

MONITORIZAREA SARCINII DISPONIBILE ÎN NODURILE REȚELELOR DE SENZORI FĂRĂ FIR PRIN DETERMINAREA CONSUMULUI DE ENERGIE CU METODE ONLINE ȘI OFFLINE

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la

Universitatea "Politehnica" din Timișoara
în domeniul CALCULATOARE ȘI TEHNOLOGIA
INFORMAȚIEI
de către

ing. Gabriel Gîrban

Conducător științific:
Referenți științifici:

prof.univ.dr.ing Mircea POPA
prof.univ.dr.ing. Nicolae ȚĂPUȘ
prof.univ.dr.ing. Lucian VINȚAN
prof.univ.dr.ing. Mircea STRATULAT

Ziua susținerii tezei: 28 Septembrie 2012

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

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

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

Copyright © Editura Politehnica – Timișoara, 2006

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

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

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul Departamentului de Calculatoare al Universității „Politehnica” din Timișoara.

Am conceput această lucrare fără asistența unei terțe părți și fără a face uz de alte surse decât cele specificate, iar noțiunile preluate direct sau indirect din alte surse au fost identificate ca atare. Această teză nu a mai fost prezentată în fața unei alte comisii de evaluare și a fost realizată în intervalul octombrie 2009 - august 2012 sub coordonarea domnului prof.dr.ing. Mircea Popa.

Timișoara, septembrie 2012

Gabriel Gîrban

Această lucrare a fost parțial finanțată prin grantul strategic POSDRU/88/1.5/S/50783, ID Proiect 50783 (2009), co-finanțat de Fondul Social European - Investing in People, prin Programul Sectorial Operațional Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 - 2013.

Gîrban, Gabriel

Monitorizarea sarcinii disponibile în nodurile rețelelor de senzori fără fir prin determinarea consumului de energie cu metode online și offline

Teze de doctorat ale UPT, Seria 14, Nr. 7, Editura Politehnica, 2012, 145 pagini, 62 figuri, 16 tabele.

ISSN: 2069-8216, ISSN-L:2069-8216

ISBN: 978-606-554-518-2.

Cuvinte cheie: Rețele de senzori fără fir, monitorizare online, monitorizare offline, conservare energie, resurse de calcul

Rezumat:

Consumul de energie la nivelul unui nod al rețelei și capacitatea bateriilor sunt elementele care influențează semnificativ proiectarea și utilizarea rețelelor de senzori fără fir, acestea determinând durata de funcționare a rețelei. Lucrarea de față se înscrie în efortul depus pentru conservarea energiei în rețelele de senzori și cuprinde rezultatele obținute pentru monitorizarea în timp real a consumului de energie la nivelul nodurilor rețelei de senzori, în scopul determinării energiei disponibile în bateriile acestora. Soluțiile hardware propuse pentru monitorizarea offline se caracterizează printr-o flexibilitate mai mare decât a platformelor de testare utilizate în acest domeniu, în timp ce precizia soluției software, propusă pentru monitorizarea online, crește exponențial cu numărul operațiilor monitorizate. Lucrarea este și o sinteză a resurselor de calcul și de memorie disponibile în nodurile reprezentative, prezentând adaptarea unor modele ale bateriei la constrângerile existente în rețelele cu senzori fără fir.

CUPRINS

Notății, abrevieri și acronime.....	1
Listă tabele	7
Listă figuri	9
1. INTRODUCERE.....	11
1.1. Obiective.....	13
1.2. Structura lucrării	13
2. REȚELE DE SENZORI	15
2.1. Durata de funcționare a rețelei.....	15
2.2. Noduri asociate static unor zone.....	16
2.3. Senzori WSN în mișcare	17
2.4. Durata de funcționare a unui nod	19
2.5. Modulul de achiziție	20
2.6. Modulul de procesare	21
2.7. Modulul de comunicare.....	23
2.8. Concluzii.....	24
3. RESURSE DISPONIBILE ÎN NODURILE WSN	27
3.1 Noduri WSN	27
3.2 Operanzi și operații aritmetice.....	30
3.2.1 Metodologie.....	30
3.2.2 Platforma Atmega12xx	31
3.2.3 Platforma PIC18LF8722	33
3.2.4 Platforma MSP430xx	33
3.2.5 Platforma Renesas M16C62P	34
3.2.6 Platforma PXA271	36
3.2.7 Discuții	37
3.3 Surse de energie	37
3.3.1 Pile de combustie - Biocelule cu combustie.....	38
3.3.2 Microsisteme pentru colectarea de energie	40
3.3.2.1 Utilizarea energiei termice	41
3.3.2.2 Utilizarea vibrațiilor.....	41
3.3.2.3 Energia solară	44
3.3.2.4 Supercondensatoare	45

3.3.2.5 Concluzii.....	47
3.3.3 Bateriile	48
3.3.3.1 Metode pentru determinarea capacității bateriilor	50
3.3.4 Concluzii	51
4. MEDIUL PENTRU TESTAREA REȚELELOR WSN	53
4.1 Medii de testare	53
4.1.1 Simulatoare WSN	53
4.1.2 Emulatoare WSN	54
4.1.3 Platforme pentru testarea rețelelor WSN	54
4.2 Cerințe ale platformei de test	56
4.3 Structura mediului de testare propus	57
4.3.1 Achiziția datelor	59
4.3.2 Generarea de semnale.....	60
4.3.3 Alunecări ale semnalelor de sincronizare	60
4.3.4 CAN	61
4.3.5 Fluxul de date.....	63
4.3.6 Software-ul aplicației	64
4.3.7 Concluzii	66
4.4 Interfața cu rețeaua WSN	66
4.4.1 Arhitectura	67
4.4.2 Fluxul de date.....	69
4.5 Aplicație software pentru testarea și managementul rețelelor WSN	69
4.5.1 Arhitectura	69
4.5.2 Extragerea datelor	71
4.6 Concluzii.....	72
5. MONITORIZAREA ENERGIEI ÎN NODURILE WSN.....	73
5.1 Sisteme pentru monitorizare a consumului de energie.....	73
5.2 Monitorizarea offline a consumului de energie	74
5.3 Monitorizarea online a consumului de energie	76
5.3.1 Modelul Matematic	76
5.3.2 Implementarea	78
5.3.3 Studii de caz	80
5.3.4 Sincronizarea	88
5.3.5 Concluzii	89
6. MODELE MATEMATICE ALE BATERIEI	91

Cuprins	vii
6.1 Proprietăți și clasificări ale bateriilor.....	91
6.2 Modelul liniar	93
6.2.1 Concluzii	96
6.3 Modele analitice	96
6.3.1 Modelul Rakhmatov-Vrudhula	97
6.3.2 Modelul chinetic.....	99
6.3.3 Concluzii	104
6.4 Modele electrice	106
6.4.1 Determinări sporadice ale capacității	108
6.4.2 Determinări recurente ale capacității	110
6.4.3 Concluzii	111
6.5 Modele stohastice	111
6.5.1 Concluzii	114
6.6 Modele electrochimice	115
6.7 Studiu de caz	116
7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII	119
ANEXA A - STRUCTURA UNUI MESAJ CAN 2.0.....	123
ANEXA B – COMENZI IMPLEMENTATE ÎN MEDIUL DE TESTARE	125
ANEXA C – CONFIGURAREA SOFTWARE-ULUI MEDIULUI DE TESTARE	127
ANEXA D - CONFIGURAREA MESAJELOR ÎN MEDIUL DE TESTARE	129
BIBLIOGRAFIE.....	131
INDEX	137

Notății, abrevieri și acronime

- δ - latența de trezire; intervalul de timp scurs de la punerea sub tensiune a unui circuit electronic până la funcționarea acestuia în parametrii stabiliți.
- κ - prag de rentabilitate; valoarea maximă a frecvenței de eșantionare până la care consumul de energie datorat tranzițiilor oprit-pornit este mai mic decât în cazul funcționării normale.
- Λ - lungimea de undă a semnalului.
- μ_{state} - starea microcontroler-ului; este utilizată pentru a determina consumul datorat modulelor din microcontroler active la un moment dat.
- Φ - rată de eșantionare; numărul de achiziții efectuate în unitatea de timp.
- ACK** - bit de confirmare în structura unui mesaj CAN; are valoare dominantă (TX) sau recisivă (RX).
- API** - Application Programming Interface; set de reguli, specificații și alte elemente care permit comunicarea între programe.
- ASCII** - American Standard Code for Information Interchange; schemă de codificare a textului în echipamente electronice.
- baud** - rată de transfer a informației în simboluri (pulsuri) pe secundă.
- big endian** - mod de ordonare a informației care se reprezintă pe mai mulți octeți, astfel încât aceștia apar în ordine descrescătoare a ponderii. Utilizat în serializarea datelor multi-octet sau în reprezentarea acestora în memorie.
- bit** - unitatea elementară de informație; un element ce poate avea doar două valori: 0 sau 1.
- boot** - operațiile și elementele conexe inițializării unui sistem încorporat.
- broadcasting** - trimiterea aceleiași informații către toți receptorii, simultan.
- BRP** - Baud Rate Prescaler; factor de divizare pentru stabilirea duratei unei cuante de timp care intră în structura unui bit pe magistrala CAN.
- buffer** - zonă de memorie tampon.
- CAN** - Controller Area Network; standard de comunicație serială, cu transmitere de mesaje fără arbitrare, dezvoltat de Bosch pentru industria auto dar utilizat și în automatizări industriale sau în industria medicală.
- CPU** - Central Processing Unit; unitate într-un sistem numeric, capabilă să proceseze instrucțiunile unui program.
- CRC** - Cyclic Redundancy Check; cod ciclic redundant pentru detecția și corecția erorilor, proprietățile acestuia depinzând de gradul și coeficienții unui polinom.
- CSMA/CA** - Carrier Sense, fiecare nod al rețelei monitorizează tot timpul nivelul

- semnalului purtător; Multiple Access, fiecare nod al rețelei poate iniția transmisia unui mesaj când mediul este liber; Collision Avoidance, când mai multe noduri inițiază transmisii în același timp, unul singur va continua procesul, restul așteptând următorul moment în care mediul va fi disponibil.
- CSV* - Comma-Separated Values; format de fișier text pentru stocarea datelor într-o formă tabelară.
- d* - distanță.
- DEL* - delimitator al câmpului de confirmare în structura unui mesaj CAN; întotdeauna este recesiv.
- DLC* - Data Length Code; câmp pe 4 biți în structura unui mesaj CAN care specifică lungimea în octeți a câmpului de date.
- driver* - componentă software prin intermediul căreia se interacționează cu un dispozitiv hardware.
- ECT* - Enhanced CapComp Timer; timer (numărător) asociat unor canale de tip intrare / ieșire, care pentru intrări permite asocierea unei referințe de timp unor evenimente ce apar pe acele canale, iar la ieșiri permite generarea unor semnale relativ la anumite întârzieri, programate.
- EOF* - End Of Frame; câmp în structura unui mesaj CAN care delimitează sfârșitul acestuia. Este format din șapte biți recesivi succesivi.
- Ethernet* - tehnologie pentru rețele locale de calculatoare care definește standarde pentru nivelul fizic, al accesului la mediu și al legăturii de date.
- F_{clk} - frecvența semnalului de sincronizare.
- FIFO* - First In First Out; abstractizare a modului de organizare a informației. Primele date introduse în structura de date vor fi primele utilizate.
- G_{rec} - câștig de recepție ale antenei.
- G_{tran} - câștig de transmisie al antenei.
- Hardware* - componentele fizice ale unui sistem electronic, în general, programabil.
- HTTP* - Hypertext Transfer Protocol; protocol de rețea, utilizat ca suport pentru comunicația de date prin Word Wide Web.
- I2C* - Inter-Integrated Circuit; interfață serială dezvoltată de Philips. Utilizează două linii pentru transmisia informației, una pentru date și una pentru sincronizare.
- IDE* - IDentifier Extension; bit în structura unui mesaj CAN. Este recesiv când urmează unui bit RTR (ID standard) sau dominant când urmează unui bit SRR (ID extins).
- ID* - IDentificator mesaj; 11 sau 29 biți în cazul unui mesaj CAN.
- IFS* - Interframe Space; biți recesivi prezenți pe mediul de comunicare al unei rețele CAN atunci când nu există transmisie de mesaje.
- întrerupere* - eveniment asincron care necesită schimbarea temporară a contextului de execuție pentru a executa codul asociat acestuia.

- IoT* - Internet of Things; rețea de tip internet în care adresele nu sunt atribuite doar unor sisteme de calcul ci și unor dispozitive inteligente cu senzori și/sau elemente de acționare, dispozitive capabile să inițieze sau să accepte interacțiuni cu alte elemente ale rețelei.
- LED* - Light-Emitting Diode; sursă de lumină realizată cu semiconductori.
- L* - factor supraunitar și adimensional reprezentând ponderea consumului de energie pe circuitele electrice din modulul de comunicație.
- M2M* - Machine to Machine communication; abilitatea sistemelor electronice de a descoperi și de a comunica cu alte sisteme care au abilități similare, fără o intervenție umană directă.
- MEM_{rdwr}* - tipul de acces la memoria flash.
- microcontroler* - circuit integrat care conține pe lângă un procesor ca element central, memorie, și alte module periferice programabile, uneori dedicate anumitor tipuri de aplicații.
- monitorizare offline* - observarea comportamentului unui sistem în laborator sau când acesta nu funcționează în scopul pentru care a fost creat.
- monitorizare online* - observarea comportamentului unui sistem când acesta funcționează în scopul pentru care a fost creat.
- MSB* - Most Significant Byte; identificator al celui mai semnificativ octet într-un număr reprezentat pe mai mulți octeți.
- multicasting* - Trimiterea aceleiași informații către un grup de receptori, simultan.
- nesC* - limbaj de programare derivat din C, care introduce în plus noțiuni ca task, comandă, eveniment.
- nod operațional* - nod care la momentul respectiv poate comunica cu alte elemente ale rețelei.
- nod potențial* - nod care deși dispune de suficientă energie, nu poate comunica cu alte elemente ale rețelei.
- Nod* - elementul de bază al unei rețele.
- NRZ* - Non Return to Zero; codificare care presupune menținerea constantă a nivelului unui semnal electric, pe toată durata unui bit. Poate ridica probleme de sincronizare.
- octet* - un grup de opt biți, ca element unitar de reprezentare a informației.
- oscilator Pierce* - oscilator bazat pe un cristal de cuarț, în configurație minimală, necesitând în plus: un inversor, una sau două rezistențe și două condensatoare.
- oscilator* - circuit electronic care produce un semnal periodic de tip analogic sau numeric.
- OS* - Operating System; software care administrează resursele hardware ale unui sistem, oferind suport pentru execuția altor aplicații.
- P_{rec}* - puterea semnalului primit de o antenă.
- P_{tran}* - puterea antenei de pe dispozitivul de transmisie.

- PDE* - Partial Differential Equations; sisteme de ecuații cu derivate parțiale.
- pipe* - element al sistemului de operare UNIX care permite comunicarea între procese.
- point-to-point* - cea mai simplă topologie de rețea care presupune o conexiune permanentă (dedicată) între doi parteneri de comunicație.
- prag de comunicare* - intervalul de timp maxim în care o rețea poate funcționa cu un număr de noduri operaționale sub limita admisă.
- PWM* - Pulse Width Modulation; modularea duratei pulsului unui semnal electric – un mod foarte eficient de a furniza cantități intermediare de energie electrică între două valori extreme.
- Q_B - corecția SOC inițială cu factori specifici bateriei ca autodescărcarea, relaxarea, temperatura, etc.
- Q_C - fluxul de sarcină datorat modulului de comunicare.
- Q_P - fluxul de sarcină datorat microcontrolerului și memoriei externe.
- Q_S - fluxul de sarcină datorat modului de achiziție.
- Q_T - fluxul total de sarcină de la începerea utilizării bateriei.
- R_e - Relaxation effect; efectul de relaxare - refacerea capacității în intervalele de timp când consumatorii sunt decuplați.
- RC_e - Rate Capacity effect; efectul de scădere temporară a capacității la conectarea unor consumatori mai mari.
- releu* - sistem de comunicație radio, care funcționează ca o stație intermediară de recepție și retransmisie.
- RTR* - Remote Transmission Request; delimitator al câmpului ID în structura unui mesaj CAN. Întotdeauna este dominant.
- SD_e - Self Discharge effect; efectul de autodescărcare al bateriilor.
- SJW* - Synchronization Jump Width; câmp de sincronizare în structura unui bit pe magistrala CAN.
- sleep* - mod de funcționare al unui circuit electronic într-un regim cu consum de energie redus.
- SoC* - System On a Chip; integrarea tuturor componentelor unui sistem pe un singur circuit integrat.
- SOC* - State of Charge; cantitatea de sarcină disponibilă în baterie.
- SOF* - Start Of Frame; identificator de început al unui mesaj în structura unui mesaj CAN. Întotdeauna este un bit dominant.
- software* - o colecție de programe și datele aferente, concepute pentru a fi executate de către un sistem electronic.

- SPI* - Serial Peripheral Interface; interfață serială sincronă care utilizează patru linii pentru transmiterea informației: o linie de sincronizare, o linie de selecție, și două linii de date (master-slave respectiv slave-master).
- SRAM* - Static Random Access memory; memorie ale cărei celule sunt formate din circuite basculante bistabile.
- SRR* - Substitute Remote Request; delimitator al primilor 11 biți ai câmpului ID extins în structura unui mesaj CAN. Întotdeauna este recesiv.
- t_q* - Cuantă de timp; submultiplu al duratei unui bit în structura unui mesaj CAN.
- tabel look-up* - tabele cu valori care implementează funcții caracteristice, în general prin interpolare, plecând de la valorile unor parametrii.
- task* - Sarcină de execuție; o secvență de cod cu un rol bine definit.
- testbed* - mediu pentru testare; platformă pentru experimentarea unor proiecte de dezvoltare mari; conține componente hardware, software și elemente de rețelistică utilizate pentru testarea riguroasă, transparentă și replicabilă a teoriilor științifice.
- TinyOS* - un sistem de operare gratuit bazat pe componente, dezvoltat ca platformă pentru nodurile WSN.
- transceiver* - circuit electronic care conține atât o componentă de transmisie cât și una de recepție.
- TSEG1* - Time SEGment; segment de timp la sfârșitul căruia se determină poziția în care se citește valoarea unui bit pe magistrala CAN.
- TSEG2* - Time SEGment; segment de timp la începutul căruia se determină poziția în care se citește valoarea unui bit pe magistrala CAN.
- UART* - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter; circuit intermediar utilizat în transmisia serială a datelor pentru preluarea octeților și trimiterea secvențială a biților conținuți, respectiv pentru asamblarea în octeți a biților primiți la recepție.
- V_{cutoff}* - tensiune de „cut-off” sau de decuplare; potențial minim, sub care funcționarea dispozitivelor electronice nu mai este posibilă.
- w^k* - cardinalitatea mulțimii W^k ; numărul de elemente al acestei mulțimi.
- W^k* - mulțime matematică ce conține valorile de energie mai mari decât un prag minim, disponibile în toate nodurile aparținând zonei identificată prin k .
- W_{min}* - pragul minimum de energie necesar unui nod pentru a comunica cu alte elemente ale rețelei.
- W_i^k* - notație prin care se identifică energia disponibilă în nodul i din zona de interes k .
- WSN* - Wireless Sensor Networks; rețele formate din senzori inteligenți, capabili să colecteze informație din mediul ambient și să o transmită către alte elemente ale rețelei.
- ZigBee* - denumire utilizată pentru identificarea nivelurilor software create peste standardul IEEE 802.15.4 - rețeaua logică și aplicațiile software.

Listă tabele

TABELUL.2.1. PUTEREA CONSUMATĂ DE NODURILE MICA2 ȘI TELOS, PE FUNCȚIONALITĂȚI.	25
TABELUL 3.1. CARACTERISTICI ALE DIFERITELOR TIPURI DE SENZORI WSN.	28
TABELUL 3.2. FAMILII DE NODURI WSN.	31
TABELUL 3.3. SUPERCONDENSATOARE: DENSITATEA DE ENERGIE ȘI DENSITATEA DE PUTERE [55].	47
TABELUL 3.4. BATERII: DENSITATEA DE ENERGIE ȘI DENSITATEA DE PUTERE.	50
TABELUL 4.1. COMENZI IMPLEMENTATE PE PLACA DE ACHIZIȚIE.	63
TABELUL 5.1. CONSUMUL NODURILOR MICA2 ȘI AL UNOR PLĂCI DE EXTENSIE MTS [88,89].	74
TABELUL 5.2. RESURSELE DE CALCUL NECESARE.	78
TABELUL 5.3. CONSUMUL DE MEMORIE DATORAT APLICAȚIEI DE MONITORIZARE	78
TABELUL 6.1. COMPORTAMENTUL MODELULUI KIBAM PENTRU DIFERITE REZOLUȚII ȘI RATE DE CONSUM (PROFIL DE TIP PULS) SIMILARE NODURILOR WSN.	105
TABELUL 6.2. EVOLUȚIA NUMĂRULUI DE ITERAȚII ȘI BUCLE EXECUTATE PRIN MODELUL KIBAM PENTRU DIFERITE REZOLUȚII ȘI RATE DE CONSUM (PROFIL DE TIP PULS).	105
TABELUL A.1: STRUCUTRA UNUI MESAJ CAN 2.0 [80] SUNT EXEMPLIFICATE DOAR MESAJELE DE TIP DATE.	123
TABELUL B.1: EXPRESII RELAȚIONALE PENTRU GENERAREA AUTOMATĂ DE SEMNALE.	126
TABELUL C.1: PARAMETRII CONFIGURABILI AI APLICAȚIEI SOFTWARE.	127
TABELUL D.1: CAMPURILE UNUI MESAJ - VALORILE SUNT CONFIGURATE ÎNTR-UN FIȘIER TEXT, ÎN FORMAT CSV.	129
TABELUL D.2: CONFIGURAREA COLECTĂRII DATELOR.	129

Listă figuri

FIG.2.1. REȚEA WSN CU NODURI ALOCATE STATIC.	16
FIG.2.2. REȚEA WSN CU NODURI ÎN MIȘCARE.	18
FIG.2.3. CONSUMUL DE CURENT ÎNTR-UN NOD WSN.	19
FIG.2.4. DIAGRAMA CAUZE EFECT PENTRU DETERMINAREA SOC.	26
FIG.3.1. PROPRIETĂȚI ALE ELEMENTELOR DE PROCESARE DIN NODURILE WSN.	28
FIG.3.2. CAPACITATEA DE STOCARE A NODURILOR WSN.	29
FIG.3.3. ATMEGA12XX. NECESARUL DE MEMORIE, ÎN OCTEȚI, PENTRU DIFERITE OPERAȚII.	32
FIG.3.4. ATMEGA12XX. NECESARUL DE MEMORIE PENTRU FIECARE COMBINAȚIE OPERAȚIE-OPERANZI.	32
FIG.3.5. MSP430XX. NECESARUL DE MEMORIE, ÎN OCTEȚI, PENTRU IMPLEMENTAREA DIFERITELOR OPERAȚII.	33
FIG.3.6. MSP430XX. NECESARUL DE MEMORIE PENTRU FIECARE COMBINAȚIE OPERAȚIE-OPERANZI.	34
FIG.3.7. M16C62P. NECESARUL DE MEMORIE, ÎN OCTEȚI, PENTRU IMPLEMENTAREA DIFERITELOR OPERAȚII.	35
FIG.3.8. M16C62P. NECESARUL DE MEMORIE PENTRU O COMBINAȚIE OPERAȚIE-OPERANZI.	35
FIG.3.9. PXA271. NECESARUL DE MEMORIE, ÎN OCTEȚI, PENTRU IMPLEMENTAREA DIFERITELOR OPERAȚII.	36
FIG.3.10. DENSITATEA SPECIFICĂ A SURSELOR DE ENERGIE ÎN REȚELELE WSN.	38
FIG.3.11. PILE DE COMBUSTIE CU MEMBRANĂ DE FILTRARE A IONILOR POZITIVI.	39
FIG.3.12. CONVERSIA VIBRAȚIILOR ÎN ENERGIE ELECTRICĂ.	42
FIG.3.13. STRUCUTRA CONDENSATOARELOR ELECTROCHIMICE.	46
FIG.3.14. MICROSISTEM PENTRU COLECTAREA ENERGIEI DIN MEDIUL AMBIANT.	48
FIG.3.15. STRUCTURA UNEI BATERII LITIU-ION.	49
FIG.4.1 ARHITECTURA MEDIULUI DE TESTARE.	58
FIG.4.2 PROTOTIPUL MEDIULUI DE TESTARE.	58
FIG.4.3 ASOCIEREA NODURILOR WSN LA PLĂCILE DE MONITORIZARE.	59
FIG.4.4 ALUNECAREA DE TIMP CA O DIFERENȚĂ ÎN MICROSECUNDE.	61
FIG.4.5 CONECTAREA COMPONENTELOR LA REȚEAUA CAN.	62
FIG.4.6 PLĂCILE DE MONITORIZARE: FLUXUL DE CONTROL ÎNTRE COMPONENTELE SOFTWARE ALE APLICAȚIEI.	64
FIG.4.7 DURATA UNUI BIT CA SUMĂ DE CUANTE DE TIMP.	65
FIG.4.8 INTERFAȚA HARDWARE A SISTEMULUI DE CALCUL CU REȚEAUA WSN.	67
FIG.4.9 ARHITECTURA INTERFEȚEI SOFTWARE CU REȚEAUA WSN.	68
FIG.4.10 FLUXUL DE DATE PRIN INTERFAȚA CU REȚEAUA WSN.	69
FIG.4.11 ARHITECTURA APLICAȚIEI PENTRU MANAGEMENTUL REȚELELOR CAN ȘI WSN.	70
FIG.4.12 REPREZENTAREA INTERNĂ A MESAJELOR.	71
FIG.5.1 MONITORIZARE OFFLINE A CONSUMULUI DE ENERGIE ÎN NODURILE WSN.	75
FIG.5.2 DOMENIUL VALORILOR REPREZENTATE PE CELE 3 SOLUȚII DE MONITORIZARE ONLINE.	77
FIG.5.3 CONSUMUL IMPLICAT DE APRINDEREA LED-URILOR FOLOSIND TASK-URI.	80
FIG.5.4 CONSUMUL IMPLICAT DE APRINDEREA LED-URILOR FOLOSIND TIMER-E.	81
FIG.5.5 ESTIMAREA CONSUMULUI APLICAȚIEI CLIENT IMPLEMENTATĂ CU TASK-URI.	82
FIG.5.6 ESTIMAREA CONSUMULUI APLICAȚIEI CLIENT IMPLEMENTATĂ CU TIMER-E.	82

FIG.5.7 PROFILUL DE START-UP LA IMPLEMENTAREA CU TASK-URI.	83
FIG.5.8 CONSUMUL DATORAT PORNIRII TRANSCIVER-ULUI LA IMPLEMENTAREA CU TASK-URI.	83
FIG.5.9 CONSUMUL IMPLICAT DE TRIMITEREA UNUI MESAJ LA IMPLEMENTAREA CU TASK-URI.	84
FIG.5.10 PROFILURILE DE CONSUM ASOCIATE LED-URILOR LA IMPLEMENTAREA CU TASK-URI.	84
FIG.5.11 EROAREA CONSUMULUI TOTAL ESTIMAT LA IMPLEMENTAREA CU TASK-URI.	85
FIG.5.12 PROFILUL DE START-UP DETRMINAT PENTRU IMPLEMENTAREA CU TIMER-E.	85
FIG.5.13 CONSUMUL INTRODUS DE MANAGEMENTUL TIMER-ELOR.	86
FIG.5.14 CONSUMUL INTRODUS DE MANAGEMENTUL TIMER-ELOR.	86
FIG.5.15 PROFILURILE DE CONSUM ASOCIATE LED-URILOR LA IMPLEMENTAREA CU TIMER-E.	87
FIG.5.16 ACUMULAREA ERORII PRIN ESTIMAREA CONSUMULUI LA IMPLEMENTAREA CU TIMER-E.	87
FIG.5.17 DIFERENȚA ÎNTRE CONSUMUL TOTAL ESTIMAT ȘI CONSUMUL TOTAL MĂSURAT.	88
FIG.5.18 ALUNECAREA BAZEI DE TIMP, ÎN μ S, ÎNTRE UN NOD MICAȘ ȘI O PLACĂ CU MICROCONTROLLER	89
FIG.6.1 PRECIZIA ȘI EFORTUL DE CALCUL IN MODELELE BATERIEI.	92
FIG.6.2 VÂRFURI DE CONSUM DATORATE CIRCUITELOR TIMER (ATMEGA128L).	94
FIG.6.3 ERORILE PENTRU APROXIMAREA RAKHMATOV-VRUDHULA ȘI SOLUȚIA PROPUȘĂ.	98
FIG.6.4 MODELAREA CHINETICĂ A BATERIEI.	99
FIG.6.5 COMPORTAMENTUL MODELULUI CHINETIC LA DIFERITE PROFILE DE CONSUM.	100
FIG.6.6 OPTIMIZAREA TIMPILOR DE EXECUȚIE PRIN REFORMULAREA MODELULUI CHINETIC.	106
FIG.6.7 MODELARE ELECTRICĂ A BATERIEI.	107
FIG.6.8 VARIAȚIA TENSIUNII LA BORNE ÎN FUNCȚIE DE CAPACITATEA BATERIEI.	109
FIG.6.9 MODELUL STOCHASTIC CHIASERINI-RAO [99].	112
FIG.6.10 MODELUL STOCHASTIC CHIASERINI-RAO MODIFICAT [100].	113
FIG.6.11 ECUAȚIILE CARE DESCRU COMPORTAMENTUL ELECTROCHIMIC AL BATERIILOR LI-ION [101]	115
FIG.6.12 NECESARUL DE MEMORIE RAM ȘI ROM PENTRU IMPLEMENTAREA MODELELOR BATERIEI	117
FIG.6.13 NECESARUL DE MEMORIE RAM ȘI ROM RELATIV LA RESURSELE DE MEMORIE DISPONIBILE.	117

1. INTRODUCERE

Avansul tehnologic din ultimele două decenii, îndeosebi în domeniul comunicațiilor fără fir, a permis dezvoltarea pe scară largă a aplicațiilor care utilizează dispozitive electronice autonome și/sau mobile și servicii conexe acestora. Factori determinanți în această evoluție sunt accesibilitatea dispozitivelor și serviciilor prin raportul preț-calitate precum și flexibilitatea soluțiilor care folosesc alte medii pentru comunicație vis-a-vis de soluțiile bazate pe fire. O problemă comună acestor echipamente electronice este chiar autonomia lor, în definiția căreia un rol predominant îl are durata de funcționare folosind energia disponibilă în acumulatori.

Până în anii '90, informația transmisă fără a face uz de fire avea preponderent conținut audio sau audio-video și avea ca destinatari și expeditori persoane sau grupuri de persoane. În ultimele două decenii, mai ales prin dezvoltarea telefoniei mobile și a protocoalelor de comunicație, au luat amploare și comunicațiile de date care utilizează medii de comunicare fără fir, acestea având acum parteneri, alături de persoane ca sursă sau destinație a informației, și mașini capabile să descopere singure alte echipamente și să trimită sau să extragă date la/de la acestea.

În ultimii ani se întâlnesc tot mai des concepte ca ambient inteligent, conectarea la internet a dispozitivelor electronice inteligente sau abilitatea acestor sisteme electronice de a comunica cu alte echipamente care au proprietăți similare, un exemplu în acest sens fiind *M2M*, concept prin care sistemele sunt capabile să se descopere, să realizeze interogări și să răspundă acestora fără a fi necesară o intervenție umană.

Rețelele de senzori fără fir (*WSN*) implementează aceste concepte fiind considerate al treilea val revoluționar în tehnologia comunicațiilor fără fir [1], după comunicațiile radio-tv și telefonia mobilă. Deși primele aplicații în care s-au utilizat aceste concepte erau preponderent legate de domeniul militar iar mai apoi de electronicele de consum, acestea s-au extins și în utilități (contorizare inteligentă), servicii (medicină) sau în diferite ramuri industriale (industria auto). Amplearea utilizării acestor sisteme a fost determinată de avansul tehnologic care a permis integrarea pe o scară tot mai largă a componentelor electronice, dar și de dezvoltarea noilor tehnologii pentru comunicații radio (*Bluetooth*, *Wi-Fi*, *ZigBee*, *Z-Wave*, *DECT ULE*, *KNX* etc.).

Tendențele actuale în domeniul rețelelor de senzori sunt centrate pe monitorizarea și controlul unui anumit sistem (natural sau tehnologic) utilizând senzori sau elemente de acționare integrate în general pe nodurile unor astfel de rețele, și interconectarea acestor elemente (senzori, actuatori sau chiar rețele) cu alte obiecte inteligente pentru a forma un "internet al obiectelor" (*IoT*). Se estimează pentru anul 2015 că o persoană obișnuită va deține aproximativ 7 obiecte conectate la internet, în lume fiind în jur de 25 de miliarde de dispozitive conectate fără a face uz de fire, iar în anul 2020 numărul dispozitivelor interconectate va ajunge la 50 de miliarde [2].

O constrângere care se regăsește atât la nivelul acestor rețele cât și la majoritatea dispozitivelor mobile sau a altor echipamente care sunt alimentate cu baterii, este energia limitată a acestora și de aici autonomia redusă. Din acest punct de vedere, probleme deosebite ridică acele dispozitive la care nu există

posibilitatea de a reîncărca sau de a înlocui bateriile, cercetarea în domeniul rețelelor *WSN* reflectând un efort deosebit pentru identificarea și implementarea unor algoritmi și a unor protocoale de comunicație eficiente din punct de vedere al consumului de energie. De asemenea, în contextul rețelelor *WSN* a fost demonstrat de Park et al. în [3] că eficiența rețelei, definită ca numărul de mesaje trimise până la descărcarea bateriei în cazul lucrării citate, poate fi îmbunătățită cu până la 52 % dacă optimizările (în cazul respectivei lucrări puterea semnalului la transmisie) vor ține cont și de starea de încărcare a bateriei.

