elemente comparatoare, sumatoare și cu zona de insensibilitate, în timp ce a doua structură propusă utilizează o rețea neuronală pentru predicția de valori corespunzătoare mărimii măsurate. Studiile de caz au utilizat date provenite dintr-un nod al rețelei de senzori meteorologici dotat cu 3 senzori de presiune distincți, a căror valori măsurate nu au coincis în totalitate, fiecare senzor având o dinamică proprie.

ANEXA 5.1. REȚEAUA DE SENZORI METEOROLOGICI (ASOS)

Sistemul Automat De Observații De Suprafață (ASOS) este un proiect dezvoltat de National Weather Service (NWS), Federal Aviation Administration (FAA), și respectiv de către Department of Defense (DOD) din cadrul Statelor Unite ale Americii început în septembrie 1992. Acesta este un sistem distribuit de monitorizare a parametrilor meteorologici de pe suprafața Statelor Unite ale Americii, care constă dintr-o rețea de senzori amplasați pe întreg continentul american. Sistemul furnizează observații meteorologice în principal pentru entitățile implicate în activități de prognoză meteorologică și pentru operațiuni aviatice, dar de asemenea vine în sprijinul comunității științifice care întreprinde cercetări în domeniul meteorologic, hidrologic și climatologic.

De vreme ce sistemul furnizează informații despre parametrii meteorologici critici pentru comunitatea aviatcă, cum ar fi vizibilitatea atmosferei, viteza vântului, nivelul de precipitații etc., unul dintre principalii dezvoltatori ASOS este chiar autoritatea aeronautică FAA - care a suportat peste jumătate din costul dezvoltării sistemului până în anul 2002, după cum este prezentat în Tabelul 5.1. [151]

Tabel 5.1 – Contribuția dezvoltatorilor ASOS la implementarea sistemului în perioada 1992-2002

Dezvoltatori	Numărul de locații	Cost total milioane USD
FAA	569	236
NWS	314	122
DoD	110	44
Total	993	402

ASOS a înlocuit operatorii umani din multe stații meteorologice cu sisteme automate de achiziție și transmisie a datelor, iar studiile efectuate pe parcursul anilor a dovedit că acest fapt nu a afectat în vreun fel calitatea datelor furnizate.

Având cel mai mare volum de senzori moderni pentru monitorizarea parametrilor meteorologici, ASOS a permis extinderea considerabilă a informațiilor disponibile pentru meteorologi și comunitatea aviatcă, dublând practic numărul stațiilor meteorologice de pe teritoriul statelor Unite ale Americii, care lucrează în regim non-stop, furnizând informații în fiecare minut, 24 de ore pe zi. Datele achiziționate sunt stocate timp de 12 ore la nivelul stației respective, iar apoi pachetele de date sunt transmise prin rețeaua de comunicații spre nodul central.

Datorită faptului că datele sunt destinate aeronauticii un număr important de stații meteorologice sunt amplasate chiar în locul unde cunoașterea exactă a acestora este cea mai importantă și anume în apropierea pistelor aeroporturilor. Tot pentru uz aviatcă, există un sistem de conversie automată a datelor în mesaje audio, care pot fi ascultate direct de către piloții avioanelor. ASOS transmite automat rapoarte speciale când se înregistrează anumite evenimente, cum ar fi faptul că vizibilitatea scade sub 3 mile.

ASOS măsoară în permanență parametrii meteorologici, la momentele de eșantionare stabilite, doar în apropierea senzorilor disponibili. Aria din jurul senzorilor în care datele furnizate de aceștia se consideră valide este prezentată în tabelul 5.2.

Tabel 5.2 – Zona de acoperire a senzorilor

Parametru	Raza acoperita de senzor [mile]
Parametrii cer (plafon de nori, tip)	3-5
Vizibilitate	2-3
Precipitații	1-2
Temperatura / Punct de roua	5
Vânt	1-2
Presiune atmosferica	5

Rapoartele generate la fiecare minut sunt obținute pe baza datelor acumulate pe următorul interval de timp, de până la momentul de raportare:

- Înălțimea plafonului de nori: 30 secunde
- Vizibilitate: 1 minut
- Photometer: 1 minut
- Vreme (tip si intensitate precipitații) 1 minut
- Chiciura 1 minut
- Temperatura/Punct de roua 1 minut
- Vânt 2 minute
- Presiune 1 minut
- Acumulări de precipitații 15 minute
- Fulgere 1 minut

Pagina 1 din raport conține informații primare referitoare la vânt (viteza medie pe 5 secunde, direcție pe 5 secunde, respectiv viteza medie pe 2 minute, direcție pe 2 minute), și vizibilitate, iar pagina a doua a raportului conține informații despre temperatura/ punct de roua și respectiv presiune atmosferică.

Rapoartele mai conțin informații despre evenimente semnificative cum ar fi: plafon de nori variabil, vizibilitate variabilă, momentul de început și de sfârșit al precipitațiilor, variații rapide de presiune atmosferică, tendința de variație a presiunii atmosferice, pale de vânt, intensitate maximă a vântului.

ANEXA 5.2. STRUCTURA DATELOR ACHIZITIONATE

Datele achiziționate de la punctele de observare meteo, se stochează în baza de date în 2 tabele distincte [145] [146]:

- DATA SET 6405 (DSI-6405) - ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 1 DATA
- DATA SET 6406 (DSI-6406) - ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 2 DATA

Fiecare element este clasificat în funcție de tipul datelor corespunzătoare în două categorii:

- numerice de exemplu: anul, data, luna, presiunea atmosferică, temperatura, punctul de rouă.
- alfanumerice, de exemplu: tipul de precipitații (NP -no precipitation), codul WBAN.

Elementele care sunt stocate în ambele seturi de date, 6405 și respectiv 6406, sunt următoarele:

- **cod WBAN** (**W**eather **B**ureau, **A**rm~~y~~,**N**avy) – este un număr unic de identificare a stației meteo, atribuit de către NCDC (National Climatic Data Center).
- **cod ICAO** – reprezintă un identificator de locație, de 4 caractere, litere și cifre, atribuit de FAA, Department of the Navy, Transport Canada, FCC și NWS.
- **cod stație** – reprezintă un identificator de locație care poate conține 3 sau 4 caractere alfanumerice, atribuit de FAA, Department of the Navy, Transport Canada, FCC și NWS.
- **an** – anul în care s-a realizat observația, utilizând 4 digiți, cu referință la LST (Local Standard Time).
- **luna** – luna în care s-a realizat observația, utilizând 2 digiți, cu referință la LST (Local Standard Time). Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [01,12].
- **ziua** – ziua în care s-a realizat observația, utilizând 2 digiți, cu referință la LST (Local Standard Time). Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [01,31].
- **ora** – ora în care s-a realizat observația, utilizând 2 digiți, cu referință la LST (Local Standard Time). Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [00,23].
- **minutul** – minutul în care s-a realizat observația, utilizând 2 digiți, cu referință la LST (Local Standard Time). Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [00,59].

Elementele care sunt stocate în pagina 1, setul de date 6405, sunt următoarele:

- **VCF1 - coeficient de vizibilitate 1** – corespunzător primului senzor de vizibilitate din punctul de observații; senzorii ASOS eșantionează condițiile de vizibilitate cu o perioadă de 30 secunde, și calculează un coeficient de vizibilitate mediu pe minut, pe baza eșantioanelor din ultimele 10 minute.

Coefficientul este calibrat în funcție de zi sau noapte. Vizibilitatea în mile (V) se poate calcula cu ajutorul acestui coeficient (c), după cum urmează:

$$\begin{aligned} \text{pe timp de zi:} & \quad V = 3/c \\ \text{pe timp de noapte:} & \quad 0.00336 = [e^{**(-c*V)}]/V \end{aligned}$$

- **VCF2 - coeficient de vizibilitate 2** – corespunzător celui de al doilea senzor de vizibilitate din punctul de observații
- **D360 - direcția vântului (la 2 minute)** – reprezintă direcția medie din care bate vântul, pe o durată de 2 minute, calculată în fiecare minut, prin medierea valorilor medii pe 5 secunde, din ultimele 2 minute. Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [0,360], unde, în plus, 0 indică faptul că nu se înregistrează vânt.
- **M2SP - viteza vântului (la 2 minute)** – reprezintă viteza medie cu care bate vântul, pe o durată de 2 minute, calculată în fiecare minut, prin medierea valorilor medii pe 5 secunde din ultimele 2 minute. Valorile sunt exprimate în noduri.
- **MXD5 - direcția vântului (la 5 secunde)** – reprezintă direcția din care bate vântul (cel mai puternic), mediat pe o durată de 5 secunde, din ultimul minut. Valorile sunt întregi cuprinse în intervalul [0,360], unde, în plus, 0 indica faptul că nu se înregistrează vânt.
- **MXS5 - viteza vântului (la 5 secunde)** – reprezintă viteza medie maximă cu care bate vântul, pe o durată de 5 secunde, calculată în fiecare minut. Valorile sunt exprimate în noduri.
- **Vizibilitate pe pistă** – este utilizată în aviație și reprezintă vizibilitatea înregistrată la nivelul pistei aeroportului, măsurată în sute de picioare.

Exemplu:

Semnificația unei linii de date din fișierul „64050K0J4200904.dat” (prezentat în Figura 5.43) accesibil prin protocolul ftp din cadrul sistemului ASOS este prezentată în tabelul 5.3.

	WBAN Si ICAO	An	Luna	Zi	Timp (local, utc)	Coefficient de vizibilitate 1 N = noapte	Coefficient de vizibilitate 2 N = noapte	D360	M2SP [noduri]	MXD5	MXS5 [noduri]	Vizibilitate pista [sute picioare]
1	63870K0J4	0J4200904	0100000600	0.070	N	indisponibil	168	8	165	8	indisponibil	
2	63870K0J4	0J4200904	0100010601	0.069	N	indisponibil	165	8	175	10	indisponibil	
3	63870K0J4	0J4200904	0100020602	0.078	N	indisponibil	174	9	181	10	indisponibil	
4	63870K0J4	0J4200904	0100030603	0.113	N	indisponibil	177	8	181	10	indisponibil	
5	63870K0J4	0J4200904	0100040604	0.216	N	indisponibil	174	8	182	12	indisponibil	
6	63870K0J4	0J4200904	0100050605	0.258	N	indisponibil	173	10	171	13	indisponibil	

Figura 5.43 Raport date meteo, setul 6405

Tabelul 5.3. Semnificația datelor specifice setului cod 6405

WBAN Si ICAO	An	Luna	Zi	Timp (local, utc)	Coefficient de vizibilitate 1 N = noapte	Coefficient de vizibilitate 2 N = noapte	D360	M2SP [noduri]	MXD5	MXS5 [noduri]	Vizibilitate pista [sute picioare]
63870 K0J4	2009	04	01	00:00 est 06:00 utc	0.070 N	indisponibil	168	8	165	8	indisponibil

Elementele care sunt stocate în pagina 2, setul de date 6406, sunt următoarele:

- **ID precipitații** – corespunzător tipului de precipitații înregistrat de senzor, după cum urmează:
 - o NP – fără precipitații (eng. *no precipitation*);
 - o R – ploaie (eng. *rain*);
 - o S – zăpadă (eng. *snow*).
- **Volum de precipitații** – cantitatea de precipitații lichide acumulată în ultimul minut măsurată în sutimi de inch.
- **Senzor pentru precipitații înghețate** – Precipitațiile care cad sub forma înghețată pot cauza probleme grave traficului aerian, rutier, și de asemenea pot duce la supraîncărcarea firelor, acoperișurilor etc cu mase suplimentare de gheață care le pun structura în pericol. Determinarea acestor precipitații înghețate se realizează cu ajutorul unei tije vibratoare, știind că frecvența de rezonanță a acesteia scade pe măsură ce se acumulează masa adițională de gheață, grindină, chiciură, brumă, zăpadă sau lapoviță. Senzorul furnizează frecvența de rezonanță a tije vibratoare.
- **Presiune atmosferică (la 3 senzori)** – reprezintă valoarea medie a presiunii atmosferice, calculată în fiecare minut, prin medierea valorilor măsurate, din ultimul minut, la fiecare 10 secunde. Valorile sunt exprimate în inch coloană de mercur. La nivelul fiecărui punct de observație meteorologic există 3 senzori de presiune distincți.
- **Temperatură (la 5 secunde)** – reprezintă temperatura aerului calculată ca o valoare medie a ultimelor două eșantioane măsurate la 30 secunde. Valorile sunt exprimate în grade Fahrenheit.
- **Punct de rouă** – reprezintă temperatura la care trebuie răcit amestecul pentru că vaporii să devină saturați și deci să înceapă să se condenseze, presupunând că pe durata răcirii presiunea amestecului și cantitatea de vapori sunt constante. Acesta reprezintă un indicator pentru umiditatea aerului. Valorile sunt exprimate în grade Fahrenheit.

Exemplu:

Semnificația unei linii de date din fișierul „64060K0J4200904.dat” (prezentat în Figura 5.44) accesibil prin protocolul ftp din cadrul sistemului ASOS este prezentată în tabelul 5.4.

ID	WBAN	An	Luna	Zi	Timp	ID Precipitatii	Volum precipitatii	Senzor precipitatii	Presiune atmosferica	Temperatura medie pe 1 minut	Punct de roua
1	63870K0J4	04	2009	01	00:00	NP	0.00	39983	29.569	64	62
2	63870K0J4	04	2009	01	00:01	NP	0.00	39983	29.570	64	62
3	63870K0J4	04	2009	01	00:02	NP	0.00	39983	29.572	64	62

Figura 5.44 Raport date meteo, setul 6406

Tabelul 5.4. Semnificația datelor specifice setului cod 6406

WBAN Si ICAO	An	Luna	Zi	Timp (local, utc)	ID Precipitatii R=ploaie S=zapada NP=fara	Volum precipitatii [sutimi de inch]	Senzor precipitatii inghetate	Presiune atmosferica la cei 3 senzori [Inch Hg]	Temperatura medie pe 1 minut [F]	Punct de roua, calculat la fiecare minut [F]
63870 K0J4	2009	04	01	00:00 est 06:00 utc	NP	0.00	39983	29.569 29.572 29.573	64	62

Gradul de acoperire al datelor stocate cuprinde zona continentală a Statelor Unite ale Americii, Alaska, Hawaii și respectiv Puerto Rico, astfel încât limitele geografice ale acestora sunt [146] :

- Limita sudică: 18°N
- Limita nordică: 72°N
- Limita vestică: 171°W
- Limita estică: 65°W

6. CONCLUZII FINALE ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE. PERSPECTIVE

6.1. CONCLUZII

Lucrarea de față este dedicată cercetărilor din domeniul de mare actualitate al dezvoltării de aplicații utilizând rețele de senzori wireless, abordându-se probleme teoretice și aplicative de reală importanță, direcționate în principal pe optimizarea consumului de energie, modelarea și analiza fiabilității sistemelor utilizând modele Markov, respectiv detecția și tratarea erorilor.

Lucrarea este concepută ca o dezvoltare succesivă de problematici specifice aplicațiilor bazate pe rețele de senzori wireless, sfârșitul fiecărui capitol evidențiind particularități, recomandări și concluzii generale, sau concluzii particularizate, funcție de specificul considerat.

Obiectivul principal al lucrării îl constituie optimizarea aplicațiilor cu rețele de senzori, în sensul reducerii consumului de energie în funcționare, creșterii fiabilității și a toleranței acestora la erori (detecția și tratarea erorilor funcționale).

Astfel, se pot evidenția următoarele direcții abordate în teză:

- dezvoltarea și analiza unor metode de reducere a consumului de energie bazate pe tehnici de agregare a informației;
- dezvoltarea și analiza unor metode de reducere a consumului de energie bazate pe tehnici de rutare a informației;
- implementarea unor strategii de comunicație, bazate pe agregarea informației, care să minimizeze energia consumată;
- modelarea fiabilității, respectiv a timpului mediu de funcționare până la apariția defectului, pentru diferite structuri de rețele de senzori, utilizând modele Markov;
- sinteza unor metode proprii de detectare și tratare a erorilor funcționale din cadrul rețelelor de senzori, bazate pe rețele neuronale.

În cadrul tezei s-au dezvoltat două metode de creștere a autonomiei de funcționare a rețelelor de senzori wireless, atât prin utilizarea tehnicilor de agregare a informației în interiorul rețelei, cât și prin utilizarea unor algoritmi de rutare a datelor între nodurile rețelei de senzori.

S-a demonstrat, că prin utilizarea unor metode de agregare adecvate a datelor, precum și prin utilizarea mai multor stații de bază, se aduc îmbunătățiri majore în reducerea volumului de date comunicate prin canalul radio în interiorul rețelei, în cazul unor rețele de senzori multi-hop. Astfel se obțin importante economii de energie la nivelul surselor de alimentare ale nodurilor rețelei de senzori wireless, fără ca acest lucru să ducă la o depreciere a calității datelor extrase din rețea (nepierzându-se informațiile importante referitoare la fenomenul monitorizat de rețeaua de senzori).

Se recomandă utilizarea acestor metode, în special în cazul rețelelor de senzori multi-hop cu resurse limitate (în ceea ce privește lățimea de bandă, energia de alimentare etc).

Pentru a îmbunătăți toleranța la defecte, s-a propus soluția adăugării de stații de bază adiționale (coroborată cu utilizarea de trasee dinamice), care aduce îmbunătățiri semnificative în ceea ce privește toleranța la defecte a rețelei, prin cheltuieli suplimentare relativ scăzute.

S-a demonstrat că prin utilizarea unui mecanism de rutare adecvat și a unei strategii corespunzătoare pentru comutarea stării nodurilor rețelei din „în așteptare” în starea „în adormire” se pot obține importante economii de energie la nivelul nodurilor rețelei de senzori, fără a afecta interconectivitatea din cadrul rețelei, îmbunătățind astfel raportul dintre durata de viață a bateriilor și acuratețea datelor furnizate de rețeaua de senzori.

Algoritmul propus permite reducerea consumului de energie înregistrat la nivelul întregii rețele de senzori sub 40% față de cazul în care toate nodurile sunt menținute în așteptare, și de asemenea permite balansarea consumului între nodurile rețelei pentru a preveni epuizarea energiei de alimentare la anumite noduri, în timp ce nodurile învecinate dispun de importante rezerve de energie.

Consumul de energie global, poate fi redus chiar mai mult prin combinarea metodei propuse cu alte tehnici, cum ar fi agregarea datelor sau clustering.

Utilizarea de stații de bază adiționale, și redefinirea corespunzătoare a arborilor de rutare, pot de asemenea să reducă volumul de comunicații realizat în interiorul rețelei de senzori, și de asemenea să conducă la creșterea toleranței la defecte a întregii rețele de senzori.

Simulările s-au realizat în mediul Matlab, prin intermediul unor programe de concepție proprie, utilizând date de catalog de la firma Crossbow, producătoare de componente de rețele de senzori wireless.

Metoda de optimizare a energiei de funcționare prin utilizarea tehnicilor de agregare a informație s-a implementat pe o rețea de senzori de tip Iris 2.4 GHz, realizându-se astfel validarea experimentală a unora dintre rezultatele obținute prin simulări.

Pe baza testelor efectuate s-a putut concluziona că printr-o alegere corectă a metodelor de agregare și/sau rutare a datelor în cadrul unei rețele de senzori se poate îmbunătăți raportul „*acuratețea datelor – durata de viață a bateriilor*”, conducând la o utilizare mai eficientă a rețelei de senzori wireless.

În cadrul tezei s-a realizat sintetizarea noțiunilor principale referitoare la toleranța la defecte în cadrul rețelelor de senzori wireless, a fundamentelor teoretice și a mărimilor caracteristice analizării toleranței la defecte în sisteme distribuite.

S-a efectuat de asemenea modelarea fiabilității a diferite rețele de senzori, cu ajutorul modelelor Markov, utilizând atât unități de schimb redundante, de tip stand-by, dedicate (care pot înlocui un singur tip de senzori), cât și unități de schimb redundante, de tip stand-by, universale (care pot înlocui orice tip de senzor din structura rețelei de senzori). S-au considerat structuri specifice de rețele de senzori întâlnite în aplicații uzuale.

Prin analiza realizată s-a dovedit că este indicat să se utilizeze în cadrul aplicațiilor cu rețele de senzori wireless, echipamente care au fost rodite în prealabil un timp limitat în afara rețelei, și se recomandă integrarea acestora în aplicație doar după atingerea maturității (intrarea în zona în care rata de defectare este constantă). În caz contrar, fiabilitatea globală a rețelei de senzori riscă să fie scăzută, și ținând cont de caracterul distribuit al aplicațiilor (de regulă pe suprafețe mari și greu accesibile), mentenanța putând implica costuri ridicate.

Pentru a crește fiabilitatea globală a întregii rețele de senzori wireless se pot recomanda două abordări:

- creșterea calității componentelor utilizate pentru asigurarea unei rate de defectare mai scăzute la nivelul senzorilor;
- creșterea numărului de unități de schimb disponibile, eventual menținerea în permanență a unui număr minimal de unități de rezervă, prin repararea/înlocuirea unităților defecte și trecerea lor în regim de stand-by.

Modelele Markov s-au dovedit deosebit de utile în modelarea fiabilității rețelelor, datorită caracterului stohastic al defectărilor și al faptului că sistemul evoluează într-un număr finit de stări, care se exclud reciproc. Rezolvarea ecuațiilor diferențiale s-a realizat prin calculul operațional, care aduce simplificări importante de calcul.

Analiza fiabilității s-a realizat pe baza funcției de fiabilitate determinată analitic, respectiv pe baza timpului mediu de funcționare până la apariția defectului (MTTF).

