



UNIVERSITATEA POLITEHNICA BUCUREȘTI  
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE  
DEPARTAMENTUL DE AUTOMATICĂ ȘI INFORMATICĂ INDUSTRIALĂ

---

## **Improving Life and Work with Reliable Wireless Sensor Networks**

- Summary of PhD Thesis -

## **Contribuții la îmbunătățirea condițiilor de viață și muncă prin rețele de senzori wireless fiabile**

- Rezumatul tezei de doctorat -

---

*Doctorand:*

Ing. Grigore STAMATESCU

*Coordonator Științific*

Prof. Dr. Valentin SGÂRCIU

Septembrie 2012, București

# Cuprins

<b>1</b>	<b>Introducere</b>	<b>4</b>
1.1	Relevanță și obiective . . . . .	4
1.2	Structura tezei . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Context și aplicații</b>	<b>11</b>
2.1	Fundamentele rețelelor de senzori wireless . . . . .	11
2.1.1	Structura unui nod senzorial și topologii de rețea . . . . .	12
2.1.2	Provocări energetice și de comunicație în rețele de senzori . . . . .	12
2.2	Domenii de aplicații . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Hardware și software pentru rețele de senzori wireless</b>	<b>14</b>
3.1	Platforme WSN generice . . . . .	14
3.1.1	IRIS . . . . .	14
3.1.2	Imote2 . . . . .	14
3.2	Sisteme de operare pentru dispozitive cu resurse limitate . . . . .	15
3.3	Protocoale și standarde . . . . .	16
3.3.1	S-MAC . . . . .	16
3.3.2	B-MAC . . . . .	16
3.3.3	X-MAC . . . . .	17
3.3.4	IEEE 802.15.4-2006 . . . . .	18
3.3.5	WirelessHART . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Integrarea în sisteme complexe de achiziție de date cu monitorizare și control la distanță</b>	<b>19</b>
4.1	Ecosistemul Memsic-IRIS-XMesh . . . . .	19
4.1.1	Instalare indoor pe termen mediu . . . . .	19
4.2	Sistem software dedicat pentru integrarea cu instrumentația virtuală . . . . .	21
4.2.1	Descriere generală . . . . .	22
4.2.2	Considerații de implementare . . . . .	23
4.2.3	SmartVI - Aplicație de instrumentație virtuală pentru ilustrarea integrării WSN . . . . .	24

4.3	Servicii pentru accesul la distanță la instrumentație virtuală . . . . .	25
4.3.1	Variabile partajate . . . . .	26
4.3.2	Panouri web . . . . .	26
4.3.3	Aplicații pentru terminale mobile . . . . .	26
<b>5</b>	<b>Dezvoltarea nodurilor senzoriale cu detectori de gaze de cost redus pentru monitorizarea calității aerului</b>	<b>27</b>
5.1	Monitorizarea densă indoor a calității aerului . . . . .	27
5.2	Detectoare semiconductoare de gaze pentru dezvoltarea nodurilor senzoriale	27
5.3	Evaluarea unui nod de măsurare a concentrației de particule . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Rețele de senzori vizuali pentru aplicații interdisciplinare în domeniul medical</b>	<b>33</b>
6.1	Rețele de senzori wireless multimedia . . . . .	33
6.2	MiceNet - Un instrument pentru cercetarea medicală . . . . .	34
6.2.1	Context specific și dezvoltări asociate . . . . .	34
6.2.2	Provocări . . . . .	35
6.2.3	Descrierea sistemului și experimentare . . . . .	35
<b>7</b>	<b>Concluzii, contribuții personale și noi direcții de dezvoltare</b>	<b>38</b>
	<b>Bibliografie</b>	<b>42</b>

# 1 Introducere

## 1.1 Relevanță și obiective

Rețelele de senzori wireless (Wireless Sensor Networks - WSN) reprezintă sisteme tehnice formate dintr-un număr mare de dispozitive de calcul de dimensiuni mici echipate cu senzori, capacități de procesare și comunicație limitate și resurse energetice restrânse, care colaborează în vederea atingerii unor obiective specifice. În sensul acestei definiții clasice, ele diferă de rețelele wireless normale, bazate pe infrastructură sau ad-hoc, și oferă suficiente argumente pentru a fi clasificate drept un domeniu de cercetare de sine stătător. Rețelele de senzori wireless au fost proiectate pentru a opera pe baterii și a fi instalate în zone de interes izolate pentru a monitoriza sau chiar controla, cum este cazul rețelelor de senzori și actuatori, un fenomen anume. Din acest motiv, strategiile de procesare, comunicație, achiziție și agregare a datelor depind puternic de tipul de date vehiculat în rețea și de specificul aplicației. În unele situații extreme, nodurile senzoriale au fost gândite să fie aruncate dintr-un avion peste o anumită zonă unde odată ajunse, pornesc, se auto-organizează și încep să transmită informațiile către un punct central de agregare. După ce aplicația și-a atins obiectivele, nodurile sunt considerate de unică folosință și nu sunt recuperate.

Principala motivație din spatele acestei lucrări constă în faptul că *rețelele de senzori wireless sunt interesante deoarece deschid calea monitorizării și controlului la o scară și cu o rezoluție, atât temporală, cât și spațială nemaiîntâlnite*. În orice aplicație ar putea fi proiectată, de la monitorizare de mediu la aplicații medicale sau instalări industriale, acestea sunt eficiente și își propun să atingă obiectivele cu minimum de resurse energetice și comunicație posibil. Evoluțiile recente arată că WSN reprezintă componente esențiale atât ale Internetului Obiectelor (Internet of Things - IOT) cât și ale cooperării Machine-to-Machine (M2M). Ambele direcții au potențialul de a influența societatea la o scară globală. Prima prin dotarea obiectelor utilizate zi de zi cu resurse de calcul și comunicație, fapt ce poate afecta viața cotidiană de o manieră imprevizibilă. O periută de dinți care îi amintește posesorului să se spele pe dinți ar putea părea mult acum dar poate să reprezinte o realitate a viitorului. Cea din urmă prin faptul că permite utilajelor și mașinilor să schimbe informații direct, fără intervenție umană, și să ia decizii într-un mod autonom, ducând astfel automatizarea la un nou nivel.

Domeniul WSN este definit prin eterogenitate. Există acum noduri senzoriale de dimensiunea unei monede și noduri de dimensiunea unei cutii de pantofi. Acestea folosesc microcontrollere pe 8, 16 sau chiar 32 de biți care au frecvențe de ceas de până la 400MHz. Unele

rămân la senzori scalari dar altele includ surse bogate de informație sub forma microfoanelor sau chiar a camerelor miniaturale. În timp ce majoritatea senzorilor wireless folosesc comunicația radio și sunt alimentați de baterii, câteva au trancievere optice și pot fi alimentate din surse regenerabile. Cu timpul au apărut standarde, atât din partea asociațiilor profesionale cum sunt IEEE și ISA dar și de la asociații industriale (ZigBee, WirelessHART), grupuri de interes speciale (Bluetooth) sau producători individuali. Adoptarea lor până acum s-a dovedit greoaie dar avansează cu fiecare aplicație concretă. Această fragmentare a adus în discuție randamentul investițiilor în WSN. Această tendință, dacă este adoptată pe larg, are potențialul de a afecta finanțarea proiectelor care alimentează această direcție de cercetare.

În fiecare an, compania de consultanță Gartner Inc. publică un raport intitulat "Emergent Technologies Hype Cycle". Acesta observă noile tehnologii pentru a le evalua maturitatea și potențialul și orizontul de timp pentru adoptarea pe scară largă de către piață. Este în primul rând adresat utilizatorilor comerciali și industriali dar poate oferi o oglindă bună și mediului academic și de cercetare din perspectiva unei evaluări a succesului transferului tehnologic, tehnologiile incluse aici provenind în mare măsură din laboratoare universitare și centre de cercetare. Rezultatele pentru anii 2006 și 2012 sunt prezentate în figura 1. Urmărim evoluția domeniului "Mesh Networks: Sensors". Cunoscând faptul că dezvoltarea inițială a rețelelor de senzori wireless a debutat la sfârșitul anilor 90, se poate observa că domeniul a devenit oarecum saturat până în 2006, fiind plasat în "valea dezamăgirii". În 2012 acesta trece prin debutul unei noi perioade de dezvoltare, îndreptându-se spre "vârful așteptărilor exagerate". Consider cauza ca fiind noile dezvoltări hardware, adoptarea mai rapidă a standardelor și o serie de noi utilizări ale WSN în medicină, automatizarea clădirilor și facilități industriale. Trecând peste paradoxul unui drum invers al rețelelor de senzori wireless pe scara evolutivă, perspectiva pentru adoptarea pe scară largă rămâne la peste 10 ani, ceea ce denotă o stagnare în termeni absoluți.

Aici se află cheia și obiectivele acestei lucrări. Rețelele de senzori wireless nu s-au ridicat la înălțimea așteptărilor ca instrumente fiabile pentru specialiștii și utilizatorii din alte domenii. *Teza își propune să abordeze o serie de nișe prin cercetări teoretice și aplicative.* În acest sens, pot rezuma succint contribuțiile mele la: integrarea, extinderea platformelor senzoriale și abordarea unor direcții de cercetare noi. Acestea au fost probate prin implementări de laborator, validări și diseminare prin publicații relevante. Trecând prin această secțiune introductivă, **obiectivele** propuse ale lucrării sunt:

În domeniul teoretic:

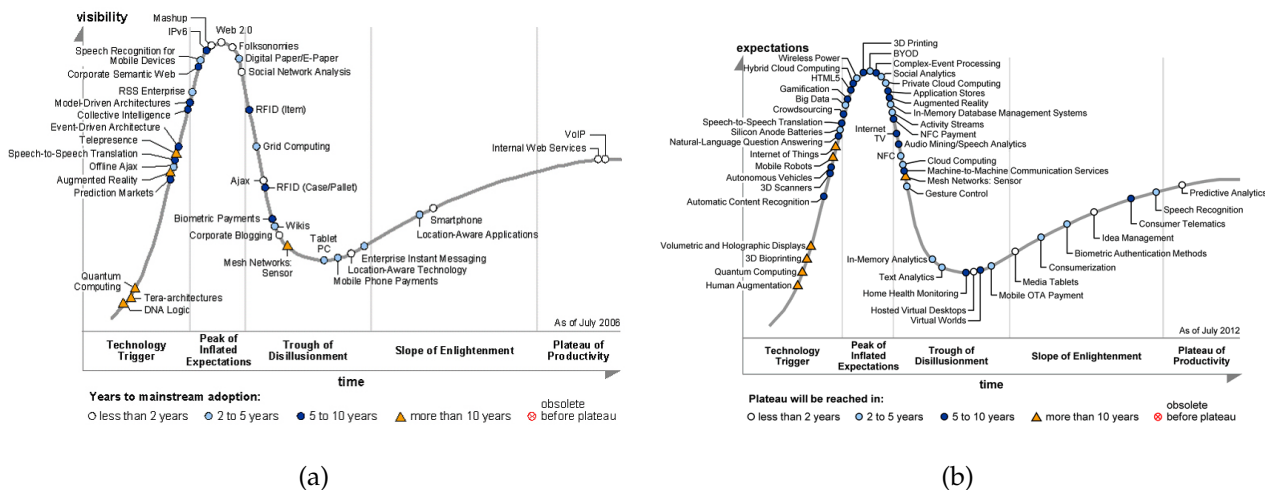


Figura 1: Gartner Emergent Technologies Hype Cycle (a) 2006 (b) 2012

- sintetizarea cunoștințelor actuale relevante pentru rețelele de senzori wireless;
- sintetizarea dezvoltărilor curente referitoare la aspecte hardware și software, protocoale de rețea și standarde aplicabile rețelelor de senzori wireless;
- starea actuală a cercetării și identificarea unor direcții de dezvoltare valide;
- validarea implementării conceptului de rețea de senzori wireless în diferite scenarii;
- proiectarea unei arhitecturi generice de sistem, potrivite unei game largi de aplicații;

În domeniul aplicativ:

- integrarea și implementarea unei rețele de senzori wireless într-un sistem complex de achiziție de date cu monitorizare și control la distanță;
- dezvoltarea de programe eficiente la toate nivelurile ierarhice ale unei rețele de senzori: nod, gateway și server;
- proiectarea și implementarea unor module hardware pentru extinderea platformelor de cercetare WSN curente de largă răspândire;
- validarea ipotezelor teoretice prin instalări de medie și lungă durată;
- analiza și prelucrarea datelor pentru informațiile provenite de la WSN.

## 1.2 Structura tezei

Teza este structurată conform cu diagrama din Figura 2. Baza edificiului acoperă noțiunile elementare și fundamentale ale rețelelor de senzori wireless. Acestea includ studii selective ale unor publicații de profil înalt care acoperă arhitecturile, protocoalele, standardele, middleware, platforme hardware și software împreună cu aplicații și instalări de succes. Cei trei piloni plasați pe această bază reprezintă cele trei direcții principale de contribuții. Primul este dedicat închiderii nișei dintre cercetarea în inginerie electrică și știința calculatoarelor și specialiștii de domeniu, beneficiari primari al unor astfel de sisteme de monitorizare și control. Am implementat aceste contribuții prin integrarea rețelelor de senzori wireless cu medii de dezvoltare grafică și aplicații ale acestora în lumea reală. Cel de-al doilea pilon abordează provocările în integrarea subsistemelor senzoriale pentru monitorizarea indoor a calității aerului (Indoor Air Quality - IAQ) precum și probleme specifice care provin din utilizarea unor senzori cu necesar energetic mare în dispozitive de calcul și comunicație cu constrângeri energetice. Cel de-al treilea pilon tratează abordarea unei direcții de aplicații noi, denumită *MiceNet* - un instrument bazat pe rețele de senzori vizuali pentru sprijinul cercetării medicale. Deasupra structurii sunt amplasate concluziile, sumarul contribuțiilor personale și direcțiile noi de dezvoltare deschise de aceste cercetări prin "Contribuții la îmbunătățirea condițiilor de viață și muncă prin rețele de senzori wireless fiabile".

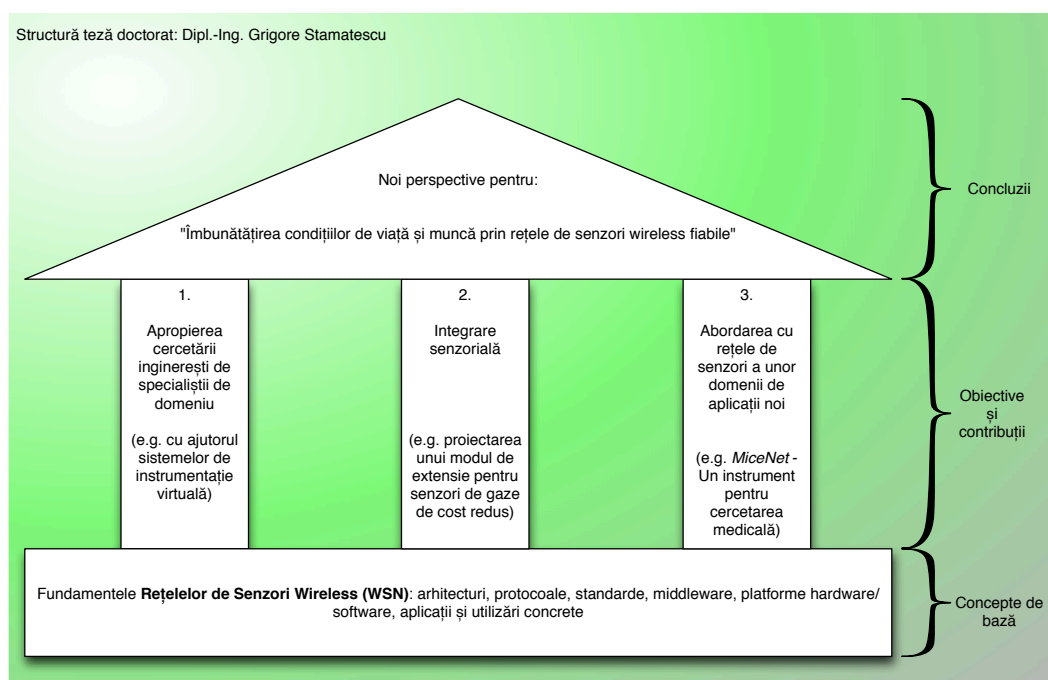


Figura 2: Structura tezei

Pe capitole:

**Capitolul 1** reprezintă capitolul introductiv în care se prezintă relevanța științifică a tezei, sunt enumerate obiectivele și este prezentată în detaliu structura lucrării.