Comportamentul bateriilor este unul neliniar, acesta depinzând de factori constructivi (dimensiune, compoziție electrozi și electrolit, număr celule, etc.), de mediul ambiant (temperatura) și de modul de variație al sarcinii (profilurilor de consum). Astfel, pentru determinarea energiei care este disponibilă în nodurile *WSN* alimentate cu baterii (starea de încărcare a bateriei) la un moment dat, trebuie considerate atât proprietățile bateriei cât și evoluția în timp a consumului de energie.

Determinarea variației consumului de energie în timp se face prin implementarea unui mecanism de monitorizare în fiecare nod al rețelei, activitatea de monitorizare neregăsindu-se printre prioritățile în cercetarea/dezvoltarea rețelelor de senzori, fiind doar pe poziția 21, cu un procent de 2,12%, într-un sondaj din 2007 [4] care clasifică principalele subiecte de cercetare din *WSN* în funcție de numărul de articole științifice pentru fiecare tematică. Lipsa de interes pentru monitorizarea nodurilor din rețelele *WSN* în general și în particular pentru monitorizarea consumului de energie la nivel de nod, poate fi explicată prin absența unui compromis rezonabil între beneficiile obținute și resursele implicate de soluțiile existente, estimarea consumului de energie realizându-se îndeosebi în laborator, prin intermediul unor simulatoare sau bancuri de test, în etapele de proiectare a rețelei sau de evaluare a eficienței strategiilor și protocoalelor de comunicație.

Pentru monitorizarea consumului de energie în rețelele *WSN* sunt utilizate două tipuri de metode: metode offline care presupun efectuarea de măsurători în laborator cu ajutorul platformelor de testare sau prin simulatoare, respectiv metode online de monitorizare, utilizate în timpul operării rețelei în aplicația pentru care aceasta a fost proiectată.

Soluțiile de monitorizare offline sunt aproape indispensabile în etapa de proiectare/dezvoltare a unei rețele *WSN*, oferind suport atât pentru testarea și validarea aplicației în laborator cât și pentru estimarea costurilor implicate, a duratei de funcționare a rețelei și pentru dimensionarea corespunzătoare a bateriilor.

Metodele de monitorizare online se clasifică în funcție de tehnologia utilizată pentru implementare în metode hardware și metode software. Soluțiile hardware de monitorizare online (*JAWS* [5], *SPOT* [6], etc.) au avantajul unei precizii mai bune decât soluțiile software dar presupun costuri mai ridicate și, mai ales, induc un consum de energie suplimentar, semnificativ. Au fost identificate trei metode software pentru monitorizarea online a consumului de energie în nodurile rețelelor senzori: *Levels* [7], o soluție bazată pe un model teoretic calibrat cu măsurători efectuate în laborator [8] și o soluție bazată pe profile de consum definite în conformitate cu stările microcontrolerului și ale circuitului de transmisie-recepție [9].

1.1. Obiective

Această lucrare se înscrie în efortul de cercetare depus în domeniul rețelelor de senzori *WSN* pentru conservarea energiei disponibile la nivel de nod, în scopul creșterii duratei de funcționare a rețelei, aceasta durată fiind utilizată ca o metrică în evaluarea performanței rețelelor de senzori. Astfel, obiectivele urmărite pe parcursul cercetării doctorale sunt:

1. determinarea influenței energiei disponibile în nodurile *WSN* asupra duratei de funcționare a rețelei, independent de topologia acesteia;
2. identificarea factorilor care influențează consumul de energie la nivelul unui nod al rețelei;
3. determinarea comparativă a resurselor (putere de procesare, spațiu pentru stocarea codului și a datelor, surse de energie, etc.) disponibile pe nodurile *WSN* actuale;
4. crearea unui mediu pentru testarea și validarea rețelelor *WSN* scalabil și flexibil, care să combine avantajele soluțiilor existente dar spre deosebire de acestea, să permită simularea în timp-real a condițiilor limită ale aplicației și măsurarea pe diferite plaje a consumului de curent;
5. obținerea unei soluții pentru determinarea offline, a consumului de energie, a cărei precizie să poată fi configurată în timp-real, în funcție de contextul aplicației;
6. identificarea unei soluții pentru estimarea online, în timp-real, a consumului de energie pe nodurile *WSN*;
7. analiza comparativă a diferitelor tipuri de modele ale bateriei;
8. optimizarea și adaptarea unor modele ale bateriei la constrângerile existente în nodurile rețelelor *WSN*;
9. determinarea resurselor necesare pentru integrarea modelelor bateriei pe platformele *WSN* actuale;
10. identificarea unor posibile direcții de cercetare pentru obținerea energiei disponibile în bateriile nodurilor *WSN* cu un raport între precizia estimării și efortul de calcul, mai bun decât cel oferit de modele actuale ale bateriei.

1.2. Structura lucrării

Rezultatele obținute în realizarea primelor două obiective sunt detaliate în capitolul următor, după o scurtă prezentare a rețelelor *WSN*, fiind demonstrat modul în care sarcina disponibilă în bateriile nodurilor *WSN* influențează durata de funcționare a unei rețele de senzori fără fir. De asemenea, factorii care influențează consumul de energie la nivelul unui nod al rețelei au fost identificați sub forma unei diagrame de tip cauze-efect.

Resursele disponibile la nivel de nod *WSN* (al treilea obiectiv) sunt analizate în capitolul 3 considerându-se platformele hardware reprezentative pentru nodurile utilizate în prezent. Sunt detaliate puterea de calcul, spațiul disponibil pentru

stocarea codului și a datelor precum și principalele soluții utilizate pentru alimentarea senzorilor *WSN* cu avantajele și dezavantajele acestora.

În capitolul 4 se descrie mediul de testare dezvoltat pe parcursul cercetării doctorale pentru validarea rețelelor *WSN*, în scopul îndeplinirii obiectivului 4. În capitolul 5 este detaliat modul în care acest sistem este utilizat pentru monitorizarea offline a consumului de energie în nodurile *WSN* (obiectivul 5). De asemenea, în capitolul 5 sunt prezentate și modificările metodelor actuale pentru monitorizarea online a consumului de energie (al șaselea obiectiv enunțat).

Capitolul 6 descrie principalele tipuri de modele matematice ale bateriilor, analizându-se posibilitatea integrării acestora la nivelul unui nod *WSN*, din perspectiva resurselor utilizate, a preciziei modelului și a utilității acestui demers. Prin acest capitol sunt detaliate rezultatele obținute în realizarea ultimelor patru obiective enumerate.

Ultimul capitol conține concluziile care reies din materialul prezentat împreună cu soluțiile identificate ca posibile direcții de îmbunătățire a performanțelor modelelor matematice ale bateriei care pot fi implementate la nivelul nodurilor *WSN*. În acest capitol sunt evidențiate contribuțiile aduse domeniului prin această teză, fiind indicate publicațiile în care au fost diseminate rezultatele obținute în realizarea obiectivelor propuse.

2. REȚELE DE SENZORI

Scopul rețelelor de senzori fără fir este de a detecta, procesa și a transmite date despre mediul ambiant, evenimente, sisteme naturale sau tehnologice, de regulă pentru cazuri în care nu este posibilă implementarea de soluții clasice bazate pe fire, sau când soluțiile clasice sunt mult mai costisitoare. Acest scop este îndeplinit utilizând un număr de noduri autonome, capabile să se descopere și să comunice între ele formând astfel o rețea pentru achiziția de date din zona în care au fost plasate. Se pot astfel identifica cel puțin trei componente ale unui nod WSN: un modul pentru achiziția de date, unul pentru procesarea primară și stocarea acestora și o componentă pentru comunicarea cu alte noduri sau centre de colectare. Nodurile sunt autonome, fiecare senzor fiind prevăzut cu o sursă de energie pentru alimentarea modulelor funcționale. Opțional, pe lângă componentele enunțate, în funcție de specificul aplicației se mai întâlnesc și elemente de acționare asupra ambiantului, module pentru localizare sau alte elemente utilizate în managementul rețelei. De asemenea, din punct de vedere funcțional, unele noduri pot avea doar o parte din atributele specifice senzorilor fără fir: achiziție și comunicare, recepție de mesaje și retransmisia acestora către alte noduri, comunicare cu un centru de colectare, etc. În funcție de modul în care sunt asociate aceste atribute nodurilor și de relațiile care se stabilesc între senzorii fără fir, se va configura topologia unei rețele *WSN*.

2.1. Durata de funcționare a rețelei

Există mai multe definiții acceptate pentru durata de funcționare a rețelelor *WSN*, în lucrarea [10] fiind identificate unsprezece. Astfel, durata de funcționare a unei rețele de senzori poate fi definită și ca abilitatea acelei rețele de a-și îndeplini sarcinile pentru care a fost proiectată astfel încât calitatea serviciilor oferite să nu scadă sub un prag predefinit. Spre exemplu, în unele aplicații se poate considera că o rețea a ajuns la sfârșitul duratei sale de funcționare când nu mai este capabilă să colecteze date dintr-un anumit număr de zone monitorizate. Cauza principală pentru care o rețea de senzori *WSN* atinge sfârșitul duratei sale de funcționare este consumarea energiei disponibile în nodurile rețelei chiar dacă senzorii se mai pot pierde și din cauza unor factori de mediu care conduc la deterioarea lor. Nodurile rețelelor *WSN* sunt alimentate, în general, cu baterii care au un disponibil limitat de energie, fiind considerate din acest punct de vedere echipamente care nu pot fi recuperate și, prin urmare, folosite o singură dată. În funcție de contextul aplicației, pot fi utilizate și noduri prevăzute cu module pentru colectarea din mediul ambiant a energiei necesare funcționării.

Legătura între consumul de energie la nivel de nod și influența acestuia la nivelul global al rețelei se face în următoarele două secțiuni printr-o abordare de tip „top-down”, luându-se în considerare două studii de caz considerate de autor ca fiind relevante pentru topologiile de rețele existente, cazurile analizate constituind un nucleu de generatori pentru aceste topologii. Astfel se introduc două modele matematice pentru definirea duratei de funcționare a rețelei *WSN* plecând de la

sarcina disponibilă în bateriile nodurilor. Primul model presupune o rețea în care nodurile sunt alocate static, pentru monitorizarea unor zone bine definite, al doilea model considerând o rețea în care nodurile se află în mișcare, existând situații în care acestea nu se află în zonele acoperite de centrele de colectare. Pentru fiecare din cele două cazuri enunțate se propune câte o definiție a duratei de funcționare a rețelei ca o funcție de informația disponibilă despre anumite „arii de interes”, prin care se identifică elementele critice pentru funcționarea rețelei. Ambele cazuri prezentate pot fi combinate în vederea obținerii unor modele pentru reprezentarea unor topologii mai complexe, cum ar fi utilizarea unor noduri desfășurate static și existența unor noduri cheie pentru extragerea informației din fiecare zonă, caz în care primul model propus este utilizat pentru modelarea nodurilor statice iar al doilea model pentru nodurile speciale.

2.2. Noduri asociate static unor zone

În mod uzual, în cazul rețelelor de senzori cu noduri alocate static, din punct de vedere al aplicației este utilă informația care se referă la o anumită zonă (arie de interes), și este mai puțin important nodul sursă prin care s-a obținut acea informație. Astfel, suprafața care trebuie monitorizată prin intermediul rețelei este împărțită în zone critice, relevante pentru scopul aplicației, zone care vor fi acoperite omogen cu senzori, conform cu structura detaliată în fig.2.1. Putem defini durata de funcționare a acestei rețele WSN ca fiind intervalul de timp în care datele pot fi colectate dintr-un număr predefinit de *arii de interes*. Dacă considerăm că aplicația monitorizează o zonă k și datele pot fi colectate de la un nod i din această zonă doar când energia disponibilă în acest nod W_i^k este mai mare decât un prag dat, atunci această ipoteză poate fi formalizată astfel:

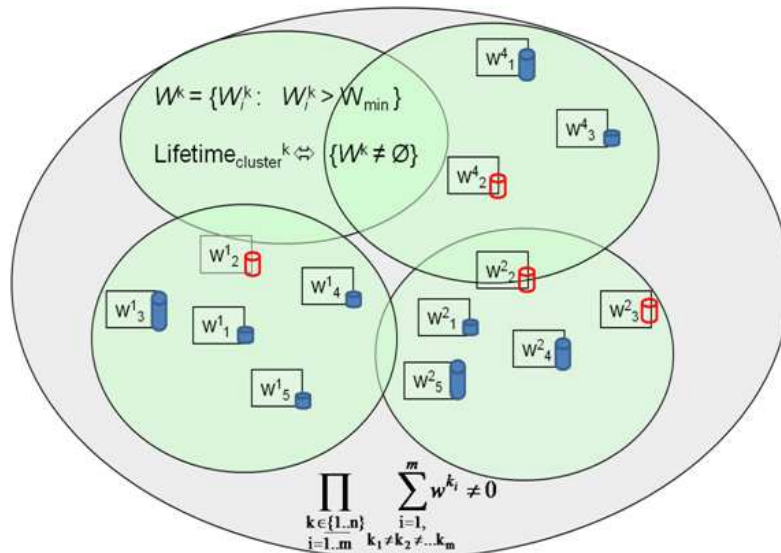


Fig.2.1. Rețea WSN cu noduri alocate static
Rețeaua colectează date din zone critice, nodurile având asociate elemente de tip baterie, care sugerează sarcina disponibilă.

$$W^k = \{W_i^k : W_i^k > W_{\min}\} \quad (2.1)$$

unde i identifică fiecare nod din aria de interes k , W^k reprezintă o mulțime cu valorile energiei disponibile pe fiecare nod în aria de interes k , W_i^k este energia disponibilă în nodul i din zona k , iar W_{\min} indică pragul minim de energie necesar unui nod pentru a putea trimite datele colectate.

Mulțimea de elemente obținută prin relația (2.1) este un element cheie în strategiile folosite pentru balansarea consumului de energie între nodurile desfășurate în zona k .

O zonă poate fi considerată ca ieșită din spectrul zonelor monitorizate în momentul în care nu se mai colectează date aferente acestora (nu mai sunt noduri cu un disponibil de energie peste pragul minim): $W^k = \emptyset$.

Dacă definim:

$$w^k = |W^k| \quad (2.2)$$

unde prin $|W^k|$ se identifică cardinalitatea mulțimii W^k , atunci relația (2.2) poate fi folosită pentru calcularea duratei de funcționare a rețelei, aceasta fiind direct proporțională cu w^k .

Astfel, putem spune că rețeaua este operațională cât timp:

$$\prod_{\substack{k \in \{1..n\} \\ i=1..m}} \sum_{\substack{i=1..m \\ k_1 \neq k_2 \neq \dots \neq k_m}}^m w^{k_i} \neq 0 \quad (2.3)$$

unde m este numărul minim de arii critice care trebuie să fie operaționale, n este numărul total de zone, w^{k_i} reprezintă cardinalitatea mulțimii de valori ale energiei disponibile în nodurile plasate în zona k_i .

Pentru balansarea consumului de energie la nivelul rețelei, se pot utiliza relațiile (2.1) și (2.2), extrapolând pentru toate ariile de interes.

2.3. Senzori WSN în mișcare

În situația în care nodurile unei rețele de senzori fără fir se află în mișcare, nefiind alocate unei zone specifice, scopul rețelei nu este orientat către acoperirea unor zone ci, în general, spre colectarea de date, cât mai precise de la senzori. Astfel, durata de funcționare a unei astfel de rețele o putem defini ca operarea cu un număr de noduri mai mic decât o valoare minimă pentru un interval de timp nu mai mare decât un prag maxim. Nodurile acestei rețele se află în mișcare și pot intra sau ieși din zona din care datele pot fi transmise către un centru de colectare, acest mod de organizare fiind prezentat în fig.2.2.

Deși nodurile pot avea suficientă energie disponibilă pentru a comunica cu alte elemente ale rețelei WSN, sunt intervale de timp în care această comunicare nu se poate realiza din cauza unor obstacole sau chiar a distanței mari până la posibili parteneri (noduri sau centre de colectare). Pentru a distinge nodurile care pot comunica față de cele aflate temporar în afara acoperirii rețelei, acestea se vor identifica cu denumirea de *noduri operaționale*, respectiv celelalte se vor denumi *noduri potențiale*.

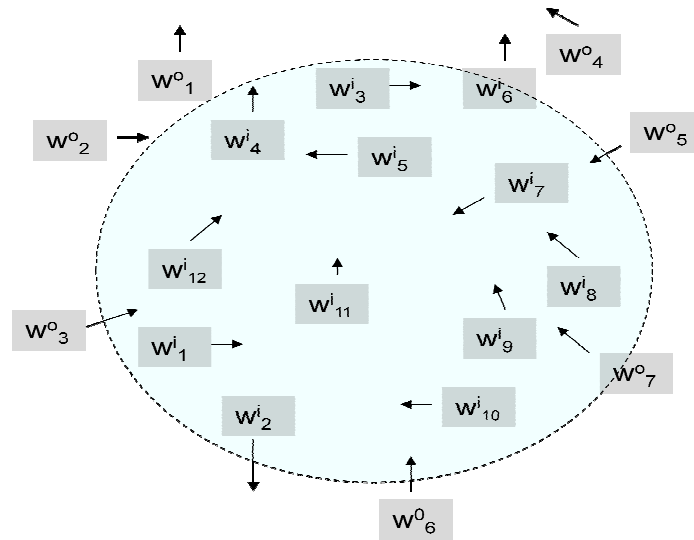


Fig.2.2. Rețea WSN cu noduri în mișcare
Nodurile rețelei pot intra sau ieși din zona în care datele pot fi colectate, săgețile indicând direcția de deplasare

Dacă se consideră că nu identificarea sursei unei informații este scopul aplicației ci obținerea unei rezoluții cât mai bune pentru datele colectate, rezoluție exprimată ca numărul de noduri operaționale într-un interval de timp dat, atunci putem defini un *prag de comunicare* ca intervalul de timp scurs de la trecerea unui nod din condiția de nod operațional în cea de nod potențial și numărul de noduri operaționale scade sub un minim predefinit, până în momentul în care suficiente noduri potențiale revin în starea de noduri operaționale pentru ca numărul acestora să depășească acel minim. Încercând o analogie cu nodurile alocate anterior în configurație statică, putem considera rețeaua WSN ca fiind acoperită de o singură arie de interes:

$$W^1 = \{W_i^1 : W_i^1 > W_{\min}\} \quad (2.4)$$

unde i are o valoare variabilă și indică toate nodurile operaționale la un moment de timp dat.

În acest context, rețeaua este operațională dacă:

$$0 \leq \begin{cases} |W^1| - m, & \text{pentru } |W^1| - m > 0 \\ (|W^1| - m) \cdot (t - t_{\max}), & \text{pentru } |W^1| - m \leq 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

unde: W^1 este o mulțime care cuprinde valorile sarcinii disponibile în nodurile operaționale, m este numărul minim de noduri operaționale necesar ca rețeaua să fie considerată funcțională, t reprezintă timpul scurs de când rețeaua funcționează cu un număr mai mic decât minimul necesar de noduri operaționale, t_{\max} este timpul de operare maxim admis cu mai puține noduri operaționale decât pragul minim.

2.4. Durata de funcționare a unui nod

Considerând relațiile (2.1) și (2.4), elementul principal este W_i^k , astfel, pentru a putea aplica strategii de prelungire a duratei de funcționare a rețelelor WSN este necesară cunoașterea sarcinii disponibile la nivelul fiecărui nod al rețelei. Când sarcina disponibilă în bateria unui senzor WSN scade sub un prag minim, sub care funcționarea acestuia nu mai corespunde parametrilor ceruți de aplicație, nodul este considerat ieșit din uz iar prin aceasta, sarcina disponibilă se dovedește a fi principalul element care implică informații despre durata de funcționare a nodurilor.

Cu puține excepții, soluția folosită în determinarea *cantității de sarcină disponibilă* în baterie (SOC) presupune și utilizarea informației despre consumul de energie. Acesta se poate determina prin monitorizarea operațiilor efectuate de un senzor WSN utilizând algoritmi capabili să identifice și să cumuleze impactul acestor operații asupra consumului sau prin utilizarea unor echipamente electronice de tip ampermetru cum este propus în [6]. Prima soluție este preferată când costurile implicate sunt mai importante decât precizia măsurătorilor, soluția cu echipamente hardware presupunând atât costuri mai mari cât și un consum de energie suplimentar.

În acest context, putem considera că operațiile principale efectuate la nivelul unui senzor WSN sunt asociate modulelor funcționale, impactul acestora asupra consumului fiind ilustrat printr-un model simplificat, prezentat în fig.2.3. Conform teoremei lui Kirchhoff, curentul electric consumat de modulele funcționale la un moment dat este:

$$I(t) = I_S(t) + I_P(t) + I_C(t) \quad (2.6)$$

Curentul electric fiind definit ca sarcină electrică în mișcare, la momentul respectiv avem următoarea relație pentru sarcina transferată:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_S}{dt} + \frac{dQ_P}{dt} + \frac{dQ_C}{dt} \quad (2.7)$$

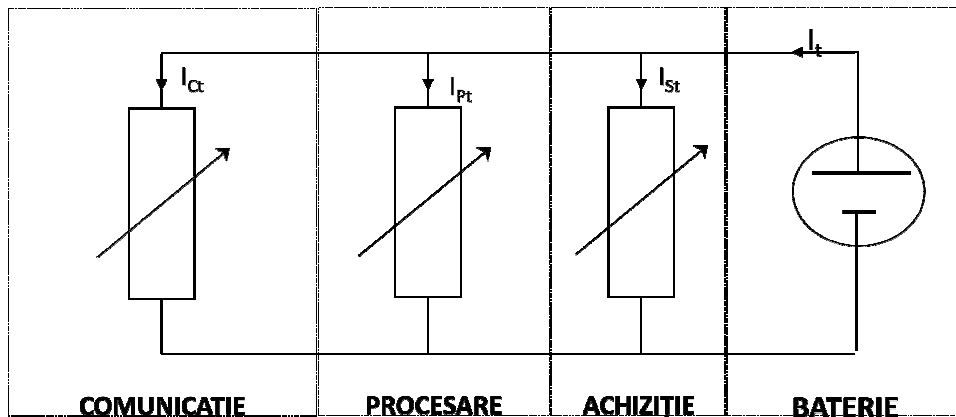


Fig.2.3. Consumul de curent într-un nod WSN.

Consumul total de curent este o sumă a impactului individual al celor trei operații (module): achiziție, procesare și comunicare.

Plecând de la relația (2.7) și ținând cont de faptul că diferența de potențial la bornele modulelor funcționale este o măsură a energiei pe care sarcina o disipă prin traversarea acestora, cantitatea de energie pe care sarcina extrasă din baterie o disipă pe fiecare din cele trei module este determinată prin relația:

$$W(t) = V(t) \cdot Q(t) = V(t) \cdot [Q_S(t) + Q_P(t) + Q_C(t)] \quad (2.8)$$

Fluxul total de sarcină, de la începutul utilizării unui nod până la momentul t este:

$$Q_t = \int_0^t Q d\tau \quad (2.9)$$

Dacă considerăm Q_B ca fiind corecția *SOC* inițială cu unii factori specifici bateriei ca pierderea de sarcină datorată unor consumatori foarte mari, autodescărcarea sau refacerea sarcinii prin reîncărcare, atunci putem obține *SOC* la momentul t de când rețeaua este operațională prin:

$$\begin{aligned} Q_t &= \left(1 - \frac{Q_t}{Q_B}\right) \cdot 100 \\ &= \left[1 - \frac{1}{Q_B} \int_0^t (Q_S + Q_P + Q_C) d\tau\right] \cdot 100 \end{aligned} \quad (2.10)$$

Fiind interesați în energia disponibilă într-un nod W_i a cărei valoare trebuie să fie mai mare decât un minim, conform relațiilor (2.1) și (2.4), putem presupune că diferența de potențial la bornele bateriei va avea variații foarte mici, chiar și atunci când W_i se află în apropierea pragului definit. Astfel, W_i la momentul t în timp este dat de:

$$\begin{aligned} W_i(t) &= V(t) \cdot (Q_B - Q_t) \\ &= V(t) \cdot \left[Q_B - \int_0^t (Q_S + Q_P + Q_C) d\tau\right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

$V(t)$ și Q_B din relațiile anterioare sunt elemente specifice bateriei și sunt determinate de tipul și dimensiunile acesteia, de aici rezultând nevoia unui model matematic cuprinzător care să ofere date cât mai precise despre proprietățile bateriei utilizate.

2.5. Modulul de achiziție

Funcția de achiziție a datelor este realizată prin intermediul unui senzor specific fenomenului fizic despre care se dorește prelevarea de informație. Senzorul măsoară o cantitate fizică, această informație fiind disponibilă la ieșire sub forma unui semnal electric. Din punct de vedere al modului în care se măsoară cantitatea fizică avem *senzori pasivi*, care colectează date fără a interveni asupra mediului ambiant (de exemplu termistori, fototranzistori), și *senzori activi* care pot obține informația doar prin stimularea mediului respectiv (spre exemplificare, senzori care măsoară distanța prin trimiterea unui fascicul cu o anumită lungime de undă și prin detectarea semnalului reflectat). Caracteristica ambelor tipuri de senzori este influențată de modul în care senzorul este alimentat (de exemplu distanțe mai mari acoperite pentru tensiuni de alimentare mai mari), informația fiind corectă doar pentru valori ale tensiunii de alimentare cuprinse într-o anumită plajă.

Având în vedere faptul că există o varietate largă de date care pot fi achiziționate, sunt disponibile foarte multe tipuri de senzori, fiecare având propriul profil de consum, puterea consumată variind de la 4 mW în cazul achiziției de temperatură, până la 1250 mW în cazul debitmetrelor [11]. Alegerea tipului de senzori pentru nodurile unei rețele WSN se face în etapa de proiectare a rețelei, ca un compromis între puterea consumată și calitatea informației oferite prin prisma preciziei, domeniului de valori și, în special, a timpului de răspuns. Senzorii pot trimite informația sub forma unui semnal numeric, semnal analogic sau chiar prin intermediul unor linii seriale de comunicație.

Dacă informația este reprezentată sub forma unui semnal analogic, aceasta este preluată de către blocul de conversie analog-numerică din microcontroler. În funcție de aplicație, achiziția datelor se poate realiza în mod continuu cu o frecvență de eșantionare predefinită, se poate declanșa de către un eveniment extern sau se poate implementa ca o combinație a celor două metode. În general, modulele de achiziție sunt funcționale doar pentru intervale scurte de timp în vecinătatea timpului de achiziție, fiind folosite strategii de eșantionare pentru a menține aceste module în regim de lucru cu consum redus cât de mult este posibil, fără a fi afectată funcționarea aplicației în parametrii ceruți.

Datorită latenței de trezire, și tranzițiilor pornit-oprit care nu au o caracteristică ideală, aceste strategii de reducere a consumului sunt condiționate de valoarea unui prag de rentabilitate [12]: valoarea maximă a frecvenței de eșantionare până la care consumul de energie datorat tranzițiilor oprit-pornit este mai mic decât în cazul funcționării normale. Atât pragul de rentabilitate cât și latența de trezire depind de valoarea tensiunii de alimentare. La un nivel superior al aplicației, consumul de energie poate fi optimizat prin strategii de adaptare a ratei de eșantionare în funcție de corelații spațio-temporale complexe între datele măsurate și energia disponibilă în nodurile rețelei.

Pentru a corela aceste informații cu relația (2.11), putem reprezenta Q_S ca o funcție care depinde următorii parametrii:

$$Q_S = Q_S(t, V, P_S, \varphi, \vartheta, \kappa)$$

unde t reprezintă un moment în timp, V este tensiunea la bornele bateriei obținută în subcapitolele anterioare, P_S este un parametru care identifică consumul asociat activării convertorului analog-numeric, φ este rata de eșantionare, ϑ reprezintă latența de trezire și κ semnifică pragul de rentabilitate.

2.6. Modulul de procesare

Funcția de procesare și memorare este realizată prin intermediul unui microcontroler și opțional a unor memorii externe de tip *Flash* și/sau de tip *SRAM*. În literatura de specialitate, consumul de putere datorat unității de procesare este proporțional cu produsul dintre capacitatea internă, pătratul tensiunii de alimentare și frecvența de lucru a microcontrolerului. Astfel, cel mai mare impact asupra consumului de energie îl are tensiunea de alimentare iar reducerea acesteia se reflectă printr-o scădere exponențială a consumului de energie. Există totuși un prag minim până la care tensiunea de alimentare se poate reduce fără a afecta funcționarea microcontrolerului ($V_{cut-off}$), motiv pentru care s-au definit mai multe moduri de lucru cu consum redus, moduri în care doar anumite blocuri din microcontroler sunt active în funcție de context. De asemenea, se are în vedere și

oprirea alimentării unității de procesare dar acest lucru se poate face doar în condițiile în care costul din punct de vedere al energiei consumate în regimurile tranzitorii este mai mic decât costul de energie dat de funcționarea normală pe acel interval de timp. Nu trebuie neglijat consumul de energie datorat accesului la memoria de tip *Flash* atât în regim de citire cât și de scriere. Reducerea consumului de energie se mai poate face și prin modificarea frecvenței de lucru, aceasta având un efect colateral asupra timpului de procesare, motiv pentru care alegerea strategiei se face printr-un compromis, în funcție de context. Deoarece microcontrolerul care echipează un nod *WSN* funcționează în regim normal doar pe intervale scurte de timp, acesta trebuie să execute instrucțiuni *puternice* într-un singur ciclu mașină. Unele microcontrolere permit o balansare între puterea de calcul și consumul de energie prin modificarea dinamică a frecvenței de lucru din software. Pentru a avea o imagine de ansamblu asupra consumului datorat procesării informației pe un senzor *WSN*, în următorul aliniat s-au extras câteva date despre caracteristicile a două microcontrolere care echipează senzorii *MICA2* și *TELOS*.

ATmega128A [13] este microcontrolerul care echipează senzorii *MICA2* și necesită o tensiune minimă de 2.7 V pentru a funcționa, având o putere de calcul de 1 MIPS per MHz. Permite funcționarea în șase moduri cu consum redus, selectabile prin software, fiecare mod având anumite funcționalități disponibile. Microcontrolerul MSP430 [14] este folosit în senzorii *TELOS* și are cinci moduri de funcționare în consum redus și o tranziție din „stand-by” în modul normal în mai puțin de 6 μ s, o latență de trezire mai mică de 1 μ s și o tensiune de „cut-off” de 1.8 V. O comparație interesantă între diferite familii de senzori *WSN*, care evidențiază avansul tehnologic prin prisma reducerii consumului de energie în dispozitivele electronice, este realizată în lucrarea [15]. Astfel, puterea consumată de senzorii *MICA2* când microcontrolerul este în modul activ, este 33 mW în timp ce în cazul senzorului *TELOS* consumul indicat este 3 mW. În regim de consum redus („sleep”) la *MICA2* sunt aproximativ 75 μ W iar la *TELOS* doar 15 μ W. O diferență considerabilă este obținută pentru latența de trezire care a scăzut de la 180 μ s la mai puțin de 6 μ s în cazul senzorilor de tip *TELOS*.

Impactul asupra consumului de energie la nivelul nodului (2.11), datorat modulului de procesare, poate fi exprimat sub forma:

$$Q_P = Q_P(V, V_{cut_off}, \mu_{state}, F_{clk}, \vartheta, MEM_{rdwr})$$

unde V este tensiunea la bornele bateriei determinată prin măsurare sau cu ajutorul unui model matematic al bateriei, V_{cut_off} specifică tensiunea de decuplare, μ_{state} este un parametru care indică starea actuală a microcontrolerului, F_{clk} reprezintă frecvența de lucru, ϑ este latența de trezire și MEM_{rdwr} identifică tipul de acces la memoria Flash.

Există în prezent diverse tehnologii de implementare a modulului de procesare și stocare a informației în senzorii fără fir, de la sisteme integrate la diferite tipuri și arhitecturi de microcontrolere sau chiar combinații ale acestora cu module *FPGA* în cazul platformelor *Cookies* [16].

2.7. Modulul de comunicație

Senzorii comunică între ei sau cu punctele de acces prin medii de comunicație specifice aplicației. Dacă nu există obstacole între elementele unei rețele WSN, acestea pot folosi comunicații în spectrul optic sau infraroșu, în cazul aplicațiilor subacvatice fiind adecvate ultrasunetele, în rest soluția preferată prin prisma flexibilității este comunicarea prin unde radio, chiar dacă aceasta este cea mai costisitoare din punct de vedere al consumului de energie. Comunicarea este realizată prin intermediul unui circuit de tip transceiver care poate fi independent sau chiar integrat împreună cu modulul de procesare pe același suport - SoC (*ATmega128 RFAx* [17] în cazul *WiSMote mini* [18] sau *MC13224V* [19] pentru nodurile *Redbee* [20]).

Influența modulului de comunicație asupra consumului de energie este semnificativă, ponderea consumului datorat comunicării variind în funcție de suportul hardware utilizat în nodurile WSN. În cazul nodurilor *Tmote*, consumul la oprirea transceiver-ului scade cu aproximativ 91 %, în cazul nodurilor *Mica2* cu aproximativ 70 %, iar pentru senzorii *Imote2*, senzori care au o putere de procesare foarte mare, consumul datorat modulului de comunicație are o pondere cuprinsă între 30 și 52 % [21]. Astfel, cercetarea actuală în domeniul rețelelor WSN este centrată pe optimizarea energiei consumate de circuitele de comunicație prin dezvoltarea și implementarea de protocoale eficiente energetic, existând două tipuri de analize relativ la nivelele stivei de protocoale: managementul energiei realizat transversal pentru toate nivelele stivei, exemplificat în [22], sau dezvoltarea de protocoale eficiente energetic pentru fiecare nivel, un exemplu fiind tratarea accesului la mediu realizată în [23].