Din studiile de caz realizate se pot desprinde următoarele concluzii:

- în cazul rețelelor de senzori hibride, compuse din diferite tipuri de senzori, utilizarea unităților de schimb universale asigură o fiabilitate sporită față de cazul utilizării unui același număr de unități de schimb dedicate.
 - fiabilitatea unei rețele este cu atât mai ridicată cu cât numărul de unități active este mai scăzut.
 - fiabilitatea globală a rețelei este maximă în cazul utilizării de elemente mature (care au rata de defectare constantă) și este scăzută în cazul utilizării de elemente care nu și-au terminat etapa de rodaj, sau care au depășit durata medie de viață (uzate).

De asemenea, s-a efectuat o analiză critică asupra celor mai referite/utilizate metode de detecție a erorilor din cadrul rețelelor de senzori. Analiza realizată s-a constituit ca premisă pentru elaborarea unei strategii bazate pe rețele neuronale, propuse, implementate și validate, pentru cazul unei rețele de senzori utilizate la monitorizarea parametrilor meteorologici.

Metoda propusă poate fi generalizată putând fi utilizată și în cazul altor procese supravegheate de rețele de senzori, condiția necesară fiind ca aceste procese să aibă un comportament predictibil, pe un anumit orizont de timp.

Pentru detecția și tratarea erorilor funcționale din cadrul unei rețele de senzori, particularizată aplicativ pentru un sistem de monitorizare a fenomenelor meteorologice, au fost dezvoltate două abordări:

- o *abordarea centralizată* – caz în care structura neuronală este localizată în afara rețelei de senzori - la nivelul sistemului central de stocare și prelucrare a datelor;
- o *abordarea distribuită* – caz în care structura neuronală este implementată la nivelul fiecărui nod al rețelei de senzori.

Structurile de detecție și tratare a erorilor funcționale utilizate în cazul monitorizării presiunii atmosferice (caz particular de studiu), au fost implementate testate și validate utilizând date măsurate și furnizate de către senzori componenți ai sistemului meteorologic ASOS [152] (dimensiunea setului de date avute la dispoziție permițând validarea soluției propuse).

Pentru determinarea structurii rețelei neuronale (ca element principal al strategiei de detecție adoptate), s-au realizat o serie de scenarii de testare, luând în considerare diferite structuri de rețele neuronale (diferind prin numărul de straturi

ascunse, numărul de neuroni componenți, ordinul recurenței de la intrare). În urma studiilor realizate s-a determinat un optim structural (corelând acuratețea predicției realizate cu gradul de complexitate al rețelei neuronale), reprezentat de o rețea neuronală având un singur strat ascuns, constituit din 6 neuroni, cu funcție de activare neliniară și o recurență de ordinul 4 pe intrare. Orice creștere a complexității rețelei neuronale (prin adăugare de neuroni suplimentari, de straturi ascunse sau prin creșterea ordinului recurenței) nu aduce îmbunătățiri majore procesului de detecție/tratare a anomaliilor.

Pentru perioade lungi de timp, structura de detecție a avut o funcționare corectă, identificând cu acuratețe existența unor valori eronate (cauzate de perturbații interne/externe), respectiv generând valori estimate (de substituție) cu o precizie corespunzătoare. Rezultate similare s-au obținut și în cazul în care sistemul de achiziție nu furnizează deloc valori (dar pentru durate scurte de timp - 1-3 minute), lipsa acestora fiind suplinită prin valorile generate predictiv de rețeaua neuronală. În cazul în care perturbația este de lungă durată (mai mult de 5 minute), acuratețea predicției realizate de rețeaua neuronală nu este întotdeauna satisfăcătoare, însă, imediat după restabilirea funcționării corecte a senzorului, structura de detecție reîntră în parametri normali de funcționare, estimând și suplinind suficient de precis noile valori eronate/lipsă. S-a realizat, de asemenea, și un studiu de caz privind posibilitatea utilizării structurii de detecție a erorilor decuplată de sistemul de achiziție de date (simulând astfel o cădere totală a acestuia), încercându-se generarea de valori estimate care să suplinească valorile reale lipsă. Rezultatele obținute și în acest caz au fost bune însă doar pe un orizont de timp limitat.

S-au sintetizat două structuri de detecție a erorilor, înregistrate la măsurarea presiunii atmosferice utilizând informații provenite de la senzori redundanți, considerând modul de abordare centralizată. Prima dintre structuri este bazată pe o logică de detecție și tratare a erorilor de tip clasic, utilizând elemente comparatoare, sumatoare și cu zonă de insensibilitate, în timp ce a doua structură propusă utilizează o rețea neuronală pentru predicția de valori corespunzătoare mărimii măsurate. Studiile de caz au utilizat date provenite dintr-un nod al rețelei de senzori meteorologici dotat cu 3 senzori de presiune distincti, a căror valori măsurate nu au coincis în totalitate, fiecare senzor având o dinamică proprie.

Concluzia care poate fi desprinsă la finele lucrării este că, pentru o gamă largă de aplicații, rețelele de senzori constituie soluții eficiente și performante de monitorizare și chiar conducere. Toate cele trei categorii de problematice abordate în cadrul tezei (optimizarea consumului, modelarea și analiza fiabilității, respectiv creșterea toleranței la defect prin detecția și tratarea erorilor funcționale) sunt factori cheie care trebuie luați în considerare la proiectarea aplicațiilor cu rețele de senzori în vederea asigurării unor performanțe ridicate.

Pentru elaborarea lucrării a fost utilizată o bibliografie care cuprinde 159 de titluri ale unor lucrări de specialitate, cele mai multe dintre ele de dată foarte recentă. De asemenea, bibliografia cuprinde 14 lucrări al căror autor principal sau coautor este autorul tezei.

Problemele prezentate, precum și rezultatele obținute, conferă lucrării un real caracter de aplicabilitate practică, deschizând noi perspective cercetărilor în domeniul abordat.

În concluzie, se poate afirma că soluțiile propuse în lucrare, soluții care pledează pentru utilizarea unor tehnici adecvate vizând reducerea consumului de energie, respectiv a unor structuri de detecție și tratare a erorilor funcționale din

cadrul rețelelor de senzori, asigură atingerea unor parametri de performanță foarte buni în cadrul diverselor aplicații avute în vedere.

6.2. CONTRIBUȚII PERSONALE

Pornind de la obiectivele declarate ale acestei lucrări, în continuare sunt prezentate principalele contribuții originale:

- ◆ Elaborarea unei sinteze critice asupra stadiului actual al domeniului rețelelor de senzori wireless.
- ◆ Elaborarea unui studiu și a unei analize asupra unor problematici de bază vizând reducerea consumului de energie la nivelul rețelei de senzori, prin utilizarea de tehnici de agregare a informației.
- ◆ Implementarea și validarea prin simulări, a unei metode propuse de reducere a consumului de energie din cadrul unei rețele de senzori, utilizând tehnici de agregare a datelor.
- ◆ Implementarea și validarea experimentală, a algoritmilor propuși de reducere a consumului energetic, utilizând o rețea de senzori de tip Iris-Crossbow 2.4 GHz.
- ◆ Implementarea și validarea unei metode de optimizare a consumului de energie la nivelul unei rețele de senzori, utilizând tehnici de rutare (considerând un număr variabil de senzori trecuți în starea de „adormire”).
- ◆ Elaborarea unui studiu critic asupra problematicilor vizând fiabilitatea rețelelor de senzori cu/fără toleranță la defecte.
- ◆ Modelarea funcționării unei rețele de senzori fără toleranță la defecte, utilizând modele Markov.
- ◆ Modelarea analitică a fiabilității unei rețele de senzori fără toleranță la defecte.
- ◆ Modelarea analitică a timpului mediu de funcționare până la apariția unui defect în cadrul unei rețele de senzori fără toleranță la defecte.
- ◆ Modelarea funcționării unei rețele de senzori cu toleranța la defecte asigurată prin elemente redundante dedicate, utilizând modele Markov.
- ◆ Modelarea analitică a fiabilității unei rețele de senzori cu toleranță la defecte asigurată prin elemente redundante dedicate
- ◆ Modelarea analitică a timpului mediu de funcționare până la apariția unui defect în cadrul unei rețele de senzori cu toleranță la defecte, asigurată prin elemente redundante dedicate.
- ◆ Modelarea funcționării unei rețele de senzori cu toleranță la defecte, asigurată prin elemente redundante nededicate, utilizând modele Markov.
- ◆ Determinarea analitică a fiabilității unei rețele de senzori cu toleranță la defecte, asigurată prin elemente redundante nededicate.
- ◆ Modelarea analitică a timpului mediu de funcționare până la apariția unui defect în cadrul unei rețele de senzori cu toleranță la defecte, asigurată prin elemente redundante nededicate.
- ◆ Analiza calitativă și cantitativă a diferite structuri de rețele de senzori cu toleranță eterogenă la defecte.

- ◆ Analiza calitativă și cantitativă a diferite structuri cu toleranță la defecte asigurată prin redundanță.
- ◆ Elaborarea, implementarea și validarea unor programe pentru simularea calitativă și cantitativă a fiabilității rețelelor de senzori.
- ◆ Elaborarea, implementarea și validarea unor programe pentru simularea timpului mediu de funcționare până la apariția unui defect în cadrul rețelelor de senzori.
- ◆ Analiza comparativă a diferitelor structuri de rețele de senzori cu toleranță la defecte.
- ◆ Stabilirea unor modele pentru defecte care pot apărea în cadrul unei rețele de senzori.
- ◆ Elaborare unui studiu critic asupra problematicilor de bază ale detecției erorilor funcționale din cadrul rețelelor de senzori wireless.
- ◆ Sinteza unor structuri de detecție și tratare a erorilor funcționale din cadrul unei rețele de senzori, bazate pe rețele neuronale.
- ◆ Particularizarea uneia dintre structurile propuse de detecție și tratare a erorilor din cadrul unei rețele de senzori destinată măsurării valorilor presiunii atmosferice.
- ◆ Sinteza și validarea unei rețele neuronale pentru predicția valorii presiunii atmosferice pe baza eșantioanelor trecute
- ◆ Integrarea rețelei neuronale în cadrul structurii de detecție și tratare a erorilor și validarea metodei propuse, concepută pentru cazul măsurării presiunii atmosferice.
- ◆ Elaborarea programelor destinate implementării, analizei și validării structurilor de detecție și tratare a erorilor considerate.

6.3. Direcții de cercetare generate de studiile efectuate

Dintre principalele direcții de cercetare care pot continua rezultatele obținute în cadrul acestei teze se pot enumera:

- Optimizarea consumului de energie total al rețelei de senzori, prin utilizarea informației „apriori” referitoare la caracteristicile valorilor achiziționate de rețeaua de senzori în vederea utilizării de metode de agregare optime (de exemplu de a defini arbori de rutare în concordanță cu probabilitățile de apariție a punctelor de extrem în anumite zone ale rețelei, de a amplasa stații de baza adiționale în apropierea zonelor cu risc maxim etc).
- Reducerea consumului de energie prin utilizarea de informații disponibile „apriori”, referitoare la procesele monitorizate, la proiectarea strategiilor de optimizare a energiei consumate (de exemplu prin definirea unor arbori de rutare minimali, în corespondență cu probabilitățile de producere ale evenimentelor în diferite zone ale rețelei de senzori, sau prin determinarea numărului și amplasamentului optim al stațiilor de bază adiționale.