**Capitolul 2** prezintă contextul și aplicațiile în care se încadrează această lucrare. Oferă definiția unei rețele de senzori wireless și evidențiază utilizările sale potențiale precum și provocările de cercetare. Este efectuată o analiză detaliată a componentelor generice ale unui nod senzorial, denumit și *mote*. Sunt parcurse componentele de bază ale unui nod: microcontroller, transceiver radio, senzori și sursa de alimentare. Introducem de asemenea și problemele energetice ce apar în cazul acestor dispozitive și provocările pentru comunicația radio ce trebuie să fie tratate în operarea unor sisteme radio de joasă putere care operează în benzi nelicențiate aglomerate cum este banda ISM (Industrial, Științific, Medical) de 2,4Ghz. Cea de-a doua parte a capitolului este rezervată unor aplicații consacrate ale rețelelor de senzori wireless în domeniile care pot beneficia cel mai mult de această tehnologie. Ordinea aleasă a domeniilor este bazată pe stadiul lor curent de dezvoltare și potențialul în raport cu rețelele de senzori wireless și includ monitorizarea ecologică, aplicații medicale, monitorizare și control industrial și mentenanța infrastructurii. Fiecare subsecțiune este dedicată pentru aplicații care se remarcă prin particularitățile sale, noutatea soluțiilor tehnice și scara de implementare. Acestea includ monitorizarea unor vulcani activi, rețele de senzori wireless pentru corp pentru monitorizarea semnelor vitale ale pacienților sau monitorizarea infrastructurilor industriale de transport.

**Capitolul 3** studiază dezvoltările hardware și software recente care au permis și susțin apariția domeniului de cercetare în rețele de senzori wireless. Prima secțiune oferă o descriere practică a două platforme de cercetare pentru rețele de senzori wireless la cele două capete ale scării de performanță. Am studiat modulele IRIS care au capacități de procesare și opțiuni de extensie limitate și platforma Imote2 care este mai puternică, poate fi extinsă mai mult și este capabilă de a rula sarcini de nivel înalt cum sunt captura și procesarea imaginilor sau rularea unei distribuții de Linux minimale. Cea de-a doua secțiune descrie arhitecturi software personalizate sub forma unor medii de execuție sau sisteme de operare bazate pe evenimente pentru dispozitive cu resurse limitate. Aceste tipuri de middleware au rolul de a oferi instrumente de utilitare standardizate pentru dezvoltarea facilă a aplicațiilor. În special, TinyOS dispune de o comunitate de dezvoltatori largă pe parcursul ultimilor 10-12 ani și este principalul nostru reper dat fiind faptul că platforma hardware (Memsic IRIS) pe care se bazează majoritatea contribuțiilor personale ale acestei lucrări este suportată sub TinyOS în versiunile 1.x și 2.1.1. Cea de-a treia secțiune a capitolului oferă o perspectivă progresivă co-



mună a protocoalelor și standardelor pentru rețele de senzori wireless. Observăm evoluția a trei protocoale de acces la mediu: S-MAC, B-MAC, X-MAC care au determinat o serie de cercetări în această zonă și reprezintă punctul de plecare pentru multe alte protocoale de acces la mediu descrise în literatura de specialitate. Standardul IEEE 802.15.4-2006 a reprezentat o piatră de hotar pentru rețelele de senzori wireless și definește specificații pentru controlul accesului la mediu (Medium Access Control - MAC) și la nivelul fizic (PHY) pentru rețele wireless personale cu rată redusă de date (Wireless Personal Area Networks - WPANs). Am luat în calcul de asemenea și standardul industrial WirelessHART care oferă o implementare bazată pe TDMA a IEEE 802.15.4 și are menirea de a aduce rețelele de senzori wireless către aplicațiile productive, care generează profit, din industrie, în special prin oferirea compatibilității cu vechile echipamente HART cu fir prin adaptoare wireless.

**Capitolul 4** debutează cu o descriere a protocolului de comunicație pentru rețele de tip plasă, XMesh, care este livrat standard cu nodurile Memsic IRIS și utilitarele suport. Aplicația MoteView realizează analiza și stocarea datelor iar MoteWorks oferă un mediu de dezvoltare integrat pentru realizarea de aplicații pentru nodurile wireless sub TinyOS 1.x. Este prezentată de asemenea și arhitectura pe trei niveluri care conține nivelul nod, nivelul poartă de acces/gateway și nivelul server. Pe această bază am dezvoltat o aplicație de monitorizare indoor pe termen mediu pentru a valida și testa colectarea fiabilă a datelor pentru parametrii de mediu cum sunt: temperatura, umiditatea, presiunea atmosferică și luminozitatea. Am raportat și evaluat rezultatele și am adus contribuții personale pentru îmbunătățirea unor indicatori ale acestui tip de aplicații. Au fost subliniate provocările specifice ale comunicației radio de joasă putere în mediile indoor. Acestea provin din partajarea benzii ISM de 2.4GHz cu dispozitive de înaltă putere precum și dintr-un peisaj dificil care prezintă ziduri sau obiecte metalice mari care produc atenuarea nedorită a canalului radio sau reflecții multi-cale ale semnalului. Am continuat cercetările prin integrarea sistemului cu mediul de dezvoltare grafică LabVIEW printr-o suită de drivere software dedicate. Am validat abordarea personală prin proiectarea și implementarea unui sistem de instrumentație virtuală în jurul rețelei de senzori wireless pentru monitorizare și controlul unui mediu de casă inteligentă (SmartVI). De asemenea, o contribuție specifică este și extinderea structurilor software pentru includerea de drivere pentru plăcile de extensie și dezvoltare MDA100 și MDA300 ca module generice de achiziție de date pentru platforma IRIS. În încheierea capitolului, am discutat opțiunile existente pentru diseminarea datelor provenite de la rețeaua de senzori wireless și integrarea lor cu sisteme industriale. Ne-am concentrat atenția pe motorul de variabile partajate (Shared Variable Engine - SVE), funcționalitatea de publicare prin inter-

net a panourilor frontale și serverul web LabVIEW pentru alimentarea cu date a aplicațiilor pentru terminale mobile.

**Capitolul 5** propune aplicarea rețelelor de senzori wireless pentru monitorizarea indoor a calității aerului. Prima secțiune este dedicată argumentării scenariului în care o rețea densă de sisteme embedded de calcul și comunicație este instalată în interiorul unei clădiri rezidențiale, de birouri sau spațiu industrial, cu scopul de a măsura și raporta anumiți parametri de calitate a aerului: monoxid de carbon, dioxid de carbon, ozon, particule. Aceasta aduce cu sine avantajele unei monitorizări cu rezoluție temporală și spațială mare și este îndeosebi potrivită pentru dotarea clădirilor existente cu costuri reduse în ceea ce privește instalarea și operarea. În acest scop, am selectat o serie de senzori, am descris caracteristicile lor relevante în special în ceea ce privește consumul energetic, timpul de răspuns, selectivitate, calibrare și liniaritate. Am extras din literatura de specialitate și discutat strategii de alimentare adaptive pentru operarea cât mai eficientă a unor astfel de senzori cu cerințe energetice ridicate. Ultima secțiune a capitolului descrie în detaliu proiectarea, implementarea și evaluarea unui nod de măsurare wireless pentru integrarea unui senzor de particule/praf. Rezultatele au fost validate în raport cu un instrument de măsură profesional cu laser. Mergând un pas înainte, am propus o dezvoltare nouă sub forma unui modul de extensie pentru nodurile IRIS pentru aplicații de monitorizare a calității aerului. Acesta găzduiește trei senzori de gaze alături de circuitele necesare de condiționare de semnal și alimentare. Se conectează la modulul principal de procesare și comunicație IRIS prin conectorul standardizat MICA de 51 de pini. Raportat la cunoștințele noastre actuale, este primul astfel de modul pentru platforma IRIS. Faptul ce îl face relevant este răspândirea largă a acestor noduri în comunitatea academică. Până în prezent cercetătorii implicați în monitorizarea calității aerului cu rețele de senzori wireless au preferat fie să își proiecteze propriile platforme wireless fie să dezvolte extensii pentru alte noduri. Sunt prezentate contribuțiile hardware și software pentru acest proiect.

**Capitolul 6** abordează o direcție modernă de aplicații pentru rețelele de senzori vizuali în scenarii interdisciplinare din domeniul medical. Am pornit prin studiul rețelelor de senzori wireless multimedia care tratează echiparea unor sisteme cu resurse limitate de calcul și comunicație cu surse bogate de date, camere miniaturale în cazul rețelelor de senzori vizuali. Principala contribuție a capitolului se numește *MiceNet*. Aceasta este o arhitectură de sistem pentru rețele de senzori vizuali adaptată situației de colectare automată și analiză a datelor de la șoarecii de laborator folosiți în cercetarea medicală prin rețele de senzori cu capacități vizuale și calcul distribuit. Aplicația concepută își propune urmărirea animalelor și evalu-

area mobilității acestora ca reacție la diferite simptome de boală. Am prezentat contextul specific și dezvoltările asociate și am discutat în detaliu provocările alături de o incursiune interdisciplinară în analiza comportamentală. Prezentăm dezvoltări la nivel de nod, nivel de gateway/middleware și nivel de server. O mare parte a contribuțiilor constă în implementarea unor algoritmi de procesare de imagini fiabili pentru identificarea șoarecilor și urmărirea acestora care recurg la operații elementare de procesare, transformări ale spațiului de culori, metode de înlăturare a fundalului (e.g. algoritmi de clasificare k-means) sau recunoaștere de forme. Rezultatele globale și perspectivele de instalare ale unui sistem complet în facilitatea de animale a unui centru de cercetare medicală sunt prezentate. *Rezultatele și contribuțiile acestui capitol au fost obținute pe parcursul unui stagiu de cercetare în grupul de sisteme ciberfizice al Prof. Kay Römer la Institutul de Informatică Tehnică, Universitatea din Lübeck, Germania.*

**Capitolul 7** marchează finalul tezei. Oferă concluziile finale, sintetizează contribuțiile personale și originale aduse pe parcurs și deschide calea unor noi direcții de dezvoltare, care vor continua cercetările începute.

**Anexele A și B** sunt dedicate unor implementări esențiale de cod sursă. Acestea subliniază anumite provocări tehnice pe parcursul dezvoltării pentru implementarea sistemelor de monitorizare indoor a calității aerului (Anexa A) și urmărirea cu rețele de senzori vizuali a animalelor de laborator cu procesare complexă de imagini (Anexa B). **Anexa C** prezintă schemele electrice ale modulului de extensie pentru nodurile IRIS.

## 2 Context și aplicații

### 2.1 Fundamentele rețelelor de senzori wireless

Rețelele de senzori wireless sunt o clasă de sisteme embedded interconectate [1] care comunică fără fire, de obicei prin intermediul undelor radio, și integrează o serie de senzori și subsisteme senzoriale selectate pentru a obține date specializate din mediul investigat.

Deși în teorie progresul a fost determinat de miniaturizare și de viziuni futuriste cum este *smart dust*, se poate observa o tendință care a dus la realizarea de noduri senzoriale constante ca dimensiuni, dar cu mai multe resurse de calcul și periferice. Acest fapt poate fi explicat prin dezvoltarea mai lentă a tehnologiilor de stocare a energiei pe parcursul ultimei decade.

### 2.1.1 Structura unui nod senzorial și topologii de rețea

Structura convențională a unui nod senzorial include: microcontroller, tranciever radio, senzori și sursă de alimentare (figura 3).

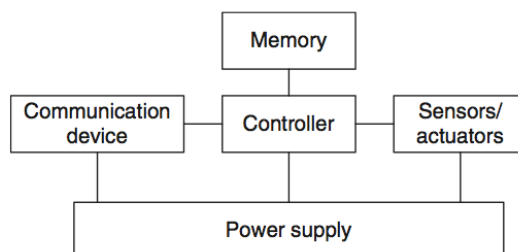


Figura 3: Structura unui nod senzorial [2]

Nodurile senzoriale colaborează pentru atingerea unor obiective comune și în acest scop, formează o rețea care poate avea următoarele topologii statice sau dinamice: stea, plasă sau hibridă. În rețeaua stea toate nodurile comunică direct cu punctul central al rețelei oferind o rată bună de transmisie și latență redusă în detrimentul scalabilității și acoperirii. Rețeaua de tip plasă permite și comunicația multi-salt în care nodurile intermediare au capacitatea de a redirecționa mesajele. Oferă scalabilitate bună și acoperire în detrimentul latenței de transmitere a mesajelor. În rețeaua de tip hibrid nodurile sunt clasificate și organizate în funcție de resursele de calcul și comunicație.

### 2.1.2 Provocări energetice și de comunicație în rețele de senzori

Economia de energie în rețelele de senzori este atinsă în principal prin reducerea consumului energetic prin optimizarea operării transceiver-ului radio. Aceasta este realizată prin utilizarea cât mai frecventă a modurilor de funcționare de mică putere cu ascultarea adaptivă a canalului radio, folosirea de strategii specifice pentru evitarea retransmisiilor datorate coliziunilor și interferenței. Relația următoare oferă o formă generică a ecuației Friis pentru atenuarea canalului radio:

$$P_{rcvd}(d) = P_{rcvd}(d_0) \cdot \left(\frac{d_0}{d}\right)^\gamma \quad (1)$$

Conform acesteia, puterea recepționată scade exponențial cu un factor  $\gamma$ . În funcție de mediul de propagare,  $\gamma$  poate fi 2, în spațiu deschis și ajunge la 5-6 pentru spații indoor aglomerate. Acest model reprezintă un argument pentru comunicația multi-salt care reduce distanța legăturilor de date și poate contribui la reducerea necesarului energetic.

Dezvoltările noi au luat în calcul diversitatea spațială și de frecvență în comunicația radio pentru rețelele de senzori wireless [3]. Este afirmat de exemplu că, prin utilizarea a două transceivere radio diferite - 900MHz și 2.4GHz pe același nod această diversitate poate fi exploatată și comutarea între cele două conduce la o mai bună rată de recepție a pachetelor (PRR) și stabilitate crescută a nivelului de rutare.

Strategiile de rutare contribuie la diseminarea eficientă a datelor în rețea. Pe baza structurii rețelei poate fi făcută o clasificare [4]: plate, ierarhizate și bazate pe locație. Acestea au un impact important asupra economisirii energiei la nivel de nod și de rețea prin selecția optimă a traseelor de la sursa de date către punctul de colectare. Informațiile de rutare, cum sunt calitatea legăturilor și tabelele de vecini pot fi stocate într-o manieră centralizată sau distribuită. Abordarea centralizată oferă consistență dar are scalabilitate redusă în timp ce abordarea distribuită este mai potrivită rețelelor cu un număr mare de noduri, introducând însă în același timp un efort suplimentar de comunicație prin actualizări dese ce trebuie transmise fiecărui nod.

## 2.2 Domenii de aplicații

Ordonate după stadiul actual de dezvoltare și potențialul de viitor, cele mai importante domenii de aplicații pentru rețelele de senzori wireless sunt: monitorizarea ecologică, aplicațiile medicale, monitorizarea și controlul industrial și mentenanța infrastructurii.

Un exemplu de aplicație este raportat în [5]. Scopul a fost monitorizarea vulcanului activ Reventador din Ecuador pe parcursul a 19 zile. Au fost instalate 16 noduri senzoriale pentru a măsura date seismice și acustice, cu o frecvență de 100Hz. Din perspectiva rezultatelor, în timpul operării rețelei, aceasta a înregistrat 229 de cutremure, erupții și alte evenimente seismoacustice. Scopul principal al cercetării a fost studiul calității și preciziei semnalelor achiziționate și cantitatea de date colectate (fidelitate și randament). Din punctul de vedere al experiențelor acumulate în urma acestei aplicații au fost reținute investiția semnificativă de timp și bani pentru pregătirea instalării, lipsa de infrastructură locală și problemele protocoalelor de comunicație precum și ridicarea încrederii specialiștilor de domeniu cu privire la calitatea datelor provenite de la rețeaua de senzori comparativ cu echipamentele de măsură profesionale. Figura 4 ilustrează schematic amplasarea nodurilor pe vulcan.