Componenta principală a unui modul de comunicație este circuitul de emisie-recepție, care pentru emisie primește mesaje de la unitatea de procesare, le modulează și le trimite prin intermediul undelor electromagnetice folosind o antenă în acest scop, sau pentru recepție demodulează semnalele care au fost primite prin antenă și trimite informația respectivă către unitatea de procesare. În condiții ideale, un raport între puterea semnalului primit și puterea utilizată pentru transmiterea aceluși semnal este dat de ecuația lui Friis în care un rol predominant îl au distanța între partenerii de comunicație și tensiunea de alimentare a circuitului:

$$P_{rec}(d) = \frac{P_{tran} \cdot G_{tran} \cdot G_{rec} \cdot \lambda^2}{(4\pi d)^2 \cdot L} \quad (2.12)$$

unde P_{rec} este puterea semnalului primit de o antenă aflată la o distanță d de emițător; P_{tran} este puterea antenei de pe dispozitivul de transmisie; G_{tran} și G_{rec} sunt câștigurile de transmisie respectiv recepție ale antenelor; λ este lungimea de undă a semnalului; L este supraunitar și adimensional reprezentând ponderea consumului de energie pe alte circuite electrice din modulul de comunicație. Analizând expresia (2.12), se observă că distanța și lungimea de undă a semnalului au un impact mai mare asupra consumului de energie. În condiții reale, impactul distanței va crește până la d^4 , în timp ce impactul lungimii de undă se reflectă în dimensiunea antenei. Puterea la antena de transmisie poate fi reglată prin variații ale tensiunii în timp ce consumul de energie datorat recepției semnalelor este controlat prin administrarea stărilor circuitului de emisie-recepție și a frecvenței oscilatorului.

Pentru a ilustra modul în care aceste elemente sunt disponibile la nivelul aplicației cu senzori *WSN* se iau în considerare caracteristicile circuitului de emisie-recepție *CC1000* [24], prezent pe nodurile din familia *MICA2*. Sensibilitatea receptorului precum și puterea la ieșire pot fi programate în timp ce tensiunea de alimentare nu trebuie să scadă sub o valoare specificată pentru ca dispozitivul să fie funcțional. În funcție de nevoile aplicației, transceiver-ul *CC1000* poate fi comutat într-un mod cu consum redus, oferind și posibilitatea de a configura frecvențele purtătoare ale semnalelor. Timpul necesar pentru „trezirea” dintr-o stare cu consum redus este mai mare de 2 ms, cu valori diferite în funcție de tipul tranziției: din consum redus la modul *Rx* sau din modul consum redus în modul *Tx*. Consumul de energie datorat tranzițiilor din/în moduri cu consum redus trebuie luat în considerare atunci când acestea apar des. Datorită acestor costuri de tranziție, aplicațiile bazate pe transceivere cu mai multe profiluri de putere necesită definirea unui prag de rentabilitate pentru trecerea într-o stare cu consum redus, concept care presupune folosirea metodei doar dacă per ansamblu este rentabilă.

În cazul nodurilor intermediare din topologiile definite anterior, timpul de funcționare în consum redus va fi invers proporțional cu numărul de noduri cu care comunică și va fi semnificativ mai mic decât durata de funcționare în consum redus a nodurilor de pe primul nivel, care comunică doar propriile date colectate. În cazul topologiilor în care toate nodurile comunică direct cu punctele de acces, energia consumată pentru comunicație va crește cu un exponent al distanței dintre senzori și punctele de colectare. Dacă avem o topologie bazată pe comunicație prin mai multe noduri intermediare între senzori și punctele de acces, consumul de energie datorat unui mesaj va crește cu numărul de noduri intermediare prin care va trece (*HopsNo*).

Pentru majoritatea aplicațiilor cu senzori *WSN*, circuitul „transceiver” este cel mai mare consumator de energie. Consumul datorat circuitului utilizat pentru transmisia și recepția mesajelor în familiile de senzori *MICA2* și *TELOS* referite anterior este 29 respectiv 38 mW la recepție și 42 respectiv 35 mW pentru transmisie la 0 dBm [15].

Se poate concluziona că ponderea circuitului „transceiver” în consumul de energie la nivel de nod este dată de un cumul de factori cu impact direct (proprietățile fizice ale circuitului) și factori indirecti care țin de topologia și strategiile definite la nivelul rețelei. Factorii indirecti sunt utilizați la nivelul aplicației pentru a controla proprietățile „transceiver-ului” care nu pot fi configurate prin software, în vederea reducerii consumului, astfel încât este utilă reprezentarea consumului la nivel de nod, doar ca o funcție de factori direcți iar la nivelul rețelei determinarea influenței factorilor indirecti asupra „transceiver-ului”:

$$Q_{trcv} = Q_{trcv}(V_{min}, Mod_{trcv}, P_{Tx}, P_{Rx}, F_{clk}, V_{out})$$

$$Q_C = Q_C(Q_{trcv}, Nr_{Hops}, Func_{Nod}, Nr_{parteneri}, Densitate_{noduri}, d)$$

2.8. Concluzii

Durata de funcționare a nodurilor *WSN* și implicit a rețelei pe care acestea o formează este unul din elementele care influențează semnificativ proiectarea unei rețele cu senzori fără fir. De asemenea, în timpul utilizării rețelei se poate folosi ca metrică timpul estimat până când rețeaua mai poate fi operată în condițiile actuale, această metrică fiind utilă în selectarea strategiilor pentru reducerea consumului de energie. Într-o lucrare care analizează caracteristicile descărcării bateriilor în

nodurile WSN [3], C. Park și coautorii apreciază că performanța unei rețele WSN poate fi prelungită cu până la 52 % prin luarea deciziilor de reducere a consumului ținând cont de sarcina electrică disponibilă în baterie (SOC) și de consumul actual de curent.

Considerând expresiile (2.3) și (2.5) se poate descrie durata de funcționare a rețelei WSN în funcție de o mulțime de valori ale energiei disponibile: (2.1) respectiv (2.4). Astfel, putem spune că elementul cheie în estimarea duratei de funcționare a rețelei este energia disponibilă în fiecare nod. Această energie poate fi obținută plecând de la valoarea inițială a acesteia, dată de capacitatea nominală a bateriei, și monitorizarea consumului de energie, conform relației (2.13).

$$W_i(t) = V(t) \cdot \left\{ Q_B - \int_0^t \left[Q_S(t, V, P_S, \varphi, \vartheta, \kappa) + Q_P(V, V_{cut_off}, \mu_{state}, F_{clk}, \vartheta, MEM_{rdwr}) + Q_C(Q_{trcv}, Nr_{Hops}, Func_{Nod}, Nr_{parteneri}, Densitate_{noduri}, d) \right] d\tau \right\} \quad (2.13)$$

În prezent sunt folosite două metode adecvate pentru măsurarea consumului de energie în rețelele de senzori. Prima folosește dispozitive electronice pentru măsurarea curentului electric având însă un inconvenient legat de convertoarele analog numerice și uneori, de existența unui regulator pentru tensiunea de referință, care presupun un consum de energie suplimentar. A doua metodă, utilizată în general în simulatoare, clasifică funcționarea nodurilor în mai multe stări de operare independente și atribuie un cost de energie pentru fiecare dintre ele prin măsurători efectuate aprioric în laborator, această metodă fiind mai puțin precisă dar implicând costuri mai mici și un consum suplimentar de energie nesemnificativ comparativ cu prima soluție. Pentru o estimare corectă a valorii SOC este important modelul de baterie folosit, cele mai exacte dar și cele mai nepotrivite prin prisma efortului de calcul necesar fiind modele electrochimice și cele derivate din acestea.

O sinteză a elementelor care intervin în consumul la nivel de nod, analizate în acest capitol este realizată prin intermediul diagramei cauze-efect din fig.2.4, în tabelul 2.1 fiind cuprinse date comparative despre consumul asociat modulelor funcționale pentru două familii de noduri WSN, TELOS și MICA2.

Tip Senzor	Comunicare [mW]	Procesare [mW]	Achiziție [mW]
MICA2	29 / 42 [0dBm]	0,075 .. 33	0,4 .. 1250
TELOS	38 / 35 [0dBm]	0,015 .. 3	0,4 .. 1250

Tabelul.2.1. Puterea consumată de nodurile MICA2 și TELOS, pe funcționalități.

Pentru comunicație valorile sunt date atât pentru recepție cât și pentru transmisie.

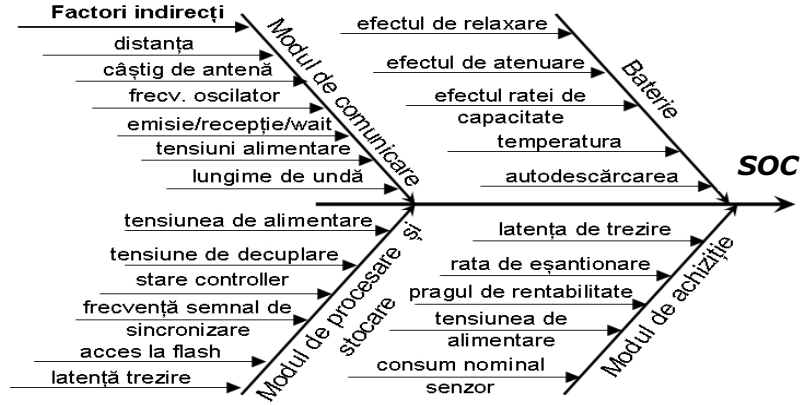


Fig.2.4. Diagrama cauze efect pentru determinarea SOC. Sunt enumerați factorii principali, corespunzători fiecărui modul funcțional, care determină consumul de energie într-un nod WSN.

3. RESURSE DISPONIBILE ÎN NODURILE WSN

În acest capitol sunt descrise resursele de procesare și stocare utilizate pe platformele de senzori *WSN* reprezentative. De asemenea, se face o scurtă prezentare a surselor de energie utilizate pentru alimentarea acestor noduri.

3.1 Noduri WSN

Platformele discutate în acest capitol au fost selectate astfel încât să permită o analiză unitară pentru arhitecturi Harvard și von Neumann, arhitecturi cu seturi de instrucțiuni *RISC* sau *CISC*, precum și arhitecturi pe 8, 16 sau 32 biți.

În tabelul 3.1 este exemplificată diversitatea elementelor de procesare utilizate în nodurile *WSN* prin descrierea arhitecturii acestora și specificarea tipului de interfață radio. Se observă utilizarea preponderentă a unor microcontrolere care aparțin aceleiași familii, variațiile în cadrul unei familii fiind determinate, în general, de capacitatea elementelor de memorie, de frecvența semnalului de sincronizare și uneori chiar de puterea de procesare (*MIPS/MHz*).

Interfețele radio sunt, în general, specifice standardelor *IEEE 802.15* definite pentru rețelele personale fără fir (*WPANs*), fiind orientate pe comunicare omnidirecțională utilizând circuite cu dimensiuni, consum de energie și prețuri reduse.

Standardul *WPAN IEEE 802.15.1 (Bluetooth)* este conceput pentru rate de transfer medii și permite transmiterea semnalului vocal în timp ce *WPAN IEEE 802.15.4 (ZigBee)* este orientat pe un consum de energie redus, ratele de transfer fiind mici.

O clasificare a modulelor de procesare exemplificate, din punct de vedere al puterii de calcul, este realizată în fig.3.1, performanța acestora fiind calculată luându-se în considerare frecvența tipică la care aceste module sunt utilizate în nodurile *WSN* și puterea de calcul exprimată în *MIPS/MHz* conform specificațiilor tehnice.

Se observă impactul semnificativ al frecvenței semnalului de sincronizare asupra performanței microcontrolerelor, valorile mari ale acestuia având însă un impact negativ asupra consumului de energie la nivelul *CPU*, puterea consumată fiind direct proporțională cu această frecvență:

$$P \approx C \cdot V^2 \cdot f$$

Deși, conform valorilor din fig.3.1, superioritatea arhitecturilor pe 32 de biți este evidentă, totuși, din punct de vedere al compromisului între preț, consum de energie și putere de calcul este justificată utilizarea arhitecturilor pe 8 și 16 biți.

Nod WSN	Microcontroler	Arhitectura	radio
Iris mote	ATmega 1281	8 biți, Harvard, RISC	802.15.4
Wasp mote	ATmega 1281	8 biți, Harvard, RISC	802.15.4
BTnode	ATmega 128L	8 biți, Harvard, RISC	802.15.1 802.15.4
MicaZ	ATmega 128L	8 biți, Harvard, RISC	802.15.4
WisMoteMini	ATmega128 RFax	8 biți, Harvard, RISC, SoC	802.15.4
GWnode	PIC18LF8722	8 biți, Harvard, RISC	173 MHz
Rene	ATmega8535	8 biți, Harvard, RISC	916 MHz
AVR raven	ATmega1284p	8 biți, Harvard, RISC	802.15.4
Mulle	M16C 62P	16 biți, vonNeumann, CISC	802.15.1 802.15.4
EPIC mote	MSP430	16 biți, vonNeumann, RISC	802.15.4
Kmote	MSP430	16 biți, vonNeumann, RISC	802.15.4
TelosB	MSP430	16 biți, vonNeumann, RISC	802.15.4
EyesIFXv2	MSP430F16x	16 biți, vonNeumann, RISC	868 MHz
shimmer	MSP430F1611	16 biți, vonNeumann, RISC	802.15.4
BEAN	MSP430F169	16 biți, vonNeumann, RISC	300-1000MHz
WisMote	MSP430F5437	16 biți, vonNeumann, RISC	802.15.4
Redbee	MC13224V	32 biți, arm7(Harvard), RISC, SoC	802.15.4
Egs	ARM Cortex M3	32 biți, arm7(Harvard), RISC	802.15.1
Lotus	ARM Cortex M3	32 biți, arm7(Harvard), RISC	802.15.4
IMote 2.0	Marvell PXA271	32 biți, arm5(Harvard), RISC	802.15.4

Tabelul 3.1. Caracteristici ale diferitelor tipuri de senzori WSN.

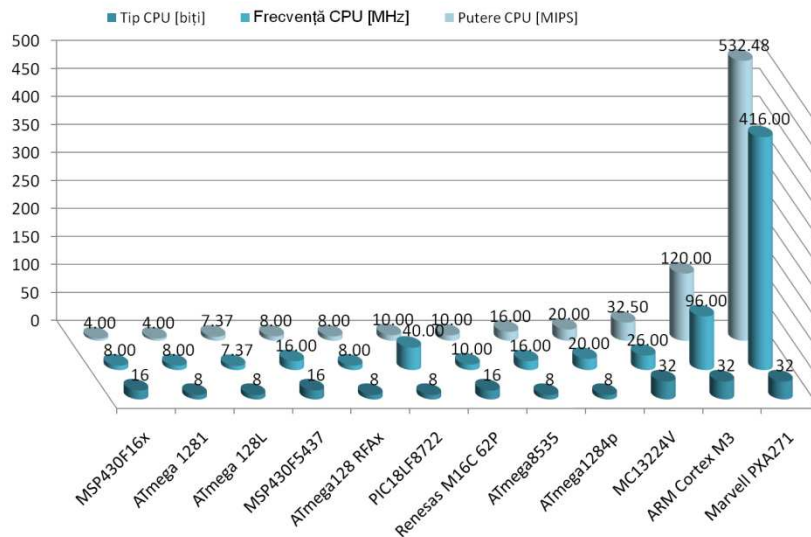


Fig.3.1. Proprietăți ale elementelor de procesare din nodurile WSN.

Capacitatea internă de stocare a informației în microcontrolerile utilizate de nodurile WSN anterioare este sintetizată în fig.3.2, fiind considerate doar memoria RAM internă și memoria program (*Flash* intern). Din acest punct de vedere, arhitecturile sunt comparabile, excepțiile fiind platformele *Xscale (PXA271)* [25] și *MC13224V* [19].

În cazul microcontrolerului *PXA271*, capacitatea memoriei este reprezentată pe o altă scară de mărime, acest microcontroler fiind destinat unor aplicații mult mai complexe în care accentul este pus pe prelucrarea unor fluxuri mari de informație, aplicații în care eficiența energetică este, în general, un obiectiv secundar.

Sistemul integrat *MC13224V* dezvoltat de *Freescale*, deși pare să conțină un spațiu de stocare rezonabil, are unele particularități legate de dimensiunea memoriei RAM interne și de tipul de memorie *Flash*. Fiind prevăzut cu o memorie *Flash* serială, codul stocat aici nu poate fi executat direct din această memorie ci, pentru a putea fi executat, trebuie copiat în memoria RAM în etapa de inițializare. Prin faptul că dimensiunea memoriei RAM este mai mică decât dimensiunea memoriei *Flash*, apar probleme de alocare în situația unor aplicații care necesită o memorie program de dimensiuni considerabile. Acest neajuns este parțial suplinit prin prezența unei alte memorii interne de tip *ROM*, capabilă să stocheze cod direct executabil, memorie care este concepută pentru a conține stiva protocoalelor de comunicație (*ZigBee*).

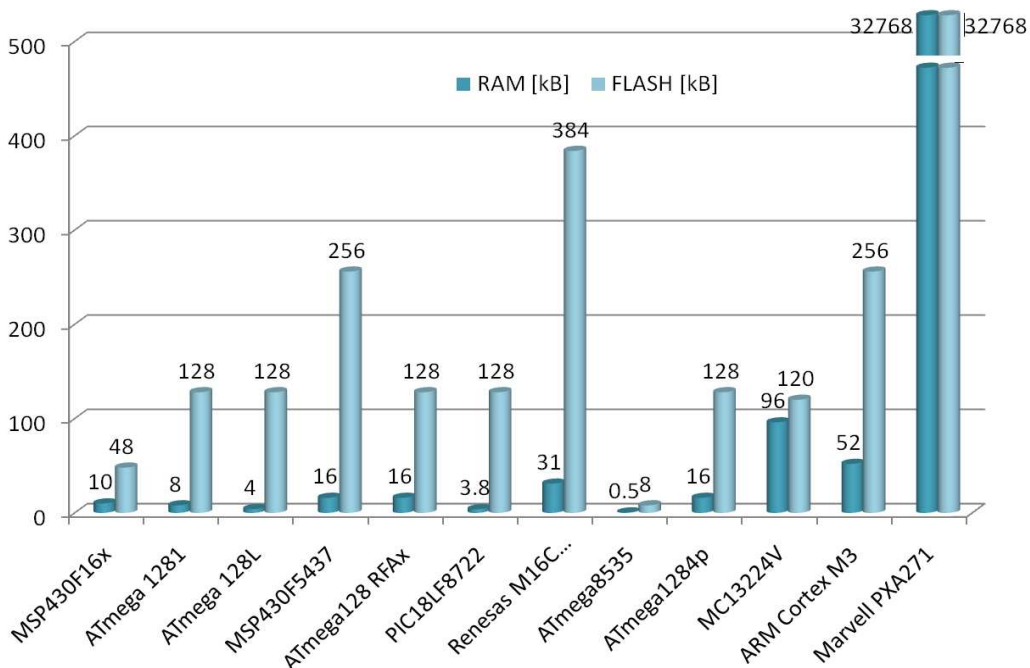


Fig.3.2. Capacitatea de stocare a nodurilor WSN.
A fost luată în considerare doar memoria internă (RAM și Flash)

3.2 Operanzi și operații aritmetice

Pentru a analiza oportunitatea implementării unui anumit model al bateriei în monitorizarea capacității bateriilor din nodurile WSN, este necesară cunoașterea resurselor (cod și date) utilizate de operațiile prin care este implementat modelul matematic respectiv. Astfel, în paragrafele următoare este determinat necesarul de resurse pentru efectuarea operațiilor de comparare, adunare, înmulțire, împărțire și ridicare la putere utilizând operanzi întregi reprezentați pe 8, 16, 32 și 64 biți sau operanzi reprezentați în virgulă mobilă cu simplă precizie, fiind luate ca referință patru familii de senzori WSN.

3.2.1 Metodologie

Pentru implementare s-a utilizat sistemul de operare *TinyOS*, codul fiind generat folosind compilatorul *GNU C (gcc)* cu opțiunile de optimizare implicite. Codul utilizat pentru determinarea resurselor necesare pe cele patru platforme descrise în tabelul 3.1 este structurat în două fișiere, fiind rezumat prin expresia „*a = b operator c*” în cazul identificării dimensiunii resurselor necesare pentru funcțiile din biblioteca compilatorului și memorării rezultatelor. Determinarea resurselor relative, introduse de noi operații similare s-a realizat prin compararea codului generat pentru expresiile anterioare cu implementarea expresiilor „*a = b operator c*” și „*a₂ = b₂ operator c₂*”. Pentru ridicarea la putere s-a utilizat funcția „*pow*” în cazul familiei *Atmega12xx* și funcția „*powf*” în cazul celorlalte familii. Rezultatele au fost obținute prin compilarea codului descris mai jos relativ la toate combinațiile *operație-operanzi*, pentru cele 16 noduri WSN din tabelul 3.2, datele relative obținute în cazul nodurilor din aceeași familie WSN fiind identice.

Codul sursă este structurat în trei componente, operațiile realizându-se în urma etapei de inițializare, în punctul de obținere a controlului la nivelul aplicației:

- SimpleAppC.nc:

```

1: configuration SimpleAppC{
2:
3: }
4:
5: implementation{
6:   components SimpleC, MainC;
7:   SimpleC.Boot -> MainC.Boot;
8: }
```

- SimpleC.nc:

```

1: #include <math.h>
2: #include <configs.h>
3:
4: module SimpleC
5:   {uses interface Boot;}
6: implementation{
7:   #ifndef REF_SW
8:     DATA_T a,b,c;
9: #endif
10:  #ifdef CMP_SW
11:     DATA_T a2,b2,c2;
12: #endif
13:
14:   event void Boot.booted()
15:   {
16:     //entry point
17:     # ifnndef REF_SW
18:       c=OP(a,b);
```

```

19: # endif
20: # ifdef CMP_SW
21:     c2=OP(a2,b2);
22: # endif
23: }
24: }

• configs.h:
1: #ifndef CONFIGS_H
2: # define CONFIGS_H
4: # ifdef T_U8
5: # define DATA_T uint8_t
6: # elif T_U16
7: # define DATA_T uint16_t
8: # elif T_u32
9: # define DATA_T uint32_t
10: # elif T_64
11: # define DATA_T uint64_t
12: # else
13: # define DATA_T float
14: # endif
16: # ifdef OP_ADD
17: # define OP(a,b) a+b
18: # elif OP_MUL
19: # define OP(a,b) a*b
20: # elif OP_DIV
21: # define OP(a,b) a/b
22: # else
23: # ifndef _atmega128hardware
24: #define OP(a,b) powf(a,b);
25: # else
26: #define OP(a,b) pow(a,b);
27: # endif
28: #endif
29: #endif //CONFIGS_H

```

Atmega12xx	MSP430xx	PIC18LF8722	Renesas M16C62P	Marvell PXA271
mica2	epic	Gwnode	mulle	imote2
	eyesIFX			
mica2dot	eyesIFXv1			
	eyesIFXv2			
	shimmer			
micaZ	shimmer2			
	telos			
	telosa			
Iris	telosb			
	tmote			

Tabelul 3.2. Familii de noduri WSN.

3.2.2 Platforma Atmega12xx

Microcontrolerile din familia Atmega12xx au o arhitectură pe 8 biți fiind caracterizate printr-un set redus de instrucțiuni mașină care nu oferă suport direct pentru operații de împărțire sau pentru operanzi în virgulă mobilă. Acest aspect se reflectă printr-un necesar suplimentar de memorie *RAM* respectiv *ROM*. Se remarcă în fig.3.3 procentul de aproximativ 3 % din totalul memoriei program ocupat de rutinele care implementează operația de împărțire pe 64 de biți, precum și procentul de aproximativ 1,5 – 2,3 % din resurse necesar pentru implementarea operației de ridicare la putere. Necesarul asociat fiecărei operații este detaliat în fig.3.4.

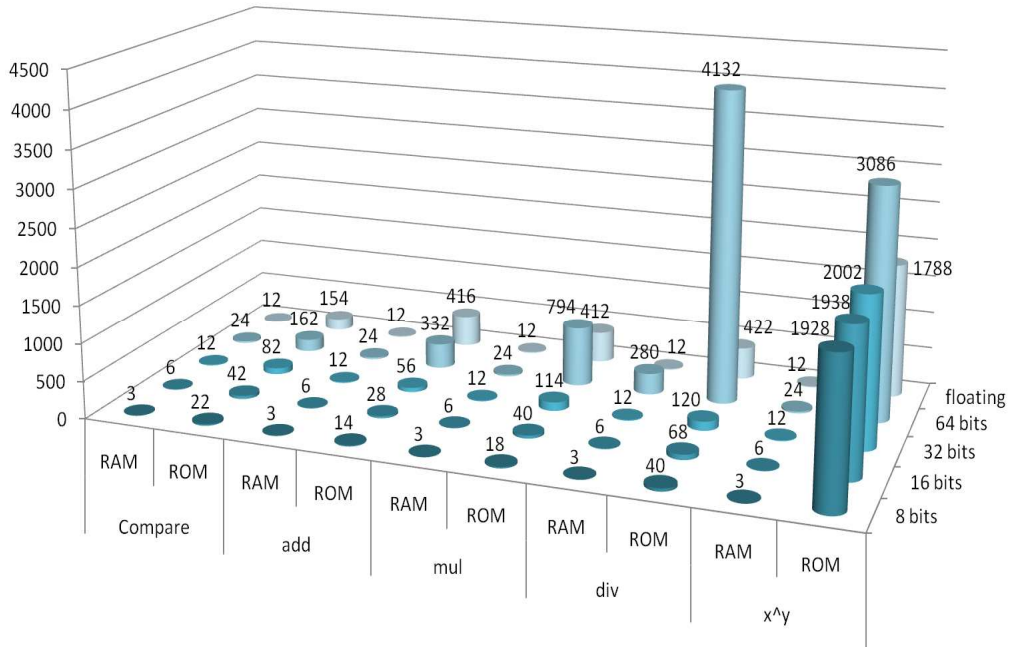


Fig.3.3. Atmega12xx. Necesarul de memorie, în octeți, pentru diferite operații și dimensiuni ale operanzilor în nodurile WSN bazate pe această familie de microcontrolere.

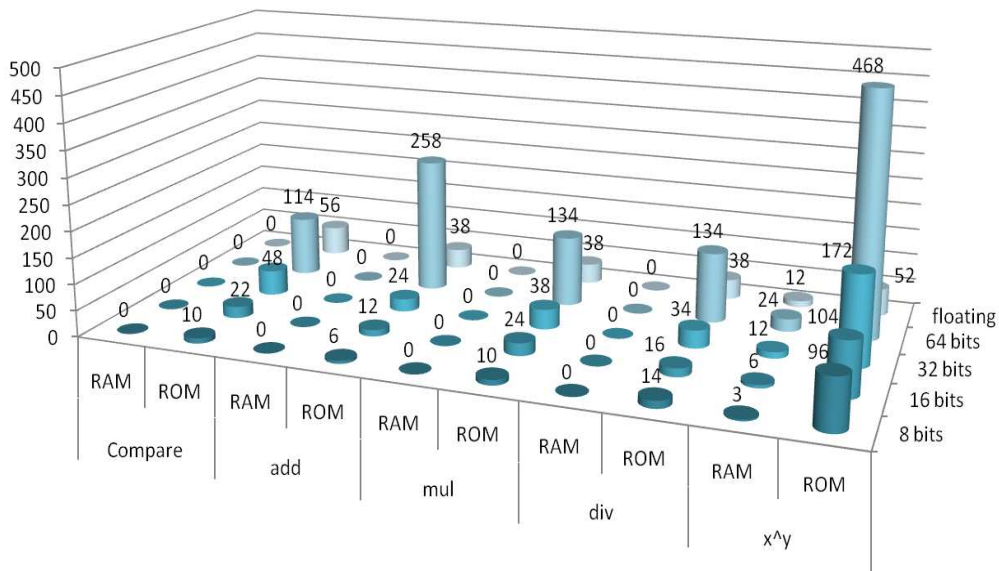


Fig.3.4. Atmega12xx. Necesarul de memorie pentru fiecare combinație *operație-operanzi* suplimentară, implementată pe nodurile WSN care folosesc microcontrolere din această familie.

Dimensiunea codului generat, conform reprezentării din fig.3.3, oferă în mod indirect și informații despre timpul de execuție, observându-se că operațiile care utilizează operanzi în virgulă mobilă sau operanzi întregi pe 64 de biți necesită un spațiu de memorie pentru stocarea codului de la 10 până la mai mult de 100 de ori mai mare decât necesarul de memorie al celorlalte combinații *operanzi-operatori*. Se ajunge astfel la concluzia că funcția implicită de ridicare la putere și utilizarea operanzilor pe 64 biți trebuie evitate pe senzorii echipați cu microcontrolere din familia *Atmega12xx*.

3.2.3 Platforma PIC18LF8722

Această platformă are multe similarități cu *Atmega12xx* din punct de vedere al resurselor disponibile, spațiu de stocare *RAM* și *ROM* comparabil, operație de înmulțire disponibilă la nivelul setului de instrucțiuni și lipsa unor instrucțiuni de împărțire, astfel încât diferențele ce pot apărea la nivelul codului generat sunt în general datorate compilatoarelor utilizate.

3.2.4 Platforma MSP430xx

Platforma MSP430xx este bazată pe o arhitectură de 16 biți cu set redus de instrucțiuni, iar spre deosebire de microcontrolerele din familia *Atmega12xx* aici nu sunt disponibile nici instrucțiuni de înmulțire. Spațiul de stocare necesar implementării operațiilor enunțate este descris prin fig.3.5 și fig.3.6.

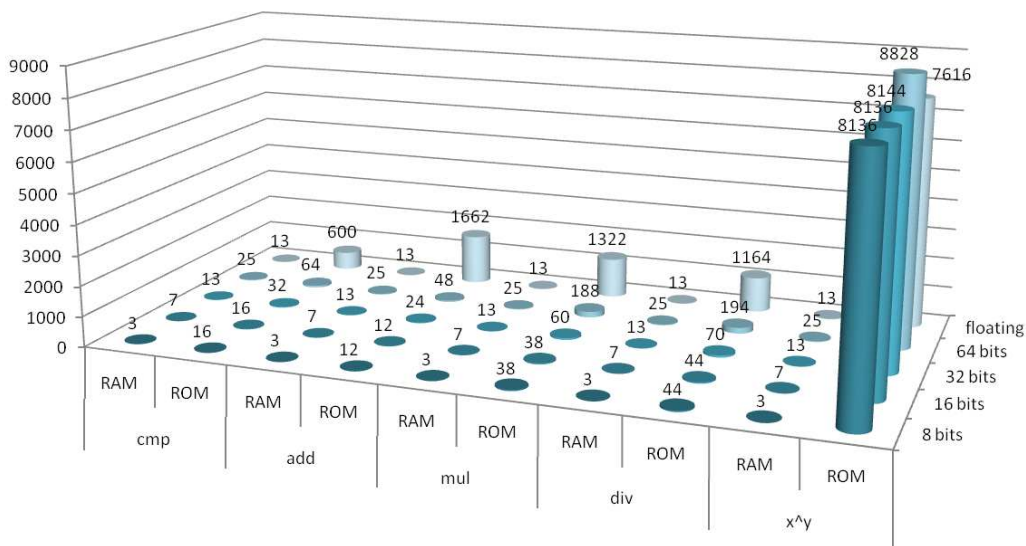


Fig.3.5. MSP430xx. Necesarul de memorie, în octeți, pentru implementarea diferitelor operații și dimensiuni ale operanzilor în nodurile *WSN* bazate pe aceste microcontrolere.

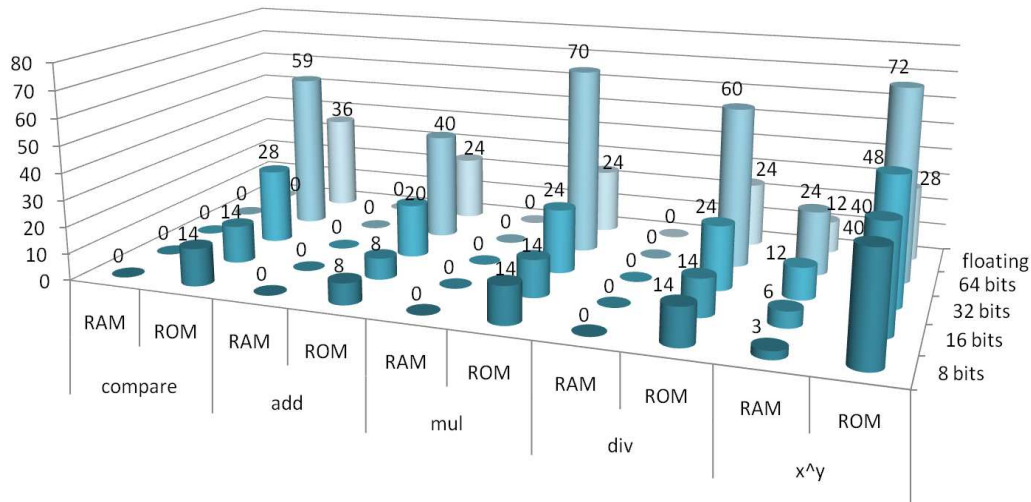


Fig.3.6. MSP430xx. Necesarul de memorie pentru fiecare combinație *operație-operanzi* suplimentară, implementată pe nodurile WSN care folosesc aceste microcontrolere.

Un impact semnificativ asupra memoriei program are operația de ridicare la putere, acesta variind de la 3 % în cazul *MSP430F5437* până la 16 % din resursele de memorie disponibile pe variantele *MSP430F16x*. De asemenea, funcțiile asociate operațiilor cu operanzi reprezentați în virgulă mobilă conduc la un consum de aproximativ 2 % din memoria *Flash* pentru *MSP430F16x*.

Utilizarea pe această platformă a operațiilor cu operanzi reprezentați pe 64 biți necesită un spațiu de până la 5 ori mai mare decât dimensiunea necesară în cazul implementării aceluiași operații folosind operanzi pe unul sau doi octeți. Pentru comparație, atunci când se implementează împărțirea folosind operanzi pe 64 biți și microcontrolerele *Atmega12xx*, codul generat necesită de 20 de ori mai multă memorie *ROM* decât în cazul implementării pe microcontrolerele *MSP430x*.