- Modelarea fiabilității unei rețele de senzori care să țină cont și de posibilele reparații, generalizarea metodei pentru orice rețea și respectiv realizarea unei baze de date cu parametrii de fiabilitate reali ai diferitelor echipamente existente pe piață.
- Extinderea utilizării structurilor propuse pentru detecția erorilor și în cazul altor fenomene/procese monitorizate de rețele de senzori.
- Utilizarea de elemente de predicție bazate pe tehnici fuzzy/algoritmi genetici.

Bibliografie

- [1] Lewis F.L. (2004) *Wireless Sensor Networks*, John Wiley & Sons
- [2] David Culler, Deborah Estrin, and Mani Srivastava, *Overview of Sensor Networks*, IEEE Computer, August 2004
- [3] Thomas Haenselmann (2006-04-05). *Sensornetworks*. GFDL Wireless Sensor Network textbook. http://pi4.informatik.uni-mannheim.de/~haensel/sn_book.
- [4] *Wireless Sensor Network: Research vs. Reality Design and Deployment Issues*, Youssef, M. El-Sheimy, N. : *Communication Networks and Services Research*, 2007. CNSR '07. Fifth Annual Conference on, 14-17 May 2007, page(s): 8-9, Location: Frederlcton, NB, ISBN: 0-7695-2835-X, INSPEC Accession Number: 10288851
- [5] Pister, K., Kahn, J. and Boser, B. "Smart dust: wireless networks of millimeter-scale sensor nodes." In *Electronic Research Laboratory Research Summary*, UC Berkeley (1999).
- [6] J. M. Kahn, R. H. Katz, K. S. J. Pister, "Next century challenges: Mobile networking for 'Smart Dust'," In *Proceedings of International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 99)*, Seattle, WA, USA, Aug 1999.
- [7] J. Hill and D. Culler. *Mica: A wireless platform for deeply embedded networks.*, IEEE Micro, 22(6):12–24, November/December 2002.
- [8] G. Asada, M. Dong, T.S. Lin, F. Newberg, G. Pottie, W.J. Kaiser, H.O. Marcy, "Wireless integrated network sensors: Low power systems on a chip," *Proceedings of the 24th IEEE European Solid State Circuits Conference*, 1998.
- [9] T.-H. Lin, H. Sanchez, H.O. Marcy, W.J. Kaiser, "Wireless integrated network sensors for tactical information systems," *Proceedings of the 1998 Government Microcircuit Applications Conference*.
- [10] http://en.wikipedia.org/wiki/Wireless_sensor_network
- [11] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. *Wireless Sensor Networks: A Survey*. *Computer Networks*, 38(4):393–422, March 2002.
- [12] Bharathidasan Archana, Vijay Anand, Sai Ponduru (2003)- "Sensor Networks: An Overview"
- [13] Cook D.J. & Das S.K. (2004). "Smart Environments: Technologies, Protocols, Applications", Chapter 2 "Wireless Sensor Networks- F.Lewis", Wiley-Interscience, New York.
- [14] *Analysis of Feature Space for Monitoring Persons with Parkinson's Disease With Application to a Wireless Wearable Sensor System*, Shyamal Patel, Konrad

- Lorincz, Richard Hughes, Nancy Huggins, John Growdon, Matt Welsh, Paolo Bonato, 29th IEEE EMBS Annual International Conference, August, 2007
- [15] Wireless Medical Sensor Networks in Emergency Response: Implementation and Pilot Results, Tia Gao, Christopher Pesto, Leo Selavo, Yin Chen, JeongGil Ko, JongHyun Lim, Andreas Terzis, Andrew Watt, James Jeng, Bor-rong Chen, Konrad Lorincz, Matt Welsh, 2008 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security, May, 2008
- [16] http://sensorwireless.ca/agricultural_products.php?CRACKLESSEGG
- [17] <http://www.zigbee.org>
- [18] Mainwaring Alan, Polastre Joseph, Szewczyk Robert, Culler David, Anderson John, "Wireless Sensor Network for Habitat Monitoring", ACM International Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications, 2002.
- [19] *** (2004) "Instrumenting the World, An Introduction to Wireless Sensors Networks", Research at Intel, February 2004
- [20] Elson Jeremy, Girod Lewis, Estrin Deborah, "Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts", Proceedings of the 5th symposium on Operating systems design and implementation, December 2002, Boston
- [21] Kumar S., Shepherd D.- "SensiT: Sensor information technology for the warfighter" Proc. 4th Int. Conf. on Information Fusion, 2001
- [22] Supriyo Chatterjea* and Paul Havinga, Improving Temporal Coverage of an Energy-Efficient Data Extraction Algorithm for Environmental Monitoring Using Wireless Sensor Networks, Sensors 2009, pp.4941-4954; doi: 10.3390/s90604941, ISSN 1424-8220, www.mdpi.com/journal/sensors, Published: 23 June 2009
- [23] <http://www.xbow.com>
- [24] <http://www.microstrain.com>
- [25] *** (2007,a) Crossbow Xmesh User's Manual Revision C, PN: 7430-0108-01
- [26] *** (2007,b) Crossbow MPR-MIB Users Manual Revision A, PN: 7430-0021-08
- [27] *** (2007,c) Crossbow MoteWorks Getting Started Guide Revision D, PN: 7430-0102-01
- [28] IEEE Std 802-1990: IEEE Standards for Local and Metropolitan Networks: Overview and Architecture New York:1990
- [29] <http://en.wikipedia.org/wiki/ZigBee>
- [30] http://www.hartcomm.org/protocol/wihart/wireless_technology.html

- [31] <http://en.wikipedia.org/wiki/6LoWPAN>.
- [32] Enkhbold Ochirsuren, Heiko Hinkelmann, Leandro Soares Indrusiak and Manfred Glesner, TinyOS Extensions for a Wireless Sensor Network Node Based on a Dynamically Reconfigurable Processor, Book Series IFIP International, Federation for Information Processing, Springer Boston, ISSN 1571-5736 (Print) 1861-2288 (Online), Volume Volume 271/2008, Book Distributed Embedded Systems: Design, Middleware and Resources, DOI 10.1007/978-0-387-09661-2 Copyright 2008 ISBN 978-0-387-09660-5 DOI 10.1007/978-0-387-09661-2_16, Pages 161-170
- [33] Sukumar Ghosh: Distributed Systems: An Algorithmic Approach, 2006 CRC Press (ISBN 1584885645)
- [34] Levis P. (2006) TinyOS/nesC Programming Reference Manual
- [35] Gay D., Levis P., Culler D.,(2003) nesC 1.1 Language Reference Manual
- [36] Hill V., R. Szewczyk, A. Woo, S. Hollar, D. E. Culler, and K. S. J. Pister. "System Architecture Directions for Networked Sensors". In Proceedings of the 9th International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems, pag. 93–104, Cambridge, MA, 2000.
- [37] S. Park, A. Savvides, M.B. Srivastava, "Simulating networks of wireless sensors", Simulation Conference, 2001. Proceedings of the Winter, Publication Date: 2001 Volume: 2, pages: 1330-1338, Location: Arlington, VA, USA, ISBN: 0-7803-7307-3
- [38] K. Römer, O. Kasten, F. Mattern, "Middleware challenges for wireless sensor networks", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review archive Volume 6, Issue 4 (October 2002), Pages: 59 – 61, ISSN:1559-1662
- [39] Rabaey J. M., Ammer M. J., da Silva J. L., Patel D., & Roundy S. (2000). "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking" IEEE Computer, 33(7): 42–48.
- [40] N. Shrivastava, C. Buragohain, D. Agrawal and S. Suri, "Medians and Beyond: New Aggregation Techniques for Sensor Networks," in Proceedings of the Second ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2004), August 2004.
- [41] W. Heinzelman, Anantha Chandrakasan, and H. Balakrishnan. „Energy-efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks”, in Proc. Hawaiian Int’l Conf. on Systems Science, January 2000.
- [42] ***, □MPR-MIB Users Manual, Revision A, June 2007, PN: 7430-0021-08□, 2002-2007 Crossbow Technology, Inc, pp. 19 – 20, June 2007.
- [43] Vasar, C.; Prostean, O.; Filip, I.; Szeidert, I.; Robu, A, "Using data aggregation to prolong the lifetime of wide-area wireless sensor networks", 4th

- International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2008. ICCP 2008, 28-30 Aug. 2008, Page(s): 247-252, Digital Object Identifier 10.1109/ICCP.2008.4648379
- [44] B. Krishnamachari, D. Estrin, and S. Wicker, „Impact of data aggregation in wireless sensor networks”, International Workshop on Distributed Event-Based Systems, Vienna, Austria, July 2002.
- [45] H. Karl and A. Willig, “Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks”, John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 0-470-09510-5, 2005, pp 60-64.
- [46] C. Intanagonwivat, D. Estrin, R. Govindan, and J. Heidemann. “Impact of Network Density on Data Aggregation in Wireless Sensor Networks”. Proceedings of the 22nd International Conference on Distributed Computing Systems, Vienna, Austria, IEEE. July, 2002.
- [47] C. Vasar, I. Filip, I. Szeidert, A. Robu, Considerations Regarding Optimizing Energy Consumption within Wireless Sensor Network Using Data Aggregation, CONTI'2008, The 8th International Conference On Technical Informatics, 5-6 June 2008, Timisoara, Romania, pag.67-70
- [48] C. Vasar, O. Prostean, D. Curiac, Aspects Regarding Data Aggregation in Wireless Sensor Networks, CONTI'2008, The 8th International Conference On Technical Informatics, 5-6 June 2008, Timisoara, Romania, pag. 71-76
- [49] Khalid, Z.; Ahmed, G.; Khan, N.M., “A real-time energy-aware routing strategy for Wireless Sensor Networks”, Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2007, 18-20 Oct. 2007 Page:381 – 384, ISBN: 978-1-4244-1374-4
- [50] V. Raghunathan, C. Schurgers, Sung Park, M. B. Srivastava, Energy-aware wireless microsensor networks, Signal Processing Magazine, IEEE In Signal Processing Magazine, IEEE, Vol. 19, No. 2. (2002), pp. 40-50. pg 53
- [51] C. Vasar, G. Prostean, A. Robu, Issues on Low Power Routing For Wireless Sensor Networks, SACI2009, 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics, Timișoara, Romania, May 28-29, 2009
- [52] Rex Min, Anantha Chandrakasan, “Energy-efficient communication for high density networks”, Source Ambient intelligence: impact on embedded system design, Pages: 295 – 314, 2003, ISBN:1-4020-7668-1, Kluwer Academic Publishers Norwell, MA, USA
- [53] Carlos De Morais Cordeiro, Dharma Prakash Agrawal, Ad hoc & sensor networks: theory and applications, Editor World Scientific, 2006, ISBN 9812566813, 9789812566812, 641 pagini,
- [54] F. Koushanfar, M. Potkonjak, A.Sangiovanni-Vincentelli. “Fault-Tolerance in Sensor Networks. Handbook of Sensor Networks”, I. Mahgoub and M. Ilyas (eds.), CRC press, Section VIII, no. 36, 2004