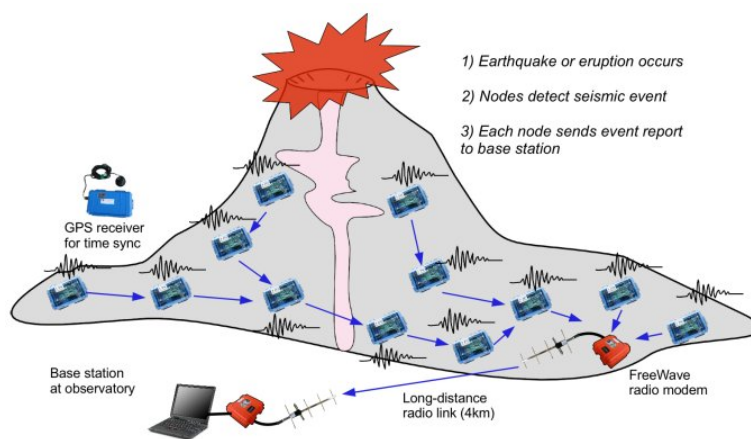


Figura 4: Instalare WSN pe un vulcan activ [5]

### 3 Hardware și software pentru rețele de senzori wireless

#### 3.1 Platforme WSN generice

Dezvoltările în cercetarea teoretică din domeniul rețelelor de senzori wireless au fost însoțite de o serie de dezvoltări hardware sub forma unor module electronice. Dintr-un punct de vedere, fragmentarea actuală a domeniului poate fi o cauză a întârzierii în adoptarea pe scară largă aplicațiilor expuse în literatura de cercetare. Platformele hardware WSN provin în special din mediul academic dar există pe piață și un număr de companii ce produc și comercializează astfel de echipamente.

##### 3.1.1 IRIS

Nodurile IRIS sunt o platformă WSN dezvoltată de Crossbow Technologies a cărei proiectare își are originea în familia de noduri Berkeley. Utilizează o structură modulară cu un modul de procesare/radio, plăci de extensie și module de alimentare. Un modul IRIS conține un microcontroller Atmel 1281 și un transceiver radio compatibil IEEE 802.15.4 Atmel RF230. Față de generația anterioară, MicaZ, acestea oferă o rază de acoperire radio de până la trei ori mai mare și memorie de program dublă. Păstrează conectorul MICA de 51 de pini pentru compatibilitatea cu plăcile cu senzori, GPS, de achiziție de date sau de dezvoltare.

##### 3.1.2 Imote2

Arhitectura Imote2 este una versatilă ce include subsisteme de: procesare, management energetic, senzorial, comunicație și interfațare. Platforma permite extensia cu o varietate mare de module, inclusiv senzori multimedia, și are resursele pentru a rula o distribuție de Linux

compactă.

Subsistemul de procesare al Imote2 [6] conține un microprocesor Marvell PXA271 și un procesor de semnal digital (DSP). Procesorul principal are capacitatea de a opera la o tensiune redusă de alimentare (0.85V) și frecvență scăzută. Frecvența poate fi ridicată până la 104MHz în modul de alimentare cel mai redus și crescută până la 416MHz cu scalare dinamică a voltajului (DVS). Mai mult, acesta oferă multe moduri de putere scăzută, inclusiv de somn și somn adânc. Coprocesorul are rolul de a accelera operațiile multimedia ce necesită putere mare de calcul.

### **3.2 Sisteme de operare pentru dispozitive cu resurse limitate**

Structura hardware deosebită a nodurilor senzoriale, marcată de constrângeri energetice și de procesare și adaptarea la aplicații a condus la dezvoltarea unor arhitecturi software dedicate. Acestea iau forma unor medii de execuție sau sisteme de operare bazate pe evenimente sau fire de lucru, cum sunt: TinyOS, Contiki, LiteOS, Mantis, FreeRTOS, SOS, Nano-RK, etc.

TinyOS [7] este un sistem de operare open-source, gratuit, bazat pe evenimente, pentru dispozitive cu resurse limitate. Obiectivele sale sunt de a minimiza utilizarea resurselor și prevenirea bug-urilor software. Sunt considerate resurse ciclurile de procesor, dimensiunea codului care este stocat în ROM și datele de stare, care sunt stocate în RAM. Aplicațiile și librăriile sunt scrise în nesC, un dialect al limbajului C. Fișierele sunt procesate de compilatorul nesC, transformate în cod C pe baza căruia se generează imaginea binară printr-un compilator hardware specific. Aplicațiile sunt dezvoltate din unități mici de cod, denumite componente și care implementează funcționalități punctuale. Componentele trebuie interconectate explicit prin declarații și fișiere speciale pentru a realiza funcționalitatea completă a programului.

Contiki [8] este o alternativă populară la TinyOS. O caracteristică interesantă a Contiki este obiectivul de a aduce la un loc eficiența sistemelor bazate pe evenimente cu flexibilitatea firelor de execuție preemptive. Acesta este realizat prin utilizarea unui model hibrid în care un nucleu bazat pe evenimente oferă opțiunea de multitasking preemptiv sub forma unor librării pentru aplicații. Doar programele care cer explicit accesul la această opțiune pot beneficia de ea.

### 3.3 Protocoale și standarde

#### 3.3.1 S-MAC

S-MAC [9] este bazat pe PAMAS și IEEE 802.11 și aduce operarea în regim parțial sub forma unor perioade active și inactive/de somn pentru nodurile senzoriale. Sunt identificate principalele patru surse de risipă a energiei în comunicația WSN: coliziunile - când două noduri încearcă să transmită simultan, ceea ce duce la coruperea pachetelor și retransmisii, supraascultarea - ascultarea unor pachete care nu îi sunt destinate, suplimentul pachetelor de control - pachetele ce nu conțin date dar sunt folosite pentru proceduri de mentenanță ale rețelei și ascultarea pasivă - pornirea radio-ului și așteptarea unor transmisii fără a ști dacă vor exista unele sau nu.

Protocolul S-MAC folosește sincronizarea între nodurile ce formează un cluster virtual pentru a putea asigura coordonarea rețelei. La nivel individual, nodurile alternează între perioade active, de ascultare și inactive, de somn. Este afirmat faptul că, datorită proporției mari pe care o are tranciever-ul radio în bugetul energetic al unui nod, un raport de 50% între activitate și somn conduce la o economie de energie de aproape 50%. Întârzierea medie la transmițător, considerând probabilități egale pentru sosirea unui pachet în timpul unui cadru este:

$$D_s = T_{cadru}/2 \quad (2)$$

cu

$$T_{cadru} = T_{ascultare} + T_{somm} \quad (3)$$

Astfel, economia relativă de energie pentru S-MAC este:

$$E_s = \frac{T_{somm}}{T_{cadru}} = 1 - \frac{T_{ascultare}}{T_{cadru}} \quad (4)$$

Evaluarea rezultatelor experimentale este făcută prin fixarea perioadei de somn la 300ms și varierea perioadei active la valori de 300ms, 500ms și 1s, modificând astfel regimul de operare parțială. În comparația directă cu 802.11, protocolul S-MAC atinge o economie de energie de 50% pentru trafic intens și mult mai mare pentru trafic scăzut. Traficul în rețea este intens sau scăzut dacă perioada de sosire dintre mesaje este mai mică sau mai mare de 4s.

#### 3.3.2 B-MAC

B-MAC [10] corectează unele dintre dezavantajele S-MAC cum este scalabilitatea redusă datorată creșterii spațiului de stocare la nivel de nod pentru programele de trezire/somn ale



nodurilor vecine. Principala idee din spatele B-MAC este aceea că nodurile senzoriale se trezesc pentru scurte perioade de timp pentru a asculta canalul radio și rămân active doar dacă identifică un preambul trimis. Natura asincronă a protocolului implică faptul că preambulul trimis de emițător trebuie să aibă o durată cel puțin la fel de mare ca durata de inactivitate a receptorului. Un preambul nu este un pachet convențional ci un puls RF cu scopul de a minimiza încărcarea rețelei.

Figura 5 prezintă schema esențială de comunicație dintre un emițător și un receptor precum și rezultatele determinării latenței rețelei ca funcție de numărul de salturi pentru B-MAC și S-MAC în diferite configurații. Concluzia principală în urma analizării rezultatelor este că B-MAC prezintă aceleași caracteristici de economisire a energiei ca S-MAC dar oferă avantaje semnificative prin implementarea compactă și scalabilitate pentru un număr mare de noduri.

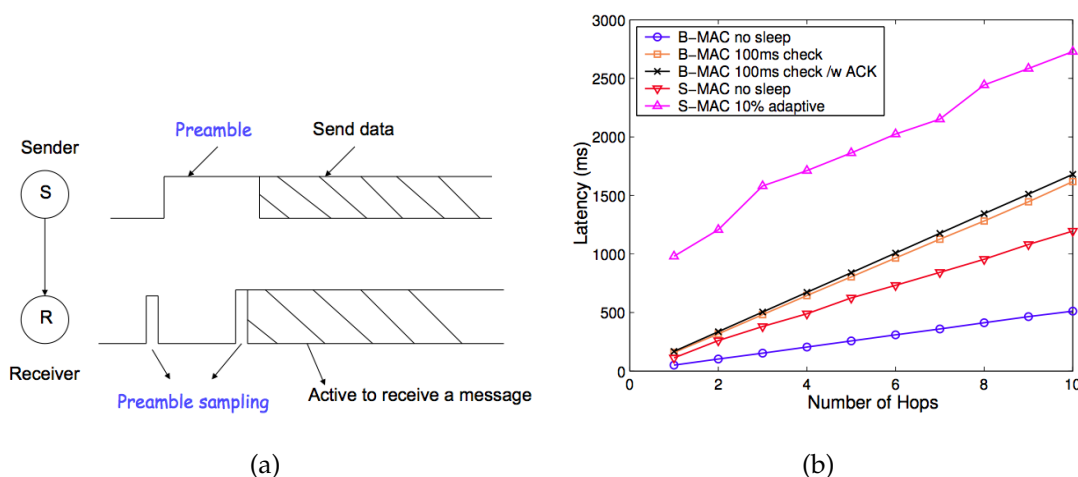


Figura 5: B-MAC [10] (a) Detectare preambul (b) Rezultate comparate cu S-MAC

### 3.3.3 X-MAC

X-MAC este construit pe baza lui B-MAC și oferă un preambul scurtat care conduce la o diminuare a energiei folosite atât la transmițător cât și la receptor. Adresa de destinație a unui pachet este inclusă în preambul, ceea ce permite nodurilor care nu sunt destinatarii unui mesaj să revină în starea de somn. Obiectivele principale atinse sunt: eficiența energetică, rata mare de transfer a datelor, adaptabilitate la cantitatea de date și aplicabilitate la toate tipurile de trancivere radio bazate pe pachete sau flux de biți. Protocolul este evaluat în funcție de ciclul activ, energie și latența mesajelor. Rezultatele cele mai bune sunt obținute pentru latență pentru care se observă o ameliorare cu aproape 50% în comparație cu un protocol simplu bazat pe ascultarea de mică putere (LPL).

### 3.3.4 IEEE 802.15.4-2006

Principalul standard dezvoltat de IEEE pentru rețele de senzori wireless este IEEE 802.15.4-2006 [11]. Acesta definește specificații pentru nivelul fizic (PHY) și de control al accesului la mediu (MAC) ale unei interfețe radio de mică putere. În terminologia 802.15.4 o LR-WPAN este o rețea de comunicație simplă, de cost redus care permite conectivitatea fără fir în aplicații cu limitări energetice și cerințe de rată de transfer relaxate. Principalele obiective ale unei LR-WPAN sunt ușurința în instalare, transfer de date fiabil, operare pe distanțe scurte, cost foarte redus și durată de viață a bateriilor rezonabilă, cu menținerea unui protocol simplu și flexibil. Caracteristicile sale cele mai importante sunt: definirea a 16 canale în banda de 2450MHz cu rata de transfer 250kbps, 10 de canale în banda de 915MHz, maxim 40kbps și 1 canal în banda de 868MHz, maxim 20kbps, operare stea sau punct la punct, adrese scurte de 16 biți sau extinse, 64 de biți, alocarea opțională de sloturi de timp garantate (GTS). Accesul la canal se face prin CSMA cu evitarea coliziunilor și este utilizat un indicator de calitate a legăturii (LQI).

Într-o rețea IEEE 802.15.4 pot participa două tipuri de dispozitive; dispozitive cu funcționalitate completă (FFD) și dispozitive cu funcționalitate redusă (RFD). Un FFD poate opera în trei moduri: coordonator de rețea personală (PAN), coordonator sau dispozitiv. Un FFD poate comunica cu RFD-uri sau cu alte FFD-uri, în timp ce un RFD nu poate comunica decât cu un FFD.

### 3.3.5 WirelessHART

WirelessHART este un standard de comunicație deschis, proiectat pentru cerințele industriei de proces cu obiective de simplitate, fiabilitate și securitatea comunicației. Stiva de protocol WirelessHART include un nivel fizic, nivel de legătură de date, nivel de transport și un nivel de aplicație. Standardul folosește echipamente radio bazate pe IEEE 802.15.4-2006.

Pentru coabitarea în banda de 2,4GHz sunt folosite o serie de mecanisme pentru a minimiza interferențele provenite de la alte dispozitive wireless. TDMA și saltul între canale au rolul de a controla accesul la mediul partajat. Protocolul TDMA implementat oferă comunicație deterministă, fără coliziuni prin folosirea sloturilor de timp pre-locate, cu o durată fixă de 10ms. Pentru a verifica absența altui trafic în rețea înainte de începerea unei transmisii radio se folosește CSMA. Este utilizat și un mecanism de evitare sau interzicere a canalelor care prezintă un nivel ridicat de zgomot sau trafic (*blacklisting*) [12].

## 4 Integrarea în sisteme complexe de achiziție de date cu monitorizare și control la distanță

### 4.1 Ecosistemul Memsic-IRIS-XMesh

Arhitectura software utilizată este structurată pe trei niveluri. Nivelul rețelei de senzori wireless este compus dintr-un număr de noduri ce rulează firmware-ul XMesh. Algoritmii de rețea implementați asigură comunicarea fiabilă multi-salt dintre noduri. Acestea se auto-organizează într-o rețea de tip plasă de joasă putere și transmit datele colectate spre o stație de bază radio, conectată la un punct central de agregare. Cel de-al doilea nivel constă din middleware ce rulează pe un sistem de calcul intermediar. Rolul middleware-ului este de a interpreta pachetele provenite din rețeaua de senzori și a pune informațiile relevante la dispoziția aplicațiilor de nivel înalt. Infrastructura de bază de date poate fi găzduită la acest nivel. Aplicațiile de vizualizare și analiză a datelor sunt plasate la cel de-al treilea nivel. Acestea realizează funcțiile de prezentare a datelor: numeric și grafic, ilustrarea topologiilor și a statisticilor de rețea. În cazul ecosistemului Memsic-IRIS-XMesh, aplicația se numește MoteView [13].

Protocolul XMesh poate ruta datele în amonte, de la nod către stația de bază, sau în aval, de la stația de bază către un nod. De asemenea, permite transmisii de date către o singură arie de acoperire sau arbitrar între oricare două noduri ale unui cluster. Calitatea serviciului (QoS) este oferită fie prin best-effort cu confirmări la nivel de legătură, fie prin livrare garantată, cu confirmări end-to-end. Protocolul suportă trei configurații energetice: HP - high power, LP - low power și ELP - extended low power.

Rezultate experimentale după o evaluare tipică pentru protocol, în interior și în spații deschise. Pentru testele indoor, fiecare nod acoperă o arie de  $28m^2$  pentru o acoperire totală de  $929m^2$ . Simularea unei distanțe mai mari este făcută prin reducerea puterii de transmisie a nodurilor la -6 dBm. În testele exterioare, nodurile sunt răspândite peste un teren dificil cu o densitate medie de un nod la fiecare  $900m^2$  și putere de transmisie maximă. Analiza rezultatelor (figura 6 a arătat că, în medie, mai mult de 90% din traficul generat de fiecare nod este colectat la stația de bază, fără a folosi mecanismele de livrare garantată.