3.2.5 Platforma Renesas M16C62P

Deși această platformă, spre deosebire de cele prezentate anterior, are la bază o arhitectură pe 16 biți cu un set complex de instrucțiuni, fiind disponibile la nivel hardware multiple operații de adunare, scădere, înmulțire și împărțire, pentru implementarea expresiilor luate ca referință în acest capitol există un necesar semnificativ mai mare atât din punct de vedere al memoriei *RAM* cât și din punct de vedere al memoriei *ROM* (fig.3.7 și fig.3.8).

Codul generat pentru operațiile de împărțire pe 32 sau 64 biți sau pentru ridicarea la putere, implică un consum de aproximativ 1,5 % din memoria disponibilă (echivalentul a 13 % din memoria *RAM* disponibilă pe platformele *Atmega128x*). Din punct de vedere al memoriei *ROM*, operațiile în virgulă mobilă

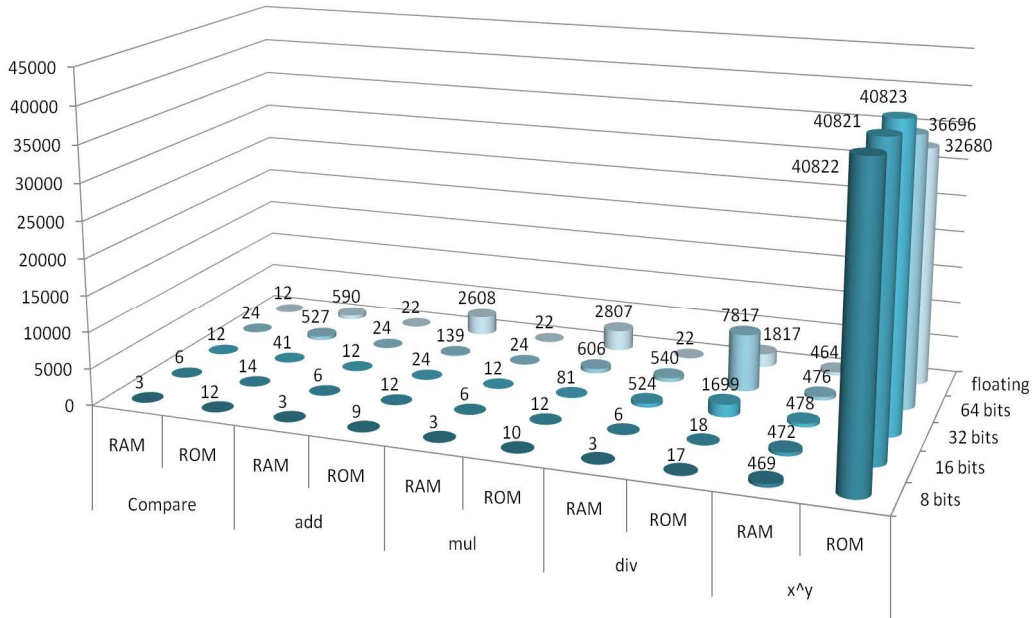


Fig.3.7. M16C62P. Necesarul de memorie, în octeți, pentru implementarea diferitelor operații și dimensiuni ale operanzilor în nodurile WSN bazate pe acest microcontroler.

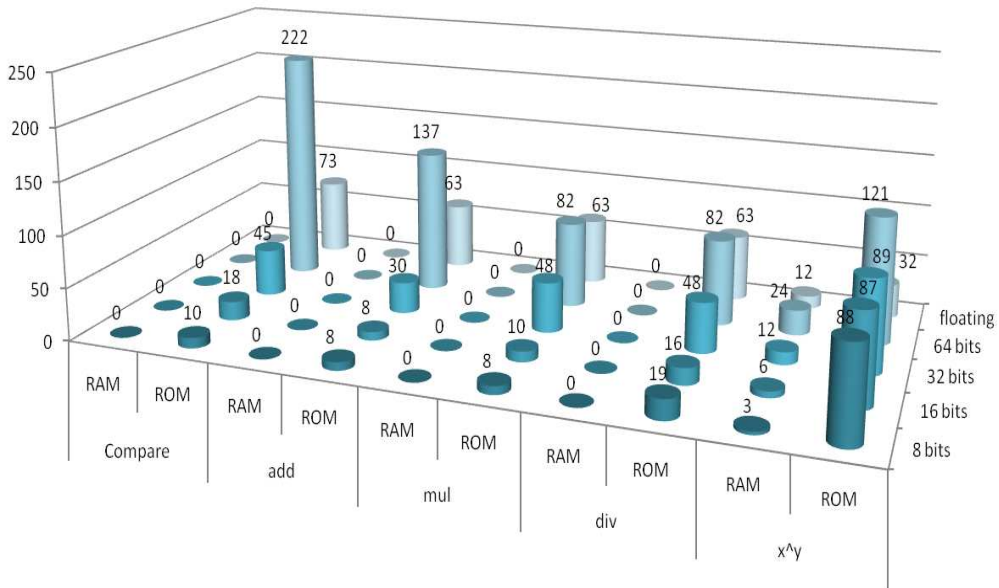


Fig.3.8. M16C62P. Necesarul de memorie pentru o combinație operație-operanzi suplimentară, implementată pe nodurile WSN care folosesc acest microcontroler.

necesită aproximativ 9 % din memoria Flash internă (echivalentul a mai mult de 25 de procente din memoria ROM internă disponibilă pe platformele Atmega128x).

Operațiile de împărțire care utilizează operanzi pe 64 biți presupun utilizarea a aproximativ 2 % din capacitatea memoriei interne.

Restricții suplimentare, pe lângă evitarea operațiilor cu operanzi în virgulă mobilă sau valori întregi reprezentate pe 64 biți, trebuie luate în considerare la implementarea pe această platformă a operației de împărțire utilizând operanzi reprezentați pe 32 biți.

3.2.6 Platforma PXA271

Setul de instrucțiuni al acestui microcontroler este compatibil cu arhitectura *ARMv5 TE*, exceptând instrucțiunile în virgulă mobilă. Astfel, chiar dacă resursele de stocare disponibile pe această platformă nu pun probleme la nivelul aplicației, necesarul de memorie pentru implementarea operațiilor propuse în acest capitol poate fi considerat comparabil cu al celorlalte platforme.

Necesarul maxim de resurse este asociat în cazul acestei platforme, operațiilor de ridicare la putere. Astfel, spațiul de memorie necesar pentru codul operațiilor de ridicare la putere tinde spre un procent de 0,05 % din memoria Flash internă, toate valorile obținute fiind descrise în fig.3.9.

Și pe platforma *PXA271* trebuie evitate operațiile care presupun utilizarea unor operanzi reprezentați în virgulă mobilă, fiind necesară limitarea operațiilor de împărțire cu operanzi reprezentați pe 64 biți.

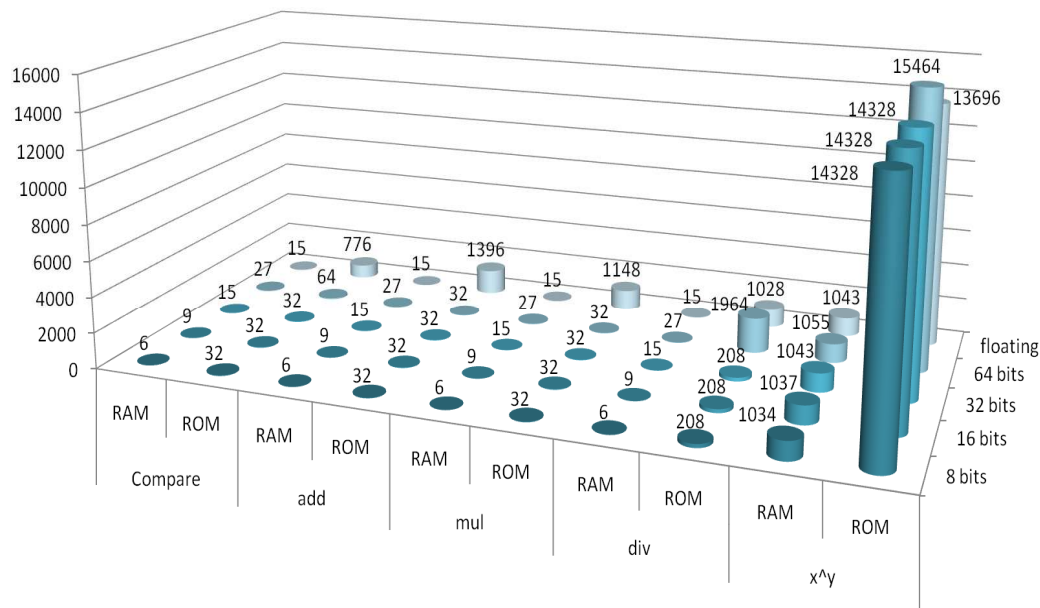


Fig.3.9. PXA271. Necesarul de memorie, în octeți, pentru implementarea diferitelor operații și dimensiuni ale operanzilor în nodurile WSN bazate pe acest microcontroler.

3.2.7 Discuții

Independent de tipul arhitecturii utilizate, modulele de procesare existente în nodurile *WSN* nu oferă suport hardware pentru operații în virgulă mobilă iar costul (timp de procesare și necesar de memorie) implicat de utilizarea unor astfel de date recomandă evitarea lor. Deși rețelele *WSN* sunt în general concepute să proceseze date colectate din sisteme naturale sau tehnologice, date care se reprezintă cu o precizie mult mai bună prin intermediul valorilor reale, pentru conservarea resurselor disponibile este mai eficientă maparea acestor date pe intervale de valori întregi și efectuarea tuturor operațiilor folosind ca operanzi doar numere întregi dar păstrând semnificația reală a rezultatelor obținute. De asemenea, dimensiunea operanzilor trebuie limitată acolo unde este posibil astfel încât să existe o corespondență cu tipurile de instrucțiuni disponibile la nivelul procesorului utilizat. Ridicarea la putere se realizează prin intermediul unor funcții din biblioteca compilatoarelor, funcții care operează cu parametrii reprezentați în virgulă mobilă, fiind astfel operația cu cel mai mare consum de resurse din setul analizat. Utilizarea operatorilor de înmulțire și împărțire se recomandă a fi limitată, acestea nefiind disponibile ca instrucțiuni mașină pe toate platformele, iar implementările prin funcții din biblioteca compilatorului presupun executarea unor bucle și implicit creșterea timpului de procesare și a energiei consumate.

Rezultatele unei astfel de analize sunt necesare pentru a optimiza dimensiunea și rezoluția datelor procesate în nodurile rețelelor de senzori, îndeosebi în aplicațiile în care resursele de calcul sunt critice. În contextul acestei lucrări, datele sunt utilizate în analiza implementării modelelor matematice ale bateriei.

3.3 Surse de energie

Alimentarea nodurilor unei rețele *WSN* depinde de tipul aplicației în care va fi utilizată rețeaua, alegerea surselor de energie realizându-se ca un compromis între preț și implicațiile acestora asupra dimensiunii nodurilor, respectiv asupra duratei de utilizare a rețelei. Ca soluții pentru stocarea energiei, nodurile *WSN* actuale utilizează baterii, supercondensatoare asociate unor micro sisteme pentru colectarea energiei din mediul ambiant, pile de combustie - celule cu (bio)combustibili sau combinații între aceste elemente.

Din punct de vedere al cantității de energie care poate fi stocată, compararea acestor soluții se poate face prin intermediul densității de energie reprezentată în MJ / kg , o vedere de ansamblu asupra diferențelor între tehnologiile utilizate în rețelele *WSN* fiind dată în fig.3.10. Bateriile pe bază de acid sunt utilizate preponderent în industria auto și în sisteme solare sau eoliene, fiind introduse în această figură doar ca un element de referință.

Pentru a putea fi utilizate în senzorii fără fir analizați, sursele de energie trebuie să permită menținerea unei tensiuni constante în plaja 2,1-5 V [21] la o încărcare variabilă care poate depăși sporadic un prag de ordinul a zeci de miliamperi pentru anumite intervale de timp (în funcție de tipul de senzori utilizat, acest prag poate depăși chiar 100mA). De asemenea, pentru a menține un cost relativ scăzut, dimensiunea acestor surse trebuie să fie limitată.

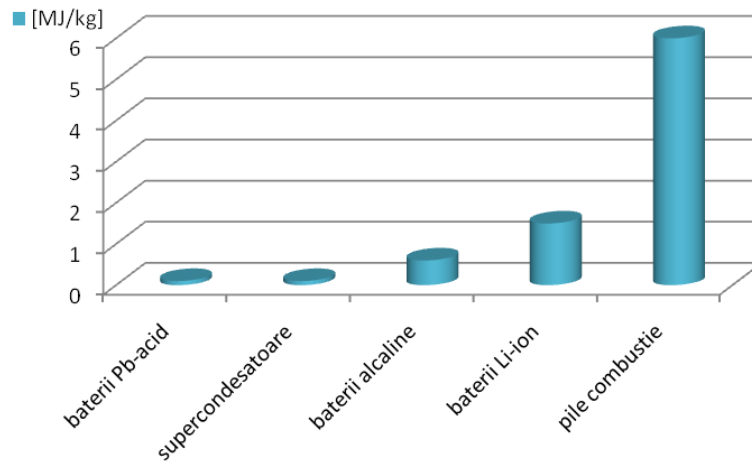


Fig.3.10. Densitatea specifică a surselor de energie în rețelele WSN. Valorile sunt orientative, fiind exprimate în MJ/kg.

În următoarele paragrafe se vor descrie principalele caracteristici ale surselor de energie utilizate în contextul rețelilor de senzori *WSN*, precum și câteva soluții implementate pentru colectarea de energie la nivelul unui nod.

3.3.1 Pile de combustie - Biocelule cu combustie

Pilele de combustie sunt realizate încă din secolul XIX, acestea fiind un rezultat al colaborării dintre C.F. Schönbein, cel care a observat reacția care stă la baza acestei combustii, și W.R. Grove inventatorul acestor surse de energie [26]. Pilele de combustie sunt dispozitive electrochimice care convertesc energia unor combustibili direct în electricitate și căldură fără a face uz de ardere cu flacără, impactul redus al acestora în prezent fiind datorat costurilor de producție ridicate. Fiind sursele cu cea mai mare densitate de energie, pilele de combustie au un potențial ridicat pentru a fi utilizate în producerea de energie la scară industrială, în transporturi dar și pentru alimentarea cu energie electrică a dispozitivelor electronice portabile, existând mai multe tehnologii pentru implementarea acestor surse de energie, specifice domeniului de aplicație.

O introducere în domeniul pilelor de combustie în care se oferă detalii despre principiile utilizate, tehnologiile existente și unele aplicații prototip bazate pe aceste surse de energie, este realizată în [27]. Principiul funcționării pilelor de combustie este exemplificat în [27] prin intermediul unei pile cu membrană de filtrare a ionilor pozitivi și reacții de oxidare a hidrogenului respectiv de reducere a moleculelor de oxigen. Un rezumat al acestui principiu este descris prin fig.3.11.

Elementele constructive ale unei pile de combustie sunt:

- un electrod (anod) cu structură poroasă care permite trecerea moleculelor de combustibil, aici având loc reacțiile de oxidare;
- o incintă pentru alimentarea/evacuarea combustibilului (acesta poate fi în stare gazoasă sau lichidă) și dacă e cazul, pentru evacuarea produsului rezultat în urma reacției electrochimice;

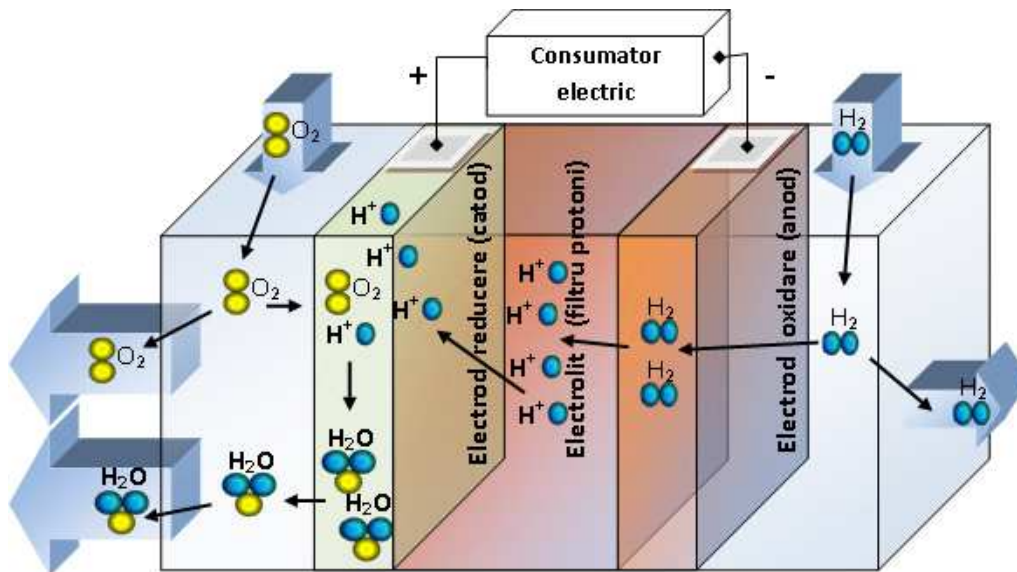
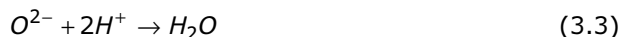


Fig.3.11. Pile de combustie cu membrană de filtrare a ionilor pozitivi. Schema descrie principiul de funcționare și reacțiile de reducere/oxidare folosind oxigen/hidrogen

- un electrod (catod) având o structură poroasă, aici realizându-se reacțiile de reducere;
- o incintă pentru alimentarea/evacuarea oxidantului (gaz sau lichid) și dacă e cazul, pentru evacuarea produsului rezultat în urma reacției;
- electrolitul care separă cei doi electrozi, acesta având rolul de a filtra ionii pozitivi (cationi) sau pe cei negativi (anioni), fiind caracterizat printr-o permeabilitate redusă doar pentru un tip de ioni și impermeabil pentru celălalt tip;
- borne conductoare atașate electrozilor, pentru alimentarea unui circuit electric extern.

Reacția electrochimică (3.3) care are loc în pila de combustie prezentată în fig.3.11 este rezultatul procesului de oxidare descris de relația (3.1) și al procesului de reducere detaliat în relația (3.2) [27].



În momentul în care circuitul extern se închide prin intermediul unui consumator, electronii eliberați în procesul de oxidare a hidrogenului la anod vor circula prin intermediul acestui circuit către catod unde vor determina procesul de reducere a moleculelor de oxigen. În funcție de tipul de electrolit utilizat, ionii de hidrogen și oxigen vor forma molecule de apă la catod (în cazul exemplului din fig.3.11) sau la anod. Tensiunea la bornele unei pile de combustie este dată de

diferența potențialelor determinate de reacțiile ce au loc în cei doi electrozi și variază neliniar în funcție de densitatea curentului.

În nodurile rețelelor WSN, datorită constrângerilor legate de dimensiune, greutate, cost și mai ales temperatură, tehnologiile care se pot utiliza sunt limitate la cele derivate din tipul pilelor PEM (*Polymer Electrolyte Membrane*), acestea implicând temperaturi de operare mai reduse, în intervalul 80–150 °C. De asemenea, probleme ridică și posibilitățile actuale de stocare a combustibilului (hidrogenul sau substanțele utilizate în acest scop), fiind necesare elemente auxiliare pentru controlul alimentării/recirculării substanțelor reactante, al răcirii sistemului și al evacuării produsului de reacție (apa în cazul pilei exemplificate). Spre deosebire de pilele de combustie clasice, pentru a obține o reducere a volumului este necesară utilizarea unor metode pasive pentru realizarea controlului amintit, de exemplu eliminarea dispozitivelor de recirculare a oxigenului utilizând convecția naturală și difuzia aerului din mediul ambiant, dar metodele pasive conduc la limitări ale parametrilor ce caracterizează performanța acestor surse de energie [28].

În prezent sunt disponibile tehnologii care utilizând enzime, produse pe baza unor bacterii, sunt capabile să substituie utilizarea metalelor grele în procesele de oxidare la anod și reducere la catod, aceste categorii de pile de combustie fiind identificate ca *biocelule de combustie*. Biocelulele de combustie operează la temperatura camerei și au o densitate de energie mai mică decât pilele clasice, această densitate la același volum fiind de doar 2-4 ori mai mare decât a bateriilor [29]. Deși prin caracteristicile tehnice, pilele de combustie (biocelulele) se pretează utilizării ca surse de energie în nodurile WSN, prețul ridicat al acestora este un element prohibitiv, fiind considerat principalul impediment pentru adoptarea acestei soluții tehnologice.

3.3.2 Microsisteme pentru colectarea de energie

Pentru colectarea energiei din mediul ambiant, există în prezent două direcții de dezvoltare: tehnologii la nivel industrial (centrale eolinene, hidrocentrale, panouri fotovoltaice) și tehnologii pentru colectarea energiei la scară micro (microsisteme), al căror scop final este alimentarea perpetuă a unor dispozitive electronice fără a face uz de fire sau baterii. Energia prezentă în mediul ambiant (solară, mecanică, termică sau chiar în sisteme biologice) este colectată și convertită direct în curent electric. În situația în care acest lucru se realizează prin intermediul unor microsisteme, curentul electric obținut este în general intermitent și neregulat, nivelul de absorbție fiind foarte mic. Conform estimărilor din [30], folosind corpul uman ca sursă de energie în aplicații din domeniul medical se pot colecta de la aproximativ $4 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ din vibrații, până la $25 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ din diferențele de temperatură, iar prin utilizarea luminii ca sursă de energie se pot obține de la $10 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (interior) la $10 \text{mW}/\text{cm}^2$ (exterior), valori mult mai mici colectându-se din semnalele radio recepționate ($0,1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ pentru tehnologia GSM).

Datorită modului de furnizare intermitentă a unor tensiuni neregulate, microsistemele de colectare a energiei din mediul ambiant necesită, pe lângă partea de conversie, și circuite capabile să stocheze această energie (elemente capacitive) respectiv să ofere tensiuni de alimentare constante (regulatoare de tensiune, etc).

3.3.2.1 Utilizarea energiei termice

Conversia energiei termice în energie electrică este posibilă prin structura atomică a metalelor, structură care prin prezența electronilor liberi permite o bună conductivitate termică și electrică. Mișcarea acestor electroni liberi sub influența unui câmp electric, a căldurii sau prin conectarea a două metale cu concentrații diferite de electroni, determină efectele termoelectrice Joule, Volta, Thomson, Peltier și/sau Seebeck. Utilizarea diferențelor de temperatură pentru obținerea curentului electric se face prin efectul termoelectric Seebeck. Acesta este un proces reversibil care presupune utilizarea a două conductoare diferite cu joncțiuni la capete și menținerea celor două puncte de contact la temperaturi diferite.

Diferența de potențial obținută este descrisă prin relația (3.4).

$$V = \int_{T_1}^{T_2} [S_{c2}(T) - S_{c1}(T)] dt \quad (3.4)$$

T_1 și T_2 sunt valorile temperaturii în cele două contacte, coeficienții Seebeck S_{c2} și S_{c1} ai celor doi conductori fiind specifici materialelor utilizate având o dependență neliniară față de temperatură.

Dispozitivele utilizate pentru conversia energiei termice în energie electrică sunt denumite generatoare termoelectrice (*TEG*), proprietățile acestora fiind determinate de coeficienții Seebeck corespunzători materialelor utilizate. Conform [31], din punct de vedere al aplicațiilor sunt utile valorile a doi parametri: rezistența internă și tensiunea electrică obținută la o diferență de temperatură de 1 *Kelvin*. Astfel, valoarea rezistenței interne variază între 0,5 și 5 Ω , alegându-se dispozitive cu valori comparabile cu impedanța circuitului alimentat, dar nu mai mari decât aceasta. Tensiunea obținută la ieșire variază între 10-50 *mV/K*, la aplicații în care diferențele de temperatură sunt mici fiind necesară legarea mai multor generatoare termoelectrice în serie cu dezavantajul creșterii rezistenței sursei de energie, numărul dispozitivelor *TEG* ce pot fi înseriate fiind limitat de caracteristicile circuitului alimentat.

Pentru a putea utiliza generatoarele termoelectrice în alimentarea nodurilor *WSN*, au fost dezvoltate circuite capabile să lucreze cu tensiuni de intrare în plaja 20-500 *mV* și să ofere la ieșire o tensiune constantă, selectabilă în plaja 2,35-5 *V* [32,33]. Aceste tehnologii necesită utilizarea unor elemente de stocare a energiei captate, fiind utilizate condensatoare în cazul soluției de la *Linear Technology* respectiv condensatoare și acumulatori pentru soluțiile consorțiului *EnOcean*.

3.3.2.2 Utilizarea vibrațiilor

Obținerea energiei electrice utilizând vibrațiile care apar în diferite sisteme se realizează prin intermediul unor materiale piezoelectrice. Aceste materiale au proprietatea de a transforma în curent electric energia mecanică exercitată asupra lor prin presare, respectiv de a se deforma când prin intermediul a doi electrozi atașați pe suprafața lor se aplică o diferență de potențial. Sunt identificate și utilizate mai multe materiale care au proprietăți piezoelectrice [34]:

- monocristale (cuarțul, $LiTaO_3$, etc.);
- materiale ceramice ($PbTiO_3$, $BaTiO_3$, etc.);

- polimeri;
- materiale compozite, obținute prin combinarea polimerilor cu materiale ceramice piezoelectrice.

Vibrațiile care apar în sistemele monitorizate prin senzori *WSN* implică, în general, exercitarea unei compresii mecanice reduse asupra materialelor piezoelectrice utilizate, astfel încât comportamentul acestor materiale este unul liniar și poate fi descris prin standardul *IEEE* pentru piezoelectricitate [35]. Prin vibrații, materialele piezoelectrice sunt supuse la încercări mecanice care induc deformări axiale și forfecări ale materialului.

Conform [36], deformările materialului și sarcina electrică rezultate în urma exercitării unei compresii mecanice depind de intensitatea acesteia, de câmpul electric și de structura materialului piezoelectric, fiind approximate prin ecuații matriceale. În aceste ecuații, structura materialului este descrisă prin intermediul unor matrice cu elemente constante, în care apar următorii termeni:

- deformarea pe cele trei axe [m/m];
- deformarea prin forfecare (rotația) [m/m];
- sarcina electrică deplasată pe cele trei axe al materialului prin tensionare mecanică [C/m^2];
- presiunea exercitată pe fiecare din cele trei axe [N/m^2];
- forfecarea de-a lungul axelor materialului [N/m^2];
- câmpul electric [V/m];
- coeficienți de conformitate elastică [m^2/N];
- constante de încărcare piezoelectrică [m^2/N];
- coeficienți dielectrici, care determină sarcina pe unitate de suprafață, datorată câmpului electric aplicat, fiind inversul constantelor de permitivitate electrică [m/F].

Raportul de conversie al energiei mecanice în energie electrică este dat de *coeficientul de cuplare piezoelectrică*. La aplicarea unei forțe F asupra unui material piezoelectric, când electrozii sunt lăsați în gol, lucrul mecanic realizat W_M este jumătatea produsului între forța aplicată și deformarea obținută ($W_M = F \Delta / 2$). Energia electrică W_E determinată de acumularea de sarcină Q prin efectul piezoelectric depinde și de capacitatea elementului C_p : $W_E = Q^2 / (2 C_p)$.

Materialele piezoelectrice utilizate pentru conversia vibrațiilor în energie electrică sunt atașate unor lamele elastice în zona de prindere a acestora la corpul care vibrează (fig.3.12).

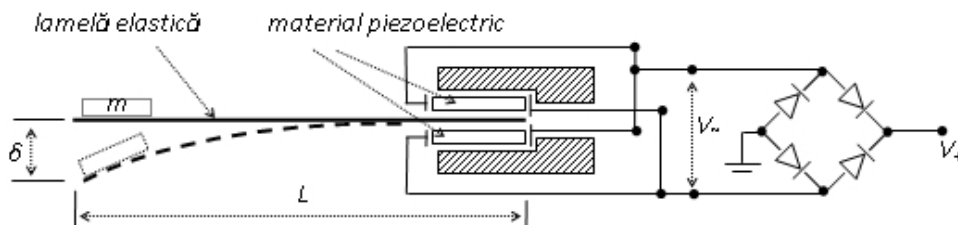


Fig.3.12. Conversia vibrațiilor în energie electrică.

Mărimile și unitățile de măsură sunt: m - masă de calibrare [kg], L - lungimea lamei [m], δ - deplasamentul lamei [m], V_+ - tensiunea electrică obținută la ieșirea redresorului [V].

Doar unul din capetele lamelelor este fixat, celălalt fiind lăsat să oscileze liber, amplitudinea acestor oscilații (δ) fiind determinată de intensitatea vibrațiilor din sistem și valoarea masei unor corpuri de calibrare (m) care se adaugă pe capătul liber al lamelei. Prin mișcarea oscilatorie, lamelele elastice exercită succesiv comprimări urmate de destinderi ale materialului piezoelectric, determinând generarea unui curent electric alternativ prin circuitul conectat la electrozii atașați acestui material, curent a cărui intensitate crește sau scade cu amplitudinea oscilațiilor. Astfel, la utilizarea unor corpuri cu masă mai mică se vor obține frecvențe mai mari de oscilație ale lamelei dar tensiuni electrice mai mici, iar prin utilizarea unor corpuri cu masă mai mare se scade frecvența oscilației, capătul liber al lamelei având o cursă mai lungă (δ), dar tensiunile electrice obținute pe electrozii generatorului (V_{\sim}) vor fi mai mari.

Frecvența de vibrație a lamelei se obține prin analiza comportamentului unei grinzi fixate în consolă, cu masă concentrată la vârf [37], amplitudinea oscilațiilor fiind obținută prin relația (3.5) iar frecvența prin relația (3.6).

$$\delta = \frac{\left(W + \frac{W_1}{4}\right) L^3}{3EI} \quad (3.5)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{g \cdot \frac{3EI}{\left(W + \frac{W_1}{4}\right) L^3}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3EI}{\left(m + \frac{m_1}{4}\right) L^3}} \quad (3.6)$$

unde:

- f este frecvența de vibrație;
- W și m sunt greutatea, respectiv masa corpului din vârful lamelei;
- W_1 și m_1 sunt greutatea, respectiv masa lamelei;
- L este lungimea lamelei;
- I reprezintă momentul de inerție;
- E este modulul de elasticitate longitudinal (constanta Young).

Puterea obținută prin utilizarea unor materiale piezoelectrice clasice variază în intervalul $10 \mu W$.. $10 mW$ [38], în funcție de proprietățile elementelor utilizate fiind necesară stocarea energiei colectate pentru a putea alimenta un nod WSN fără a face uz de alte surse de energie. De asemenea, pentru alimentarea nodurilor WSN cu dispozitive piezoelectrice, gradul de utilizare trebuie corelat cu timpul de încărcare al condensatoarelor și puterea elementelor piezoelectrice, fiind utilizate circuite pentru limitarea tensiunii și monitorizarea energiei disponibile.

În prezent, costul materialelor piezoelectrice este ridicat (între 50 și 500 \$) iar energia obținută este relativ mică pentru necesarul procesării și comunicării datelor prin mesaje radio la o recurență acceptabilă în marea majoritate a aplicațiilor WSN și se încearcă eficientizarea modulelor de colectare prin diverse tehnici exemplificate în [39-43].

În domeniul rețelelor WSN sunt dezvoltate aplicații care permit trimiterea de mesaje radio folosind doar energia colectată din vibrații. Exemple ale unor astfel de aplicații sunt detectarea trecerii vehiculelor [44], localizarea unei persoane prin senzori WSN atașați la încălțăminte [45,46], detectarea vibrațiilor pe treptele scăriilor de lemn [47] sau colectarea energiei din vibrațiile traverselor din căile ferate [48].

3.3.2.3 Energia solară

Obținerea energiei electrice prin utilizarea energiei solare are la bază efectul fotoelectric. Acesta a fost explicat de A. Einstein prin aplicarea proprietății duale a undelor electromagnetice (undă-corpusul) la lumină [49]:

- considerând relația energie-frecvență $\Delta\varepsilon = h\nu$, unde $\Delta\varepsilon$ este energia emisă sau absorbită de un electron la schimbarea stării energetice, h este constanta lui Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$) iar ν este frecvența radiației electromagnetice, s-a observat experimental că un electron liber din structura unui metal necesită o energie minimă $h\nu_0$ pentru a fi scos din acel metal (lucru de extracție notat cu ϕ);
- s-a constatat că un electron poate să absoarbă energia $h\nu$ a unui singur foton (particule care formează radiația electromagnetică);
- dacă energia unui foton incident este mai mare decât lucrul de extracție al electronului ϕ , efectul fotoelectric rezultat este descris prin relația (3.7).

$$h\nu = \phi + E_C \quad (3.7)$$

E_C este energia cinetică a electronilor extrași din structura metalului, aceasta fiind direct proporțională cu frecvența radiației electromagnetice $h(\nu - \nu_0)$ dar independentă de intensitatea luminii;

- când crește numărul de fotoni incidenti a căror energie este mai mare decât pragul de extracție al electronilor, crește și numărul electronilor extrași din metal, intensitatea luminii influențând liniar rata de desprindere a electronilor.

Tehnologiile actuale utilizate pentru conversia energiei solare în energie electrică folosesc materiale semiconductoare dopate cu impurități pentru a crește numărul electronilor liberi și mobilitatea acestora. În general, pentru a obține o suprafață incidentă mare, celulele și panourile solare sunt construite sub forma unor corpuri plane rigide, având un strat protector antireflexiv din sticlă, eficiența acestora fiind influențată semnificativ de orientare. Conform [50], la o radiație în spectrul solar de 1000 W/m^2 la $25 \text{ }^\circ\text{C}$, eficiența dispozitivelor solare variază între 4 % în cazul utilizării unor subansamble organice și 35 % pentru celule cu joncțiuni multiple, densitatea curentului fiind cuprinsă între $2,99 \text{ mA/cm}^2$ pentru subansamble formate dintr-un strat subțire de siliciu și $42,7 \text{ mA/cm}^2$ pentru celule pe bază de cristale de siliciu.