- [55] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, *Sensor Network Protocols*, Editor CRC Press, 2006, ISBN 0849370361, 9780849370366, 248 pagini
- [56] http://en.wikipedia.org/wiki/Time_division_multiple_access
- [57] http://www.cisco.com/en/US/tech/tk389/tk214/tk125/tsd_technology_support_sub-protocol_home.html
- [58] Andrew S. Tanenbaum, *Computer Networks*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ (2003). 892 pp. ISBN 0-13-066102-3
- [59] Pejman Roshan, Jonathan Leary, *802.11 Wireless LAN Fundamentals*, Dec 23, 2003, Cisco Press., Pages: 312, Edition: 1st, ISBN-10: 1-58705-077-3
- [60] About the Bluetooth. Bluetooth SIG, http://www.bluetooth.com/Bluetooth/Technology/Works/Core_System_Architecture.htm
- [61] Jennifer Bray, Charles F. Sturman, *Bluetooth: Connect Without Cables*, 516 pages, Publisher: Prentice Hall PTR; 1st edition (December 15, 2000), ISBN-10: 0130898406, ISBN-13: 978-0130898401
- [62] *ZigBee Wireless Sensor Applications for Health, Wellness and Fitness*, ZigBee Alliance, Martie 2009, <http://www.zigbee.org>.
- [63] Drew Gislason, *Zigbee – Wireless Networking*, Elsevier Inc, 2008, pag. 448, ISBN: 978-0-7506-8597-9
- [64] Carlos De Morais Cordeiro, Dharma Prakash Agrawal, *Ad hoc & sensor networks: theory and applications*, Editor World Scientific, 2006, ISBN 9812566813, 9789812566812, 641 pagini
- [65] Y. Xu, J. Heidemann, D. Estrin, "Geography-informed Energy Conservation for Ad-hoc Routing," In *Proceedings of the seventh Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking 2001*, pp. 70-84.
- [66] B. Chen, K. Jamieson, H. Balakrishnan, R. Morris, "SPAN: An EnergyEfficient Coordination Algorithm for Topology Maintenance in Ad Hoc Wireless Networks", *Wireless Networks*, Vol. 8, No. 5, Page(s): 481-494, September 2002.
- [67] M. Ettus. System Capacity, Latency, and Power Consumption in Multihop-routed SS-CDMA Wireless Networks. In *Radio and Wireless Conference (RAWCON '98)*, pages 55– 58, Aug. 1998.
- [68] X. Lin and I. Stojmenovic. Power-Aware Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In *SITE*, University of Ottawa, TR-98- 11, Dec. 1998.
- [69] T. Meng and R. Volkan. Distributed Network Protocols for Wireless Communication. In *Proc. IEEE ISCAS*, May 1998.

-
- [70] T. Shepard. A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Radio Networks. In Proc. ACM SIGCOMM, pages 219–230, Aug. 1996.
- [71] S. Singh, M.Woo, and C. Raghavendra. Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks. In Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile
- [72] Jing Deng Han, Y.S. Po-Ning Chen Varshney, P.K., "Optimum transmission range for wireless ad hoc networks", Wireless Communications and Networking Conference, 2004. WCNC. 2004 IEEE, 21-25 March 2004, Volume: 2, page 1024- 1029, ISSN: 1525-3511, ISBN: 0-7803-8344-3
- [73] F. Koushanfar, A. Davare, D. Nguyen, M. Potkonjak, A. Sangiovanni-Vincentelli. "Low Power Coordination in Wireless Ad-hoc Networks." ACM International Symposium on Low Power Electronics and Design (ISLPED), pp. 475-480, August 2003.
- [74] Hongju Cheng Xiaohua Jia, "An energy efficient routing algorithm for wireless sensor networks", Wireless Communications, International Conference on Networking and Mobile Computing, 2005. Proceedings. 2005, 23-26 Sept. 2005, Volume 2, pages: 905-910, ISBN: 0-7803-9335-X, Wuhan, China.
- [75] Ruzzelli, A.G.; Cotan, P.; Oapos; Hare, G.M.R.; Tynan, R.; Havinga, P.J.M., "Protocol assessment issues in low duty cycle sensor networks: the switching energy", IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006, Volume 1, Issue , 5-7 June 2006 Page(s): 136 – 143, 2006, ISBN:0-7695-2553-9-01
- [76] B. S. Dhillon, Reliability in computer system design Ablex series in software engineering Communication, the Human Context, Editor Intellect Books, 1987, ISBN 0893914126, 9780893914127, 282 pagini
- [77] Balbir S. Dhillon, Applied reliability and quality: fundamentals, methods and procedures, Springer series in reliability engineering, Editor Springer, 2007, ISBN 184628497X, 9781846284977, 246 pagini
- [78] Mohammad Ilyas, Imad Mahgoub, Handbook of sensor networks: compact wireless and wired sensing systems, Editor CRC Press, 2005, ISBN 0849319684, 9780849319686, 864 pagini
- [79] Bruce M. McMillin, Fault tolerance for multicomputers: the application-oriented paradigm, Editor Ablex Pub., 1997, ISBN 0893918849,9780893918842, 199 pp
- [80] A. Brown, D. A. Patterson. "Embracing Failure: A Case for Recovery-Oriented Computing (ROC)." 2001 High Performance Transaction Processing Symposium, Asilomar, CA, October 2001.
- [81] A. Brown, D. A. Patterson. "To Err is Human." Proceedings of the First Workshop on Evaluating and Architecting System dependability (EASY '01), Göteborg, Sweden, July 2001.

- [82] A. Brown, D. A. Patterson. Rewind, Repair, Replay: "Three R's to Dependability." 10th ACM SIGOPS European Workshop, Saint-Emilion, France, September 2002.
- [83] G. Candea, J. Cutler, A. Fox, R. Doshi, P. Garg, R. Gowda. "Reducing Recovery Time in a Small Recursively Restartable" System. Proc. International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN-2002), Washington, D.C., June 2002
- [84] Koushanfar F., Potkonjak M., Sangiovanni-Vincentelli A., "Fault-Tolerance in Sensor Networks." Book chapter, in: 'Handbook of Sensor Networks', I. Mahgoub and M. Ilyas (eds.), CRC press, Section VIII, no. 36, 2004
- [85] N. Mandayam, "A Software Radio Architecture for Linear Multiuser Detection." IEEE JSAC, vol. 17, no. 5, pp. 814-823, May 1999.
- [86] D. Eckhardt, P. Steenkiste, "Measurement and Analysis of the Error Characteristics of an in Building Wireless Network." in Proceedings of the SIGCOMM, pp. 243-254, 1996.
- [87] D. Eckhardt, P. Steenkiste, "A trace-based evaluation of adaptive error correction for a wireless local area network." Journal on Special Topics in Mobile Networking and Applications (MONET), 1998.
- [88] D. Eckhardt, P. Steenkiste, "Improving Wireless LAN Performance via Adaptive Local Error Control." INCP, 1998.
- [89] C. Fragouli, P. Lettieri, M. Srivastava, "Low Power Error Control for Wireless Links." ACM/IEEE MobiCom, pp. 139-150, 1997.
- [90] K. Whitehouse, D. Culler, "Calibration as Parameter Estimation in Sensor Networks." ACM WSNA, 2002.
- [91] V. Bychkovskiy, S. Megerian, D. Estrin, M. Potkonjak. "Colibration: A Collaborative Approach to In-Place Sensor Calibration." 2nd International Workshop on Information Processing in Sensor Networks (IPSN'03), pp. 301-316, April 2003.
- [92] K. Römer, O. Kasten, F. Mattern, "Middleware challenges for wireless sensor networks", ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review archive Volume 6 , Issue 4 (October 2002), Pages: 59 - 61, ISSN:1559-1662
- [93] Cougar Project. www.cs.cornell.edu/database/cougar.
- [94] Smart Messages Project. www.rutgers.edu/sm.
- [95] Scalable Coordination Architectures for Deeply Distributed Systems. www.isi.edu/div7/scadds.

- [96] Taherkordi, A.; Taleghan, M.A.; Sharifi, M., Achieving availability and reliability in wireless sensor networks applications, The First International Conference on Availability, Reliability and Security, ARES 2006, 20-22 April 2006 Page(s): 7
- [97] Bein D., Jolly V., Kumar B., Latifi S., Reliability Modeling in Wireless Sensor Networks, International Journal of Information Technology, Vol. 11 No. 2, 2002
- [98] Tim Williams, The circuit designer's companion, EDN Series for Design Engineers Series, Butterworth-Heinemann, 2004, ISBN 0750663707, 9780750663700, 341 pagini
- [99] Cotter W. Sayre, Complete wireless design, Editor McGraw-Hill Professional, 2001, ISBN 0071370161, 9780071370165, 547 pagini
- [100] George Ellwood Dieter, Engineering design: a materials and processing approach, Editor McGraw-Hill, 2000, ISBN 0073661368, 9780073661360, 798p.
- [101] Klaus Schmidt, High availability and disaster recovery: concepts, design, implementation, Editor Springer, 2006, ISBN 3540244603, 9783540244608, 410 pagini.
- [102] D. P. Gaver and M. Acar, "Analytical hazard representations for use in reliability, mortality and simulation studies," Communications in Statistics—Simulation and Computation, vol. 8, pp. 91–111, 1979.
- [103] S. Rajarshi and M. B. Rajarshi, "Bathtub distributions: A review," Communications in Statistics—Theory and Methods, vol. 17, pp. 2597–2621, 1988.
- [104] C. D. Lai, M. Xie, and D. N. P. Murthy, "Bathtub shaped failure rate distributions," in Handbook of Statistics [on Reliability], N. Balakrishnan and C. R. Rao, Eds. Amsterdam: North Holland, 2001, pp. 69–106.
- [105] Shooman, M. L. Probabilistic Reliability: An Engineering Approach, 2d ed. Krieger, Melbourne, FL, 1990
- [106] Shooman M.L., Reliability of Computer Systems and Networks: Fault Tolerance, Analysis, and Design; John Wiley and Sons Inc, New York, 2002, pp.528, ISBN 0-471-29342-3
- [107] Dong S. K., Shazzad KM, Jong S. P., A framework of survivability model for wireless sensor network, The First International Conference on Availability, Reliability and Security, 2006. ARES 2006, 20-22 April 2006 Page(s): 8.
- [108] Vasar C., Biriescu M., Mihet-Popa L., In-Network Aggregation With Size Reduction For Wireless Sensor Networks – Quantitative Analysis, The 19th INTERNATIONAL DAAAM SYMPOSIUM "Intelligent Manufacturing & Automation: Focus on Next Generation of Intelligent Systems and Solutions" 22-25th October 2008.