#### 4.1.1 Instalare indoor pe termen mediu

Instalările pe scară redusă, de durată medie reprezintă un instrument important în planificarea utilizării unui sistem de monitorizare WSN. Evaluarea fiabilității software și hardware

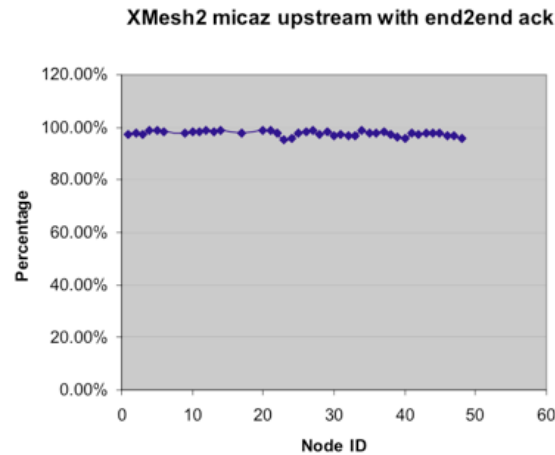


Figura 6: Rată livrare pachete, 48 noduri, 72 ore [14]

a soluției proiectate într-un scenariu bine specificat este vitală. Aceasta permite de asemenea evaluarea preliminară a mediului radio care poate pune probleme în special în mediile aglomerate cum sunt clădirile. Interferențele, atenuarea și reflecțiile multi-cale conduc la o rată mare de pierdere a pachetelor și afectează durata de viață a bateriilor printr-un număr ridicat de retransmisii.

În figura 7 este prezentată așezarea a patru noduri wireless IRIS cu module MTS400, o stație de bază radio și un echipament dedicat pentru interceptarea și interpretarea pachetelor radio, într-un spațiu de laborator. De asemenea, am ilustrat topologia de rețea multi-salt formată de noduri precum și suprapunerea unui gradient de luminozitate pe baza datelor colectate. Astfel de informații interpretate corect pot fi puse la dispoziția sistemelor inteligente de administrare ale clădirilor pentru a optimiza eficiența energetică și confortul locatarilor.

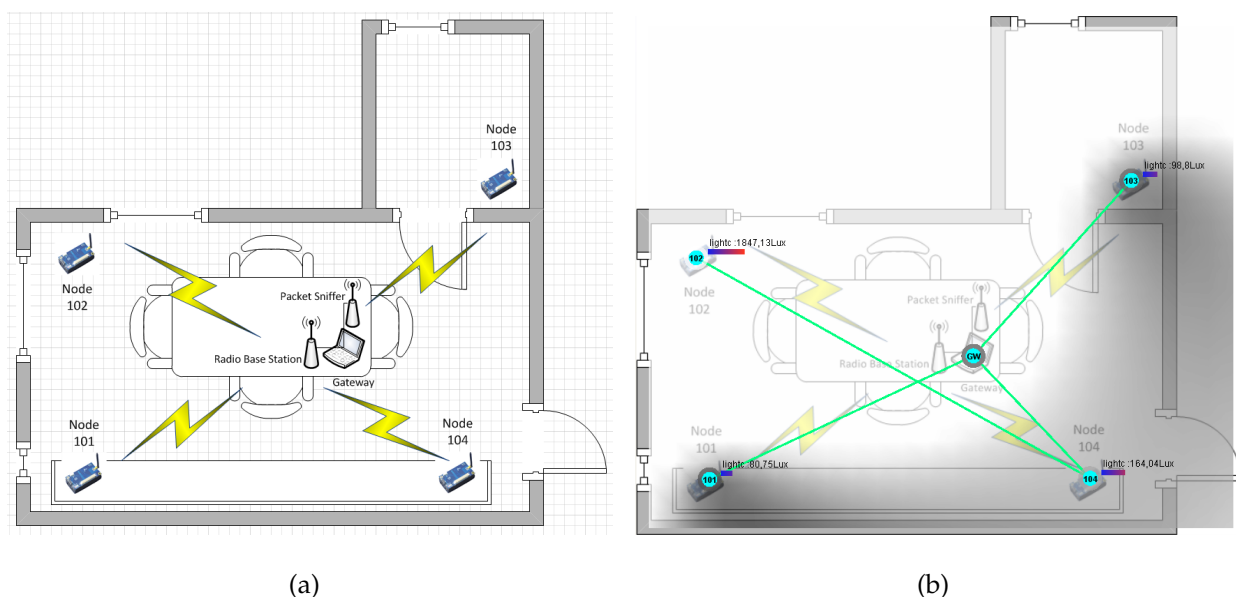


Figura 7: WSN indoor (a) Amplasare noduri (b) Topologie de rețea și gradient de lumină

Rezultatele a 7 zile de monitorizare sunt ilustrate în figura 8. Pe parcursul experimentului am colectat 89756 de puncte de date de temperatură, umiditate, presiune atmosferică și lumină în 163 de ore de operare continuă. Graficele ilustrează evoluția zilnică a parametrilor investigați precum și influența poziționării nodurilor asupra valorilor măsurate.

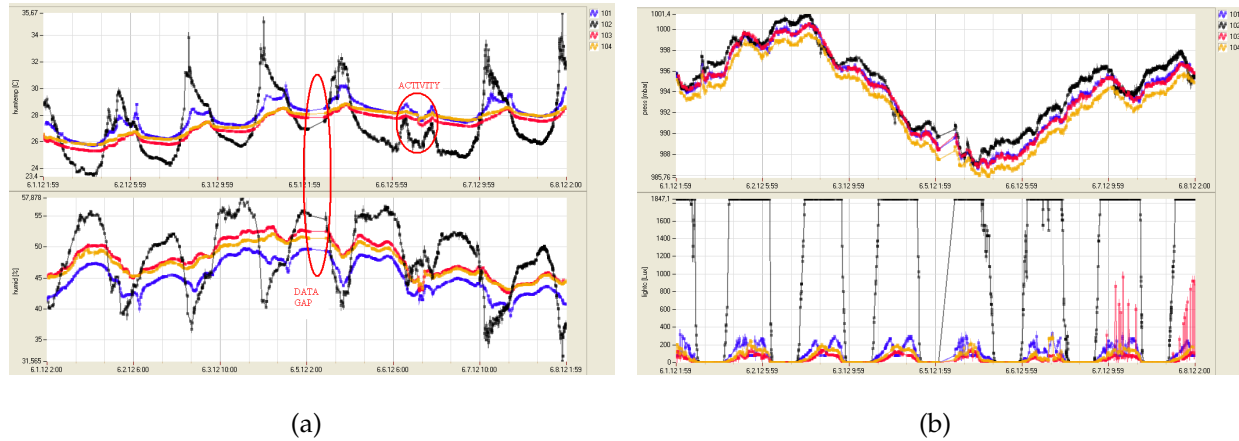


Figura 8: Date colectate (a) Temperatură și umiditate (b) Presiune atmosferică și lumină ambientală

Statisticile de rețea finale sunt raportate în tabelul 1. Au fost obținute prin pachete speciale care sunt generate periodic de noduri cu scopul de informa coordonatorul rețelei de starea lor din punctul de vedere al conectivității la nivel de legătură și de rețea. Informațiile de stare includ și indicatorul RSSI pentru puterea semnalului radio la receptor, care este inclus automat în pachete de către transceiverul radio RF230. Costul de rutare [13] este definit ca o estimare a numărului de transmisii necesar pentru a trimite un pachet de la nod către bază. Acesta ia în calcul numărul de salturi și numărul de retransmisii per salt. Cel mai mic cost posibil este 4. Se poate vedea cum, dintre cele patru noduri instalate, nodul 102 prezintă cele mai slabe performanțe, ceea ce sugerează o modificare a amplasării sale spațiale.

$$Cost\_rutare = 4 * Nr\_est\_transmisii(ETX) \quad (5)$$

$$Cost\_rutare = 2^{10} / (calitate\_tx * calitate\_rx) \quad (6)$$

## 4.2 Sistem software dedicat pentru integrarea cu instrumentația virtuală

Această secțiune prezintă o abordare de integrare a rețelelor de senzori wireless cu mediul de dezvoltare grafică LabVIEW [15].

Tabela 1: Statistici finale de rețea

ID nod	101	102	103	104
Pachete de stare rețea	1.94%	2.27%	1.74%	1.82%
Pachete de date	83.25%	97.55%	74.4%	78%
Redirecționate	13.71%	0%	23.54%	21.14%
Pierdute	3.03%	2.45%	2.06%	0.86%
Retransmisii	12.26%	78.64%	12.07%	12.23%
Cost de cale	5	1029	5	6
RSSI părinte	16	18	22	24

#### 4.2.1 Descriere generală

Sistemul proiectat se încadrează într-o arhitectură de monitorizare și control a unei case inteligente. Scenariul propus (figura 9) include alocarea nodurilor senzoriale fiecărei încăperi a unei locuințe și utilizarea de plăci de achiziție de date pentru comanda convențională a elementelor de execuție. Sistemul permite monitorizarea și controlul local, la distanță prin Internet sau folosind aplicații pentru terminale mobile.

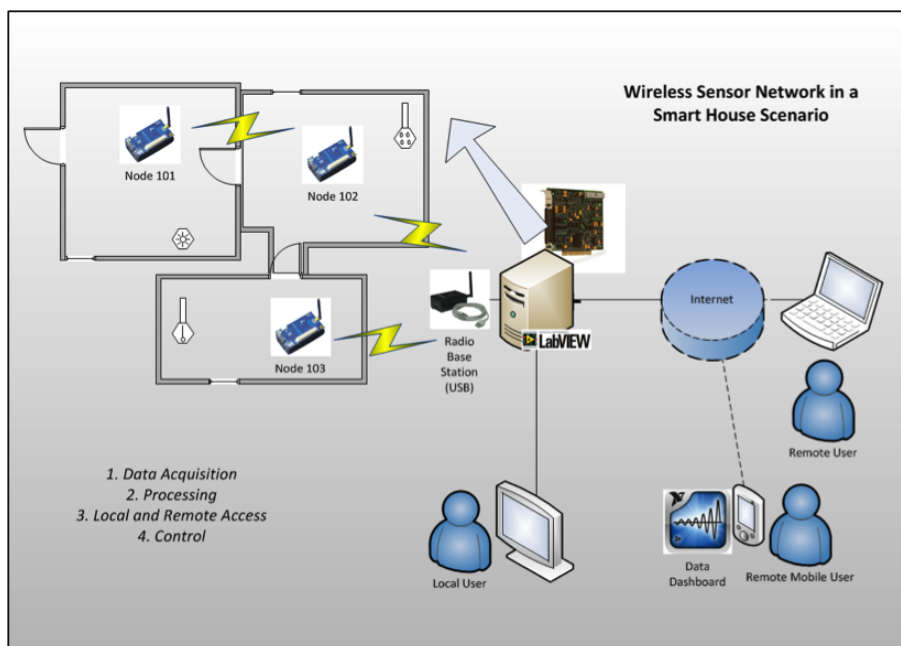


Figura 9: Sistem WSN pentru o casă inteligentă

Argumentul major pentru această dezvoltare este că, profitând de caracteristicile unice ale

Tabela 2: Necesari de curent pentru modulul IRIS în diferite moduri de operare

IRIS	Pr. full	Pr. slp	Rad. rcv	Rad. tr	Rad. slp	Fls wr	Fls rd	Fls slp
I[mA]	8	0.008	16	17	0.001	15	4	0.002

rețelelor de senzori wireless, cum sunt comunicația fără fir de joasă putere și operarea pe baterii, se poate obține rezoluție mare temporală și spațială în mediile rezidențiale.

#### 4.2.2 Considerații de implementare

Configurația hardware utilizată include module de procesare/radio IRIS cu senzori de temperatură, umiditate și lumină, o stație de bază radio cu interfață USB precum și un PC cu rol de gateway. Modulele IRIS oferă un consum redus de energie, ceea ce contribuie la o durată de viață a bateriilor de ordinul lunilor (tabelul 2).

Protocolul XMesh implementat în TinyOS definește structura unui mesaj radio (figura 10). Un mesaj debutează cu un antet TinyOS de 5 octeți. Acesta este urmat de un antet XMesh de 0-7 octeți care include informații pentru nivelul de rutare cum sunt: adresa sursei, adresa de origine, numărul de secvență, identificator aplicație. Antetul XSensor cuprinde date despre identificatorul plăcii cu senzori, identificator pachet și nodul părinte. Ultimii 2 octeți ai mesajului conțin codul de detectare erori CRC.

<b>Bytes: 5</b>	<b>0/7</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>20</b>	<b>2</b>
TinyOS Header	XMesh Header	XSensor Header	Voltage	Humidity	Temperature	CRC	
<b>MTS400 Payload</b>							

Figura 10: Structura de mesaj XMesh pentru modulul de extensie MTS400 [14]

Sarcina utilă este reprezentată de 26 de octeți ce includ valorile provenite de la senzorii plăcii MTS400. Aceste date trebuie extrase din context și valorile numerice brute convertite în unități ingineresti. Ca exemplu, pentru calculul valorii de temperatură aferente indicației numerice a sensorului Sensirion SHT11 [16] presupune următoarea relație:

$$T = d_1 + d_2 \cdot SO_T \quad (7)$$

unde  $T$  este temperatura în grade Celsius sau Fahrenheit și  $SO_T$  este valoarea numerică brută. Coeficienții de conversie  $d_1$  și  $d_2$  pentru a obține o temperatură în grade Celsius la o

tensiune de alimentare de 2.4-3.2V cu rezoluție de 14 biți sunt -39.4 respectiv 0.01. Relația devine:

$$T = -39.4 + 0.01 \cdot SO_T \quad (8)$$

Pe baza informațiilor prezentate mai sus, implementarea comunicației seriale și extragerea informației din pachetele de date, sub forma unei diagrame bloc/cod sursă LabVIEW este ilustrată de figura 11.

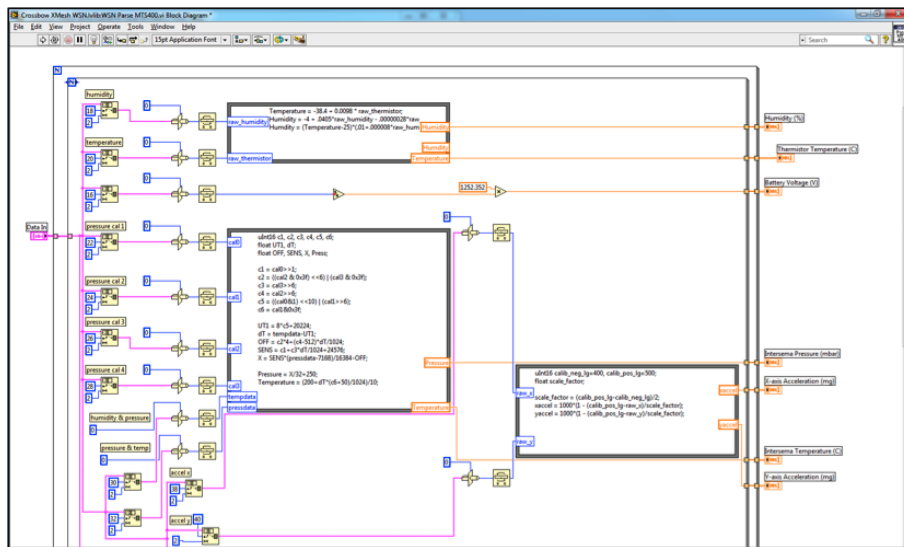


Figura 11: Fragment de diagramă bloc pentru instrumentul virtual de extragere a datelor

### 4.2.3 SmartVI - Aplicație de instrumentație virtuală pentru ilustrarea integrării WSN

Pentru a ilustra integrarea WSN cu LabVIEW am dezvoltat o aplicație de instrumentație virtuală pentru o casă inteligentă. Printre obiectivele acesteia se numără: achiziția datelor de la rețeaua de senzori wireless prin folosirea unor funcții specifice ale driver-ului Crossbow XMesh, prezentarea datelor, afișarea unor grafice cu evoluția în timp a parametrilor monitorizați, înregistrarea datelor în fișiere de măsurare format LVM, implementarea în simulare a logicii de comandă pentru echipamente de încălzire, răcire și iluminat precum și publicarea datelor prin variabile partajate pentru monitorizarea la distanță.