În cazul utilizării energiei solare pentru alimentarea dispozitivelor mobile este important și raportul dintre puterea obținută la greutatea (masa) adăugată [W/kg]. Din acest punct de vedere, celulele clasice au un raport de până la $0,82 \text{ W/g}$, celulele „crescute” pe structuri flexibile din polimeri ajung la 3 W/g în timp ce pentru dispozitivele bazate pe subansamble organice valoarea este de 4 W/g [51]. Un alt avantaj al dispozitivelor bazate pe subansamble organice prezentate în [51] îl constituie flexibilitatea și rezistența mecanică a acestora.

Deși este cea mai răspândită formă de colectare a energiei din mediul ambiant în rețelele WSN, energia electrică obținută prin conversia energiei solare are un comportament variabil, valoarea acesteia fiind nulă în timpul nopții și atinge maxime în timpul zilei, maxime care depind de vreme (senin - înnorat) sau de alți factori (praf, temperatură, vegetație, etc.). Pentru a obține o tensiune electrică

relativ constantă, schema tipică pentru alimentarea sezorială *WSN* folosind energie solară presupune utilizarea unui condensator (sau alt element cu rol de acumulator) pentru stocare, a unui regulator pentru energia colectată de la celulele fotoelectrice și a unui circuit regulator pentru tensiunea la ieșire, un exemplu pentru calcularea parametrilor acestor circuite fiind prezentat în [52].

3.3.2.4 Supercondensatoare

Energia electrică obținută prin conversia energiei din mediul ambiant este caracterizată prin versatilitate, fiind necesară stocarea acesteia pentru crearea unei surse de tensiune constantă. Utilizarea acumulatorilor permite stocarea energiei electrice dacă aceasta este disponibilă în anumiți parametri (valoare peste un anumit prag pentru un anumit interval de timp), încărcarea acestora realizându-se lent, fără a fi influențată semnificativ de variațiile mari pe perioade scurte ale energiei colectate. Pentru stocarea energiei electrice care este disponibilă în cantități mari dar pentru perioade foarte scurte de timp se folosesc condensatoare. Acestea au avantajul unui timp de încărcare foarte mic comparativ cu acumulatorii dar, spre deosebire de baterii, capacitatea de stocare este extrem de mică. Capacitatea relativ mare de stocare a bateriilor și timpul de încărcare mic al condensatoarelor sunt principalele elemente urmărite în dezvoltarea de dispozitive hibride care să prezinte ambele avantaje, un astfel de exemplu fiind soluția propusă în [53]

Cantitatea de sarcină electrică care poate fi stocată pe un condensator electrostatic este dată de capacitatea acestuia (C) și depinde de suprafața armăturilor metalice (A), de forma armăturilor, și de permitivitatea electrică a materialului dielectric care le separă (ε), pentru un condensator cu armături plane separate printr-un dielectric de grosime d fiind dată de relația (3.8):

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \frac{Q}{V} \quad (3.8)$$

unde Q este sarcina în coulombi iar V este potențialul electric în volți.

Supercondensatoarele denumite uneori și ultracondensatoare, au un principiu de funcționare bazat pe energie electrostatică similar condensatoarelor, dar prin particularitățile constructive permit stocarea unei cantități mult mai mari de energie (fără să spre deosebire de μF sau chiar pF în cazul condensatoarelor). Având o densitate de energie inferioară bateriilor, supercondensatoarele dispun de o capacitate de stocare mai mică (până la câteva procente din capacitatea unei baterii la dimensiuni similare) dar au avantajul unei densități de putere superioare, având un timp de încărcare/descărcare mult mai mic.

Spre deosebire de un condensator clasic, format din două armături metalice separate prin intermediul unui dielectric, la condensatoarele electrolitice cele două armături (electrozi) sunt introduse într-un electrolit lichid. Când nu sunt încărcate cu sarcină electrică, condensatoarele electrolitice exemplificate în fig.3.13-a au o dispersie uniformă a ionilor pozitivi și negativi în electrolit, electrozii având același potențial.

Dacă se aplică o diferență de potențial între cei doi electrozi, pe suprafața fiecăruia se va forma un strat de sarcină electrică care va determina o atracție a ionilor din electrolit (ionii negativi vor fi atrași de electrodul pozitiv respectiv ionii pozitivi de cel negativ), formându-se astfel încă un strat de sarcină electrică diferită la o distanță foarte mică de electrod.

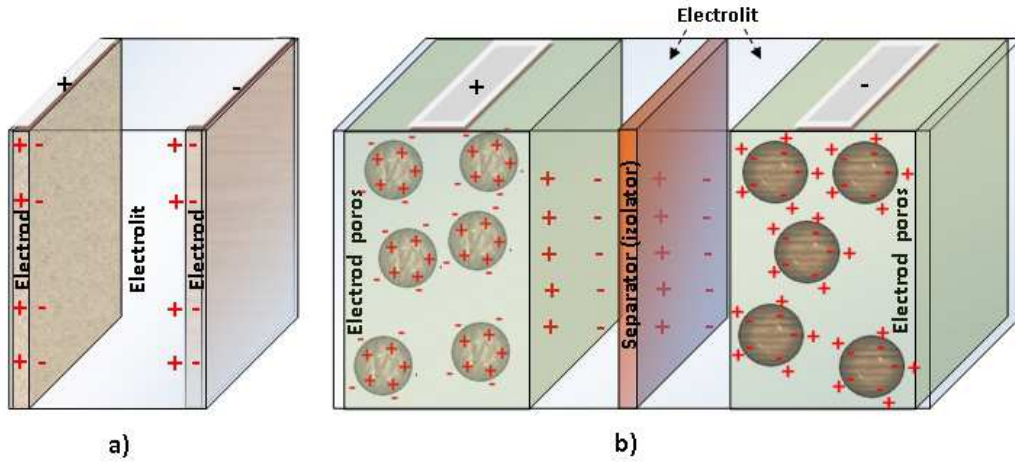


Fig.3.13. Structura condensatoarelor electrochimice.

- a) condensator electrolitic încărcat cu sarcină electrică;
 b) condensator electrochimic cu strat electric dublu încărcat (supercondensator).

Pentru explicarea proceselor care au loc la nivelul straturilor de sarcină electrică din jurul electrodului au fost propuse diferite modele, acestea fiind sintetizate în [54]:

- modelul Helmholtz consideră interfața formată dintr-un strat de electroni pe suprafața electrodului și un strat de ioni asociat acestuia în electrolit, capacitatea depinzând în acest caz doar de permitivitatea electrică și de distanța între cele două straturi, valoarea diferențială fiind dată de expresia 3.9:

$$C' = \frac{\epsilon}{4\pi\Delta} \quad (3.9)$$

unde Δ reprezintă distanța între electron și centrul unui ion;

- modelul Gouy-Chapman, pe lângă permitivitatea electrolitului consideră și influența potențialului aplicat, plecând de la ipoteza că ionii din electrolit au o concentrație variabilă și are loc o difuzie a acestora în stratul din jurul electrodului;
- modelul Stern, consideră ambele ipoteze anterioare fiind o combinație între modelele Helmholtz și Gouy-Chapman.
- modelul *BDM* consideră interacțiunea cu ionii din electrolit a unui solvent polar (apa) ale cărui molecule sunt aliniată în jurul electrodului datorită sarcinii electrice.

În general, capacitatea unui condensator electrolitic este aproximată prin relația (3.10):

$$C = \frac{\epsilon}{4\pi\delta} \int dS \quad (3.10)$$

unde S este suprafața electrodului.

Supercondensatoarele sunt derivate din condensatoarele electrolitice având electrozii formați dintr-un material poros și „îmbibați” în electrolitul lichid, fiind separați prin intermediul unui izolator foarte subțire (fig.3.13-b). Deși este un izolator electric, separatorul dintre cei doi electrozi permite trecerea ionilor pozitivi,

astfel încât, prin intermediul electrolitului se poate efectua un proces electrochimic reversibil de reducere-oxidare, supercondensatoarele fiind denumite și condensatoare electrochimice cu strat dublu (*EDLC*). Prin utilizarea unui material poros, suprafața electrodului se extinde de la exteriorul acestuia (pentru cazul clasic) în tot volumul electrodului, fără a crește semnificativ dimensiunile condensatorului. Urmărind relația (3.8) se poate deduce impactul acestei modificări asupra capacității condensatorului.

Densitatea de energie respectiv densitatea de putere a supercondensatoarelor variază în funcție de materialele utilizate pentru electrozi și electrolit, prin tabelul 3.3 fiind rezumate unele valori estimate în [55].

tip electrozi	electrolit	densitate energie [Wh/kg]	densitate putere [W/kg]
Carbon	Apos	1,5	2000
	organic	8 - 10	1000 - 1500
metal-oxid	Apos	1,5	2000 - 3000
	organic	8 - 12	1000 - 2000
Polimeri	organic	8	4000

Tabelul 3.3. Supercondensatoare: densitatea de energie și densitatea de putere [55].

Tensiunile electrice relativ mici la care lucrează supercondensatoarele (cuprinse în intervalul 1 - 5 V) nu sunt un factor care să influențeze utilizarea acestora în nodurile rețelelor *WSN*, acest tip de condensatoare având mai multe avantaje din punct de vedere al utilizării pentru stocarea temporară de energie electrică:

- timpi de încărcare/descărcare foarte mici;
- durata de funcționare foarte mare („nelimitată” în raport cu acumulatorii);
- au densitate de putere foarte mare (rezistență serie mică);
- se comportă mult mai bine la vârfuri de putere decât bateriile;
- nu necesită protecție la supraîncărcare, dar au o tensiune de străpungere mică.

Principalul dezavantaj al supercondensatoarelor relativ la baterii este densitatea de energie mult inferioară, peste aceasta suprapunându-se și o pierdere de sarcină mai mare, prin autodescărcare.

3.3.2.5 Concluzii

Pentru ca un nod *WSN* să poată funcționa în parametrii normali (achiziție date, procesare informație, comunicare mesaje radio, este necesară alimentarea acestuia cu o tensiune electrică continuă, ale cărei variații să nu depășească un interval dat pentru valori ale curentului consumat cuprinse între 0 *amperi* și un prag maxim, care în funcție de aplicație poate să depășească 100 *mA*.

Utilizarea energiei electrice obținută prin conversia energiei captate din mediul ambiant poate satisface doar parțial necesarul unui nod *WSN*. Printre cauzele acestui neajuns sunt tensiunile foarte mici obținute la utilizarea generatoarelor termoelectrice, caracterul intermitent al tensiunii disponibile în cazul conversiei

vibrațiilor sau, la utilizarea energiei solare, intervalele foarte lungi în care energia nu este disponibilă. Pentru a reduce impactul acestor limitări se utilizează elemente capabile să acumuleze și să stocheze suficientă energie astfel încât să permită funcționarea unor aplicații în care nodurile sunt active doar pe intervale scurte de timp. Acumularea și stocarea energiei electrice se face prin intermediul condensatoarelor și/sau acumulatorilor, acestea având la rândul lor nevoie de o interfață atât cu sursele de energie (limitatoare, redresoare, etc.), cât și cu dispozitivele alimentate (stabilizatoare de tensiune, elemente pentru monitorizarea sarcinii disponibile sau a consumului de curent, etc.). Toate aceste elemente formează un microsistem pentru colectarea energiei din mediul ambiant integrat la nivelul unui nod *WSN*, structura acestor microsisteme fiind descrisă prin fig.3.14.

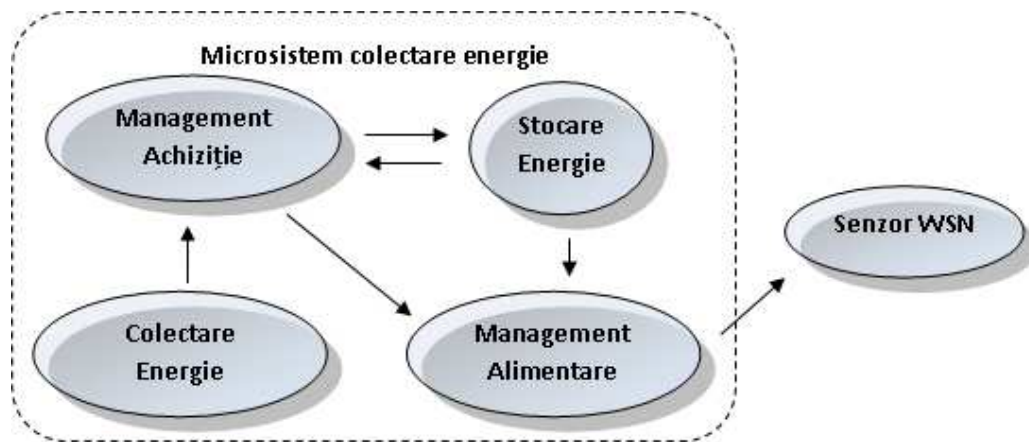


Fig.3.14. Microsistem pentru colectarea energiei din mediul ambiant. Unele noduri *WSN* pot fi alimentate, în anumite condiții, fără a fi necesare elemente de stocare a energiei.

Pentru colectarea energiei din mediul ambiant sunt dezvoltate și rețele *WSN* ale căror noduri sunt capabile să utilizeze simultan mai multe surse de energie diferite (soluția propusă în [56] integrează elemente solare și eoliene dar permite și utilizarea unor elemente pentru conversia energiei termice sau a vibrațiilor). De asemenea, pentru stocarea energiei electrice se întâlnesc soluții care conțin condensatoare sau acumulatori, dar și soluții cu elemente mixte.

3.3.3 Bateriile

Bateriile sunt utilizate pentru producerea energiei electrice prin reacții chimice. Acestea sunt formate din una sau mai multe celule, având ca elemente principale doi electrozi (anod și catod), un electrolit care înconjoară acești electrozi și un separator care permite trecerea ionilor pozitivi. Curentul electric este determinat de fluxul electronilor între anod și catod printr-un circuit exterior, flux datorat reacțiilor chimice de reducere-oxidare. Aceste reacții sunt exemplificate în acest paragraf prin intermediul unei celule din bateriile Litiu-ion (fig.3.15). Prin conectarea unui consumator electric între cei doi electrozi, electronii liberi din

structura atomilor de *Li* intercalați în electrodul pe bază de carbon se vor deplasa prin circuitul electric exterior în urma unui proces de oxidare, iar ionii pozitivi rezultați în urma acestui proces vor traversa separatorul spre electrodul pozitiv unde va avea loc reducerea acestora. Reacțiile chimice de *reducere-oxidare* sunt descrise prin relațiile (3.11), (3.12) și (3.13) [57].



Procesul de oxidare a litiului este descris prin relația (3.11) și reprezentat în partea dreapta-sus în fig.3.15, reducerea ionilor de litiu fiind descrisă prin relația (3.12) și reprezentată în fig.3.15 în partea stânga-sus. În cazul bateriilor Li-ion procesul de *reducere-oxidare* este reversibil, acest lucru presupunând formarea reversibilă (reprezentată în partea de sus a fig.3.15) și descompunerea moleculelor de *Li₂O* (reprezentată prin implicațiile din partea de jos a fig.3.15). Descompunerea *Li₂O* este necesară pentru reîncărcarea bateriilor, acest lucru realizându-se prin aplicarea unei diferențe de potențial între cei doi electrozi. La conectarea unui consumator, anodul este electrodul negativ iar catodul este electrodul pozitiv, polaritățile schimbându-se prin conectarea unei surse de tensiune, oxidarea realizându-se în acest caz la celălalt electrod (interschimbarea anodului și a catodului).

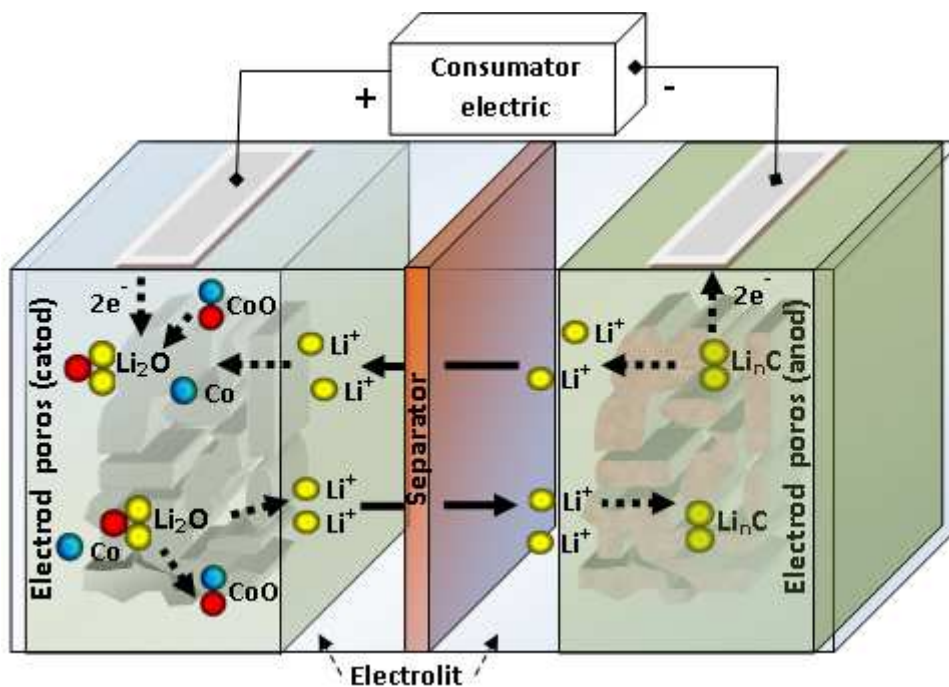


Fig.3.15. Structura unei baterii Litiu-ion.

Prin oxidarea atomilor de Li intercalați în structura electrodului de carbon, electronii rezultați se vor deplasa prin circuitul electric exterior iar ionii pozitivi vor traversa separatorul dinspre anod către catod, unde va avea loc reducerea acestora.

În cazul bateriilor Li-ion, procesul este reversibil.

Proprietățile bateriilor sunt determinate de materialele utilizate pentru electrozi, electrolit și separator. Densitatea de energie respectiv de putere a bateriilor, în funcție de diferitele tehnologii utilizate pentru realizarea acestora, este prezentată în tabelul 3.4. Fiind caracterizate printr-o densitate mare de energie și un preț relativ mic, bateriile sunt sursele de energie preferate în dispozitivele electronice portabile.

tip baterie	densitate energie [Wh/kg]	densitate putere [W/kg]
Pb-acid [58]	30	180
Nichel-Cadmiu [58]	15 - 50	50 - 1000
Litiu-ion [59]	10	100

Tabelul 3.4. Baterii: densitatea de energie și densitatea de putere.

3.3.3.1 Metode pentru determinarea capacității bateriilor

În contextul aplicațiilor care utilizează senzori WSN, o modalitate de a aproxima capacitatea bateriei unui nod (SOC), este cunoașterea capacității nominale și diminuarea acesteia în funcție de numărul mesajelor procesate de acel nod, știind valoarea aproximativă a energiei utilizate pentru fiecare mesaj. Această metodă nu ține cont de toate stările în care un nod WSN funcționează și nici de consumul de energie datorat achiziției de date, valorile obținute fiind orientative. Pentru o aproximare mai bună a energiei disponibile în baterii sunt necesare metode mai complexe, cu elemente din mai multe domenii (electrochimie, inginerie electrică și calculatoare), o astfel de abordare fiind realizată în [60] unde autorii determină capacitatea printr-o metodă adaptivă, estimând timpul rămas pentru funcționarea unor dispozitive electronice mobile alimentate cu baterii Li-ion.

Într-un rezumat al metodelor utilizate pentru a obține capacitatea bateriilor realizat în [61] au fost identificate următoarele metode:

- măsurare directă: bateria este descărcată la o rată constantă prin utilizarea unui consumator cu impedanță variabilă pentru a menține tensiunea constantă în timp. Variația tensiunii este monitorizată, bateria fiind considerată descărcată când tensiunea la borne scade sub un anumit prag. Capacitatea bateriei este cuantificată prin curentul consumat și timpul necesar pentru descărcare;
- contorizare amperi-oră (sau numărare coulombi): se măsoară curentul consumat, iar valoarea acestuia corectată în funcție de temperatură se utilizează pentru creșterea sau diminuarea cantității de sarcină disponibilă în baterie. Inițial se pleacă de la capacitatea nominală, apoi după fiecare interval de timp în care consumul de curent este cunoscut, valoarea capacității se actualizează în funcție de valorile determinate pentru consum. Este o metodă populară, fiind preferată când momentele la care au loc tranzițiile descărcare-încărcare, încărcare-descărcare, respectiv variațiile consumului între aceste tranziții cât și auto-descărcarea sunt cunoscute;
- măsurări ale greutatei specifice (SG): metoda se aplică doar la bateriile plumb-acid utilizate, în general, în industria auto și în producerea energiei

- electrice prin sisteme solare sau eoliene. Se bazează pe proprietatea electrolitului de a-și schimba densitatea odată cu descărcarea bateriei. Se plasează senzori electronici în baterie prin care se obțin aceste informații;
- măsurarea tensiunii electrice: se utilizează proprietatea bateriilor că la o temperatură și un consum constante, tensiunea scade proporțional cu capacitatea bateriei. Metoda este mai puțin precisă când sunt modificări ale temperaturii sau ale curentului consumat. De asemenea este necesar un interval de timp pentru ca bateria să fie în „relaxare” pentru ca măsurătorile să fie relevante. Precizia metodei depinde de tipul bateriei, nefiind recomandată pentru baterii la care variațiile tensiunii sunt foarte mici în raport cu sarcina electrică disponibilă în baterie;
 - metode bazate pe probabilități: utilizează lanțuri Markov, logică fuzzy sau rețele neuronale pentru interpretarea măsurătorilor efectuate;
 - spectroscopie de impedanță în c.a. pe o plajă largă de frecvențe [62]: nu este o soluție rezonabilă fiind dificil de implementat în dispozitive mici prin faptul că necesită informații despre structura bateriei și implică utilizarea altor echipamente electronice, precum și a unei surse de curent alternativ;
 - măsurări ale rezistenței interne: reacțiile electrochimice au ca efect modificări ale compoziției chimice alterând astfel rezistența internă. Aceste metode sunt dificil de implementat iar valorile rezistenței depind și de temperatură;
 - filtre Kalman (*KF*) și filtre Kalman extinse (*EKF*): sunt metode care estimează parametrii bateriei prin metode specifice teoriei filtrelor Kalman;
 - metode mixte: combină cazurile mai avantajoase ale metodelor enunțate, un astfel de exemplu fiind descris în lucrarea [60] unde se propune numărarea coulombi când avem consum de curent și măsurarea tensiunii în gol.

În contextul rețelelor *WSN*, metodele ce se pot utiliza pentru determinarea capacității bateriei trebuie să implice costuri mici și obținerea unor rezultate relevante din punct de vedere al preciziei, într-un timp scurt cu un efort de calcul mic. De asemenea, energia consumată în acest scop trebuie să fie per ansamblu mai mică decât câștigul de energie obținut prin utilizarea valorii capacității în strategiile de limitare a consumului.

3.3.4 Concluzii

În paragrafele anterioare au fost prezentate principalele tipuri de surse de energie utilizate pentru alimentarea nodurilor *WSN*. Pilele de combustie au avantajul unei densități foarte mari de energie (între 400 și 2250 *Wh/kg* [63]) dar utilizarea acestora implică temperaturi foarte mari. Prin tehnologiile actuale se pot obține și pile de combustie care funcționează la temperatura mediului ambiant, utilizarea acestora fiind în prezent prohibitivă prin faptul ca se obțin densități de energie apropiate de cele ale bateriilor performante dar la un preț semnificativ mai mare. Pentru viitor, se estimează o creștere a performanțelor pilelor de combustie care funcționează la temperaturi normale și o scădere a prețului, această tehnologie fiind considerată o posibilă soluție pentru alimentarea în viitor a nodurilor *WSN*.

Microsistemele pentru conversia energiei din mediul ambiant în energie electrică au avantajul unui timp de utilizare ridicat al rețelelor *WSN* (teoretic

„nelimitat”), dar pe lângă costul suplimentar introdus de elementele necesare pentru colectarea/stocarea energiei, acestea introduc și constrângeri la nivelul aplicației, colectarea datelor realizându-se intermitent și, în funcție de tipul energiei convertite, pot exista perioade lungi în care nodurile nu sunt operaționale.

Bateriile au avantajul celui mai bun raport densitate de energie/preț, fiind sursele de energie cel mai des întâlnite în nodurile rețelelor WSN.

În paralel cu eforturile depuse în domeniul electrochimiei pentru îmbunătățirea performanțelor surselor de energie electrică, cercetarea în domeniul rețelelor WSN este focalizată pe eficientizarea utilizării resurselor de energie disponibile. Sunt dezvoltate în acest scop noi protocoale de comunicație, componentele electronice ale diferitelor module funcționale sunt integrate într-un singur circuit utilizând tehnologii care implică o putere disipată mică (SoC), sunt dezvoltați algoritmi pentru o scalare dinamică a frecvenței sau a tensiunii de alimentare, etc.

Prin extinderea domeniilor de aplicație ale rețelelor WSN către aplicații mai complexe, este necesară procesarea unor fluxuri tot mai mari de date (de exemplu fluxuri audio sau video) această extindere implicând resurse de calcul și de stocare a datelor mult mai mari precum și o lățime de bandă superioară. Toate aceste resurse suplimentare implică un consum de energie mai mare, astfel încât optimizările consumului trebuie realizate ținând cont de factori și constrângeri noi, ambele fiind tot mai complexe. Un exemplu în acest sens este platforma *Cookies* [16], unde prin combinarea unui microcontroler cu circuite *FPGA* se obțin vârfuri de consum mai mari dar un timp de procesare mult mai mic care poate conduce, per ansamblu, la un consum total de energie mai mic.

Pentru optimizarea costurilor implicate și a duratei de utilizare a unei rețele WSN se realizează simulări ale rețelelor în care se implementează modele matematice ale factorilor de consum și ale surselor de energie (de exemplu modelarea și optimizarea unui sistem pentru captarea energiei solare și alimentarea unei rețele de senzori wireless în [64]). Deși sunt mai puțin folosite în acest scop, aceste modele ale surselor de energie pot fi implementate la nivelul unui nod în timpul utilizării rețelei pentru a permite luarea unor decizii în timp real, în funcție de context.

4. MEDIUL PENTRU TESTAREA REȚELELOR WSN

Rețelele de senzori fără fir acoperă domenii de aplicații similare cu cele ale rețelelor de senzori în care conexiunile sunt realizate prin fire, dar sunt mult mai flexibile și pot fi desfășurate în zone inaccesibile. Rețelele de senzori care folosesc undele radio ca mediu de comunicație sunt preferate, în general, rețelelor cablate când costurile totale sunt mai mici sau atunci când soluțiile cablate nu pot fi utilizate. În ambele cazuri, un mediu pentru testarea acestora este necesar atât pentru estimarea costurilor cât mai ales în scopul validării în laborator a strategiilor, prin simulare sau prin reproducerea rețelei la o scară redusă.

Proiectarea și implementarea rețelelor cu senzori fără fir presupune, pe lângă efectuarea unor simulări, și validări în laborator ale componentelor hardware utilizate, reproducând condiții similare mediului în care vor fi utilizate. Astfel, în funcție de etapa de dezvoltare a aplicației, sunt adecvate diferite tipuri de medii de testare, în prezent fiind utilizate diverse soluții pentru testarea rețelelor *WSN*, de la platforme de testare la simulatoare și emulatoare.

Prin acest capitol este prezentat mediul de testare dezvoltat și aplicațiile conexe, utilizate pentru monitorizarea nodurilor rețelei și reproducerea semnalelor generate de senzori în vederea validării rețelei prin simularea condițiilor de mediu în laborator, respectiv prin utilizarea unei rețele la scară redusă. Acest mediu de testare a fost proiectat pentru a controla individual datele colectate, alimentarea nodurilor și monitorizarea consumului de energie pentru fiecare senzor *WSN*, utilizând o rețea cablată de echipamente cu microcontroler. Fiecare din aceste echipamente poate fi asociat unuia sau mai multor noduri și sunt interconectate prin intermediul aceleiași magistrale de comunicație *CAN* cu un sistem de calcul care controlează fluxul de date. Sistemul propus se poate extinde foarte ușor pentru a monitoriza noi senzori *WSN*, fiind necesară doar legarea pe aceeași magistrală *CAN* a noi plăci cu microcontroler și o actualizare a identificatorilor acelor plăci în software.

4.1 Medii de testare

4.1.1 Simulatoare WSN

Simulatoarele sunt utilizate în primele faze ale proiectării rețelelor de senzori fără fir fiind folosite îndeosebi în găsirea unor soluții adecvate pentru protocoale de comunicație și pentru topologia rețelei. Ele sunt utilizate, de asemenea, pentru teste de scalabilitate atunci când strategiile sunt verificate prin simularea unei rețele cu sute sau chiar mii de noduri. Validarea aplicației necesită și utilizarea unor componente hardware similare celor utilizate în sistemul real, simulările nereușind să acopere toate aspectele legate de condițiile aplicației respective.

Printre simulatoarele utilizate pentru rețelele WSN sunt *SensorSim* [65], *TOSSIM* [66], *PowerTOSSIM* [67] și *Castalia* [68], ultimul simulator fiind dezvoltat pe baza lui *OMNet++*.

SensorSim integrează modele radio ale bateriei și interacțiuni între noduri reale și noduri simulate, moștenind proprietățile unor simulatoare de rețele tradiționale (*NS-2*);

TOSSIM este un simulator bazat pe sistemul de operare *TinyOS*, care permite compilarea codului sursă și executarea acestuia pe un *PC*;

PowerTOSSIM este de fapt un pachet care oferă suport pentru consumul de energie în simulatorul *TOSSIM*;

Castalia se caracterizează prin modele radio precise și integrează multe platforme hardware;

EmStar [69] este un simulator utilizat în cadrul platformei *Kansei* pentru calibrarea nodurilor virtuale cu date (timpul și informația achiziționată) obținute prin intermediul nodurilor reale, fiind utilizat pentru scalarea măsurătorilor efectuate prin realizarea unor simulări cu un număr foarte mare de noduri.

4.1.2 Emulatoare WSN

Emulatoarele WSN realizează de fapt emularea instrucțiunilor din setul aferent microcontrolerelor utilizate în nodurile WSN. Unele emulatoare pot de asemenea să emuleze cu precizie și circuitele de transmisie/recepție radio, convertoarele analog-numerice, circuitele *timer* sau alte periferice. Un emulator WSN a cărui precizie este la nivel de ciclu mașină este **Avrora** [70], acesta fiind însă cu 50 % mai lent decât simulatorul *TOSSIM*.

AEON [71] este o extensie a emulatorului *Avrora* care implementează un mecanism pentru estimarea consumului de energie la nivelul nodurilor.