- [109] Zhijun Y., Jie W., Fault-Tolerant Sensor Coverage for Achieving Wanted Coverage Lifetime with Minimum Cost, International Conference on Wireless Algorithms, Systems and Applications, WASA 2007, 1-3 Aug. 2007 Pages:95-102
- [110] Cinque M., Cotroneo D., Di Martino C., Russo S., Modeling and Assessing the Dependability of Wireless Sensor Networks, proc. of the 26th IEEE International Symposium on Reliable Distributed Systems (SRDS'07), Beijing, China, Oct. 2007, pp. 33-42.
- [111] Graf, Urs, Applied Laplace Transforms and z-Transforms for Scientists and Engineers - A Computational Approach Using a Mathematica Package, 2004, X, 500 p. With CD-ROM., Hardcover, ISBN: 978-3-7643-2427-8, A Birkhäuser book
- [112] Bertrand Russell , The principles of mathematics, Ediție 2, reeditată, Editor W.W. Norton, 1996 , ISBN 0393314049, 9780393314045, 534 pagini
- [113] Andrei Dmitrievich Polyanin, Aleksandr Vladimirovich Manzhirov, Handbook of mathematics for engineers and scientists, Editor CRC Press, 2007, ISBN 1584885025, 9781584885023, 1509 pagini
- [114] Jinran Chen, Shubha Kher, and Arun K. Somani, "Distributed Fault Detection of Wireless Sensor Networks," in Proc. of DIWANS 06, LA, Sept.2006.
- [115] Yassine Lakhnech, Sergio Yovine, Formal techniques, modelling and analysis of timed and fault-tolerant systems: joint international conferences on Formal Modelling and Analysis of Timed Systems, FORMATS 2004 and Formal Techniques in Real-Time and Fault-Tolerant Systems, FTRTFT 2004, Grenoble, France, September 22-24, 2004 Editor Springer, 2004, ISBN 3540231676, 9783540231677, 395 pagini.
- [116] Chessa, S.; Santi, P. Comparison based system level fault diagnosis in Ad hoc networks. In Proceedings of IEEE 20th Symp. on Reliable Distributed Systems (SRDS); IEEE Press: New Orleans, 2001; pp. 257-266.
- [117] Elhadeif, M.; Boukerche, A; Elkadiki, H. Performance analysis of a distributed comparison based self-diagnosis protocol for wireless ad hoc networks. In Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile system; ACM: NY, USA, 2006; pp. 165-172.
- [118] Tsang-Yi Wang, Li-Yuan Chang, Dyi-Rong Duh, Jeng-Yang Wu, Distributed Fault-Tolerant Detection via Sensor Fault Detection in Sensor Networks, 10th International Conference on Information Fusion, 9-12 July 2007, pages 1-6, ISBN: 978-0-662-45804-3, Quebec, Canada.
- [119] Jianliang Gao, Yongjun Xu, Xiaowei Li, Online Distributed Fault Detection of Sensor Measurements, Tsinghua Science & Technology, Volume 12, Supplement 1, July 2007, Pages 192-196, ISSN 1007-0214, DOI: 10.1016/S1007-0214(07)70108-6

- [120] Peng Jiang „A New Method for Node Fault Detection in Wireless Sensor Networks“, Journal on Sensors, ISSN 1424-8220, CODEN SENSC9, Publisher Molecular Diversity Preservation International (MDPI), Basel, Switzerland, 2009
- [121] Teresa Dillon, Wireless Sensing Networks: an overview of US development , Futurelab, December 2005, <http://www.futurelab.org.uk/resources/publications-reports-articles/web-articles/Web-Article514>
- [122] J.R. Agre, L.P. Clare, G.J. Pottie, N.P. Romanov, “Development Platform for Self-Organizing Wireless Sensor Networks” Aerosense’99, Orlando FL, April 1999.
- [123] G. J. Pottie, et. al., “Wireless Sensor Networks”, Information Theory Workshop Proceedings, 1998, Killamey, Ireland, June 22-26, 1998.
- [124] Pottie, G.J., and Clare, L.P., "Wireless integrated network sensors: towards low-cost and robust self-organizing security networks," Proc. SPIE, Boston, Nov 3-5, 1998, Vol. 3577, pp. 86-95
- [125] Pottie, G.J., and Kaiser, W.J., "Wireless Integrated Network Sensors," Comm. of the ACM, vol. 43 No. 5, pp. 51-58, May 2000.
- [126] Min, R.; Bhardwaj, M.; Seong-Hwan Cho; Shih, E.; Sinha, A.; Wang, A.; Chandrakasan, A., „Low-power wireless sensor networks“, Fourteenth International Conference on VLSI Design, 2001, Page(s):205 – 210
- [127] Minsu Choi; Park, N.; Lombardi, F., "Modeling and analysis of fault tolerant multistage interconnection networks," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, , vol.52, no.5, pp. 1509-1519, Oct. 2003
- [128] F. Koushanfar, M. Potkonjak, and A. Sangiovanni-Vincentelli, “On-line fault detection of sensor measurement,” in Proceedings of IEEE Sensors, vol. 2, 2003, pp. 974–979.
- [129] Krings, A.W.; Ma, Z., "Fault-Models in Wireless Communication: Towards Survivable Ad Hoc Networks," Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE , vol., no., pp.1-7, 23-25 Oct. 2006
- [130] Zhanshan Ma, Axel W. Krings , Dynamic hybrid fault models and the applications to wireless sensor networks (WSNs), International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems archive, Proceedings of the 11th international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Vancouver, British Columbia, Canada , Pages 100-108, 2008, ISBN:978-1-60558-235-1
- [131] Newman, R.; Gaura, E.; Mount, S., "The myth and reality of Wireless Sensor Networks : Designing Optimally Redundant Networks," Mechatronics and Automation, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on , vol., no., pp.780-786, 25-28 June 2006

- [132] Basile, C.; Meeta Gupta; Kalbarczyk, Z.; Iyer, R.K., "An Approach for Detecting and Distinguishing Errors versus Attacks in Sensor Networks," Dependable Systems and Networks, 2006. DSN 2006. International Conference on , vol., no., pp.473-484, 25-28 June 2006
- [133] de Deus, F.E.; Puttini, R.S.; Molinaro, L.F.; Kabara, J., "On survivability of IEEE 802.11 WLAN," Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2006. IEEE International Conference on , vol.1, no., pp.8 pp.-, 5-7 June 2006
- [134] O. Proștean, I. Filip, C.Vaşar, I. Szeidert, Inverse control based on neural networks, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 50(64), 2005 No.1, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.35-40, 2005
- [135] G. Dreyfus, Neural networks: methodology and applications, Publisher Birkhäuser, 2005, ISBN 3540229809, 9783540229803, 497 pages
- [136] Danilo P. Mandic, Jonathon A. Chambers, Recurrent neural networks for prediction: learning algorithms, architectures, and stability, Editor John Wiley and Sons, 2001, ISBN 0471495174, 9780471495178, 285 pagini
- [137] Upadhyaya, B. R., F. P. Wolvaardt, and O. Glockler (1987), "An Integrated Approach for Sensor Failure Detection in Dynamic Systems," Research Report prepared for the Measurement & Control Engineering Center, Report No. NE-MCEC-BRU-87-01.
- [138] Uhrig, R. E., J.W. Hines, C. Black, D. J. Wrest, and X. Xu (1996), "Instrument Surveillance and Calibration Verification System", Report Prepared by the University of Tennessee for Sandia National Laboratories, Contract No. AQ-6982.
- [139] Nabeshima, K., K. Susuki, and T. Turkan (1995), "Real-Time Nuclear Power Plant Monitoring with Hybrid Artificial Intelligence Systems," 9th Power Plant Dynamics, Control 7 Testing Symposium, Vol. 2, pp. 55.01, Univ. of Tennessee-Knoxville, May 24-26.
- [140] Dong, D. and T. McAvoy (1994), "Sensor Data Analysis Using Autoassociative Neural Networks," Proceedings of the World Congress on Neural Networks, San Diego, CA, Vol. 1, pp. 161-166.
- [141] Kramer, M. A., (1992), "Autoassociative Neural Networks" Computers in Chemical Engineering, 16:(4), pp. 313-328.
- [142] C. Vasar, I. Szeidert, I.Filip, G. Proştean, Short Term Electric Load Forecast with Artificial Neural Networks, Preprints of the 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2007), Sibiu, Sept. 27-30, 2007, ISBN 978-976-739-481-1, pag.443-450
- [143] Brandon Rasmussen, J. Wesley Hines, „Instrument Surveillance and Calibration Verification: A Case Study Using Two Empirical Modeling

- Paradigms", Proceedings of the Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2002), Knoxville, TN, May, 2002.
- [144] C. Vasar, O.Prostean, I.Filip, I.Szeidert, Electrical Energy Prediction Study Case Based on Neural Networks, Proceedings of 1st Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, SACI 2004, May 25-56, ISBN 963-71-54- 26-4, pag.89-96
- [145] ***, DATA DOCUMENTATION FOR DATA SET 6405 (DSI-6405), ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 1 DATA, July 12, 2006, National Climatic Data Center 151 Patton Ave, Asheville, NC 28801-5001 USA
- [146] ***, DATA DOCUMENTATION FOR DATA SET 6406 (DSI-6406), ASOS SURFACE 1-MINUTE, PAGE 1 DATA, July 12, 2006, National Climatic Data Center 151 Patton Ave, Asheville, NC 28801-5001 USA
- [147] Max Bramer, Research and development in intelligent systems XXIII : proceedings of AI-2006, the Twenty-Sixth SGA International Conference on Innovative Techniques and Applications of Artificial Intelligence, Publisher: London : Springer, 2007. ISBN: 184628662X 9781846286629
- [148] José S. Torrecilla, Maria L. Menab, Paloma Yáñez-Sedeñob and Julián García, Field determination of phenolic compounds in olive oil mill wastewater by artificial neural network, Biochemical Engineering Journal, Volume 38, Issue 2, 15 February 2008, Pages 171-179
- [149] Monruthai Radeerom, Chonawat Srisa and M. L. Kulthon Kasemsan, Prediction Method for Real Thai Stock Index Based on Neurofuzzy Approach, Lecture Notes in Electrical Engineering, ISSN 1876-1100, Volume 6, Book Trends in Intelligent Systems and Computer Engineering, Publisher Springer US, DOI 10.1007/978-0-387-74935-8, ISBN 978-0-387-74934-1 (Print)
- [150] Howard Demuth, Mark Beale, Martin Hagan, „Neural Network Toolbox™ 6” , User’s Guide, The MathWorks, Inc.,Natick, MA 01760-2098, USA, 2009
- [151] ***, Observations on the Automated Surface Observing System, Memorandum AV-2001-073, 26 June 2001, U.S. Department of Transportation, Office of the Secretary Of Transportation, Office of Inspector General.
- [152] NWS ASOS Program, <http://www.nws.noaa.gov/asos/>
- [153] You Ke, Liu Rui Qiang, Gao Run Quan, "Bluetooth Sensor Network Communication," iis, pp.203-206, 2009 International Conference on Industrial and Information Systems, Haikou, China April 24-25 April 2009
- [154] Markov Models for Wireless Sensor Network Reliability, C Vasar, O. Prostean, I. Filip, R. Robu, D.Popescu, Proceedings of IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, August 27-29, 2009, Cluj-Napoca, Romania, ISBN: 978-1-4244-5007-7, pag.323-328