Panoul frontal este reprezentat în figura 12. Interfața principală cu utilizatorul folosește elemente grafice intuitive și prezintă informațiile grupate pe camerele casei inteligente. Logica de control folosește strategii distincte pentru încălzire/răcire și iluminat. Pentru asigurarea confortului termic a fost implementată o strategie de control bipozițional prin care



utilizatorul setează valoarea dorită de temperatură iar sistemul asigură comanda echipamentelor de încălzire dacă valoarea raportată de nodul wireless alocat încăperii respective scade cu mai mult de 1 grad față de referință și comandă echipamentele de răcire dacă valoarea este mai mare cu cel puțin 1 grad față de referință. În cazul iluminării sunt considerate, atât valoarea de luminozitate detectată, cât și informații de la detectori de mișcare, pentru a nu ilumina o încăpere neocupată.

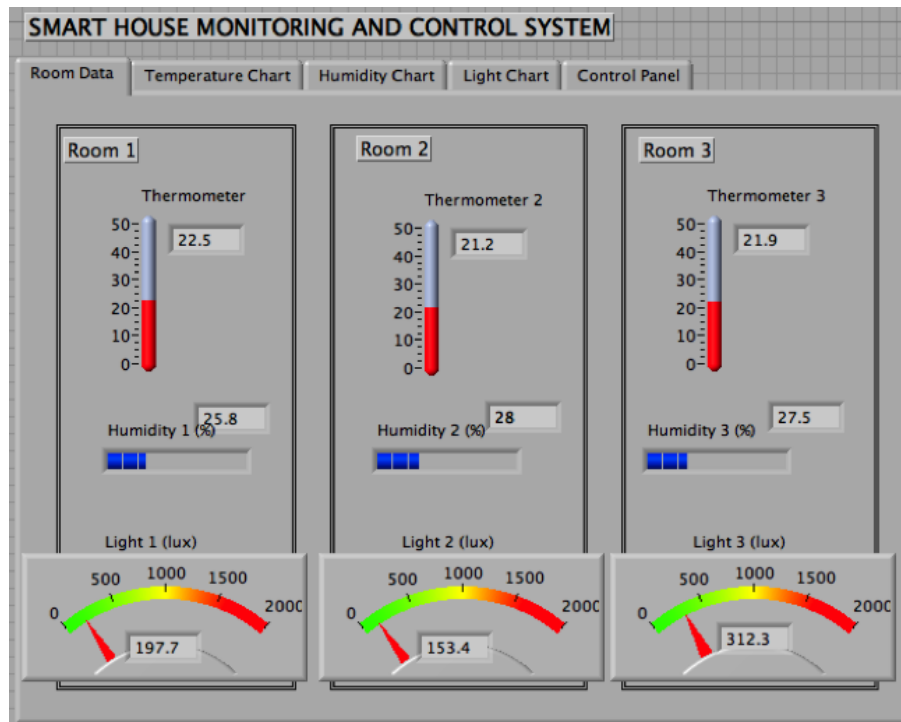


Figura 12: Panoul frontal al SmartVI

### 4.3 Servicii pentru accesul la distanță la instrumentație virtuală

Această secțiune prezintă instrumente LabVIEW specifice care permit diseminarea datelor obținute din rezultatele anterioare către terți, în sisteme de monitorizare și control. Mediul de dezvoltare grafică poate produce aplicații care funcționează la nivelul server în structura ierarhică a unei rețele de senzori wireless sau, prin unirea nivelului server cu nivelul client, aplicații care includ partea de middleware precum și procesarea, analiza și vizualizarea datelor. Tehnologiile incluse în această analiză sunt: variabilele partajate, panourile web și aplicațiile pentru terminale mobile.

### 4.3.1 Variabile partajate

Avantajele unei abordări distribuite provin din faptul că sistemul poate folosi stații de lucru dedicate, fiecare cu o configurație hardware și software proprie, care sunt interconectate printr-o rețea. Serverul reprezintă o structură hardware mai puternică pentru procesarea și stocarea datelor și poate acționa și ca un gateway între proces și Internet. Variabilele partajate în LabVIEW [17] sunt folosite pentru a implementa conceptul de punere în comun al datelor aferente unor programe ce rulează pe sisteme distincte. Acestea oferă abstractizarea comunicației în rețea din diagrama bloc LabVIEW. În spatele acesteia se află un protocol UDP care trimite datele la un server denumit motor de variabile partajate care are rolul de a publica datele tuturor clienților din rețea care le solicită. Pentru transferul datelor este folosită o arhitectură publish-subscribe, mai mulți clienți putând citi și scrie în aceeași variabilă fără cod adițional. Experimentele practice au arătat că protocolul UDP necesită deschiderea explicită a unor porturi de comunicație (în funcție de arhitectura Logos folosită în versiunea utilizată de LabVIEW) pentru ca datele să poată trece prin mecanismele de securitate Windows [18]. Variabilele partajate pot fi de asemenea legate la etichete OPC, permițând astfel interconectarea facilă cu arhitecturi software industriale standard.

### 4.3.2 Panouri web

Panourile web folosesc serverul web LabVIEW pentru a publica panoul frontal al unei aplicații pe Internet. Odată activată această funcționalitate, un utilizator la distanță poate accesa și controla elementele de interfață grafică direct în fereastra unui navigator web. În momentul în care un utilizator a obținut controlul prin introducerea adresei IP a serverului la care se conectează, instrumentul virtual este blocat pe mașina gazdă. Acest mod de operare la distanță este util și în situații de utilizare ocazională deoarece clientul nu trebuie să instaleze software suplimentar iar sarcinile de calcul sunt alocate mașinii gazdă.

### 4.3.3 Aplicații pentru terminale mobile

În urma actualelor dezvoltări exponențiale în adoptarea de către consumatori și mediul de afaceri al telefoanelor inteligente și a tabletelor, au apărut o serie de aplicații dedicate pentru extragerea, prezentarea și analizei datelor de proces direct pe aceste dispozitive. Adoptția acestor tehnologii a fost implementată pe scară largă de exemplu prin companiile ce oferă sisteme de automatizări rezidențiale. Acestea oferă soluții care permit utilizatorului să își comande sistemele HVAC și echipamentele electrocasnice când nu se află în casă, să primească

alerte și să vizualizeze evoluția în timp a unor parametri de interes. O abordare similară poate fi aplicată pentru monitorizarea informațiilor provenite de la o rețea de senzori wireless, de exemplu prin aplicația Data Dashboard care se conectează la un server web LabVIEW și prezintă datele provenite de la variabile partajate pre-alocate.

## **5 Dezvoltarea nodurilor senzoriale cu detectori de gaze de cost redus pentru monitorizarea calității aerului**

### **5.1 Monitorizarea densă indoor a calității aerului**

Rețelele de senzori wireless oferă avantaje specifice pentru monitorizarea indoor. Pe lângă parametrii convenționali, cum sunt temperatura, umiditatea sau lumina, nodurile wireless pot fi dezvoltate prin integrarea de senzori specializați. O direcție nouă de aplicații este astfel deschisă care permite măsurarea concentrațiilor de dioxid de carbon, oxigen, ozon, monoxid de carbon, compuși organici volatili (VOC), metan. O hartă a calității aerului în spații închise, care reprezintă datele provenite de la rețeaua de senzori, permite administratorului să acționeze pentru a crește calitatea aerului și astfel productivitatea și calitatea a vieții persoanelor care lucrează sau locuiesc în aceste spații și, mai important, să evite riscurile majore de intoxicație sau explozie.

Beneficiind de avantajul lipsei conexiunilor prin fire, nodurile senzoriale oferă flexibilitate în alegerea amplasării. Densitatea instalării unei rețele de senzori, calculată ca număr de noduri raportat la unitatea de suprafață sau volum, poate fi adaptată nevoilor utilizatorului. În special pentru folosirea datorită reducerii considerabile a costurilor de instalare și întreținere. Unele lucrări practice au demonstrat viabilitatea conceptului prezentat în această secțiune. În [19] este prezentată integrarea unui senzor de monoxid de carbon cu platforma WSN MicaZ împreună cu proiectarea unei camere climatice pentru calibrarea senzorului de CO și raportarea sistemului dezvoltat la un sistem de măsurare de precizie ridicată.

### **5.2 Detectoare semiconductoare de gaze pentru dezvoltarea nodurilor senzoriale**

Obiectul acestui studiu este abordarea detectoarelor de gaze semiconductoare bazate pe tehnologie cu dioxid de staniu  $SnO_2$ . Principiul de operare al acestor dispozitive este că absorbția sau desorbția unui gaz pe suprafața unui strat de oxid metalic îi modifică acestuia

Tabela 3: Caracteristici senzori de gaze și particule

Type	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>	PM
Prod.	Hanwei	Hanwei	Hanwei	Hanwei	Sharp
Model	MQ-7	MG-811	MQ-131	MQ-4	GP2Y1010AU0F
Conc. (ppm)	20-2·10 <sup>3</sup>	350-10 <sup>4</sup>	10 <sup>-2</sup> -2	200-10 <sup>4</sup>	0.55[mg/m <sup>3</sup> ]
Tensiune	5 V	6 V	5-6V	5 V	5 V
Curent	70 mA	200 mA	190 mA	150 mA	20 mA
Cros. sel.	H <sub>2</sub>	CO	CL <sub>2</sub>	LPG	n/a

conductivitatea. Stratul metalic trebuie mai întâi încălzit la o anumită temperatură și ulterior este citită o valoare de tensiune proporțională cu modificarea rezistenței electrice în raport cu concentrația gazului investigat. Avantajele acestei abordări provin din construcția simplă, dimensiunile compacte și interfațarea directă cu sisteme de achiziție de date. Dezavantajele includ variabilitatea între senzori similari datorată inconsistențelor de fabricație, selectivitatea redusă (i.e. semnalul de ieșire al sensorului este influențat nu numai de gazul țintă ci și de alte gaze, precizate de obicei în fișa de specificații sub forma unor curbe de selectivitate) și, un factor important pentru aplicații WSN [20], curent de operare mare în intervalul 70-200mA pentru faza de încălzire a stratului semiconductor. Unele tipuri de senzori au nevoie de faze ciclice de încălzire/răcire pentru a curăța stratul sensibil de reziduuri înainte de o nouă măsurare.

Tabelul 3 prezintă o sinteză a caracteristicilor constructive ale unor senzori de gaze. Am inclus în analiza comparativă și un senzor de particule/praf, ca reper pentru dezvoltările ce vor fi expuse în continuare.

Pe baza acestor specificații am proiectat un modul de extensie pentru nodurile IRIS care să găzduiască senzorii Hanwei de CO, CO<sub>2</sub> și O<sub>3</sub>. Au fost incluse circuite dedicate de alimentare, operare și condiționare de semnal. Criteriile avute în vedere în faza de proiectare sunt:

- circuit imprimat cu dimensiuni similare plăcii de dezvoltare MDA100 pentru nodurile IRIS, dimensiuni ca. 5.5cm x 3cm;
- conector MICA de 51 pini, tip HiRose DF-51P-1V(54);
- 3 socluri pentru senzori de gaze pentru montarea pe circuitul imprimat;

- logică de comandă implementată hardware pentru operarea senzorilor în regim parțial;
- conversie DC-DC pentru asigurarea unei tensiuni de alimentare de 6V;
- condiționare de semnal pentru adaptarea la domeniul de intrare admisibil al ADC-ului nodurilor IRIS;
- conector pentru alimentare externă 5V;
- switch pornire/oprire alimentare externă;
- termistor și fotocelulă pentru măsurarea locală a temperaturii și a luminozității.

### 5.3 Evaluarea unui nod de măsurare a concentrației de particule

Prezența particulelor în aer, clasificate în general ca praf, reprezintă un factor important ce afectează calitatea aerului în mediul exterior și interior. Există multe procese industriale care necesită încăperi curate în care concentrația de praf trebuie menținută sub anumite limite pentru a asigura succesul procesului de fabricație sau calitatea produsului finit. În prezent, aplicațiile care cer măsurări precise ale concentrației de praf utilizează echipamente complexe și costisitoare. În paralel, rețelele de senzori wireless s-a dezvoltat ca instrumente ce oferă măsurări cu o rezoluție spațială mai înaltă decât a sistemelor de achiziție de date convenționale. În această secțiune sunt prezentate contribuțiile personale și originale pentru proiectarea, dezvoltarea și implementarea unui nod de măsurare a concentrației de particule din aer prin integrarea unui senzor optic de praf cu platforma IRIS prin module de achiziție de date adecvate.

Există principii de determinare a concentrației de praf bine studiate cum sunt: gravimetric, triboelectric sau optic. Fiecare sunt potrivite pentru domenii de aplicații specifice care diferă prin intensitatea poluării cu praf, proporția de vapori de apă din atmosferă și suprafața zonei investigate.

Dintre acestea am ales modalitatea optică de determinare a concentrației de particule care se bazează pe calculul atenuării intensității unui fascicul luminos prin absorbție și dispersie atunci când traversează un nor de particule solide. Fenomenul este descris de legea Lambert-Beer [21]:

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon \cdot c \cdot l} \quad (9)$$

$I_0$  este intensitatea luminoasă inițială a sursei de lumină iar  $I$  este intensitatea luminoasă rezultantă. Determinarea concentrația de particule  $c$  conține și distanța  $l$  dinte emitor și re-

ceptor precum și coeficientul de stingere  $\varepsilon$ , o constantă ce depinde de tipul de particule și de mediul ambiental.

Arhitectura de nivel înalt a sistemului este ilustrată în figura 13. Aceasta constă într-o rețea de tip plasă de noduri de măsurare wireless ce transmit datele către baza radio. La nivelul de gateway, datele sunt colectate, stocate și prezentate pentru interpretare sau procesare ulterioară. Un nod wireless este compus din patru elemente: modulul de procesare/radio IRIS, placa de achiziție de date MDA300, o placă de dezvoltare cu microcontroller și senzorul optic de praf.

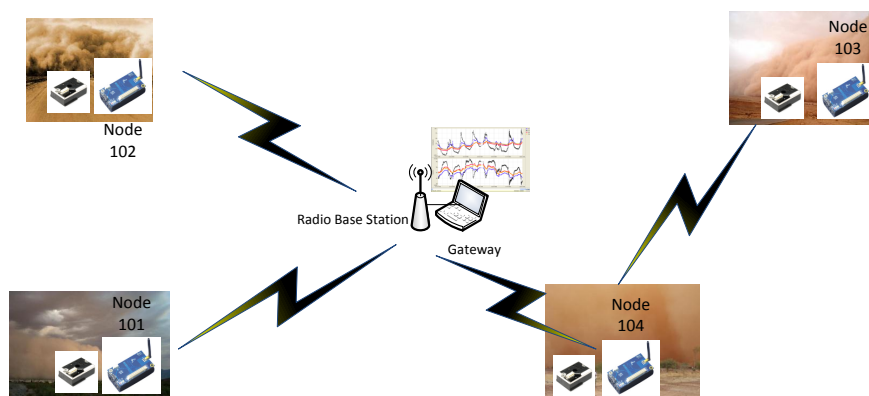


Figura 13: Arhitectura unui sistem wireless de măsurare a prafului

Senzorul Sharp GP2Y1010AU0F [22] este un senzor de praf cu un sistem optic de măsurare. Este compus dintr-o diodă cu emisie în infraroșu (IRED) și un fototranzistor aranjate diagonal în interiorul carcasei. Senzorul detectează lumina reflectată la trecerea prin zona de măsurare. A fost proiectat pentru detectarea particulelor fine cum este fumul de țigară. Caracteristicile principale sunt dimensiunile compacte și consumul de curent redus de circa 20mA. Am realizat interfațarea dispozitivului cu nodul wireless printr-o placă de dezvoltare populară de tip Arduino. Aceasta are rolul de a opera în regim parțial comanda pentru LED-ul senzorului prin setarea unei ieșiri digitale ca LOW pentru 0.32ms la fiecare 10ms și citirea ulterioară a valorii de ieșire analogice a senzorului.