4.1.3 Platforme pentru testarea rețelelor WSN

În sens general, prin medii pentru testare și validare („*testbeds*”) se identifică platformele utilizate pentru efectuarea de experimente în contextul unor proiecte de dezvoltare mari. Acestea conțin componente hardware, software și elemente de rețelistică utilizate pentru testarea riguroasă, transparentă și replicabilă a ipotezelor științifice. În cazul rețelelor WSN, acestea sunt folosite atât pentru evaluarea software-ului care rulează pe nodurile rețelei cât și pentru testarea hardware-ului utilizat [72]. Astfel de platforme utilizate în prezent sunt:

TWIST [73] (*TKN Wireless Indoor Sensor network Testbed*) este un mediu de testare flexibil dezvoltat la *Universitatea Tehnică din Berlin* pentru aplicații de interior. Este bazat pe o rețea de senzori cu 102 noduri *TmoteSky* și 102 noduri *eyesIFX*, desfășurate pe trei etaje ale unei clădiri, cu o distanță de

trei metri între noduri. Platforma *TWIST* permite configurarea nodurilor, programarea la nivel de rețea, colectarea datelor aplicației, un control al sursei de alimentare a nodurilor (pornit/oprit), selectarea dinamică a topologiei rețelei (ierarhică sau „flat”) și injectarea controlată a unor erori în nodurile rețelei;

Motelab [74] este o rețea experimentală desfășurată la Universitatea Harvard având o interfață web pentru a asigura accesul public pentru dezvoltarea și testarea de aplicații bazate pe rețele de senzori. Utilizatorii pot reprograma nodurile cu propriul lor cod și toate mesajele sunt colectate într-o baza de date din care pot fi accesate pentru a fi vizualizate și prelucrate în momentul finalizării testelor. Există 190 de noduri *TmoteSky* permanent instalate, fiecare cu senzori de lumină, temperatură și umiditate. Nodurile nu sunt prevăzute cu baterii având sursă de alimentare permanentă și sunt conectate cu un server central printr-o conexiune *Ethernet* utilizată pentru reprogramarea și depanarea acestora;

MistLab [75] este dezvoltat la MIT. Are 61 de noduri (47 de noduri *Mica2* și 14 noduri *Cricket*) desfășurate pe același etaj în mai multe camere. Acesta permite reprogramarea nodurilor, planificarea unor teste doar pe anumite noduri sau pe întreaga rețea, precum și colectarea de date. Spre deosebire de *Motelab*, se poate comunica direct cu noduri individuale în timp ce acestea execută codul planificat;

Kansei [76] este un mediu complex dezvoltat la *Universitatea de Stat Ohio*, fiind axat pe achiziția datelor și pe scalarea rețelei. Sunt trei tipuri de noduri desfășurate: staționare, portabile și mobile. Fiecare nod *XSM* sau *TmoteSky* este asociat cu un sistem *Stargate* bazat pe *Linux*, fiind echipat cu senzori (fotocelule, *PIR*, temperatură, magnetometru și un microfon). Sistemele *Stargate* sunt conectate la o stație *PC* cu rol de manager, folosind interfața *Ethernet* prin cablu sau utilizând carduri *Wi-Fi* (802.11) în cazul nodurilor portabile și mobile. Rețeaua cuprinde 210 senzori *XSM* (150 fiind înlocuite cu *TmoteSky*) ca noduri staționare, 50 senzori *Trio* (*TmoteSky*) ca noduri portabile și 5 roboți utilizați ca noduri mobile, fiecare robot având asociate sisteme *Stargate* și ambele tipuri de senzori (*XSM* și *TmoteSky*). *Kansei* permite programarea și planificarea printr-o interfață web și oferă instrumente pentru generarea automată de date pe baza datelor achiziționate de la senzori și a unor parametri și modele statistice. Sunt posibile astfel simulări hibride care utilizează un server de simulare care rulează pe un *PC* conectat la nodurile platformei de testare;

PowerBench [77] este o platformă dezvoltată la *Delft University of Technology*, pentru testarea rețelelor *WSN*, fiind formată din 24 de noduri. Aceasta este capabilă să colecteze date despre consumul de energie al tuturor nodurilor, în paralel. Utilizează o pereche de dispozitive *Linksys NSLU2* pentru fiecare grup de 6 senzori *TNode* (*Mica2*). Dispozitivele *NSLU2* sunt adaptoare *Ethernet-USB* 2.0 având unele modificări pentru a include un convertor analog-numeric cu interfață serială, un rezistor de șunt și comutatoare pornit/oprit. Astfel, este posibilă utilizarea acestora pentru programarea nodurilor, controlul pornirii/opririi și prin legarea în serie a senzorilor cu rezistorul de șunt se pot detecta variațiile de tensiune pe acesta prin

convertorul ADC care trimite datele la al doilea dispozitiv *NSLU2* pentru a fi redirecționate prin rețeaua *Ethernet*. Permite o rezoluție de $30 \mu A$ (teoretic $16 \mu A$) la o rată de eșantionare de 5 kHz pentru un curent maxim de 65 mA ;

FlockLab [78] permite măsurarea puterii și stimularea nodurilor WSN fiind dezvoltat la *ETH Zurich*. Spre deosebire de platforma *PowerBench* menționată anterior, *FlockLab* asociază senzorii cu dispozitive hardware capabile nu doar să monitorizeze comportamentul acestora dar și să le stimuleze. Nodurile sunt formate din senzori WSN asociați cu observatori capabili să efectueze măsurători de tensiune și curent, și pot fi pornite/oprite printr-o linie externă. O contribuție principală a acestei platforme este sincronizarea observatorilor cu baza de timp a serverului cu care aceștia comunică. Platforma conține senzori *TinyNode* utilizați ca noduri WSN și plăci de observație bazate pe un sistem de operare *Embedded Linux (Gumstix)*;

DSN [79] (*Deployment Support Network*) poate fi utilizat direct în aplicații reale, utilizând dispozitive de monitorizare fără fir atașate la noduri WSN. Această platformă este dezvoltată la *ETH Zurich* pe baza senzorilor *BTNode Rev.3*, pentru a sprijini dezvoltarea, monitorizarea și testarea de aplicații WSN. Modulele de monitorizare folosesc interfața *Bluetooth* și sunt utilizate în principal pentru monitorizarea și reprogramarea nodurilor WSN din aplicații orientate pe evenimente.

Din punct de vedere al costurilor legate de dezvoltarea unei astfel de platforme și al posibilităților de testare oferite, metoda optimă este crearea unor module de tipul placă echipată cu microcontroler asociată unor noduri WSN, capabile să comunice cu un sistem de calcul central. Uzual, aceste medii de testare sunt utilizate în scopul reprogramării nodurilor rețelei, monitorizării stării acestora, pentru determinarea energiei consumate prin monitorizarea consumului, pentru depanare, verificarea strategiilor, determinarea duratei de funcționare, etc.

Din punct de vedere al funcționalităților implementate, sistemul dezvoltat în laborator are unele similarități cu *FlockLab* și *PowerBench*, fiind însă orientat pe obținerea unor costuri mici, simularea mediului ambiant și monitorizarea consumului de energie.

4.2 Cerințe ale platformei de test

Pentru îndeplinirea scopului de a colecta date din mediul ambiant, nodurile WSN sunt asociate cu plăci de extensie specifice aplicației. Informația astfel achiziționată, este procesată și trimisă succesiv către alte noduri ale rețelei care acționează și ca relee (noduri intermediare de recepție și retransmisie), până ajunge la un centru de colectare.

Datorită dimensiunilor reduse ale senzorilor WSN, energia disponibilă în bateriile acestora este limitată și impactul asupra consumului de energie datorat fiecăreia din cele trei componente ale unui nod trebuie atent analizat pentru a prelungi durata de funcționare a aceluia nod, această analiză fiind utilă pentru îmbunătățirea timpului de funcționare a rețelei. Acest aspect este foarte important pentru rețelele ale căror noduri nu se mai pot recupera, astfel că o funcționalitate necesară este monitorizarea în laborator a consumului de energie și posibilitatea de a determina influența unor factori asupra acestuia.

Pentru a se găsi un optim între calibrarea pragului de rentabilitate, obținerea unui flux minim de mesaje și o rată eficientă de comutare a microcontrolerului în modurile cu consum redus, este necesară o reproducere în laborator a condițiilor din mediul real în care va fi utilizată aplicația.

Dat fiind faptul că multe din condițiile la limită nu se pot reproduce în laborator sau costurile implicate sunt foarte mari, soluția este reproducerea semnalelor generate de senzori în aceste condiții utilizând un mediu de testare echipat cu generator de semnale capabil să modifice parametrii semnalelor în mod automat sau pe baza unor comenzi.

4.3 Structura mediului de testare propus

Printre criteriile care au fost urmărite în conceperea și implementarea platformei pentru testarea rețelelor de senzori au fost: costuri minime implicate, ușurința cu care poate fi extinsă și posibilitatea de a stimula/monitoriza anumiți senzori din rețea în mod centralizat. În acest context, sistemul a fost proiectat utilizând o magistrală serială CAN [80] ca mediu de comunicație, prin intermediul căreia se interconectează plăcile de monitorizare și control împreună cu un sistem de calcul. Sistemul de calcul este conectat la magistrala CAN folosind un adaptor de tip *USB-CAN* și este capabil să trimită comenzi către anumite plăci de testare și să primească răspunsuri de la acestea. Plăcile cu microcontroler sunt programate să detecteze mesajele care le sunt adresate pe magistrala CAN, să le decodifice, să execute operațiile cerute și să trimită eventuale răspunsuri prin același suport de comunicație.

O sinteză a arhitecturii sistemului de achiziție este realizată în fig.4.1, iar o imagine a prototipului este prezentată în fig.4.2, unde au fost asociate etichete fiecărui element. În fig.4.1 sistemul este reprezentat din punct de vedere funcțional ca două rețele paralele, o rețea cablată și o rețea WSN, fiecare având propriul sistem de management. Soluția constructivă aleasă pentru rețeaua cablată permite conectarea mai multor sisteme de calcul, prototipul sistemului prezentat în fig.4.2 având două calculatoare legate la magistrala CAN, unul dintre ele funcționând ca sistem de management comun pentru ambele rețele. Plăcile de monitorizare etichetate cu „A” în fig.4.2 sunt realizate folosind plăcile de dezvoltare *ZK-S12-B* [81], pe care s-au montat tranzistori bipolari, amplificatoare instrumentale și alte componente discrete. Prin eticheta „B” sunt marcate liniile magistralei CAN, acestea conectând cele două plăci de monitorizare cu cele două sisteme de calcul „F” și „G” prin intermediul adaptoarelor *USB-CAN* marcate cu „C”. Sistemul „G” rulează o aplicație comercială (sub *Windows*), aplicație care permite monitorizarea fluxului de date pe rețeaua CAN. Acesta este folosit pentru a colecta toate mesajele care circulă pe magistrala CAN în vederea validării aplicației dezvoltate în laborator. Sistemul „F” folosește o distribuție a sistemului de operare *Linux* și rulează o aplicație realizată în laborator pentru managementul unitar al ambelor rețele, această aplicație fiind cea care trimite comenzi în cele două rețele și recepționează toate mesajele trimise de nodurile WSN respectiv de către plăcile de monitorizare. Acest calculator portabil interacționează cu nodurile rețelei WSN etichetate „D” (*MICAZ*), prin intermediul interfețelor *USB MIB520* [82] marcate cu eticheta „E”.

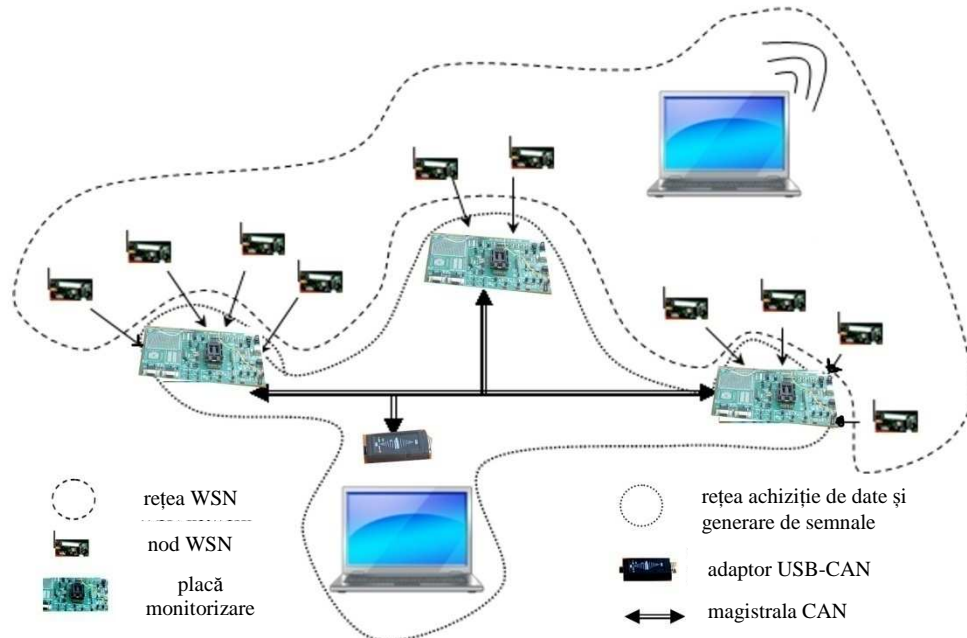


Fig.4.1 Arhitectura mediului de testare.

Nodurile rețelei WSN au asociate echipamente care comunică folosind o magistrală serială de tip CAN.

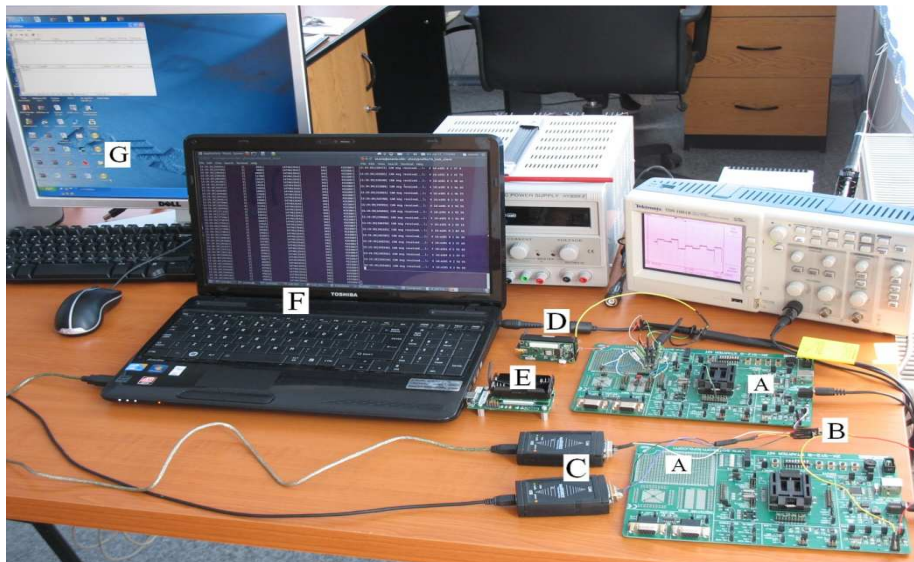


Fig.4.2 Prototipul mediului de testare.

Elementele cu etichete asociate sunt: plăcile de monitorizare cu microcontroler (A), magistrala CAN (B), adaptoare USB-CAN (C), noduri WSN (D), punct de acces în rețeaua WSN (E), sistemul de control al mediului de testare (F) și sistemul de monitorizare a fluxului de mesaje pe magistrala CAN (G).

4.3.1 Achiziția datelor

Modulul pentru achiziția de date a fost proiectat pentru a permite monitorizarea intrărilor analogice și digitale în mod continuu sau sporadic, ca răspuns la comenzi. În cazul microcontrolerului utilizat (*MC9S12C128C* [83]) avem 8 canale de intrare analogice cu o rezoluție de 10 biți și 8 canale cu scop general configurate ca intrări digitale, acestea fiind resursele disponibile pentru fiecare placă de achiziție. 7 canale sunt rezervate pentru măsurarea semnalelor periodice.

Printre cerințele acestui sistem se regăsește și necesitatea de a măsura curent electric în câteva plaje de variație fără a deconecta sau afecta funcționarea circuitului monitorizat. Conectarea nodurilor la porturile microcontrolerului este prezentată în fig.4.3.

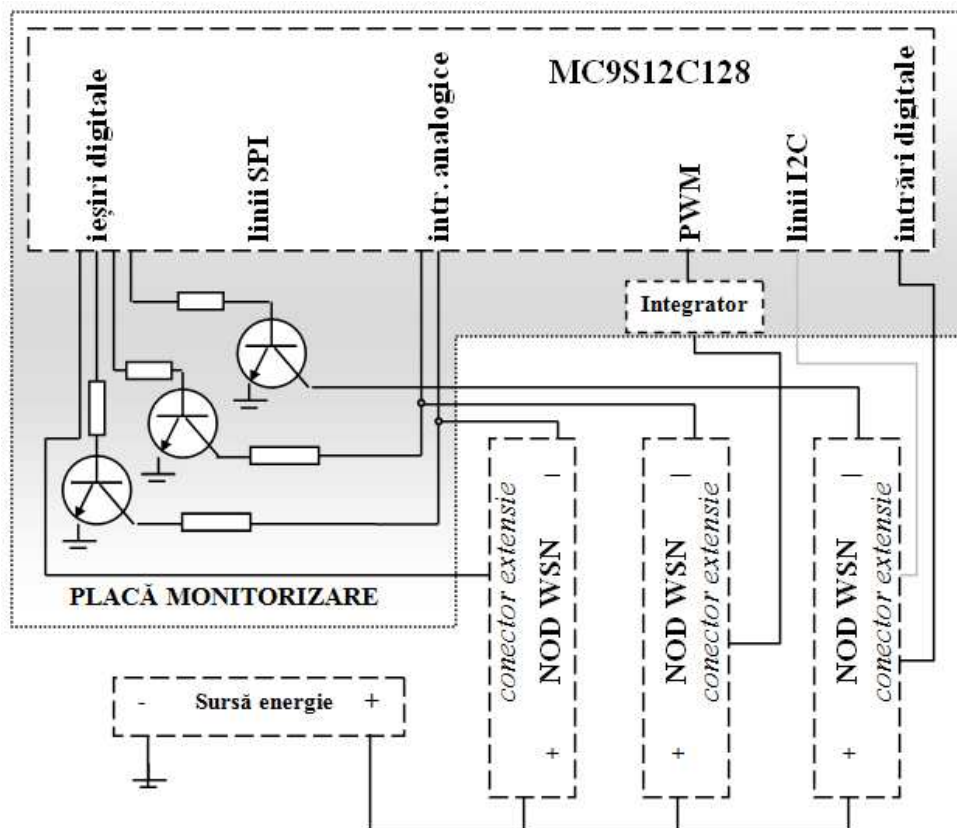


Fig.4.3 Asocierea nodurilor WSN la plăcile de monitorizare.

Semnalele specifice diferitelor tipuri de senzori sunt generate prin intermediul interfețelor microcontrolerului și detectate de noduri prin intermediul cuplelor de extensie. De asemenea, nodurile pot comunica direct cu plăcile de monitorizare prin intermediul liniilor seriale, fiind posibilă reprogramarea acestora.

4.3.2 Generarea de semnale

Plăcile de dezvoltare utilizate au fost configurate să poată interacționa cu nodurile WSN monitorizate. Astfel, pe lângă canalele configurate ca ieșiri digitale, sunt utilizate și opt canale configurate ca PWM. Comportamentul acestor canale este controlat în mod dinamic, prin software, în funcție de conținutul mesajelor recepționate prin magistrala CAN. Semnalele PWM se pot integra pentru a simula comportamentul senzorilor care oferă informația prelevată despre un anumit proces sau fenomen fizic sub forma unui semnal analogic.

O privire de ansamblu asupra modului în care mediul de testare simulează mediul ambiant prin intermediul generării de semnale este dată în fig.4.3. În această figură, avem trei noduri WSN, fiecare fiind pornit/oprit prin intermediul unor ieșiri digitale. Fiecare nod WSN captează informația sub forma unor semnale generate de placa de monitorizare, astfel, nodul din stânga primește un semnal digital, cel din mijloc simulează recepția informației sub forma unui semnal analogic în timp ce senzorul din dreapta este conectat prin intermediul unei linii de comunicație serială.

4.3.3 Alunecări ale semnalelor de sincronizare

Din punct de vedere funcțional, sistemul de monitorizare și rețeaua WSN sunt două rețele diferite iar în procesul de validare în laborator a aplicației care urmează a fi deservită de nodurile WSN, acestea vor executa software-ul acelei aplicații fără a fi „conștiente” de existența plăcilor de monitorizare. Astfel, o comunicare directă prin pachete de mesaje între elementele celor două rețele nu este posibilă și ținând cont de alunecările care apar între semnalele de sincronizare ale acestor elemente, o deplasare a referinței de timp va fi inevitabilă.

Microcontrolerul MC9S12C128C utilizat pe plăcile de monitorizare operează la o frecvență de 32 Mhz respectiv 16 MHz pentru componentele conectate la magistrala internă [83], în timp ce referința externă este obținută de la un cristal în configurație Pierce. Senzorul MICAz este echipat cu un microcontroler ATmega128L al cărui semnal de sincronizare poate avea frecvența selectabilă prin software și are posibilitatea de a utiliza ca referință un oscilator intern [84]. Semnalul implicit de sincronizare pentru acest microcontroler vine de la un cristal cu oscilația de 7,3MHz.

În fig.4.4 este reprezentată diferența obținută între timpul în microsecunde „citat” pe microcontrolerul unei plăci de achiziție și cel obținut pe un senzor MICAz.

Pe axa „y” este reprezentată diferența în microsecunde iar pe axa „x” timpul sistemului de calcul care recepționează simultan informația de la cele două dispozitive. Placa de monitorizare trimite mesaje cu o recurență de o milisecundă în timp ce nodul MICAz are o rată de transmisie de un mesaj pe secundă, aceasta explicând creșterile urmate de corecții la fiecare secundă.

Pentru a reduce influența problemelor de sincronizare, o corecție a timpului utilizat în calculele efectuate pe placa de monitorizare se face în mod dinamic, prin configurări realizate cu ajutorul unor mesaje trimise pe magistrala CAN. Aceste corecții sunt realizate pentru calculele care implică timpul scurs între anumite evenimente.

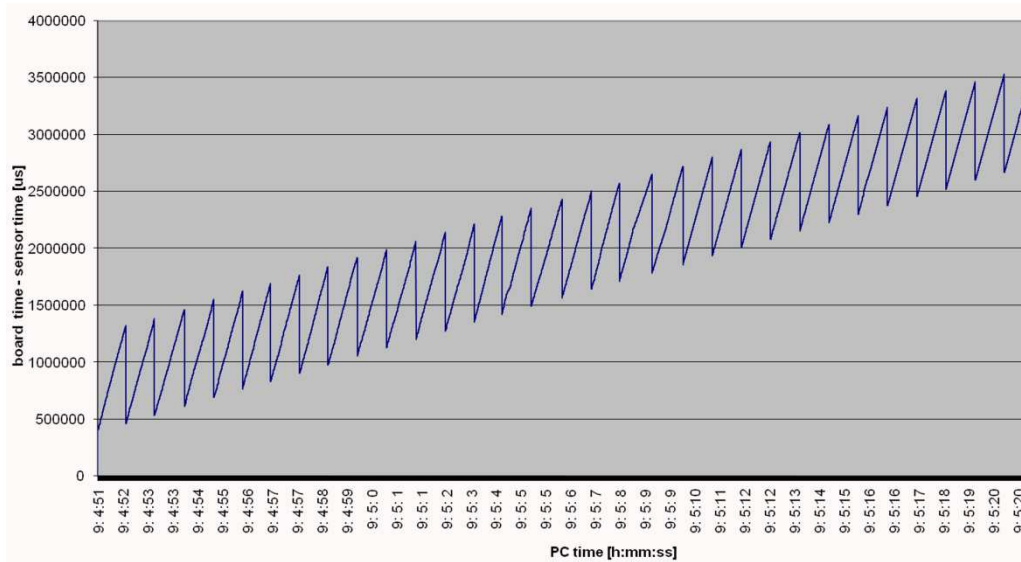


Fig.4.4 Alunecarea de timp ca o diferență în microsecunde între un nod MICAz și o placă de monitorizare. Pe axa verticală avem diferența în microsecunde iar pe axa orizontală timpul sistemului de calcul.

4.3.4 CAN

În 1983, compania *Robert Bosch* a început dezvoltarea unei rețele prin care să înlocuiască sistemele de comunicație „*point-to-point*” între dispozitivele electronice de control dintr-un autovehicul, cu o singură magistrală serială care să interconecteze aceste elemente. Protocoalele de comunicație au fost finalizate în 1986, primele circuite care integrează controler *CAN* fiind comercializate din 1987. Versiunea *CAN 2.0* [80] utilizată în sistemul de achiziție este disponibilă din 1991.

Caracteristicile care au condus la alegerea acestui protocol pentru rețeaua de monitorizare sunt suportul pentru *multicasting* și *broadcasting* precum și posibilitatea de a modifica numărul nodurilor rețelei în mod dinamic, fără a perturba funcționarea celorlalte noduri. Prin protocolul *CAN*, nodurile unei rețele nu au asociate adrese specifice, identificarea destinatarului realizându-se prin intermediul identificatorilor mesajelor care au și rolul de a stabili prioritatea acelor mesaje. Partea de monitorizare a sistemului prototip utilizat în laborator este detaliată din punct de vedere al accesului fizic la rețeaua *CAN* în fig.4.5.

Acesul la nivelul fizic, reprezentat prin cele două linii cu rezistențele de 120Ω se face folosind *CSMA/CA* și o codificare de tip *NRZ*. Astfel, nivelul mediului de comunicație este monitorizat tot timpul de fiecare nod al rețelei, oricare din acestea având posibilitatea de a iniția trimiterea unor mesaje când nu există flux de date. În cazul în care mai multe noduri încearcă să trimită mesaje în același timp, doar unul va continua procesul, iar restul nodurilor sesizând coliziunea, vor aștepta finalizarea transmisiei în curs. Sunt definite două nivele pentru starea mediului de comunicație, unul dominant și unul recesiv. Mecanismul de acces la mediul fizic este de tip ȘI-cablat, prin urmare nivelul recesiv este echivalentul valorii logice „1” iar cel

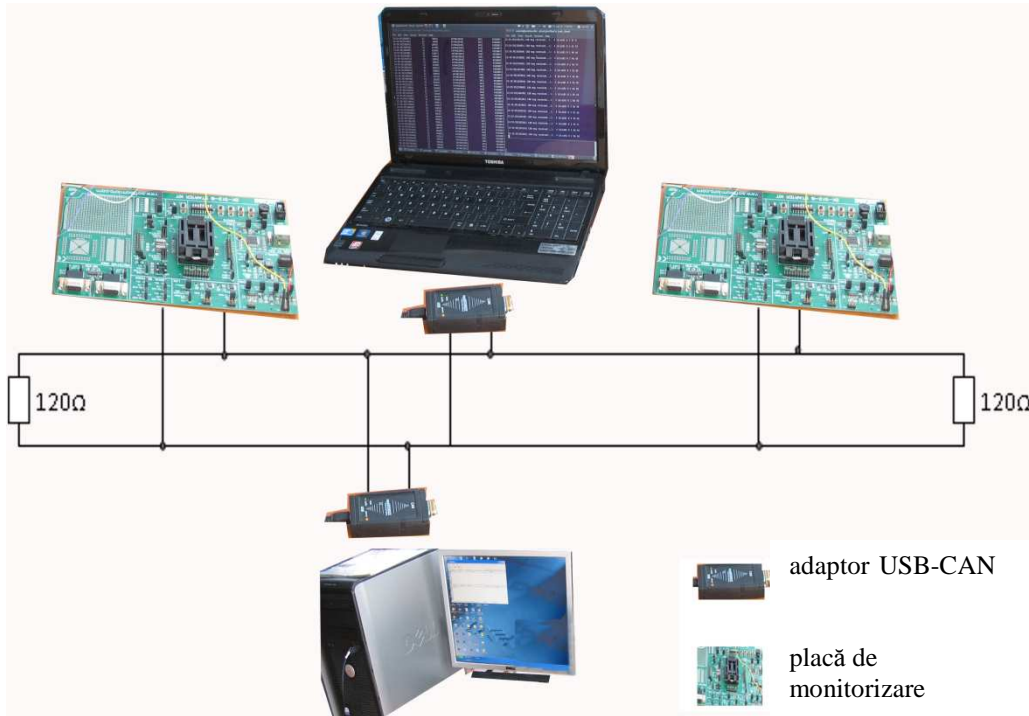


Fig.4.5 Conectarea componentelor la rețeaua CAN.
Sistemele de calcul comunică cu plăcile de monitorizare prin intermediul unor adaptoare USB-CAN.

dominant este similar nivelului logic „0”, deci mediul fizic este în stare recesivă doar dacă toate nodurile transmit valoarea „1”. Arbitrarea în cazul coliziunilor se face în mod nedistructiv, la nivel de bit, un mesaj fiind acceptat de toate nodurile sau de niciunul. Structura acestor mesaje *CAN*, conform specificației 2.0, este descrisă în *Anexa A*.

Prin utilizarea codificării *NRZ* pot apare probleme de sincronizare pentru secvențele mai lungi în care mediul rămâne în stare recesivă sau dominantă, prin faptul că sincronizarea se face pe frontul descrescător. Pentru resincronizarea nodurilor, în timpul transmiterii unui mesaj vor fi maxim 5 biți consecutivi cu aceeași polaritate, în cazul secvențelor mai lungi fiind inserat un bit cu polaritate complementară. Procesul este refăcut pe partea de recepție unde biții de sincronizare inserați sunt detectați și eliminați.

Rata de transfer într-o rețea *CAN* este configurabilă prin stabilirea cuantei de timp pentru un bit și a numărului de cuante care determină fiecare din cele patru segmente care compun un bit: sincronizare, propagare, fază 1 și fază 2. O detaliere a relațiilor între aceste segmente va fi realizată la prezentarea configurației software utilizate.

4.3.5 Fluxul de date

Sistemul pentru monitorizarea senzorilor *WSN* constă într-un număr de plăci echipate cu microcontroler și unul sau mai multe sisteme de calcul prevăzute cu adaptoare *USB-CAN* cu rol de control al fluxului de date prin trimiterea de comenzi către anumite plăci și colectarea datelor trimise ca răspuns de cele din urmă. Ambele tipuri de sisteme, plăci de monitorizare și sisteme de calcul, sunt conectate la aceeași magistrală *CAN*, folosind ca protocol de comunicație *CAN 2.0* și mesaje în format extins [80]. Fiecare placă are atribuit propriul identificator filtrând astfel comenzile care trebuie executate la nivelul acesteia de mesajele adresate altor echipamente. Sistemul de calcul recepționează toate mesajele care circulă pe magistrala *CAN*, filtrarea acestora realizându-se la un nivel superior al aplicației. Sursa unui mesaj de tip răspuns este identificată prin intermediul *ID*-ului acelui mesaj care include identificatorul plăcii, tipul comenzii al cărei răspuns este și, în funcție de comandă, canalul la care se referă informația conținută de acel mesaj. Codificarea acestor informații în *ID*-ul mesajelor fiind principala justificare de a utiliza mesaje *CAN* în format extins.

Mesajele definite pentru sistemul prototip sunt prezentate pe scurt în tabelul 4.1 iar în *Anexa B* sunt detaliate sub forma *Comenzi/Răspunsuri*.

Comandă	Descriere
FFh	Versiunea de software care rulează pe placa de monitorizare
00h	citire canal analogic
01h	citire canal digital
02h	măsurare semnal periodic
03h	comandă ieșire digitală
04h	generare semnal PWM
05h	generare automată de semnale digitale
06h	monitorizarea consumului
07h	
08h	
09h	calibrare canal analogic
0Ah	achiziție semnal analogic cu prelevarea timpului
0Bh	corecție alunecare timp

Tabelul 4.1. Comenzi implementate pe placa de achiziție.

Aplicația creată pentru trimiterea și colectarea mesajelor către/dinspre plăcile de testare este executată pe un sistem de calcul bazat pe o distribuție a sistemului de operare *Linux*. Toate mesajele care circulă pe magistrala *CAN* a sistemului prototip mai sunt colectate și prin aplicația software comercială care rulează pe sistemul bazat pe *Windows*. Ambele tipuri de dispozitive conectate prin rețeaua *CAN* suportă rate de transfer de 1 *Mbit* pe secundă.

4.3.6 Software-ul aplicației

Pentru editarea programelor executate pe plăcile de monitorizare și programarea microcontrolerelor cu codul aferent, s-a utilizat mediul de dezvoltare *CodeWarrior* de la *Freescale*. Programul a fost structurat în trei secțiuni: inițializare, întreruperi și o buclă de tratare a evenimentelor. În fig.4.6 este prezentată interacțiunea dintre aceste secțiuni.

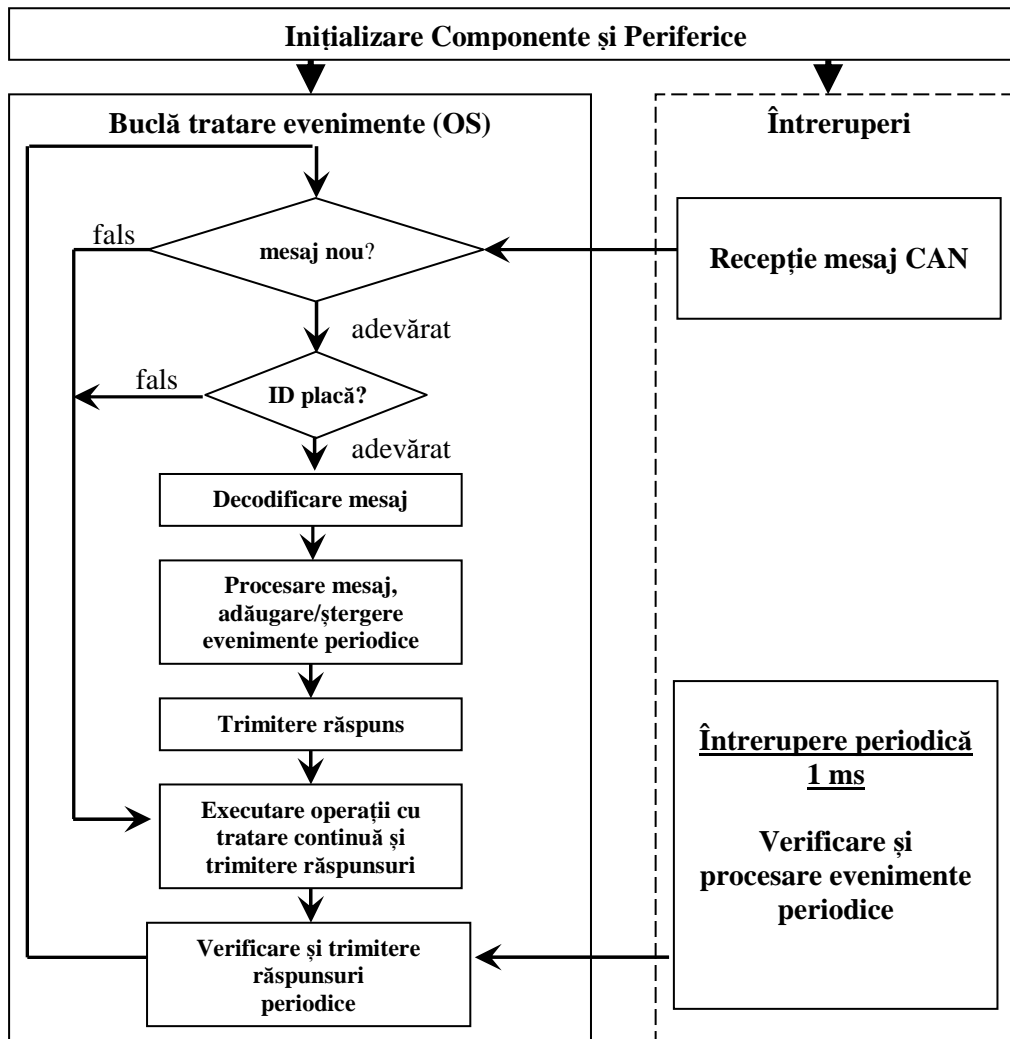


Fig.4.6 Plăcile de monitorizare: fluxul de control între componentele software ale aplicației. Sunt trei tipuri de operații executate: procesare mesaje CAN, executare operații periodice și efectuarea unor operații în mod continuu.

În secțiunea de inițializare sunt configurate porturile microcontrolerului.