-
- [155] A Reliability Analysis for Wireless Sensor Networks in a Wind Farm, C Vasar, O. Prostean, I. Filip, R. Robu, Proceedings of the XXII International Conference in Information, Communication and Automation Technologies, ICAT 2009, 29-31 October 2009, Sarajevo, Bosnia Herzegovina, IEEE Catalog Number: CFP0991G-CDR, ISBN: 978-1-4244-4221-8.
- [156] Consideration Regarding System Identification by Using Neural Networks, C. Vasar, I.Filip, I.Szeidert, Periodica "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Tomul 47(61), No.1, 2002, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.58-61
- [157] Neural Predictors for Electric Energy Consume within Power Systems, I.Filip, C.Vasar, O.Prostean, Proceedings of the 8th International Conference on Applied Electromagnetics, Nis, Serbia, Sept.3-5, 2007, ISBN 978-86-85195-47-0
- [158] Câteva aspecte ale prognozei consumului de energiei pe termen mediu, folosind rețele neuronale artificiale, A.Buta, B.Luștrea,I.Borlea, C.Vasar, Simpozionul International "Sisteme de Inteligenta Artificiala in Electroenergetica", SIAE'04, Editia a II-a, Galati, ROMANIA, 29-30 Septembrie, 2004
- [159] Comparative Studies above Neural System Identification, C.Vasar,I.Filip, I.Szeidert, 3rd Conference "Technology & Automation", 14-16 oct.2000, Athens Piraeus, Greece, vol 1, ISSN-1109-2262, pag.475-478

A1. LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE ÎN DOMENIUL TEZEI

A. Volumele unor manifestări științifice internaționale cotate ISI

1. **Markov Models for Wireless Sensor Network Reliability, C Vasar, O. Prostean, I. Filip, R. Robu, D.Popescu**, Proceedings of IEEE 5th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, August 27-29, 2009, Cluj-Napoca, Romania, ISBN: 978-1-4244-5007-7, pag.323-328 [IEEEExplore, ISI Proceedings]
2. **Issues on Low Power Routing For Wireless Sensor Networks, C. Vasar, G. Prostean, A. Robu**, Proceedings of the 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2009, Timisoara, Romania, May 28-29, 2009, ISBN 978-1-54244-4478-6, pag. 345-349 [ISI Proceedings, IEEEExplore]
3. **In-Network Aggregation with Size Reduction for Wireless Sensor Networks – Quantitative Analysis, C.Vasar, M.Biriescu, L.Mihet-Popa**, Proceedings of 19th DAAAM International Symposium 2008 "Intelligent Manufacturing & Automation", Trnava, Slovakia, 22-25th October 2008 [ISI Proceedings]
4. **Using Data Aggregation to Prolong the Lifetime of Wide-area Wireless sensor networks, C.Vasar, O. Prostean, I.Filip, I.Szeidert, A.Robu**, Proceedings of IEEE 4th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, August 28-30, 2008, Cluj-Napoca, Romania, ISBN: 978-1-4244-2673-7, pag.247-252 [IEEEExplore, ISI Proceedings]

B. Volumele unor manifestări științifice internaționale, indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. **A Reliability Analysis for Wireless Sensor Networks in a Wind Farm, C Vasar, O. Prostean, I. Filip, R. Robu**, Proceedings of the XXII International Conference in Information, Communication and Automation Technologies, ICAT 2009, 29-31 October 2009, Sarajevo, Bosnia Herzegovina, IEEE Catalog Number: CFP0991G-CDR, ISBN: 978-1-4244-4221-8, CD-ROM. [IEEEExplore]
2. **Short Term Electric Load Forecast with Artificial Neural Networks, C. Vasar, I. Szeidert, I.Filip, G. Prostean**, The 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2007), Sibiu, Sept. 27-30, 2007, ISBN 978-976-739-481-1, pag.443-450 [IFACPapersOnLine]

C. Reviste de specialitate din țară, cu circulație internațională recunoscută, indexate în baze de date internaționale (BDI). Reviste B+ în clasificarea CNCIS

1. ***Inverse control based on neural networks***, O. Proștean, I. Filip, **C.Vasar**, I., Szeidert Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 50(64), 2005 No.1, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.35-40
2. ***Consideration Regarding System Identification by Using Neural Networks***, **C. Vasar**, I.Filip, I.Szeidert, Periodica "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Tomul 47(61), No.1, 2002, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.58-61

D. Volumele unor manifestări științifice din țară sau străinătate

1. ***Aspects Regarding Data Aggregation in Wireless Sensor Networks***, **Cristian Vasar**, Octavian Proștean, Daniel Curiac, CONTI'2008, The 8th International Conference On Technical Informatics, 5-6 June 2008, Timisoara, Romania, pag. 71-76
2. ***Considerations regarding optimizing energy consumption within wireless sensor network using data aggregation***, **C. Vasar**, I. Filip, I. Szeidert, A. Robu, Proceedings of the 8th International Conference On Technical Informatics, CONTI'2008,5-6 June 2008, Timisoara, Romania, ISSN 1844-539X , pag. 67-70.
3. ***Neural Predictors for Electric Energy Consume within Power Systems***, I.Filip, **C.Vasar**, O.Proștean, Proceedings of the 8th International Conference on Applied Electromagnetics, Nis, Serbia, Sept.3-5, 2007, ISBN 978-86-85195-47-0, CD.
4. ***Electrical Energy Prediction Study Case Based on Neural Networks***, **C. Vasar**, O.Proștean, I.Filip, I.Szeidert, Proceedings of 1st Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, Timisoara, SACI 2004, May 25-56, ISBN 963-71-54- 26-4, pag.89-96
5. ***Câteva aspecte ale prognozei consumului de energie pe termen mediu, folosind rețele neuronale artificiale***, A.Buta, B.Luștrea,I.Borlea, **C.Vasar**, Simpozionul International "Sisteme de Inteligența Artificială în Electroenergetică", SIAE'04, Editia a II-a, Galați, ROMANIA, 29-30 Septembrie, 2004
6. ***Comparative Studies above Neural System Identification***, **C.Vasar**,I.Filip, I.Szeidert, 3rd Conference "Technology & Automation", 14-16 oct.2000, Athens Piraeus, Greece, vol 1, ISSN-1109-2262, pag.475-478

A2. LISTA DE LUCRĂRI PUBLICATE (EXCEPTÂND CELE DIN DOMENIUL TEZEI)

A. Volumele unor manifestări științifice internaționale cotate ISI

1. **On a Software Platform for the On-line Quality Evaluation in Academic Environment**, A.P. Robu , C. Vasar, Proceedings of the 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2009, Timisoara, Romania, May 28-29, 2009, ISBN 978-1-4244-4478-6, pag. 355-359 [ISI Proceedings, IEEExplore]
2. **Considerations about an Oracle Database Multi-Master Replication**, I.Filip, C.Vasar, R. Robu, Proceedings of the 5th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2009, Timisoara, Romania, May 28-29, 2009, ISBN 978-1-4244-4478-6, pag. 147-151 [ISI Proceedings, IEEExplore]
3. **Issues regarding the modeling and simulation of wind energy conversion system's components**, I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar , L. Mihet-Pop, Proceedings of the International Conference on Automation, Quality & Testing, Robotics (AQTR 2008), May 22-25, Cluj-Napoca, 2008 IEEE-TTLC, ISBN: 978-1-4244-2576-1, pag. 225-228 [ISI Proceedings, IEEExplore]
4. **Hybrid Architecture For A Single-Precision Arithmetic Processor**, L. Jurca A. Gontean, F. Alexa, C. Vasar, Proceedings of 19th DAAAM International Symposium 2008 "Intelligent Manufacturing & Automation", Trnava, Slovakia, 22-25th October 2008 [ISI Proceedings]
5. **Consideration regarding the convergence and stability of an adaptive self-tuning control system**, I. Filip , O. Prostean, I.Szeidert, C. Vasar Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Computational Cybernetics, Gammarth, Tunisia, Oct. 19-21, 2007, ISBN 1-4244-1146-7, pag. 75-79 [ISI Proceedings, IEEExplore]
6. **Fault Detection Methods for Frequency Converters Fed Induction Machines**, L. Mihet-Popa, O. Prostean, I. Filip, I. Szeidert, C.Vasar Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2007, Patras, Grecia September 25-28, 2007, ISBN 1-424-0826-1, pag. 161-168 [ISI Proceedings, IEEExplore]
7. **Considerations Regarding the Control of a Mixed Genset Based on the Usage of Synchronous and Asynchronous Generator**, M. Babescu, I. Filip, V. Balas, O. Prostean, C. Vasar, Proceedings of the 2nd IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment, Portorose, Slovenia, May 15-17, 2007, ISSN: 1790-5095, ISBN: 978-960-8457-69-0, pag.123-128 [ISI Proceedings]
8. **About Initial Setting of a Self-Tuning Controller**, I.Filip, C.Vasar, Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Computational Intelligence SACI 2007, Timisoara, Romania, May 17-18, 2007, IEEE Catalog Number: 07EX1788, ISBN 1-4244-1234-X, pag. 251-256 [ISI Proceedings, IEEExplore, Compedex]

9. **Self-tuning Control Using External Integrator Loop for a Synchronous Generator Excitation System**, I. Filip, O. Prostean, I.Szeidert, G. Prostean, C. Vasar, Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA2006, Prague September 20-22, 2006, IEEE Catalog Number: 06TH8897C, ISBN: 1-4244-0681-1, Library of Congress: 2006927951, pag.997-1000 [ISI Proceedings, IEEEExplore]

B. Volumele unor manifestări științifice internaționale, indexate în baze de date internaționale (BDI)

1. **Neural-Adaptive Control Based on Adaline Neurons with Application to a Power System**, I. Filip, O. Prostean, F.Dragan, C. Vasar, The 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL 2007), Sibiu, Sept. 27-30, 2007, ISBN 978-976-739-481-1, pag.457-464 [IFACPapersOnLine]

C. Articole publicate în reviste de specialitate de circulație internațională

1. **Above Flux Estimation Issues in Induction Generators with Application at Energy Conversion Systems**, I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, Volume 3, Issue Number 3, 2006, Special Issue on Applied Computational Intelligence, ISSN 1785-8860, pag. 137-148,

D. Reviste de specialitate din țară, cu circulație internațională recunoscută, indexate în baze de date internaționale (BDI). Reviste B+ în clasificarea CNCSIS

1. **Issues regarding the wind farm's design and implementation**, I. Szeidert, O. Prostean, I. Filip, C. Vasar, L. Mihet-Popa Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara Transactions on Mechanics, fascicolul 1, 2008, Tomul 53 (67), ISSN 1224-6077, pag. 141-144
2. **Neuro-Fuzzy Control and Classic PI Control - Comparative Analysis for Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine**, O. Prostean, I. Filip, C.Vaşar, I. Szeidert Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 51(65), 2006 No.4, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.11-16
3. **Wind Energy Conversion Systems - Modeling in Simulink Environment**, O.Prostean, I. Szeidert,, I Filip, C. Vasar, Scientific Buletin of "Politehnica" University of Timisoara, Transaction on Automatic Control and Computer Science, Vol. 49(63), 2004 No.1, Editura Politehnica, ISSN 1224-600X, pag.169-174
4. **Comparative Studies About an Adaptive Controller With Application to a Power System**, I.Filip, O.Prostean, I.Szeidert,C.Vasar, Buletin Stiintific al UPT, seria Automatica Calculatoare, Tomul 45(59), 2000, ISSN 1224-600X, pag.211-216