Implementarea de laborator a sistemului este ilustrată în figura 14. Pentru a putea evalua rezultatele oferite de sistemul dezvoltat, am folosit un sistem de referință în forma unui detector de particule profesional cu laser, model Dyllos DC1100. Acesta oferă măsurări pe două canale, unul pentru particule mici, cu dimensiuni între  $0.5\mu m - 2.5\mu m$  cum sunt bacteriile și mușgaiul și un canal pentru particule mari  $2.5\mu m - 10\mu m$  ca polenul și fumul dens. Pentru a putea obține rezultate comparabile am urmat o procedură de conversie. Aceasta utilizează

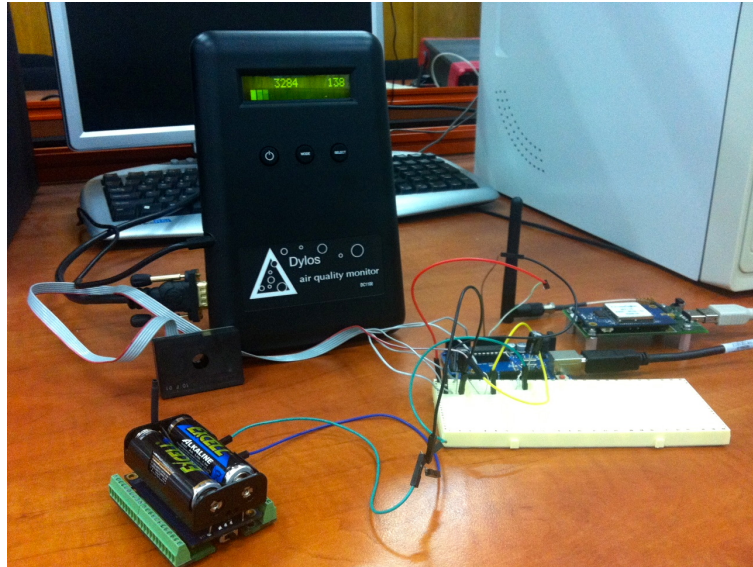


Figura 14: Montaj de laborator destinat implementării sistemului propus

următoarele valori [23]: particulele sunt sferice, cu o densitate de  $1.65E12 \mu g/m^3$ , raza unei particule mici este de  $.44 \mu m$ , raza unei particule mari este de  $2.6 \mu m$ .

Astfel, relația folosită pentru a determina densitatea masică din numărul de particule pe unitatea de volum este:

$$c[mg/m^3] = \frac{n}{0.0283} \cdot \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot r^3 \cdot \rho \quad (10)$$

unde  $n$  reprezintă numărul de particule pe  $ft^3$ ,  $r$  este raza unei particule iar  $\rho$  densitatea specifică a particulelor.

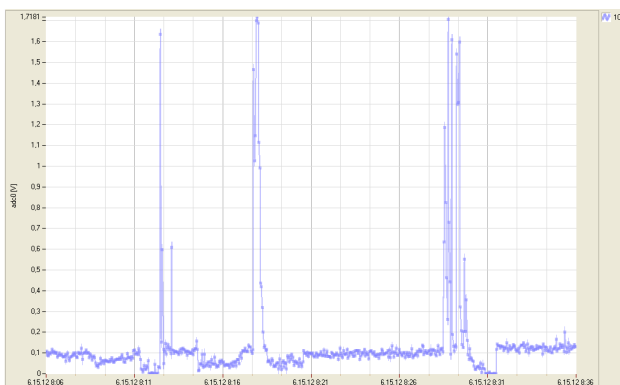
Tabelul 4 prezintă datele obținute și convertite de la echipamentul profesional de referință, pe durata experimentului. Valorile medii, minime și maxime pentru ambele canale sunt convertite în  $mg/m^3$  pentru a permite compararea directă cu răspunsul în timp al nodului wireless cu senzor Sharp.

Experimentul principal care a fost realizat a constat într-o perioadă de monitorizare continuă de 30 de minute în care nodul wireless și sistemul de măsurare de referință au funcționat în paralel. Rezultatele sunt ilustrate în figura 15. În acest orizont de timp am colectat 31 de valori de la dispozitivul de referință și 632 de valori de la nodul dezvoltat, cu rată de transmisie de 3 secunde. Pentru a putea stabili un nivel de bază al concentrației din zona monitorizată, perioadele stabile sunt alternate cu evenimente cu concentrație mare de particule, simulate sub forma arderii unor hârtii. Cele trei vârfuri observate pe grafice reprezintă răspunsul sistemelor la aceste evenimente. Nivelul de bază în creștere demonstrează că sistemul implementat este sensibil și la variații mici ale parametrilor investigați reflectate de acumularea în aer a unui număr mai mare de particule ulterior fiecărui eveniment de ardere.

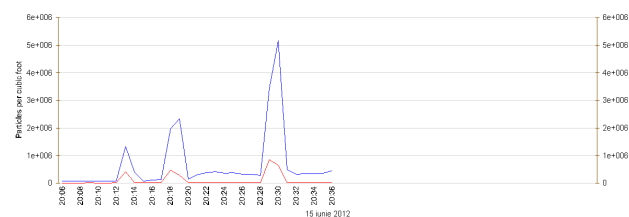
Tabela 4: Număr de particule măsurat cu echipamentul Dyllos DC1100

Canal	Mici	Mari
Mediu	666329	95512
Minim	68300	8000
Maxim	5157300	850900
Mediu $mg/m^3$	0.0139	0.4097
Minim $mg/m^3$	0.0014	0.0343
Maxim $mg/m^3$	0.107	3.64

Tensiunea de bază s-a încadrat în intervalul 0.05-0.15V. Referitor la valorile maxime, vârfurile au fost corect identificate de către nodul wireless care a indicat o valoare de saturație de 1.72V. Corelând această indicație cu valoarea maximă din fișa de catalog, o putem echivala cu o concentrație maximă detectată de  $0.55mg/m^3$ . O observație interesantă este aceea că putem sesiza o concentrație mai mare de particule în aer prin persistența semnalului generat de nodul wireless. Este de menționat faptul că, deși plasate în imediata apropiere pe parcursul experimentelor, în timp ce detectorul folosește inducția forțată de aer printr-un ventilator, senzorul optic de praf se bazează doar pe fluxul natural de aer prin camera de măsură.



(a)



(b)

Figura 15: Rezultate monitorizare particule - 30min. (a) Nod de măsurare wireless (b) Monitor calitate aer Dyllos DC1100

În această secțiune am prezentat modul de proiectare, implementare și evaluare pentru un nod wireless pentru măsurarea prafului în spații rezidențiale sau comerciale, care combină tehnici inteligente de achiziție de date cu tehnologia rețelelor de senzori wireless. Toate



componentele de laborator au fost integrate într-un singur sistem pentru a crea un nod inteligent și au fost adaptate conform obiectivelor specifice. Pe lângă costurile reduse, un astfel de nod prezintă avantajul scalabilității atât la nivel de nod, prin conectarea unui număr mai mare de senzori la același sistem, cât și la nivel de rețea, prin multiplicarea nodurilor care monitorizează o zonă de interes. Sistemul final este adecvat aplicațiilor de alertare în care este urmărită depășirea unui nivel critic de concentrație a particulelor în aer și poate reacționa rapid și informa factorii de decizie.

## 6 Rețele de senzori vizuali pentru aplicații interdisciplinare în domeniul medical

### 6.1 Rețele de senzori wireless multimedia

Rețelele de senzori wireless multimedia (WMSN) au fost dezvoltate prin completarea platformelor convenționale de senzori wireless cu surse bogate de date, cum sunt senzorii audio și video. Rețelele de senzori vizuali, tematica principală a acestui capitol, reprezintă o clasă particulară de WMSN, implementate prin extinderea rețelelor de senzori wireless cu detectori de imagine. Aceștia iau forma unor module electronice cu camere CMOS ce includ elementul sensibil împreună cu un obiectiv adecvat și circuite auxiliare de procesare. Circuitele adiționale pot fi de la buffere de imagine și module de compresie la microcontrollere dedicate care rulează cod specific folosit pentru extragerea de informații de înalt nivel din imaginile brute. Senzorii scalari generici cum sunt cei de temperatură, accelerație sau lumină, au costuri neglijabile în raport cu platforma gazdă. În cazul senzorilor vizuali și estimând costul unui nod la \$100, ei pot reprezenta oriunde de la jumătate, în cazul celor mai simple module, până la dublul costului nodului, în cazul sistemelor vizuale cu microcontroller dedicat. Aflându-se la intersecția cu un alt domeniu de cercetare, rețelele de senzori vizuali pot fi astfel considerate sub forma unor camere inteligente miniaturale [24]. Ele permit un domeniu de aplicații amplu ce include recunoașterea și urmărirea cooperativă a obiectelor, monitorizarea de securitate și a habitatelor ecologice.

În figura 16 sunt ilustrate trei tipuri de arhitecturi pentru rețele de senzori wireless multimedia. Acestea includ structuri omogene, eterogene și ierarhizate.

Cele trei platforme evaluate experimental pentru aplicația MiceNet au fost: iSense Core2 cu modul de securitate, CMUCam3 și modulul C429.

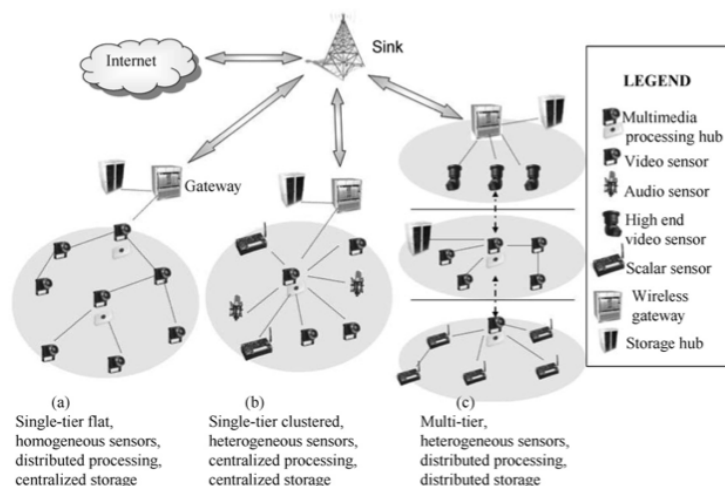


Figura 16: Arhitecturi de referință pentru rețele de senzori wireless multimedia [25]

## 6.2 MiceNet - Un instrument pentru cercetarea medicală

Cercetarea medicală folosește șoareci de laborator pentru studii experimentale. Actualmente, simptomele sunt observate și înregistrate manual ceea ce conduce la date afectate de zgomot și la un număr mare de animale necesar pentru obținerea unor rezultate reprezentative statistic. Este propusă folosirea unei rețele de senzori vizuali care este atașată cuștilor în care sunt găzduite animalele, ca o soluție de cost redus pentru monitorizarea continuă a comportamentului șoarecilor și oferirea accesului la distanță la date pentru cercetători, *MiceNet* [26]. Sunt prezentate beneficiile acestei abordări împreună cu provocările întâlnite în diferitele faze ale instalării sistemului. Am prezentat arhitecturile hardware și software propuse, precum și rezultate experimentale.

### 6.2.1 Context specific și dezvoltări asociate

Experimentarea cu animale de laborator reprezintă o metodă de cercetare medicală importantă. Partenerul nostru medical, Institutul de Dermatologie, expune populații mari de șoareci cu genotipuri diverse la factori patogeni și studiază simptomele prezentate de animale cu scopul de a determina colerații între prezența anumitor gene și simptomele bolii. Într-un experiment tipic, câteva sute de animale sunt plasate în zeci de cuști într-o casă de animale sub condiții de mediu controlate. Observarea acum este făcută manual, cercetătorii vizitând animalele odată la câteva zile și notând simptomele manifestate (cum ar fi modificarea gradului de mobilitate). Această abordare prezintă unele deficiențe. În primul rând, diagnosticul este puternic subiectiv și nu variază numai în funcție de persoana care realizează observația ci și, în timp, pentru aceeași persoană e.g. datorită oboselii. În al doilea rând, observarea este spo-

radică, activitățile intermediare nefiind înregistrate. Datele astfel obținute sunt afectate de zgomot care trebuie eliminat prin medierea pentru un număr mare de observații și animale.

Prin introducerea unui sistem automat pentru a realiza observații continue și obiective, cantitatea de zgomot și implicit numărul de animale ar putea fi redus considerabil [27]. Există o serie de sisteme comerciale oferite pe piață care au fost dezvoltate în acest scop. Costul lor este însă ridicat și fie necesită cuști speciale astfel încât majoritatea infrastructurii existente trebuie să fie înlocuită fie folosesc sisteme complexe de achiziție de date [28].

### 6.2.2 Provocări

Mediul de lucru este o casă de animale care găzduiește zeci de cuști, fiecare cu 4-5 șoareci. Cuștile trebuie să fie curățate odată pe săptămână, operație care de regulă este făcută prin mutarea animalelor într-o cușcă nouă și înlocuirea celei vechi. Subiecții de test sunt șoareci albinoși de laborator din rasa BALB/c. Pentru ochiul uman aceștia arată identic și nu prezintă trăsături personale de identificare. Greutatea adultă este de 20-25g, de circa 8-12 ori mai mică decât a unui șobolan, studiat în lucrări similare [29]. Aceasta este o provocare fundamentală deoarece greutatea maximă care poate fi atașată unui animal este de 5% din masa corporală (<1g), ceea ce a dus la alegerea soluției bazate pe monitorizare externă.

În ceea ce privește rețeaua de senzori, este necesară evaluarea constrângerilor energetice, a resurselor limitate de calcul, stocare și comunicație a nodurilor. În operarea cu imagini care produc cantități mari de date am ales o abordare duală. În loc să folosim un flux video continuu, am utilizat un senzor PIR pentru detectarea mișcării și activarea camerei doar la momentele de interes. De asemenea, camera oferă compresie JPEG hardware și posibilitatea de a configura rezoluția și calitatea de achiziție pentru reducerea informației transmise prin canalul radio. Provocările specifice discutate includ: identificarea șoarecilor, considerații privitoare la cușcă și la câmpul vizual al camerei, activitatea și ritmul circadian al animalelor.

### 6.2.3 Descrierea sistemului și experimentare

În urma evaluării, am optat pentru o structură hardware compusă din module iSense Core2 cu modul de securitate atașat ce include senzorii PIR și de imagine. Acesta este dezvoltat în jurul unui microcontroller Jennic 5148 (4-32Mhz, 128kB ROM și RAM, radio 802.15.4 integrat). Sensorul de imagine este OV7640 care poate capta cadre la o rezoluție maximă de 640x480 și are un obiectiv ce oferă un câmp vizual de 42 de grade orizontal și 16.5 grade vertical. Dezvoltarea pentru platforma iSense este realizată în C++ cu suita de utilitare oferită

de producător.

Arhitectura de sistem dezvoltată este ilustrată în figura 17. Fiecărei cuști îi este atribuit un nod senzorial cu modul vizual. Acestea formează o rețea wireless care trimite imaginile comprimate JPEG spre baza radio care este conectată la gateway. Gateway-ul este implementat ca un sistem compact (Plug Computer) cu posibilități de calcul și consum energetic medii. Aici rulează scripturi dedicate care achiziționează și stochează imaginile provenite de la rețeaua de senzori. Sarcinile complexe de prelucrare de imagini sunt alocate unui server puternic care returnează informațiile de înalt nivel rezultate în urma analizei. În final, datele procesate sunt prezentate utilizatorului local sau la distanță prin intermediul serverului web.