- 8 canale configurate ca intrări analogice, cu o rezoluție pe 10 biți, conversie continuă cu 8 conversii efectuate într-o secvență;
- 8 canale configurate ca intrări digitale - PA[0..7];
- 8 canale configurate ca ieșiri digitale - PB[0..7];
- 8 canale configurate ca ieșiri PWM - PP[0..7];
- 7 canale sunt rezervate pentru măsurarea semnalelor periodice PT[0..6]
- a fost configurat un timer din modulul *ECT* pentru a genera o întrerupere la fiecare milisecundă;
- a fost configurat modulul *CAN* pentru a accepta toate mesajele (nu aplică filtre) și a fost activată generarea întreruperilor la recepția mesajelor. Rata de transfer a fost aleasă la 500 *kbps* iar pentru configurarea acesteia s-au parcurs următorii pași:

1) durata unui bit este $t = 1 \cdot (500000 \text{ bps})^{-1} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$;

2) pentru microcontrolerul utilizat, configurarea se face prin intermediul parametrilor *SJW*, *BRP*, *TSEG₁* și *TSEG₂* [83]:

$$t = \frac{BRP_{val}}{f_{CANclk}} (SJW + TSEG_1 + TSEG_2) \quad (4.1)$$

3) fiecare bit este compus din patru segmente de timp, fiecare segment fiind un multiplu de cuante t_q : *sincronizare*, *propagare*, *faza₁* și *faza₂*;

4) citirea bitului se face între ultimele două segmente (*faza₁* și *faza₂* fig.4.7) iar durata acestor segmente trebuie să respecte cumulativ condițiile:

4.a) $8 t_q \leq t \leq 25 t_q$;

4.b) $2 t_q \leq faza_2 \leq 8 t_q$;

4.c) $4 t_q \leq propagare + faza_1 \leq 16 t_q$;

4.d) $SJW \leq 4 t_q$ și $SJW \leq \min\{faza_1, faza_2\}$;

5) segmentul de *propagare* are rol de compensare a întârzierilor datorate propagării semnalului pe magistrala *CAN*. Valorile uzuale sunt cuprinse între $1 t_q$ și $14 t_q$ în funcție de lungimea cablurilor. Având în vedere faptul că la o rată de 500 *kbps* lungimea liniilor poate ajunge la câteva sute de metri iar sistemul de testare este desfășurat într-o sală, pe un spațiu restrâns, se poate alege o valoare mică pentru acest timp ($2 t_q$).

6) uzual, raportul între frecvența semnalului de referință și factorul de prescalare al acesteia este un număr par iar valorile pentru numărul de cuante în *faza₁* și în *faza₂* se aleg să satisfacă una din relațiile $faza_2 = faza_1$ sau $faza_2 = faza_1 + 1$ în funcție de paritatea expresiei:

$$\frac{t - SJW - propagare}{t_q} \quad (4.2)$$

durata unui bit [$8 t_q$.. $25 t_q$]		
SJW [$\leq 4t_q$]	$TSEG_1 = propagare + faza_1$ [$4 t_q$.. $16 t_q$]	$TSEG_2 = faza_2$ [$2 t_q$.. $8 t_q$]

Fig.4.7 Durata unui bit ca sumă de cuante de timp. Momentul prelevării informației este marcat între *TSEG₁* și *TSEG₂*.

7) prin substituirea în (4.1) și în (4.2) a valorilor:

$$SJW = 1 tq, \text{ propagare} = 2 tq, f_{\text{CANclk}} = 16 \text{ MHz}$$

dacă se alege un factor de prescalare: $BRP_{\text{val}} = 4$,

atunci, conform condițiilor de mai sus, se obțin valorile minime:

$$\text{faza}_1 = 2 tq \text{ și } \text{faza}_2 = 3 tq.$$

4.3.7 Concluzii

Prin acest subcapitol au fost prezentate componentele hardware și software ale plăcilor de monitorizare a nodurilor WSN, așa cum au fost utilizate în laborator pentru măsurarea consumului de curent și simularea datelor achiziționate. Acest sistem a fost proiectat ca o arhitectură generică care poate fi îmbunătățită în ce privește precizia măsurărilor efectuate și a performanțelor generale, doar prin înlocuirea microcontrolerului utilizat cu unul mai performant sau chiar cu un sistem dedicat de tip SoC [85].

Acest sistem se comportă ca un mediu de testare cu câteva funcționalități: achiziție de date, generare de semnale în funcție de context și surse multiple pentru furnizarea sau colectarea datelor, surse conectate prin intermediul aceluiași mediu de comunicare.

O limitare a sistemului dezvoltat ca prototip este lipsa facilității de reprogramare a nodurilor prin intermediul rețelei de monitorizare, aceasta nefiind încă implementată. Acest aspect se poate corecta în viitor prin adăugarea unor noi comenzi care să permită trimiterea de mesaje CAN cu conținutul care trebuie reprogramat și programarea nodurilor WSN cu aceste informații prin intermediul liniilor seriale.

O altă limitare a sistemului în forma actuală este legată de scalabilitatea acestuia. Rata maximă de transfer acceptată de dispozitivele utilizate este de 1 Mbaud, astfel încât apare o limitare a numărului de noduri monitorizate prin prisma creșterii numărului de mesaje și a utilizării unui protocol de comunicație care nu presupune o arbitrare a accesului la mediul de comunicație. Posibile direcții de extindere a sistemului în acest caz se pot realiza prin interconectarea sistemelor de calcul printr-o rețea Ethernet dar în acest caz apar alte probleme legate de introducerea unor întâzieri prin folosirea unei aplicații distribuite.

4.4 Interfața cu rețeaua WSN

Interfațarea sistemului de calcul cu rețeaua WSN s-a realizat prin intermediul unui adaptor MIB520 [82] pe care s-a montat un nod MICAz (fig.4.8). Software-ul este executat pe nodul MICAz care are rol de releu, recepționând mesajele pe care sistemul de calcul le trimite către acesta prin interfața USB, le prelucrează sumar și trimite rezultatele prin interfața radio către nodurile MICAz. De asemenea, realizează și fluxul invers de date prin trimiterea către sistemul de calcul a mesajelor primite de la nodurile rețelei WSN

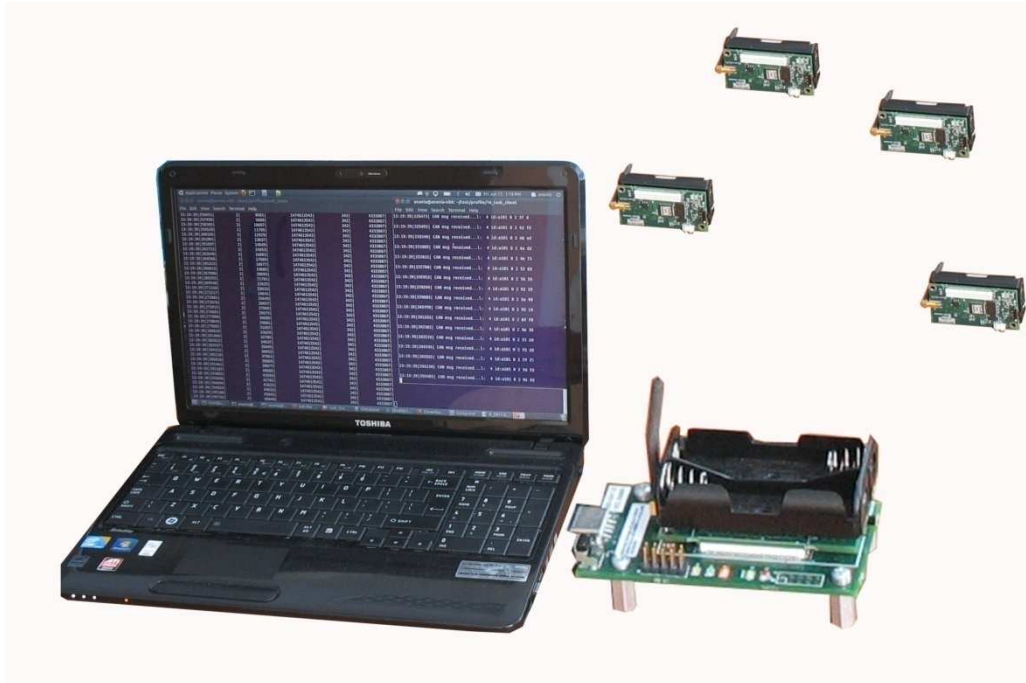


Fig.4.8 Interfața hardware a sistemului de calcul cu rețeaua WSN.
Este utilizat un adaptor MIB520 cu nod MICAz.

4.4.1 Arhitectura

Software-ul creat pentru această interfață a fost dezvoltat pentru a funcționa cu sistemul de operare *TinyOS* [86] fiind utilizat limbajul *nesC* [87] și compilatorul *GCC*. Arhitectura aplicației software este descrisă în fig.4.9.

Aplicația este structurată pe patru module funcționale: inițializare, management interfață *UART*, management interfață radio respectiv procesare și adaptare mesaje.

În etapa de inițializare sunt activate cele două module de comunicație și sunt specificate stările inițiale ale automatelor. În urma activării modulului de comunicație radio, acesta va introduce *task*-ul buclei de procesare în structura de execuție a sistemului de operare, după care, la fiecare mesaj recepționat va apela o funcție de tip eveniment. Modulul de comunicație pe interfața serială se comportă similar, exceptând planificarea spre execuție a funcției de procesare.

Modulul de procesare, se auto-inserează în structura de *task*-uri a sistemului de operare și realizează decodificarea mesajelor, procesarea acestora în vederea extragerii informației utile și reformatării acestora precum și retransmiterea datelor pe cealaltă interfață.

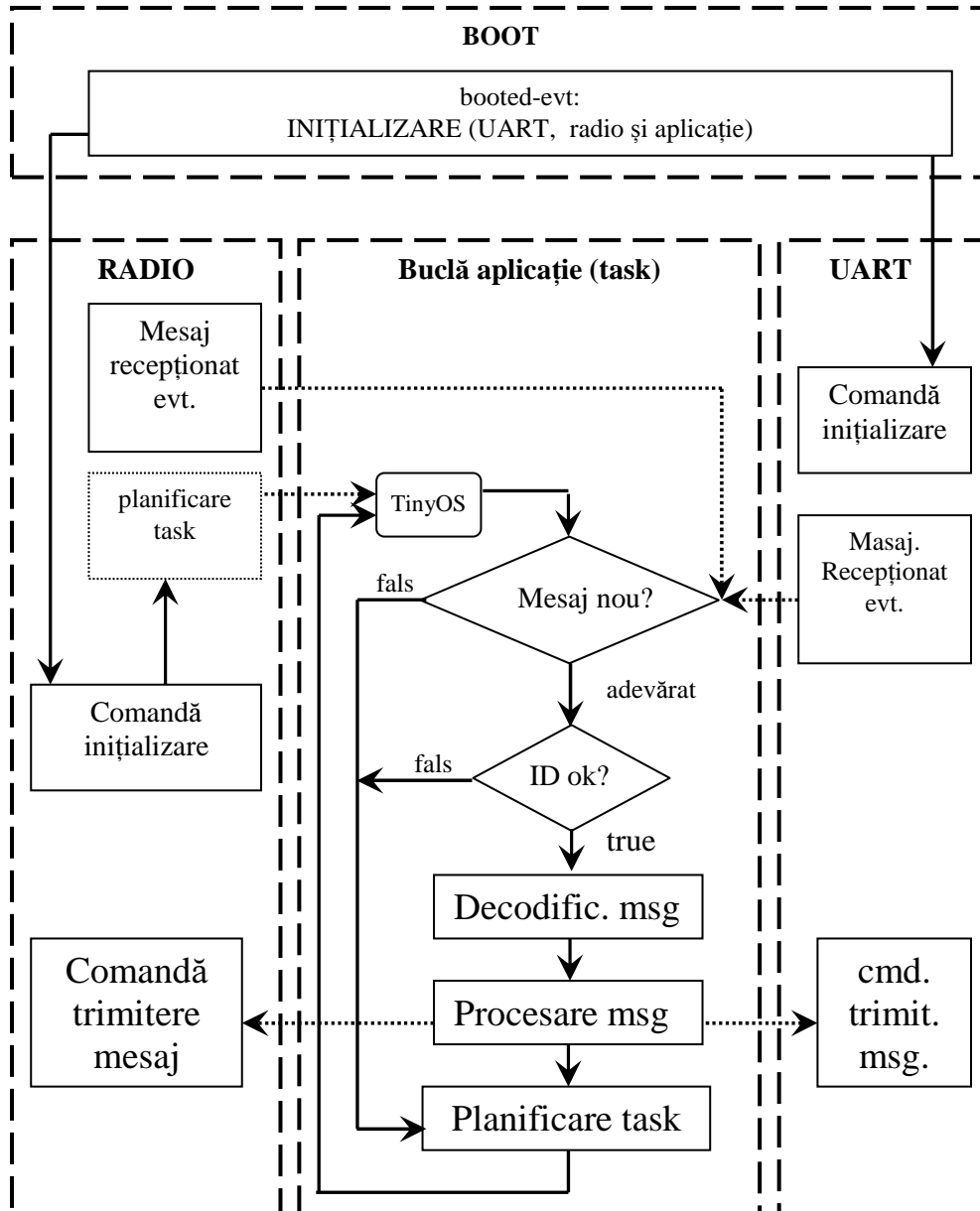


Fig.4.9 Arhitectura interfeței software cu rețeaua WSN.

Figura reprezintă cele 4 module funcționale și relațiile de interdependență.

Sunt utilizate trei automate de stări: câte unul pentru fiecare interfață de comunicație și un automat pentru procesarea informației.

4.4.2 Fluxul de date

Interfața între sistemul de calcul și rețeaua WSN decodifică mesajele primite prin intermediul portului *USB* și în funcție de conținutul câmpului de comandă trimite informația din câmpul de date prin rețeaua radio sau execută alte sarcini. Toate mesajele radio recepționate care sunt adresate sistemului, se reformează și sunt trimise pe linia serială. Acest flux de date și câmpurile corespundente celor două tipuri de mesaje sunt descrise prin fig.4.10.

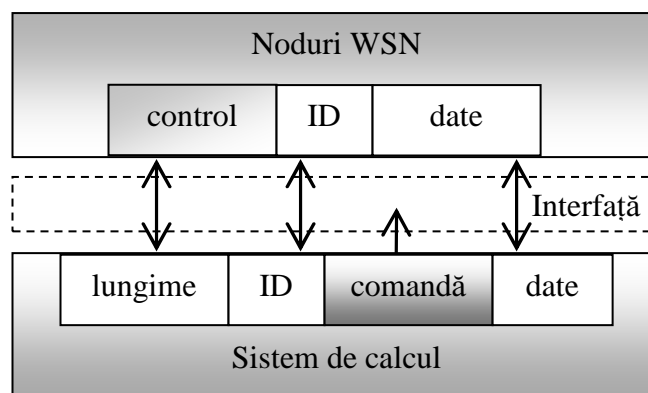


Fig.4.10 Fluxul de date prin interfața cu rețeaua WSN.

Câmpul comandă este prezent doar în mesajele trimise de sistemul de calcul către interfață.

Câmpul ID este identificatorul mesajului și se reprezintă pe doi octeți iar câmpul lungime conține numărul tuturor octeților din mesaj.

4.5 Aplicație software pentru testarea și managementul rețelelor WSN

Sistemele prezentate în subcapitolele anterioare se pot rezuma ca două rețele independente, una care folosește mediul radio pentru comunicație și o a doua cablată care utilizează un protocol de comunicație *CAN*. Liantul între cele două rețele este o aplicație prin intermediul căreia se face managementul ambelor sisteme. Prin acest subcapitol se prezintă arhitectura acestei aplicații software și modul în care se configurează extragerea informației utile din fluxul de date între cele două rețele.

4.5.1 Arhitectura

Aplicația rulează sub sistemul de operare *Linux* și a fost scrisă în *C*. Imaginea de ansamblu a structurii aplicației se regăsește în fig.4.11.

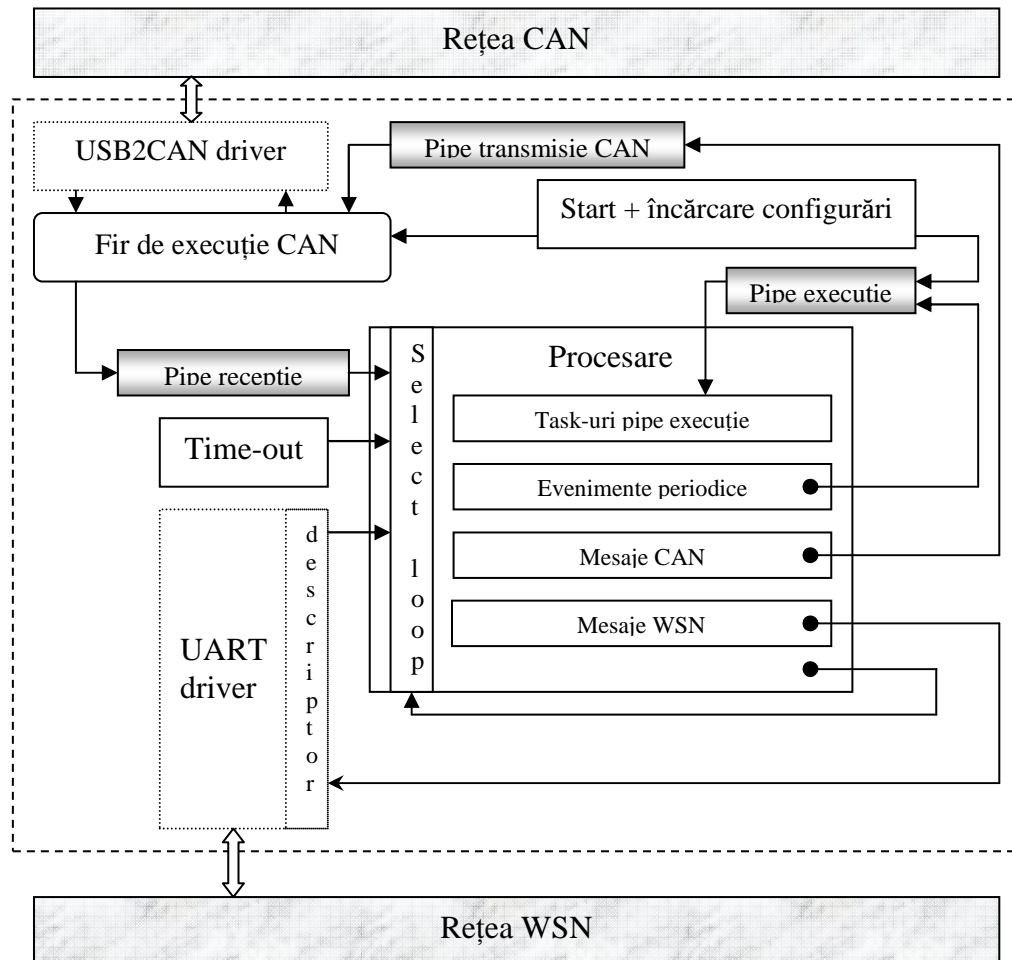


Fig.4.11 Arhitectura aplicației pentru managementul rețelelor CAN și WSN.

Sunt prezentate principalele blocuri de execuție și modul în care acestea interacționează. Partenerul de comunicație pentru schimbul de date cu rețeaua WSN este aplicația software care rulează pe nodul MICAz conectat la adaptorul MIB520. Transferul informației spre/dinspre rețeaua WSN se face prin intermediul unui descriptor de fișier asociat unui port USB. Comunicarea cu rețeaua CAN se face tot prin intermediul unui port USB, într-un fir de execuție separat, folosind funcțiile API ale modulului USB-CAN.

Prin secțiunea de inițializare se vor încărca fișierele de configurare prin care se stabilesc parametrii de comunicație și se va crea un fir de execuție separat pentru managementul fluxului de date pe rețeaua CAN. Numele parametrilor de configurare, valorile posibile și semnificația acestora sunt prezentate în Anexa C.

Blocul principal de execuție este implementat sub forma unei bucle de tip „select”, evenimentele detectate fiind recepția unui semnal pe una din cele două rețele sau evenimentul periodic de o milisecundă. Descriptorii utilizați pentru identificarea mesajelor sunt obținuți prin apel sistem de acces la portul USB în cazul

rețelei WSN respectiv prin crearea unui „pipe” în cazul rețelei CAN. După procesarea evenimentelor detectate în bucla „select”, se execută toate operațiile planificate prin intermediul unui „pipe” de execuție, acesta funcționând pe principiul FIFO, după care se rămâne în bucla „select” în așteptarea unui nou eveniment.

Prin procesarea evenimentelor se realizează: extragerea mesajelor din buffer-ul asociat rețelei respective sau, în cazul evenimentelor periodice, din structura de date asociată mesajelor de trimis, se analizează aceste mesaje și în funcție de criteriile stabilite, dacă sunt mesaje recepționate se vor extrage câmpurile utile spre a fi scrise într-o bază de date, iar în cazul evenimentelor periodice, sunt transmise mesaje corespunzătoare către rețeaua asociată.

Aplicația, în forma actuală, interacționează cu utilizatorul sub forma unor fișiere de configurare respectiv fișiere cu date achiziționate dar oferă suport pentru extensie cu o interfață grafică, respectiv publicarea datelor și recepția comenzilor prin intermediul unor porturi *http*.

4.5.2 Extragerea datelor

Aplicația software comunică cu cele două rețele prin trimiterea și recepționarea de mesaje, scopul final fiind extragerea unor informații legate de starea unor noduri WSN. Pentru cele două operații (comunicare și filtrare date) se folosesc două fișiere de configurare a căror nume se specifică prin parametrii descriși în *Anexa C*, tabelul C.1.

Prin fișierul de configurare a comenzilor se specifică mesajele care trebuie trimise, prin ce rețea vor fi direcționate acestea precum și modul în care se va face transmiterea acestora (periodic sau o singură dată la pornirea aplicației). Datorită faptului că structura mesajelor este diferită în cele două rețele, reprezentarea internă a mesajelor se face ținând cont de particularitățile acestora conform fig.4.12.

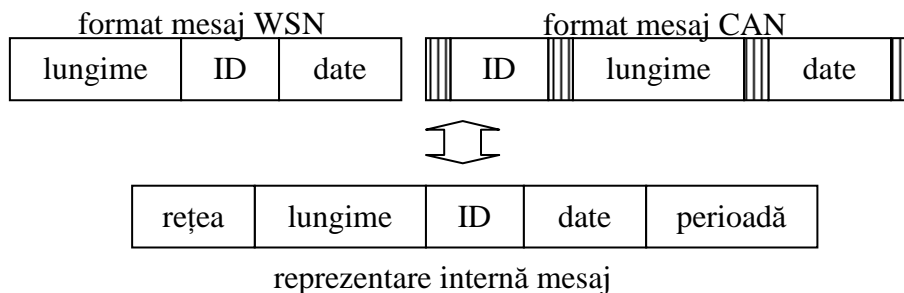


Fig.4.12 Reprezentarea internă a mesajelor.
Sunt evidențiate doar câmpurile utilizate explicit de aplicație.

Câmpurile unui mesaj se identifică prin poziția acestora într-un fișier CSV conform *Anexei D*. Dintre aceste câmpuri, doar identificatorul rețelei și identificatorul mesajului vor fi utilizați pentru filtrarea datelor achiziționate. Astfel, se va utiliza un fișier de tip text tot în format CSV, prin care se vor specifica datele care urmează a fi colectate. Modul în care se configurează datele și formatul în care se extrag este detaliat în *Anexa D*.

4.6 Concluzii

În acest capitol a fost prezentat sistemul dezvoltat în laborator pentru testarea rețelelor *WSN* și pentru validarea aplicațiilor concepute să folosească aceste rețele. Elementele de noutate invocate sunt flexibilitatea și generalitatea soluției utilizate ca „*testbed WSN*”.

Sistemul este conceput în jurul unei rețele *CAN* prin intermediul căreia circulă mesaje de comandă și control. Prin această rețea *CAN* s-au conectat plăci electronice cu microcontroler, cu rol de monitorizare a nodurilor *WSN* și de generare de semnale pentru simularea achiziției de date din mediul ambiant prin intermediul senzorilor. Din punct de vedere al principiului de funcționare sunt trei componente ale acestui sistem: un sistem de calcul care trimite și recepționează mesaje în/din cele două rețele (*CAN* și *WSN*), noduri *WSN* și noduri *CAN*. Pentru realizarea acestui sistem au fost concepute aplicații software pentru sistemul de calcul, pentru nodurile *CAN*, nodurile *WSN* și punctul de acces în rețeaua *WSN*.

Acest sistem îndeplinește scopul pentru care a fost conceput dar are unele limitări. Sistemul lucrează în prezent folosind doar fișiere de configurare, interactivitatea acestuia fiind limitată de inexistența unei interfețe grafice, chiar dacă pentru mesajele de trimis în rețeaua *CAN* se pot folosi în același timp și aplicații grafice comerciale. Totuși, sistemul a fost conceput pentru a permite dezvoltări ulterioare, inclusiv adăugarea unei interfețe grafice utilizator. O altă limitare a soluției propuse este comună soluțiilor de testare hardware și este legată de scalabilitatea acesteia. Rata maximă de transfer suportată de adaptorul *USB-CAN* și de microcontrolerul utilizat este de 1 *Mbit* pe secundă. Astfel, numărul nodurilor monitorizate prin intermediul aceleiași rețele *CAN* sau caracteristicile care pot fi utilizate simultan, sunt limitate de fluxul de date implicat. Pentru a reduce impactul acestor neajunsuri, rata de transfer pe magistrala *CAN* se poate îmbunătăți prin utilizarea unui microcontroler și unor adaptoare *CAN* mai performante. Alte direcții de dezvoltare ar fi crearea unei rețele *Ethernet* pentru interconectarea sistemelor de calcul asociate unor rețele *CAN* diferite și crearea unor aplicații distribuite capabile să monitorizeze un număr mare de senzori *WSN* de la distanță.

5. MONITORIZAREA ENERGIEI ÎN NODURILE WSN

5.1 Sisteme pentru monitorizarea consumului de energie

Consumul de energie este un element critic, acesta determinând durata de utilizare a dispozitivelor electronice care folosesc baterii ca surse de alimentare, în special în aplicațiile unde înlocuirea bateriilor este dificilă sau presupune costuri foarte mari. O astfel de situație se întâlnește în cazul rețelelor de senzori WSN desfășurate în zone inaccesibile. O metodă eficientă de reducere a costurilor totale (dezvoltare și utilizare) a acestor rețele este prelungirea duratei de funcționare a rețelei prin utilizarea unor strategii și unor algoritmi care țin cont de valoarea consumului de energie, în special prin calibrarea achiziției datelor și reorientarea fluxului de date ținând cont de energia disponibilă. Prin utilizarea informației despre energia disponibilă în luarea unor decizii, au fost obținute chiar prelungiri ale duratei de funcționare a rețelelor WSN de până la 3 ori durata de funcționare a acelei rețele în cazul în care deciziile erau luate pe baza unor probabilități [87].

Sunt două tipuri de metode utilizate pentru monitorizarea consumului de energie la nivelul unui nod WSN:

monitorizarea offline realizată experimental în laborator, prin utilizarea unor echipamente de măsurare a consumului de energie pe unele noduri care funcționează într-o rețea similară aplicației dar la scară redusă. Acest gen de monitorizare este realizată prin intermediul sistemului de testare folosind plăci de monitorizare, prezentat în capitolul precedent. În această categorie se încadrează de asemenea simulatoarele și emulatoarele de rețele WSN. Printre sistemele de monitorizare offline utilizate în prezent se regăsesc: *PowerBench* [77], *PowerTOSSIM* [67], *AEON* [71] sau *MoteLab* [74].

monitorizarea online este realizată dinamic în timp ce rețeaua este utilizată în deservirea aplicației pentru care a fost proiectată. Sunt trei tipuri de soluții utilizate pentru monitorizarea online a consumului de energie în nodurile WSN:

soluții software - au fost identificate doar trei sisteme de monitorizare online prin software: *Levels* [7] soluția dezvoltată de Kellner și colaboratorii săi [8] în care se folosește un model teoretic calibrat cu măsurători precise, și o soluție cu profile definite în funcție de consumul de energie ținând cont de starea principalelor componente ale unui nod (microcontroler și transceiver), soluție prezentată de Dunkels și colaboratorii în [9].

soluții hardware - în această categorie de sisteme online se încadrează platforma *JAWS* [5] de la *ETH*, unde senzorii de tip *BTNode* sunt prevăzuți cu module capabile să monitorizeze consumul nodurilor și să trimită această informație prin mesaje radio. O altă soluție hardware de monitorizare a nodurilor WSN este *SPOT* [6].

estimare pe baza fluxului de date - prin această metodă se estimează

energia consumată de către un nod al rețelei WSN prin prisma mesajelor care au ajuns la centrul de colectare și au ca sursă nodul respectiv. Această metodă nu are implicații la nivelul nodurilor dar este cea mai puțin recomandată din punct de vedere al preciziei estimărilor prin faptul că nu se ține cont de consumul datorat transceiver-ului în mod recepție mesaj, de consumul datorat achiziției de date sau de starea în care operează microcontrolerul. O îmbunătățire a preciziei se poate realiza prin monitorizarea tuturor mesajelor care circulă la nivelul unui nod dar și în acest caz estimarea este mult mai puțin precisă decât în cazul sistemelor anterioare.

5.2 Monitorizarea offline a consumului de energie

În tabelul 5.1 sunt evidențiate caracteristicile pe care un sistem pentru monitorizarea consumului de energie trebuie să le satisfacă, fiind luate ca referință datele tehnice ale unui nod MICAz [88] împreună cu câteva din plăcile de extensie compatibile [89].

Dispozitiv	Consum de curent pe modul		
	Modul	Consum de curent	Mod
Nod	Procesare	8 mA	activ
Nod	Procesare	< 15 μ A	sleep
Nod	Comunicare	19.7 mA	recepție
Nod	Comunicare	17.4 mA	transmisie
Nod	Comunicare	20 μ A	așteptare
Nod	Comunicare	1 μ A	Sleep
Senzor	MTS400/MTS420	< 1 mA	Accelerometru
Senzor	MTS420	60 mA	GPS

Tabelul 5.1. Consumul nodurilor MICAz și al unor plăci de extensie MTS [88,89].

Se observă o plajă foarte mare de variație a curentului consumat, de la câțiva microamperi, în modul „sleep”, până la zeci de miliamperi în modul de operare „activ” și utilizarea unor senzori cu consum mare. De asemenea, în timpul operării într-o stare activă se pot distinge diferite profile de consum în funcție de modificări ale stării transceiver-ului, ale ratei de eșantionare, încălzirea unor electrozi, etc. Două metode enunțate în capitolul 2 se pretează monitorizării consumului de curent în nodurile WSN: măsurare continuă a consumului de curent prin intermediul unor echipamente hardware integrate [6], respectiv estimare pe baza unor profile de consum determinate anterior. Precizia estimării, în cazul celei de a doua metode, poate fi îmbunătățită prin identificarea corectă a diferitelor profile de consum și prin creșterea preciziei măsurărilor efectuate. Ambele metode pot fi validate prin intermediul unui mediu de testare care să permită controlul

simultan al comportamentului mai multor noduri *WSN* care interacționează între ele. Pentru măsurarea simultană a consumului de curent pe mai multe noduri, este necesar un sistem de achiziție de date cu mai multe canale, capabil să comute automat între diferite plaje de curent, dar un astfel de dispozitiv este prohibitiv în cazul utilizării unui număr mare de noduri. În acest context, un sistem de achiziție de date bazat pe un microcontroler mai ieftin poate fi adaptat ținând cont de constrângerile la nivelul unui nod *WSN*, cât și de problemele de sincronizare a datelor primite pe canale diferite sau chiar de la sisteme de achiziție diferite.

Pentru monitorizarea consumului de curent în nodurile *MICAz*, un sistem de achiziție de date trebuie să detecteze curent electric în plajele: 0 - 1 mA; 1 - 10 mA; 10 - 100 mA respectiv mai mult de 100 mA. Scăderea preciziei, ca o consecință a rezoluției convertorului analog-numeric din microcontroler are un impact limitat de timpul în care un nod *WSN* lucrează în regimuri cu consum ridicat. Prin prisma numărului limitat de intrări analogice vis-a-vis de scalabilitatea nodurilor rețelei, o caracteristică necesară pentru un sistem de achiziție de date este posibilitatea de a fi interconectat cu alte sisteme similare și să permită comunicarea consumului de curent într-un mod flexibil.

Această cerință este implementată pe platforma de testare, prezentată în capitoul anterior, într-un mod care poate fi configurat utilizând comenzi care se trimit pe magistrala *CAN* și componente hardware: tranzistoare bipolare și rezistențe de șunt. Principiul conectării acestor componente cu nodurile *WSN* și placa de monitorizare este prezentat în fig.5.1, fără a se ține cont de amplificarea semnalului și de filtrarea acestuia.

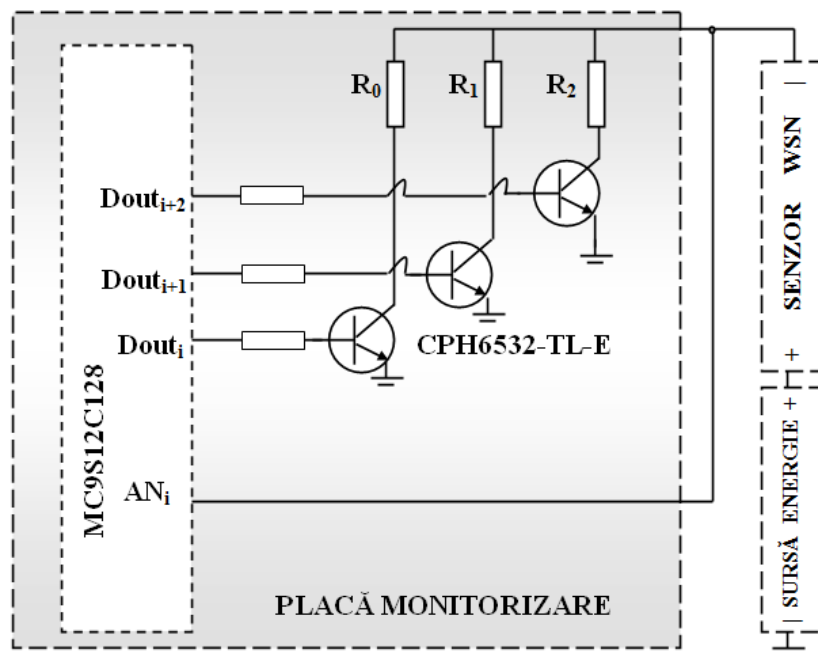


Fig.5.1 Monitorizare offline a consumului de energie în nodurile *WSN*. Sunt utilizate tranzistoare pentru selecția automată a plajei de curent sau pentru a controla cuplarea/decuplarea nodurilor la/de la sursa de alimentare.