5. **Modeling of a Pickling Line**, I.Filip, C.Vasar, D.I.Curiac, Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Automatica și Calculatoare, Tomul 43(57), 1998, pag. 228-237
6. **Above the Simulation of a Synchronous Generator Connected to a Power System**, O.Prostean, I.Filip, D.I.Curiac, C.Vasar Buletinul Stiintific al Universitatii "Politehnica" din Timisoara, Automatica și Calculatoare, Tomul 43(57), 1998, pag.218-227

E. Volumele unor manifestări științifice internaționale din țară sau străinătate

1. **Considerations above Synchronous Machine Stability Analysis by using Phase Portraits**, M. Babescu, O. Prostean, G. Prostean, I. Szeidert, C. Vasar, Proceedings of the 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2007, 4-6 Oct. Chisinau, Republica Moldova, Analele Universitatii din Craiova, Seria Inginerie Electrica, Anul 31, nr.31, 2007, vol II, ISSN 1842-4805
2. **Comparative Study Regarding Classic PI and Fuzzy Control Solutions Applied at Electrical Drives Equipped with Permanent Magnet Synchronous Machine**, O.Prostean, C.Vasar, I.Szeidert, I.Filip, Proceedings of the 7th International Conference on Technical Informatics (CONTI'2006), Timisoara, Romania, June 8-9, 2006, Vol.1 pag.51-54, ISBN (10) 973-625-319-8
3. **Considerations regarding the flux estimation in induction generator with application at the control of unconventional energetic conversion systems**, I.Szeidert, O.Prostean, I.Filip, C.Vasar, Proceedings of 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2006, Timisoara, Romania, May 25-26, 2006, ISBN 963 7154 46 9, pag 77-86
4. **Adaptive Fuzzy Controller for Synchronous Generator**, I.Filip, O.Prostean, C.Vasar, I.Szeidert, Proceedings of 3rd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2006,, Timisoara, May 25-26, 2006, ISBN: 963 7154 46 9, pag 154-163
5. **Considerations Above Modelling And Control Of Windmills**, I.Szeidert, O.Prostean, I.Filip, N.Budisan, C.Vasar, Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 417-425
6. **Design An Simulation Of Two Adaptive Self-Tuning Controllers With Application To A Power System**, O.Prostean, I.Filip, I.Szeidert, C.Vasar, Proceedings of 2nd Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2005, Timisoara, Romania, May 12-14, 2005, ISBN: 963 7154 39 6, pag 121-129,
7. **Considerations Regarding The Usage Of Wind Energy Conversion Systems**, I. Szeidert, G.Prostean, I. Filip, C.Vasar, Manufacturing and Management in 21st Century, Ohrid, Republic of Macedonia, Sept. 16-17, 2004, CD-ROM, ISBN: 9989-2325-0-4
8. **A Petri Net Approach To The Modelling And Analysis Of Manufacturing Systems**, C.Vasar, G. Prostean, I. Filip, I. Szeidert, Manufacturing and Management in 21st Century, Ohrid, Republic of Macedonia, Sept. 16-17, 2004, CD-ROM, ISBN: 9989-2325-0-4

9. **Secure Web Access Control Algorithm**, I.Filip, I.Szeidert, C. Vasar, Proceedings of 1st Romanian-Hungarian Joint Symposium on Applied Computational Intelligence, SACI 2004, Timisoara May 25-56, ISBN 963-71-54-26-4, pag.159-165
10. **Design and Simulation of an Adaptive Control System with Application to Excitation Control of a Synchronous Generator**, I.Filip, O. Prostean, I. Szeidert., C. Vasar, Proceedings of the 22nd IASTED International Conference on Modelling, Identification, and Control (MIC 2003), February 10-13, 2003, Innsbruck, Austria IASTED/ ACTA Press 2003, ISBN 0-88986-343-1, pag. 629-634 [Compedex, Scopus, CSBib]
11. **Self-Tuning Regulator Based On Reference Compensation**, O.Prostean, I.Filip, C.Vasar, Proceedings of 13th International Conference on Control System and Computer Science, 2001, Bucharest, Proceedings, Editura Politehnica Press, ISBN 973-85237-1-0 pag.69-72
12. **Adaptive Fuzzy PI Controller**, O.Prostean, I.Filip, C.Vasar, 3rd Conference "Technology & Automation", 14-16 oct.2000, Athens Piraeus, Greece, vol 1, ISSN-1109-2262, pag.61-64
13. **Digital speed control structure implemented on a digital signal processor system**, I. Szeidert, O. Proștean, C. Vașar, 3rd Conference "Technology & Automation", 14-16 oct.2000, Athens Piraeus, Greece, vol 1, ISSN-1109-2262
14. **Comparative Studies above Neural System Identification**, C.Vasar,I.Filip, I.Szeidert, 3rd Conference "Technology & Automation", 14-16 oct.2000, Athens Piraeus, Greece, vol 1, ISSN-1109-2262, pag.475-478
15. **Digital Signal Processor System Used for Digital Motion Control**, I.Szeidert, I.Filip, C.Vasar, F.Dragan, Proceedings of A&Q'2000 International Conference on Automation and Quality Control, Cluj-Napoca, 28-29 Mai 2000, vol. II, ISBN 973-386-058-2, pag.197-201
16. **On-line Parameters Estimations of a Synchronous Generator Model**, I.Filip, O.Prostean, N.Budisan, C.Vasar, S.Mahil, AWEA ENERGEX 2000, Proceedings of the 8th International Energy Forum, Balaban Publisher, Las Vegas, USA, July 23-28, 2000, ISBN 1-58716-016-1, pag.245-251
17. **Sistem cu microcontroler pentru controlul temperaturii**, Ioan Borza, O. Dranga, G. Prostean, Cristian Vașar, Conferința tehnico-științifică cu parti-cipare internațională "Ingineria sanitara si mediul ambiant", 2-4 oct.1997, Chișinău, Moldova, 4 pag.
18. **Sistem distribuit pentru automatizarea instalațiilor unei clădiri mari**, Ioan Filip, Ioan Borza, Cristian Vașar, Conferința tehnico-științifică cu parti-cipare internațională "Ingineria sanitară și mediul ambiant", 2-4 oct.1997, Chișinău, Moldova, pag.152-157.

F. Volumele unor manifestări științifice naționale

1. **2 MW Active Stall Controlled Wind Turbines Versus Pitch Controlled Wind Turbines**, Mihet-Popa Lucian, Szeidert Iosif, Vasar Cristian, "ELS 2007, International Symposium on Electrical Engineering and Energy Converters, Suceava - Romania" 2007 27-28, Septembrie, ISBN 978-973-666-259-1 pag. 121-126
2. **Considerations Regarding the Implementation of an Informatics Communication Infrastructure**, I.Szeidert, I. Filip, O. Prostean, I. Borza,

- C. Vasar, Conferinta Instalatiile pentru Constructii si Confortul Ambiental, ICCA 2006, Editia a XV-a, Timisoara, Romania, 6-7 aprilie 2006, pag.8
3. **Mathematical Models of Specific Elements of Wind Energy Conversion Systems Based on Induction Generator**, O. Prostean, I.Szeidert, N. Budisan, G. Prostean, C. Vasar, Simpozion Electrotehnica si Energetica, Zilele Academice Timisene, 26-27 mai 2005, ISBN: 973-625-253-3, CD-ROM
 4. **Câteva aspecte ale prognozei consumului de energie pe termen mediu, folosind rețele neuronale artificiale**, A.Buta, B.Luștrea,I.Borlea, C.Vasar. Simpozionul International, "Sisteme de Inteligenta Artificiala in Electroenergetica " , SIAE'04, Editia a II-a, Galati, ROMANIA, 29-30 Septembrie, 2004
 5. **Some considerations about electrical energy production costs**, I. Szeidert, G. Prostean, C. Vasar, Sesiune de comunicari stiintifice a Universitatii "Petru Maior", 27-28 octombrie, 2000, Targu-Mures, pag. 215-220
 6. **Aspecte ale implementării software a unui sistem expert de determinare a frecvenței vibrațiilor funcție de simptomele provocate de către acestea subiecților umani**, C. Popa, I. Szeidert, C. Vașar, Timișoara Conferinta de la management in productie si transporturi - sectiunea tineri doctoranzi - 12-13 octombrie 2000
 7. **Problematica funcționării instalațiilor de încălzire centrala sub aspectul realizării unor parametrii funcționali și energetici optimi**, I.Borza, O. Prostean, D. Curiac, I.Filip, C.Vasar, I.Szeidert Simpozionul "Producerea, Transportul și Utilizarea Energiei, Cluj-Napoca, mai 2000, ISBN 973-9464-91-2, pag.355-362
 8. **Structuri de achiziție și filtrare numerică folosite în automatizarea instalațiilor din construcții**, I. Szeidert, O. Proștean, I. Borza, C.Vașar Conferința "Știința modernă și energia" – Producerea, transportul și utilizarea energiei, ISBN 973-9464-91-2, Cluj-Napoca, 17 - 18 mai 2000, pag. 264-269
 9. **Reglarea automata a temperaturii folosind strategii convenționale și fuzzy**, C.Vasar, I.Filip, I.Szeidert, I.Borza Simpozionul "Producerea, Transportul și Utilizarea Energiei, Cluj-Napoca, Mai 2000, ISBN 973-9464-91-2, pag.255-263
 10. **Aspecte ale modelării și simulării unui sistem de reglare automată a temperaturii într-o incintă**, C.Vașar, I. Borza, I. Szeidert, Simpozionul Societății de instalații electrice și automatizări SIEAR, București, 24 - 26 noiembrie 1999
 11. **Sistem cu procesor digital de semnal pentru conducerea unei acționări de instalație în construcții**, I. Szeidert, C. Vașar, F. Dragan, Simpozionul Societății de instalații electrice și automatizări SIEAR, București, 24 - 26 noiembrie 1999, pag. (151-156)
 12. **Logica fuzzy în conducerea automată a instalațiilor**, Filip I., Prostean O., Dranga O., Vașar C., Simpozionul cu participare internaționala "Instalații pentru construcții și confort ambiental" ediția 7, 23-24 aprilie 1998. Timișoara , vol.2, 6 pag.
 13. **Aspecte ale simulării unor sisteme de reglare a instalațiilor pentru constructii, utilizand mediul Labview**, O. Prostean, O.Dranga, D. Curiac, C. Vasar, Simpozionul cu participare internaționala "Instalații pentru

- construcții și confort ambiental" ediția 7, 23-24 aprilie 1998. Timișoara , vol.1
14. **Aspecte ale conducerii automate a procesului de neutralizare a apelor reziduale**, D.I.Curiac, C.Vasar, I.Filip, O.Dranga Simpozionul internațional "Instalații pentru construcții și confort ambiental" editia 7, Timișoara 23-24 aprilie 1998, vol.1, pag.203-210