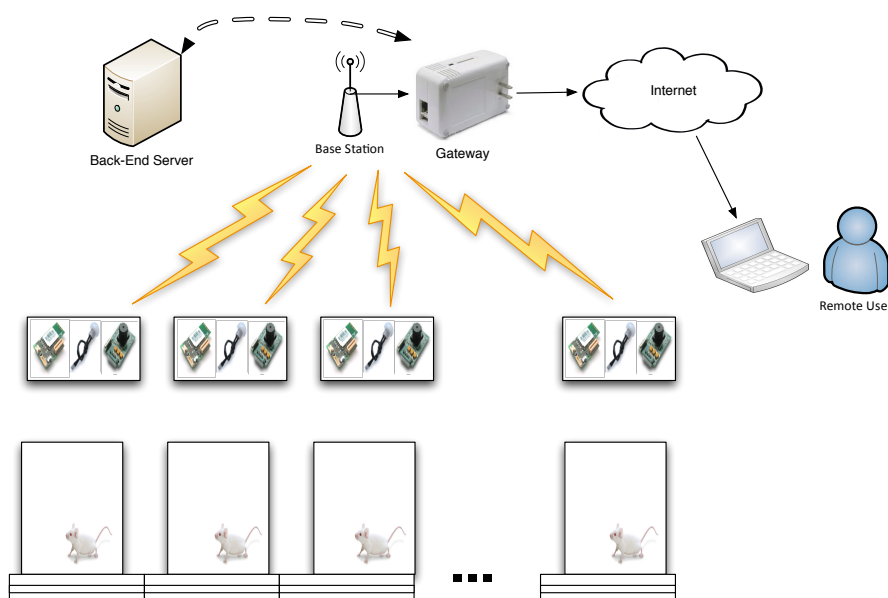


Figura 17: Diagrama sistemului propus

Experimente inițiale au presupus un scenariu simplificat cu un singur animal într-o cușcă (figura 18). Acest scenariu a permis calibrarea sistemului vizual și acomodarea cu strategiile de prelucrare de imagini pentru identificarea formelor. După înlăturarea fundalului și identificarea formei părții dorsale a șoarecelui, modelată ca un element discoidal, poziția sa este calculată ca centru de masă al formei rezultate. Aplicarea rutinei de procesare pe un set de 25 de imagini pe parcursul a 15 minute a generat 21 de detecții corecte (84%), 2 detecții cu poziționare incorectă (8%) și 2 detecții fals negative (8%). Pe baza acestor date, distanța de deplasare estimată ( $\hat{d}$ ) poate fi calculată cu formula:

$$\hat{d} = \sum_{i=1}^{n-1} \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2} \quad (11)$$

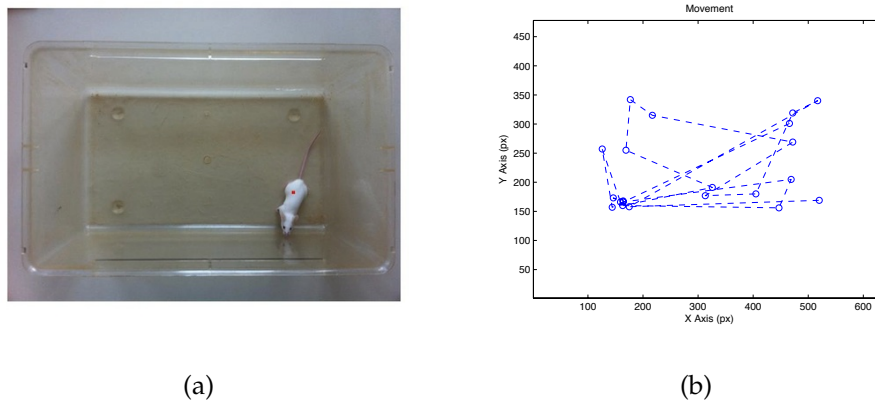


Figura 18: Rezultate experimentale (a) Situație de test cu un singur șoarece (b) Tipar de deplasare

Scenariul real include elemente complexe precum grila care acoperă cușca, stratul de rumeguș inferior și un număr mai mare de animale. Algoritmul dezvoltat și implementat dorește să exploateze diferența de culoare dintre animal și substrat. Pentru aceasta am implementat un algoritm de clusterizare k-means care are rolul de a înlătura fundalul imaginii. Sinteza pașilor de procesare de imagini: transformarea spațiului de culoare din RGB în  $L^*a^*b$  pentru robustețe la variațiile de luminozitate, rulare k-means cu 2 cluster și 3 iterații, identificarea formelor și calculul centroizilor aferenți. Secvența de procesare este prezentată în figura 19.

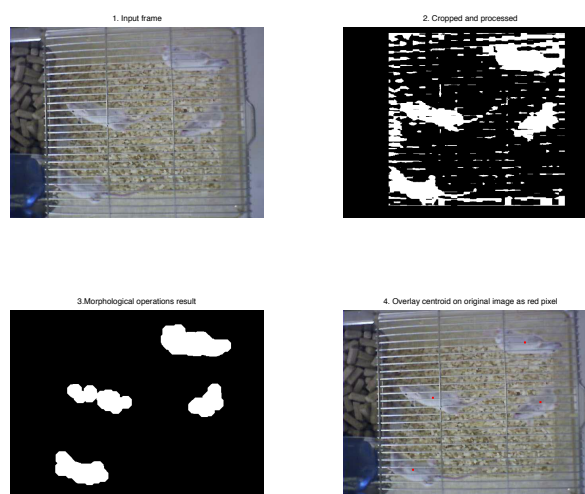


Figura 19: Sumarul algoritmului de procesare de imagini

## 7 Concluzii, contribuții personale și noi direcții de dezvoltare

Obiectivul major al tezei a fost deschiderea de noi perspective în dezvoltarea de aplicații inovative cu rețele de senzori wireless, printr-o încercare de a închide nișa dintre cercetarea în știința calculatoarelor și ingineria electrică și specialiștii din alte domenii (biologi, geologi, personal medical, etc.) și utilizatorii finali. Ei ar trebui să aibă la dispoziție mecanismele pentru a opera direct o astfel de rețea de senzori pentru colectarea datelor în diferite situații.

Pentru aceasta am construit o bază teoretică solidă care a permis aplicarea celor mai adecvate soluții tehnice care au rezultat în urma studiului literaturii recente de specialitate. Au fost prezentate și testate noi metode de integrare a rețelelor de senzori wireless cu medii de dezvoltare industriale standard la un loc cu utilitarele de dezvoltare. A fost argumentat un scenariu de monitorizare specific pentru măsurarea indoor a calității aerului care ia în considerare strategii adaptive de operare în regim parțial pentru senzori cu cerințe energetice ridicate. A fost dezvoltată o implementare și s-au evaluat rezultatele obținute. O direcție de cercetare inovativă a fost deschisă prin aplicarea WSN pentru urmărirea animalelor de laborator împreună cu dezvoltarea de algoritmi de procesare de imagine adecvați și sistemele suport necesare.

Contribuțiile personale și originale ale tezei, diseminate în principal în lucrările **J1, J2, B3, C1, C2, C7, C10, C16**, din lista de publicații personale, sunt prezentate mai jos:

- realizarea unei sinteze, într-o concepție proprie, a domeniului rețelelor de senzori wireless dintr-o perspectivă multidisciplinară aflată la intersecția științei calculatoarelor, ingineriei electrice și a telecomunicațiilor;
- realizarea unei sinteze, într-o concepție proprie, a celor mai relevante domenii de aplicații ale rețelelor de senzori wireless prin aplicații recunoscute din monitorizarea ecologică, îngrijire medicală, monitorizare și control industrial și mentenanța infrastructurii;
- realizarea unui studiu al literaturii de specialitate în ceea ce privește abordarea problemelor de comunicație radio în rețelele de senzori wireless;
- oferirea unei perspective duale asupra unor platforme de cercetare pentru rețele de senzori wireless, de la gama de jos prin nodul IRIS până la gama superioară, Imote2, din punctul de vedere al capabilităților de procesare, de extensie și complexitate;

- prezentarea în detaliu a sistemului de operare bazat pe evenimente pentru sisteme cu resurse limitate, TinyOS, dezvoltat special pentru aplicații WSN;
- realizarea unui studiu cronologic al protocoalelor și standardelor punând accentul pe protocoale de acces la mediu bazate pe competiție (S-MAC, B-MAC, X-MAC), standarde (IEEE 802.15.4-2006) și standarde industriale (WirelessHART);
- identificarea unei direcții de cercetare la confluența rețelelor de senzori wireless cu mediile de dezvoltare grafică, prin integrarea celor două tehnologii;
- implementarea unei aplicații practice de durată medie pentru evaluarea fiabilității colectării datelor și a comunicației radio de joasă putere, tip plasă într-un mediu indoor;
- utilizarea unor drivere LabVIEW pentru platforma WSN IRIS împreună cu un modul de extensie dedicat pentru măsurarea temperaturii, umidității, presiunii atmosferice, luminozitate și accelerometru pe două axe;
- extinderea și validarea unor drivere LabVIEW existente pentru modulele de dezvoltare MDA100 și MDA300, care permite abordarea unor noi direcții de aplicații prin integrarea de senzori specializați;
- proiectarea unui scenariu de monitorizare și control al unei case inteligente și demonstrarea validității soluției alese;
- aplicarea rezultatelor obținute la diseminarea pe scară largă a datelor și conectarea la sisteme industriale standard și utilitare;
- propunerea și argumentarea aplicării rețelelor de senzori wireless pentru monitorizarea de cost redus indoor a calității aerului cu rezoluție înaltă temporală și spațială;
- alegerea și evaluarea unei suite de senzori adecvate pentru o astfel de aplicație, ce constă în senzori de: particule/praf, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>;
- realizarea integrării sensorului de particule cu un nod senzorial IRIS la nivel hardware și software;
- evaluarea și validarea fezabilității sistemului prin comparație cu un instrument profesional de măsurare cu laser;
- propunerea și proiectarea unui modul de extensie nou cu senzori de gaze semiconductori pentru platforma IRIS;

- realizarea dezvoltărilor hardware și software asociate;
- identificarea unei nișe în monitorizarea și urmărirea prin senzori wireless a șoarecilor de laborator într-un laborator de cercetare medicală, argumentarea soluției propuse și dezvoltarea unei arhitecturi generice cu rețele de senzori wireless multimedia și proiectarea unui scenariu de testare;
- documentarea unor incursiuni în analiza comportamentală a animalelor de laborator printr-o colaborare între Institutul de Informatică Tehnică și Departamentul de Dermatologie al Universității din Lübeck, Germania;
- realizarea unei analize comparative între diferite platforme de rețele de senzori wireless pentru alegerea celei mai potrivite pentru aplicația proiectată;
- studierea noilor dezvoltări în domeniul rețelelor de senzori vizuali (i.e. rețele de senzori wireless echipate cu surse de informații bogate sub forma senzorilor de imagine) pentru a putea câștiga experiență din aplicații anterioare și bune practici;
- evaluarea și compararea unor subsisteme imagistice și optice pentru scenariul dat;
- proiectarea și implementarea unei arhitecturi globale de sistem în jurul unei rețele de senzori wireless ca nucleu, împreună cu un gateway ce rulează software specializat și un server dedicat pentru rularea sarcinilor complexe de prelucrare de imagini;
- proiectarea, implementarea și adaptarea unor algoritmi de prelucrare de imagini pentru manipulare primară a imaginilor, înlăturare fundal, recunoașterea formelor și urmărirea;
- evaluarea rezultatelor aplicației pilot de urmărire a șoarecilor de laborator și stabilirea bazelor pentru o instalare experimentală în Departamentul de Dermatologie, Universitatea din Lübeck, Germania.

Pe baza cunoștințelor acumulate și a contribuțiilor personale și originale, o nouă direcție de dezvoltare a acestei cercetări o constituie potențialul de a organiza și instala un test bed pentru rețele de senzori wireless. Acesta va permite cercetări fundamentale asupra unor teme de interes cum sunt problemele de rutare fiabilă și agreare și diseminarea datelor provenite de la astfel de sisteme. Această abordare ar prezenta beneficii și în planul activității didactice oferind studenților oportunitatea de a testa și evalua protocoale și standarde



consacrate pentru rețele de senzori wireless. De asemenea, ar reprezenta o arhitectură de sistem generică pentru dezvoltarea și experimentarea în zona WSN. Esențială ar fi flexibilitatea la nivelurile de configurare, topologie, extindere și aplicații. Această rețea ar funcționa ca o instalare permanentă în cadrul departamentului de Automatică și Informatică Industrială și va permite cercetări peste o gamă largă de subiecte.

De asemenea, în strânsă legătură cu dezvoltările și contribuțiile expuse în capitolul 5, o propunere de cec de inovare a fost trimisă și acceptată de către Autoritatea Națională pentru Cercetare Științifică (PN-II-IN-CI-2012-1-0254 MICARES) pentru dezvoltarea unui produs inovativ de monitorizare indoor a calității aerului prin rețele de senzori wireless. Scopul acestui proiect este de a proiecta și construi un nod și structura de rețea ierarhică asociată pentru un partener industrial ca va putea fi promovat în considerabila piață pentru soluții de renovare a clădirilor existente. Este vizualizată atribuirea unui grup/cluster de noduri senzoriale pentru fiecare nivel al unei clădiri care direcționează datele către un coordonator central. Datele de interes constau în parametri uzuali cum sunt temperatura, umiditatea, presiunea, lumina și măsurări specializate de monoxid de carbon, dioxid de carbon, metan și alte gaze inflamabile și toxice, praf și fum. Structura este modulară în sensul în care subsisteme senzoriale potrivite sunt atribuite fiecărui nod în funcție de o așezare pre-determinată a rețelei. Componentele care stau la baza acestei noi dezvoltări sunt nodurile Memsic IRIS și comunicația de joasă putere de tip plasă IEEE 802.15.4. Principalele contribuții vor consta în configurarea structurii sistemului la nivel de cluster și de rețea, proiectarea și implementarea arhitecturii software, proiectarea și implementarea nodurilor senzoriale, dezvoltarea unui model experimental cu o structură reconfigurabilă și demonstrarea funcționalității acestuia. Provocările cheie constau în selectarea și dimensionarea sursei de energie și a senzorilor de gaze precum și în testarea componentelor de cost redus în funcție de timp de răspuns, reproductibilitate și liniaritate. O provocare este de asemenea și proiectarea unui cadru de evaluare și calibrare. Rezultatul final al activității de cercetare va fi un produs brevetat cu scopul de a testa piața pentru astfel de tehnologii avansate.

## Bibliografie

- [1] Gregory Pottie and William Kaiser. *Principles of Embedded Networked Systems Design*. Cambridge University Press, August 2005.
- [2] Holger Karl and Andreas Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, 2006.
- [3] Branislav Kusy, Christian Richter, Wen Hu, Mikhail Afanasyev, Raja Jurdak, Michael Brünig, David Abbott, Cong Huynh, and Diethelm Ostry. Radio diversity for reliable communication in wsns. In *IPSN*, pages 270–281, 2011.
- [4] Jamal N. Al-karaki and Ahmed E. Kamal. Routing techniques in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 11:6–28, 2004.
- [5] Geoff Werner-Allen, Konrad Lorincz, Jeff Johnson, Jonathan Lees, and Matt Welsh. Fidelity and yield in a volcano monitoring sensor network. In *Proceedings of the 7th symposium on Operating systems design and implementation, OSDI '06*, pages 381–396, Berkeley, CA, USA, 2006. USENIX Association.
- [6] Walteneus Dargie and Christian Poellabauer. *Fundamentals of Wireless Sensor Networks: Theory and Practice (Wireless Communications and Mobile Computing)*. Wiley, May 2010.
- [7] Philip Levis and David Gay. *TinyOS Programming*. Cambridge University Press, July 2010.
- [8] Adam Dunkels, Bjorn Gronvall, and Thiemo Voigt. Contiki - a lightweight and flexible operating system for tiny networked sensors. In *Proceedings of the 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN '04*, pages 455–462, Washington, DC, USA, 2004. IEEE Computer Society.
- [9] Wei Ye, John S. Heidemann, and Deborah Estrin. An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks. In *INFOCOM*, 2002.
- [10] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems, SenSys '04*, pages 95–107, New York, NY, USA, 2004. ACM.
- [11] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between

- systems- Local and metropolitan area networks- Specific requirements–Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs. pages 1–323, September 2006.
- [12] Jianping Song, Song Han, Al Mok, Deji Chen, Mike Lucas, Mark Nixon, and Wally Pratt. Wirelesshart: Applying wireless technology in real-time industrial process control. In *Proceedings of the 2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, RTAS '08*, pages 377–386, Washington, DC, USA, 2008. IEEE Computer Society.
- [13] M. Turon. Mote-view: A sensor network monitoring and management tool. In *Embedded Networked Sensors, 2005. EmNetS-II. The Second IEEE Workshop on*, pages 11 – 18, may 2005.
- [14] Crossbow Inc. *XMesh User's Manual*, revision c edition, March 2007.
- [15] Grigore Stamatescu and Valentin Sgârciu. Integration of wireless sensor networks with virtual instrumentation in a residential environment. *Scientific Bulletin of the University Politehnica of Bucharest*, 74(4), 2012.
- [16] Sensirion. *SHT1X Humidity and Temperature Sensor IC Datasheet*, 2012.
- [17] Rick Bitter. *LabVIEW Advanced Programming Techniques - 2nd Edition*. CRC Press, August 2007.
- [18] Grigore Stamatescu, Valentin Sgarciu, and Sabin Stamatescu. Pc-based system for level transducer interfacing. In *Proceedings of the 2010 First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, SENSORDEVICES '10*, pages 89–93, Washington, DC, USA, 2010. IEEE Computer Society.
- [19] Demin Wang, Dharma P. Agrawal, Wassana Toruksa, Chaichana Chaiwatpongsakorn, Mingming Lu, and Tim C. Keener. Monitoring ambient air quality with carbon monoxide sensor-based wireless network. *Commun. ACM*, 53(5):138–141, 2010.
- [20] Jinfu Zheng, Charles Elliott, Anand Dersingh, Ramiro Liscano, and Mikael Eklund. Design of a wireless sensor network from an energy management perspective. In *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual*, pages 80–86, may 2010.
- [21] F. Hauert and A. Vogl. Measurement of Dust Cloud Characteristics in Industrial Plants. Technical Report PL910695, Research Center for Applied System Safety and Industrial Medicine, 1995.

- [22] Sharp Corporation. *GP2Y101AU0F Compact Optical Dust Sensor Datasheet*, e4-a01501en edition, 2007.
- [23] Ji Lee, Hye Shin, Soo Bae, Yong Kim, and Chang-Hee Kang. Seasonal variation of particle size distributions of pachs at seoul, korea. *Air Quality, Atmosphere, Health*, 1:57–68, 2008. 10.1007/s11869-008-0002-2.
- [24] B. Rinner, T. Winkler, W. Schriebl, M. Quaritsch, and W. Wolf. The evolution from single to pervasive smart cameras. In *Distributed Smart Cameras, 2008. ICDSC 2008. Second ACM/IEEE International Conference on*, pages 1–10, sept. 2008.
- [25] Ian F. Akyildiz, Tommaso Melodia, and Kaushik R. Chowdhury. A survey on wireless multimedia sensor networks. *Comput. Netw.*, 51(4):921–960, March 2007.
- [26] G. Stamatescu, K. Romer, R. Ludwig, S.M. Ibrahim, and V. Sgarciu. Work in progress: Micenet: Monitoring behaviour of laboratory mice with sensor networks. In *Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), 2011 International Conference on*, pages 1–3, june 2011.
- [27] Monya Baker. Animal models: Inside the minds of mice and men. *Nature*, 475(7354), July 2011.
- [28] H.A. van de Weerd, R.J. Bulthuis, A.F. Bergman, and F. Schlingmann. Validation of a new system for the automatic registration of behaviour in mice and rats. *Behavioural Processes*, 53(1–2):11–20, 2001.
- [29] Okuary Osechas, Johannes Thiele, Jo Bitsch, and Klaus Wehrle. Ratpack: Wearable sensor networks for animal observation. In *Engineering in Medicine and Biology Society, 2008. EMBS 2008. 30th Annual International Conference of the IEEE*, pages 538–541, aug. 2008.

Mai jos este prezentată o listă de publicații personale.

### Jurnale și reviste

**J1. Stamatescu Grigore**, Sgârciu Valentin, Integration of Wireless Sensor Networks with Virtual Instrumentation in a Residential Environment, *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, Vol. 74, Issue x, pp. xx-xx, 2012, ISSN 12xx-xxxx

**J2. Sgârciu Valentin, Stamatescu Grigore**, Năstase Alin, Optimizing the Energy Consumption of a Smart House using the LabVIEW Development Environment and WSN Technologies (R), *Automation and Instrumentation Magazine*, 5-6/2010, ISSN 1582-3334

**J3.** Iliescu Sergiu, Făgărașan Ioana, Dumitru Iulia, Arghira Nicoleta, **Stamatescu Grigore**, Modular Systems for Simulation of the Automatic Control of Industrial Processes for Equipping Multifunctional Educational Platforms (R), *Automation and Instrumentation Magazine*, 01/2010, ISSN 1582-3334

**J4.** Iordache Mihai, Dumitriu Lucia, **Stamatescu Grigore**, A Numerical Two-Time Approach for RF-IC Analysis, *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 30, 2006, ISSN 1842-4805

**J5.** Filipescu Adrian, Chetroiu Virgil, **Stamatescu Grigore**, Sliding-mode observer-controller for multimachine power systems control, *Scientific Bulletin of Petroleum and Gas University from Ploiesti*, pp. 28-33, Vol.LVIII, Technical Series, No.1/2006, ISSN 1224-849

### Conferințe

**C1.** **Stamatescu Grigore**, Sgârciu Valentin, Evaluation of Wireless Sensor Network Monitoring for Indoor Spaces, International Symposium on Instrumentation and Measurement, Sensor Network and Automation, IMSNA 2012, Sanya, China

**C2.** Khadem Mokhloss, **Stamatescu Grigore**, Sgârciu Valentin, Wireless Measurement Node for Dust Sensor Integration, Proceedings of the 6th International Conference on Sensor Technologies and Applications, SENSORCOMM 2012, Rome, Italy, ISBN 978-1-61208-207-3

**C3.** Ion Ion, Curaj Adrian, Borangiu Theodor, Vasile Aurelian, **Stamatescu Grigore**, Some Aspects of the Movement MERO Modular Walking Robot on Unarranged Terrain, Adaptive Mobile Robotics: Proceedings of the 15th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines, CLAWAR 2012, Baltimore, USA, ISBN 978-981-4415-94-1

**C4.** Ion Ion, **Stamatescu Grigore**, Motion Simulation of the Modular Walking Robot MERO using Force and Attitude Sensors, Proceedings of the 2012 International Conference on Modeling, Simulation and Visualization Methods, MSV2012, Las Vegas, USA, ISBN 1-60132-226-7

**C5.** Cernian A., Olteanu A., Mateescu G., Vlădescu M., **Stamatescu G.**, Ropot A., Pleșca C., Togan M., Sgârciu V., Cârstoiu D., Saru D., Anghel M., Oană A., The Design and Implementation of an Experimental Model for Secure Management of Personal Data based on Electronic Identity Card and PKI Infrastructure, *Proceedings of 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2012)*, Bucharest, Romania, pp. T454-T458, DOI 10.3182/20120523-3-RO-2023.00398

**C6.** Olteanu A., Cernian A., **Stamatescu G.**, Mateescu G., Vlădescu M., Ropot A., Pleșca C., Togan M., Sgârciu V., Cârstoiu D., Saru D., Anghel M., Oană A., The Design and Va-

Validation of an Experimental Model for the Secure and Efficient Medical Services based on PKI Infrastructures and Smart-cards, *Proceedings of 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing (INCOM 2012)*, Bucharest, Romania, pp. W638-W643, DOI 10.3182/20120523-3-RO-2023.00413

**C7. Stamatescu Grigore**, Römer Kay, Ludwig Ralf, Ibrahim Saleh, Sgârciu Valentin, Work in Progress: MiceNet: Monitoring Behaviour of Laboratory Mice with Sensor Networks, *Proceedings of the IEEE DCOSS 2011*, Barcelona, Spain, pp. 1-3, ISBN 978-1-4577-0512-0

**C8. Dumitru Iulia, Stamatescu Grigore**, Făgărașan Ioana, Iliescu Sergiu, Dynamic Management Techniques for Increasing Energy Efficiency within a Data Center, *Proceedings of the First UNITE Doctoral Symposium*, 27-28 June 2011, Bucharest, Romania, pp.129-133, PRINTECH, ISSN 2247-6040

**C9. Olteanu Adriana, Ioniță Anca, Stamatescu Grigore**, Sgârciu Valentin, Ionescu Traian, Cernian Alexandra, Model Based Educational Content for Pressure Measurement Experiments, *Proceedings of the 18th International Conference on Control Systems and Computer Science, CSCS18*, May 2011, Vol. 2, pp. 687-692, Bucharest, Romania, ISSN 2066-4451

**C10. Stamatescu Grigore**, Sgârciu Valentin, Stamatescu Sabin, PC-Based System for Level Transducer Interfacing, *Proceedings of the First International Conference on Sensor Device Technologies and Applications, SENSORDEVICES 2010*, Venice, Italy, DOI 10.1109/SENSOR-DEVICES.2010.23, ISBN 978-1-4244-7474-5

**C11. Șolea Razvan, Filipescu Adrian, Stamatescu Grigore**, Sliding-mode real-time mobile platform control in the presence of uncertainties, *Proceedings of the 48th Conference on Decision and Control, IEEE CDC 2009*, pp.7747-7752, Shanghai, China, DOI 10.1109/CDC.2009.5399667, ISBN 978-1-4244-3871-6

**C12. Filipescu Adrian, Șuşnea Ioan, Filipescu Adriana, Stamatescu Grigore**, Distributed System of Mobile Platform Obstacle Avoidance and Control as Robotic Assistant for Disabled and Elderly, *International Conference on Control and Automation, IEEE ICCA 2009*, pp.1886-1891, Christchurch, New Zealand, 9-11/December/2009, ISBN 9781424447060

**C13. Filipescu Adrian, Șuşnea Ioan, Filipescu Silviu, Stamatescu Grigore**, Wheeled Mobile Robot Control Using Virtual Pheromones and Neural Networks, *International Conference on Control and Automation, IEEE ICCA 2009*, pp.157-162, Christchurch, New Zealand, 9-11/December/2009, ISBN 9781424447060

**C14. Paraschiv Nicolae, Băieșu Adriana, Stamatescu Grigore**, Using an Advanced Control Technique for Controlling a Distillation Column, *International Conference on Control and Automation, IEEE ICCA 2009*, pp.581-584, Christchurch, New Zealand, 9-11/December/2009,

ISBN 9781424447060

**C15. Stamatescu Grigore**, Deubzer Michael, Popescu Dumitru, Mottok Jürgen, Migration Overhead in Multiprocessor Scheduling, pp.645-654, *Proceedings of the ESE Kongress 2009*, Sindelfingen, Vogel Business Media GmbH & Co. KG, ISBN 978-3-8343-2402-3

**C16. Rancea Irina, Sgârciu Valentin, Stamatescu Grigore**, Remote Acquisition Processing and Generation of Digital Signals for a Reversible Counter through Labview Environment, pp.857-858, *Annals of DAAAM for 2009 & Proceedings of the 20th International DAAAM Symposium*, ISBN 978-3-901509-70-4, ISSN 1726-9679, Published by DAAAM International, Vienna, Austria

**C17. Dumitru Iulia, Făgărașan Ioana, Iliescu Sergiu, Stamatescu Grigore**, Arghira Nicoleta, Barbulea Veronica, A Modular Process Simulator with PLC, *Proceedings of the 9th Int. Conf. on Simulation, Modelling and Optimization (SMO)*, Budapest, Hungary, September 2009, pp 391-394, ISBN 978-960-474-113-7

**C18. Airimițoaie Tudor Bogdan, Popescu Dumitru, Dimon Cătălin, Stamatescu Grigore**, Robust Control Optimization for Thermo-energetic Installations, *Proceedings of the IFAC CAO 2009 Workshop*, Finland, DOI 10.3182/20090506-3-SF-4003.00006, ISBN 978-3-902661-42-5

**C19. Filipescu Adrian, Stancu Alexandru, Filipescu Silviu, Stamatescu Grigore**, Real-time Sliding-mode Adaptive Control of a Mobile Platform Wheeled Mobile Robot, *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, July 6-11, 2008, pp.4393-4399, ISBN 978-1-1234-7890-2, DOI 10.3182/20080706-5-KR-1001.0881, Elsevier IFAC Publication

**C20. Filipescu Adrian, Șuşnea Ioan, Stancu Alexandru, Stamatescu Grigore**, Path following, real-time, embedded fuzzy control of a mobile platform pioneer 3-dx, *8th WSEAS International Conference on Systems Theory and Scientific Computation (ISTASC08)*, Rhodes (Rodos) Island, Greece, August 20-22, 2008, pp.334-335, ISBN 978-960-8764-83-1, ISSN 1790-3865, Published by WSEAS Press

**C21. Rancea Irina, Sgârciu Valentin, Stamatescu Grigore**, Remote Monitoring of Parameters for a Pressure Transducer Through Hart Protocol and Labview Environment, pp.1171-1172, *Annals of DAAAM for 2008 & Proceedings of the 19th International DAAAM Symposium*, ISBN 978-3-901509-68-1, ISSN 1726-9679, Published by DAAAM International, Vienna, Austria

**C22. Filipescu Adrian, Stancu Alexandru, Filipescu Silviu, Stamatescu Grigore**, On-line Parameter Estimation in Sliding-mode Control of Pioneer 3-DX Wheeled Mobile Robot, *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Systems Theory and Scientific Computation*

ISTASC07, pp72-77 in Vouliagmeni Beach, Athens, Greece, August 24-26, 2007 . ISSN 1790-5117, ISBN 978-960-8457-98-0, Proceedings + Book published by WSEAS Press (Proceedings ISI quoted)

**C23.** Filipescu Adrian, Stancu Alexandru, **Stamatescu Grigore**, On-line Parameter Estimation and Adaptive Gain Smooth Sliding Observer-Controller for Robotic Manipulator Control, *International Conference on Control and Automation, IEEE ICCA 2007, CCA 2007*, pp.1948-1955, Guangzhou, China, 30/May-1/June/2007, Catalog number: 07EX1625C, ISBN 1-4244-0818-0, DOI 10.1109/ICCA.2007.4376701 (Proceedings ISI quoted)

### Cărți și capitole de carte

**B1.** Făgărașan Ioana, **Stamatescu Grigore**, Dumitru Iulia, Arghira Nicoleta, Electrical and Electronic Drives for the Electric Motor. Description and Practical Experiments. Laboratory Handbook (R), CONSPRESS, ISBN 978-973-100-224-8, Bucharest, Romania, 2012.

**B2.** Făgărașan Ioana, **Stamatescu Grigore**, Dumitru Iulia, Arghira Nicoleta, Automation. Command Schemes. Sequential Logic Circuits. LOGO Didactic Panel. Description and Practical Experiments. Laboratory Handbook (R), CONSPRESS, ISBN 978-973-100-226-2, Bucharest, Romania, 2012.

**B3.** Sgârciu Valentin, **Stamatescu Grigore**, Distance Process Monitoring using LabVIEW Environment, *LabVIEW Modeling, Programming and Simulations*, pp. 67-88, Ed.: Riccardo de Asmundis, InTech, ISBN: 978-953-307-521-1, Rijeka, Croatia, January 2011.

**B4.** **Stamatescu Grigore**, Dumitru Iulia, Buta Valentin, Jora Boris Numerical Methods - Problems (R), *MatrixRom*, ISBN: 978-973-755-106-1, Bucharest, Romania, October 2006.

### Brevete

**P1.** Făgărașan Ioana, Iliescu Sergiu, **Stamatescu Grigore**, Dumitru Iulia, Arghira Nicoleta Intelligent Simulator for Industrial Processes (R), *Submitted to OSIM Romania under no A00756/24.09.2009*. Published in BOPI-inv-06-2011, pp. 54.

**P2.** Petrescu Cătălin, Ștefănoiu Dan, **Stamatescu Grigore**, Nicula Octavian Method for Numerical Data Coding and Decoding in Small Power Radio Transceivers (R), *Submitted to OSIM Romania under no A00779/29.09.2009*. Published in BOPI-inv-06-2011, pp. 58.