Nodurile *WSN* sunt conectate la electrodul pozitiv al bateriei, iar prin intermediul rezistențelor de șunt la colectorii mai multor tranzistoare bipolare *NPN* cu rol de întrerupătoare. Aceste întrerupătoare sunt comandate prin canalele microcontrolerului configurate ca ieșiri digitale, un singur tranzistor fiind saturat în regim de operare pe o plajă de curent. Două tranzistoare sunt în saturație în cazul tranzițiilor de la o plajă la alta, astfel încât nodul nu va fi deconectat la schimbarea semnificativă a consumului de curent. Emitorii tranzistoarelor sunt legați la masă, iar căderea de tensiune pe rezistențele de șunt este folosită pentru determinarea consumului de curent. Această tensiune împreună cu diferența de potențial pe joncțiunea colector-emitor sunt captate prin intermediul unui canal analogic de către microcontroler.

Calibrarea sistemului se face tot prin intermediul unor comenzi trimise pe magistrala *CAN*, ținând cont de variațiile de tensiune maxime admise la alimentarea senzorului *WSN* fără a afecta comportamentul acestuia. Această diferență de potențial este utilizată și în determinarea tensiunii de referință la convertorul *analog-numeric* de pe microcontroler cât și pentru dimensionarea corectă a rezistențelor de șunt pentru fiecare interval. Software-ul care rulează pe microcontrolerul plăcii va comanda deschiderea acestor întrerupătoare în funcție de valorile de prag trimise anterior prin intermediul mesajelor *CAN*. Acest software folosește o structură de date pentru memorarea plajei de curent active și a condițiilor de identificare a limitelor acesteia, iar schimbarea plajei se face automat, comportamentul plăcii fiind dat de valoarea semnalului pe canalul analogic specificat, pragurile configurate dinamic și operatorii relaționali asociați acestor praguri.

Conținutul celor trei comenzi prin care se calibrează monitorizarea offline a consumului de curent este descris în *Anexa B*, alături de codurile operatorilor relaționali implementați (tabelul B.1).

Flexibilitatea platformei de testare permite integrarea mai multor modele ale bateriei și evaluarea simultană a energiei disponibile la nivel de nod prin intermediul acestora, utilizând parametrii bateriei specificați prin intermediul mesajelor *CAN*.

5.3 Monitorizarea online a consumului de energie

5.3.1 Modelul Matematic

Soluțiile actuale de monitorizare a consumului prin software pe baza unor estimări, pot fi asociate unor extreme: unele bazându-se pe modele matematice complexe implicând resurse de calcul semnificative, altele având o abordare minimalistă, fiind mai potrivite din punct de vedere al resurselor de calcul necesare, dar neindicate prin prisma preciziei. În acest context, s-a încercat o abordare uniformă pentru soluțiile de monitorizare hardware, acestea fiind o referință din punct de vedere al preciziei, și soluțiile software de monitorizare bazate pe profile de consum, acestea din urmă implicând un necesar minim de resurse (timp procesare, energie consumată, etc.). Dacă se iau în considerare valorile consumului de curent care pot fi obținute utilizând fiecare din aceste metode se va obține un interval continuu pentru soluțiile hardware respectiv o mulțime cu câteva valori discrete în cazul estimărilor bazate pe profile de consum, conform fig.5.2.

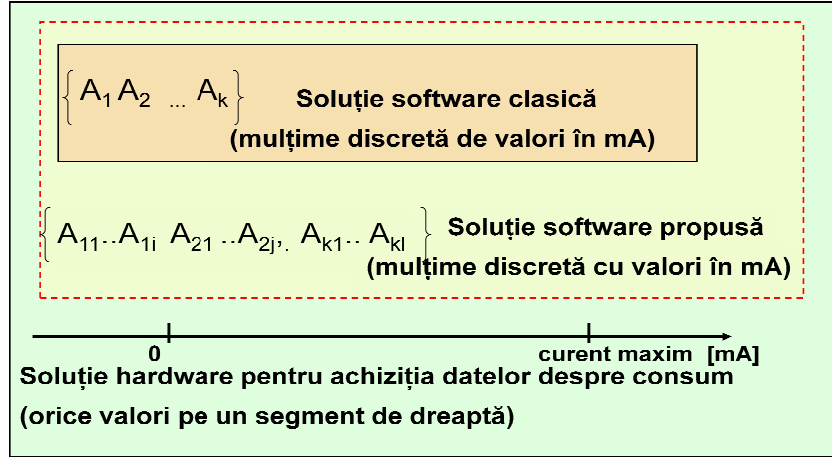


Fig.5.2 Domeniul valorilor reprezentate pe cele 3 soluții de monitorizare online. Interval continuu pentru soluția hardware, o mulțime cu k elemente pentru soluția clasică, respectiv o mulțime cu un număr mult mai mare de elemente pentru soluția propusă.

Pentru soluția hardware s-a plecat de la premisa că un instrument cu precizie bună are o rezoluție foarte mare și domeniul de valori poate fi considerat ca un interval continuu, între 0 și consumul maxim posibil. Soluția clasică bazată pe profile de consum oferă doar o mulțime limitată de valori posibile. Dacă presupunem că soluția de monitorizare software folosește un număr n de stări de consum pentru CPU, un număr m de stări definite pentru modulul de comunicație și l niveluri de putere diferite pentru unitatea de achiziție, atunci numărul total k de valori care pot fi obținute prin monitorizarea online este dat de relația:

$$k = m \times n \times l \quad (5.1)$$

Prin măsurătorile efectuate în laborator, s-a observat că există mici modificări în consumul de curent, chiar dacă starea microcontrolerului nu se schimbă și nici starea celorlalte două module (*transceiver*-ul și unitatea cu senzori). Aceste modificări sunt legate de activitățile realizate la nivelul microcontrolerului în timp ce rulează în starea specificată. Există de asemenea schimbări cu o dinamică ridicată în consumul de energie care nu pot fi abordate printr-un nivel constant, pentru o anumită perioadă de timp (de exemplu vârfuri de consum datorate numărătoarelor). Prin urmare, s-au definit două tipuri de activități: *statice* și *dinamice*. Generalizând acest aspect și pentru celelalte două module, se poate defini impactul unui modul asupra profilului de consum de energie ca o sumă de activități de acest gen, nominalizate ca *factori statici concurenți*. Luând în considerare faptul că stările unui modul nu pot apărea simultan, atunci posibilitățile de a combina N factori concurenți pentru un modul cu n stări distincte sunt date de relația $n \cdot C_{N-n}^i$, iar numărul total de valori în cadrul mulțimii asociate aceluiași modul este:

$$n \cdot \sum_{i=1}^{N-n} C_{N-n}^i = n \cdot (2^{N-n} - 1)$$

Înlocuind aceste valori în relația (5.1) se obține numărul total de valori care pot fi estimate prin intermediul soluției propuse ca fiind:

$$k = m \cdot (2^{M-m} - 1) \times n \cdot (2^{N-n} - 1) \times l \cdot (2^{L-l} - 1) \quad (5.2)$$

Astfel, în cazul în care doar numărul de profile din soluția clasică (doar stările modulelor) sunt utilizate ca factori statici în relația (5.2), se va obține ecuația (5.1) ca un caz particular al soluției propuse. Având în vedere relația (5.2), este trivial faptul că adăugarea de noi factori statici implică o creștere exponențială de profile de consum detectate de aplicație (valori mai mari pentru M , N și L), astfel precizia soluției propuse tinzând către precizia obținută pentru soluțiile hardware de monitorizare.

Prin soluția propusă, profilul de consum P_t poate fi estimat ca o sumă a factorilor statici concurenți, activi în momentul respectiv. *Consumul total se poate determina ca o sumă a tuturor factorilor dinamici și a factorilor statici integrați pe intervalele de timp în care au fost activi.*

5.3.2 Implementarea

S-a urmărit obținerea unui sistem de monitorizare software capabil să furnizeze în timp real o estimare precisă a consumului de energie, puterea totală consumată de când senzorul este operațional, precum și timpul scurs de când nodul se află în profilul de consum curent. Acest sistem de monitorizare nu este legat de o familie specifică de senzori și poate fi integrat în diferite tipuri de aplicații. Alte caracteristici ale acestui sistem sunt:

- ușor de integrat; sunt necesare apeluri de comenzi și doar în cazul utilizării memoriei nonvolatile pentru memorarea consumului total trebuie implementate evenimentele pentru accesul la memoria de tip Flash.
- onsum de energie suplimentar foarte mic;
- puține resurse de calcul necesare; numărul de operații implicate este prezentat în tabelul 5.2, iar memoria necesară pentru alocarea codului și a datelor este detaliată în tabelul 5.3.

operație	număr operații necesare
atribuire	10
apel funcție	2
înmulțire (32 biți)	2
adunare	3
scădere	3

Tabelul 5.2. Resursele de calcul necesare pentru fiecare factor de consum monitorizat pe nodurile MICAz.

Cauza	ROM [octeți]	RAM [octeți]
pachet monitorizare	2010	27
necesar / factor monitorizat adăugat	24	-

Tabelul 5.3. Consumul de memorie datorat aplicației de monitorizare pe nodurile MICAz.

Utilizând terminologia *TinyOS-nessC*, aplicația pentru monitorizarea consumului de energie a fost concepută sub forma unui pachet cu 3 componente:

1) o interfață (fișierul ConsProfile.nc):

```

01: interface ConsProfile {
02: command uint64_t getConsumed(); // returnare consum total
03: command void updateCons(int32_t cons,uint32_t t);}
04: // actualizare consum total cu factori dinamici identificati
05: // sub forma perechilor consum-timp
06: command void setConsProfile(uint32_t cons);//restabilire profil cnt
07: command void addConsProfile(uint32_t cons);//activare factor static
08: command void subConsProfile(uint32_t cons);//eliminare fct. static
09: command uint32_t getConsProfile(); // returnare consum actual
10: command uint32_t getProfileTime(); // returnare profil actual
11: #ifdef IMPLM_LOG
12: //operatii memorie flash
13: command error_t storeConsumed(); // salvare informatii consum
14: // in memoria FLASH
15: event void consStored(error_t err);// recuperare informatii despre
16: // consum din memoria FLASH
17: command error_t recoverConsumed();
18: event void consRecovered(error_t err);
19: #endif
20: }

```

2) o configurație (fișierul ConsProfileC.nc):

```

01: configuration ConsProfileC
02: { provides interface ConsProfile;}
03: implementation {
04: components ConsProfileP, CounterMicro32C, MainC;
05: # ifdef IMPLM_LOG
06: components new LogStorageC(VOLUME_SYNCLOG, FALSE);
07: # endif
08: ConsProfile = ConsProfileP.ConsProfile;
09: ConsProfileP.Boot -> MainC;
10: ConsProfileP.Timer0 -> CounterMicro32C;
11: # ifdef IMPLM_LOG
12: ConsProfileP.LogWrite-> LogStorageC;
13: ConsProfileP.LogRead -> LogStorageC;
14: # endif
15: }

```

3) o componentă de implementare (fișierul ConsProfileP.nc).

Integrarea sistemului de monitorizare într-o aplicație se face în două etape. Prima constă în izolarea factorilor, atât statici cât și dinamici, și determinarea consumului de curent introdus de aceștia prin măsurători efectuate în laborator. Acuratețea estimărilor va fi condiționată de precizia măsurătorilor efectuate în acest pas. A doua etapă presupune integrarea pachetului de monitorizare în codul aplicației și asocierea valorilor măsurate anterior la factorii monitorizați utilizând comenzile specifice aceluși tip de factor.

5.3.3 Studii de caz

Pentru validarea sistemului de monitorizare online a consumului de energie s-au folosit două abordări diferite ale aceleiași aplicații: *incrementarea unui numărător și aprinderea LED-urilor de pe senzorul MICAz conform cu valoarea acestuia*. Prima metodă de aprindere a *LED*-urilor folosește un *task* care se auto-inserează în lista de execuție astfel încât microcontrolerul este întotdeauna în aceeași stare de funcționare, consumul implicat de această metodă fiind exemplificat prin fig.5.3. Se poate observa că fiecare *LED* are propriul profil de consum. A doua metodă folosește un *timer* pentru a genera evenimente periodice, incrementarea contorului și aprinderea *LED*-urilor realizându-se pe evenimentele asociate aceluși *timer*. Consumul implicat de această metodă este prezentat în fig.5.4. Comparativ cu metoda anterioară se observă funcționarea microcontrolerului într-un regim cu consum redus și trecerea acestuia în starea de funcționare din metoda anterioară doar pentru momente scurte de timp, treceri datorate managementului *timer*-elor la nivelul sistemului de operare.

Rezultatele obținute prin estimarea curentului consumat utilizând metoda de monitorizare propusă pe ambele implementări, sunt prezentate în figurile următoare, unde alături de valorile măsurate prin intermediul sistemului de monitorizare dezvoltat în laborator este reprezentată și diferența între cele două valori. Pentru a evidenția modul în care factorii dinamici influențează eroarea estimată, estimările următoare sunt realizate doar pe baza factorilor statici.

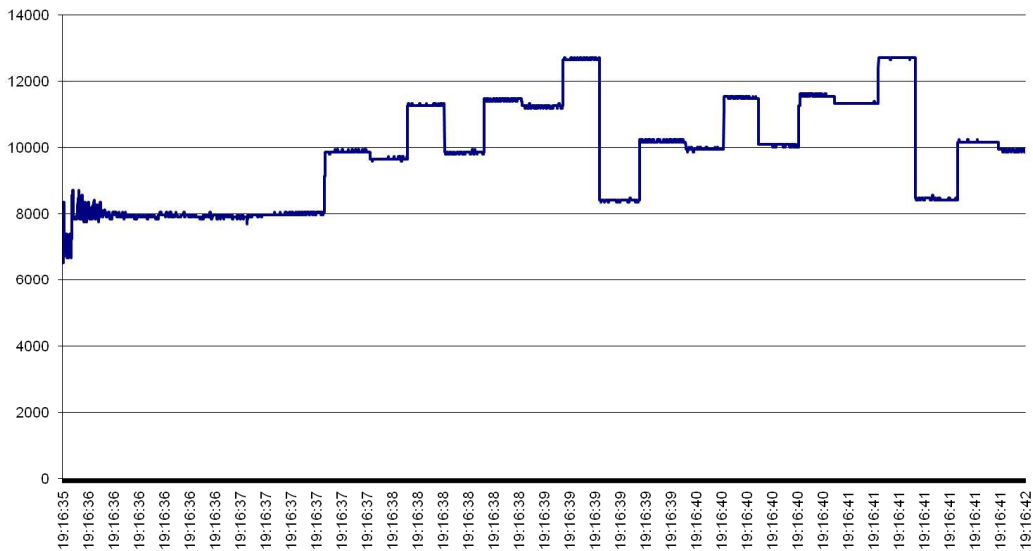


Fig.5.3 Consumul implicat de aprinderea *LED*-urilor folosind *task*-uri. Pe verticală sunt reprezentate valorile în μA achiziționate prin sistemul de monitorizare, iar timpul sistemului de calcul este trecut pe axa *Ox*. Etapele de consum sunt: start-up, *LED0*, *LED1*, *LED1+LED0*, *LED2*,

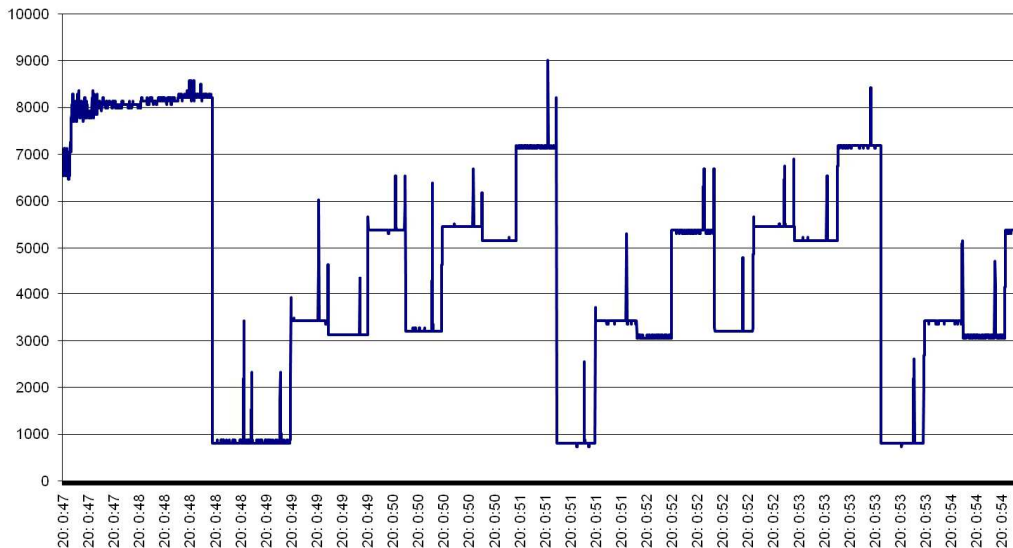


Fig.5.4 Consumul implicat de aprinderea LED-urilor folosind timer-e.

Pe verticală sunt reprezentate valorile în μA achiziționate prin sistemul de monitorizare, iar timpul sistemului de calcul este trecut pe axa Ox. Etapele de consum sunt: start-up, LED0, LED1, LED1+LED0, LED2,....

Fig.5.5 și fig.5.6 oferă o privire de ansamblu asupra consumului pentru implementarea aplicației prin *task-uri*, respectiv pentru implementarea utilizând *timer-e*.

Prin fig.5.7, fig.5.8, fig.5.9 și fig.5.10, se detaliază datele obținute pentru etapele de *start-up*, pornire transceiver, trimitere mesaj radio respectiv aprindere a LED-urilor în cazul implementării prin *task-uri*. Se pot distinge ca factori statici activarea *transceiver*-ului, LED-urile și trimiterea mesajelor, în timp ce etapa de pornire trebuie implementată ca un factor dinamic, la nivelul aplicației neavând control asupra operațiilor efectuate. În fig.5.11 este prezentată eroarea acumulată, observându-se o diferență foarte mare la început care apoi tinde să scadă. Causa pentru aceste diferențe este necalibrarea factorului dinamic de *start-up* (corecția dinamică pentru consumul în etapa de start este 0) și luarea în considerare a consumului datorat trimiterii mesajelor radio, la nivelul unui nod WSN, doar după ce acest mesaj a fost trimis, prin aceasta din urmă justificându-se tendința de scădere a erorii cumulate, eroarea datorată mesajelor fiind negativă.

Fig.5.12, fig.5.13, fig.5.14, și fig.5.15 prezintă datele obținute pentru *start-up*, vârfurile datorate schimbării stării microcontrolerului prin managementul *timer*-elor la nivelul sistemului de operare, trimiterea mesajelor radio respectiv aprinderea LED-urilor. Se pot distinge ca factori statici pornirea *transceiver*-ului, LED-urile, în timp ce etapa de pornire și influența *timer*-elor trebuie implementate ca factori dinamici. Eroarea acumulată în cazul implementării prin evenimente periodice este prezentată în fig.5.16, și în acest caz diferența mare de la început fiind determinată, similar cu situația descrisă la implementarea prin *task-uri*, de lipsa corecției prin factori dinamici a consumului din etapa de start.

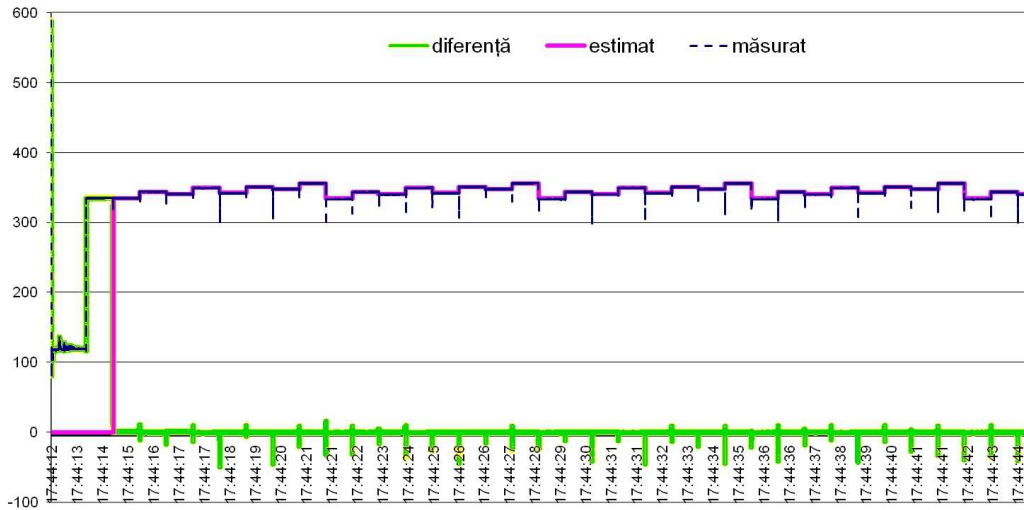


Fig.5.5 Estimarea consumului aplicației client implementată cu task-uri.

Etapele de consum sunt: start-up, transceiver-on, LED0, trimite mesaj, LED1,...
Pe verticală sunt valorile logice achiziționate de sistemul de monitorizare, iar timpul sistemului de calcul este trecut pe axa 0x.

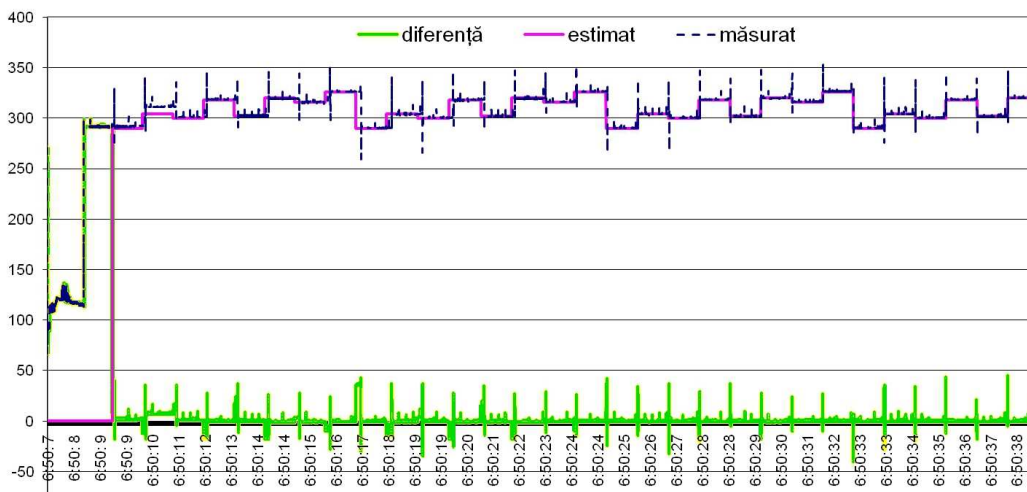


Fig.5.6 Estimarea consumului aplicației client implementată cu timer-e.

Etapele de consum sunt: start-up, transceiver-on, LED0, trimite mesaj, LED1,...
Pe verticală sunt valorile logice achiziționate de sistemul de monitorizare, timpul sistemului de calcul fiind reprezentat pe axa 0x.

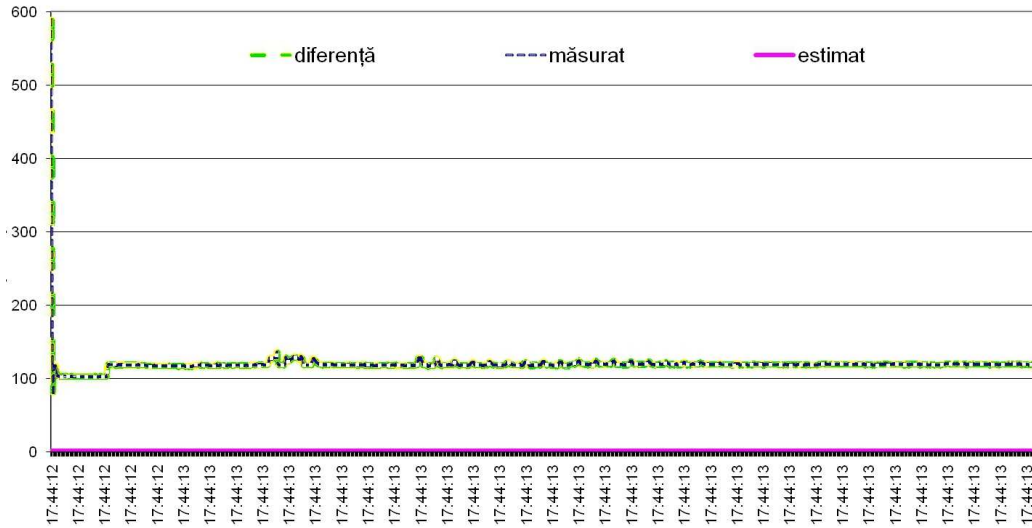


Fig.5.7 Profilul de start-up la implementarea cu task-uri.

Pe verticală sunt valorile logice achiziționate de sistemul de monitorizare, iar timpul sistemului de calcul este trecut pe axa 0x. Se observă că în această etapă nu există estimări ale factorilor de consum.

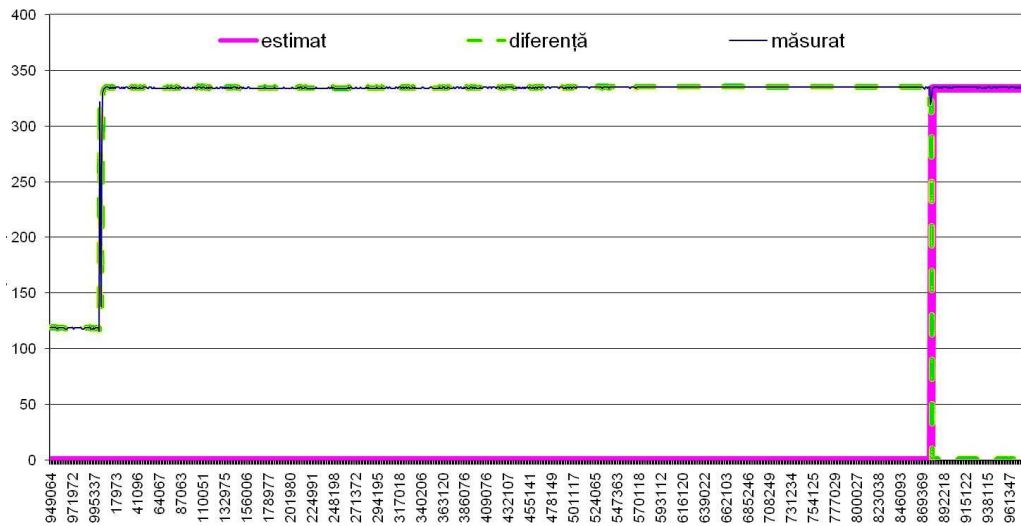


Fig.5.8 Consumul datorat pornirii transceiver-ului la implementarea cu task-uri.

Pe axa 0x este reprezentată referința de timp, în μs , pe sistemul de calcul, în timp ce pe axa 0y sunt trecute valorile logice achiziționate prin sistemul de monitorizare. Până la stabilirea comunicației cu nodul WSN nu există mesaje recepționate cu valoarea consumului.

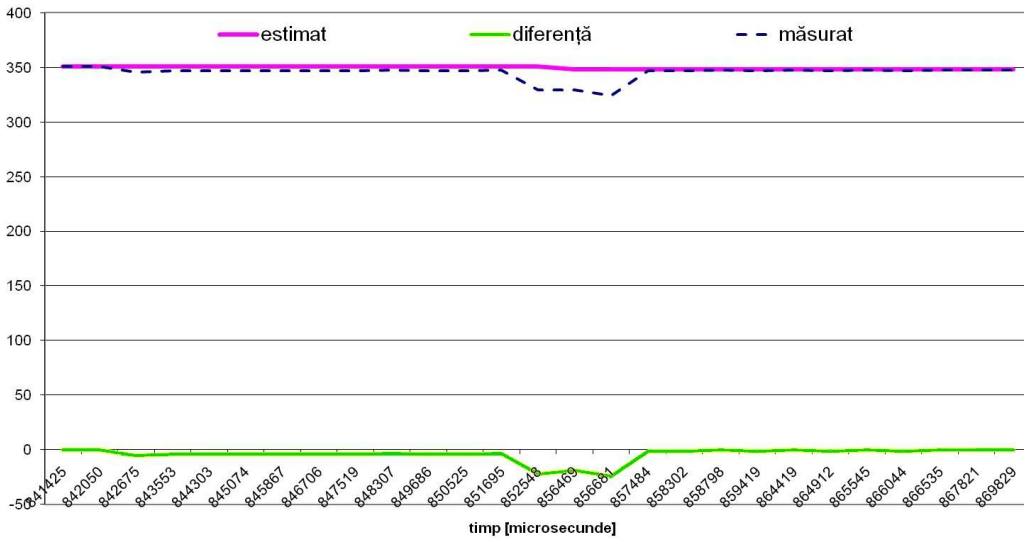


Fig.5.9 Consumul implicat de trimiterea unui mesaj la implementarea cu task-uri. Pe axa Oy sunt trecute valorile logice achiziționate prin sistemul de monitorizare iar pe axa Ox este referința de timp a sistemului de calcul. Factorul dinamic asociat transmiterii mesajelor nu se regăsește în valoarea estimată.

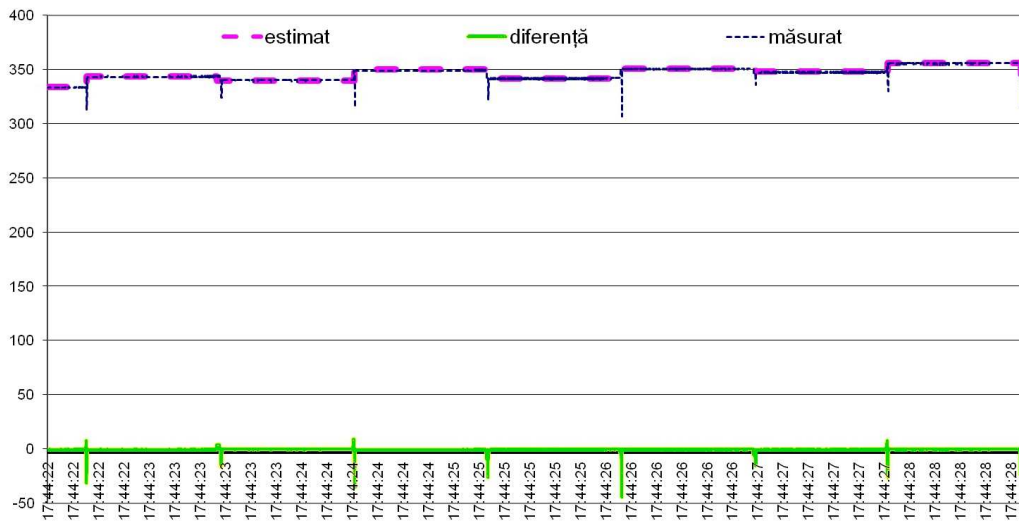


Fig.5.10 Profilurile de consum asociate LED-urilor la implementarea cu task-uri. Pe axa Ox este reprezentată referința de timp, în μ s, pe sistemul de calcul, în timp ce pe axa Oy sunt trecute valorile logice achiziționate prin sistemul de monitorizare. Se observă diferențele datorate transmiterii mesajelor radio la comutarea LED-urilor.

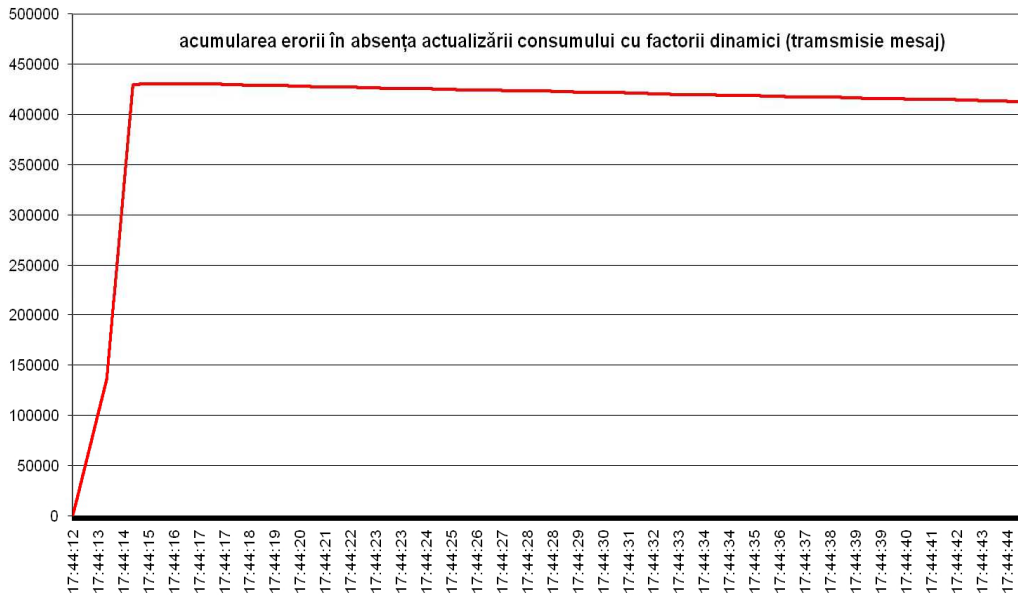


Fig.5.11 Eroarea consumului total estimat la implementarea cu task-uri. Pe axa Oy este reprezentată acumularea diferenței, în valori logice, între consumul estimat până în acel moment de timp și consumul măsurat. Nu sunt implementați factorii dinamici. Diferența inițială este datorată necalibrării consumului de start-up.

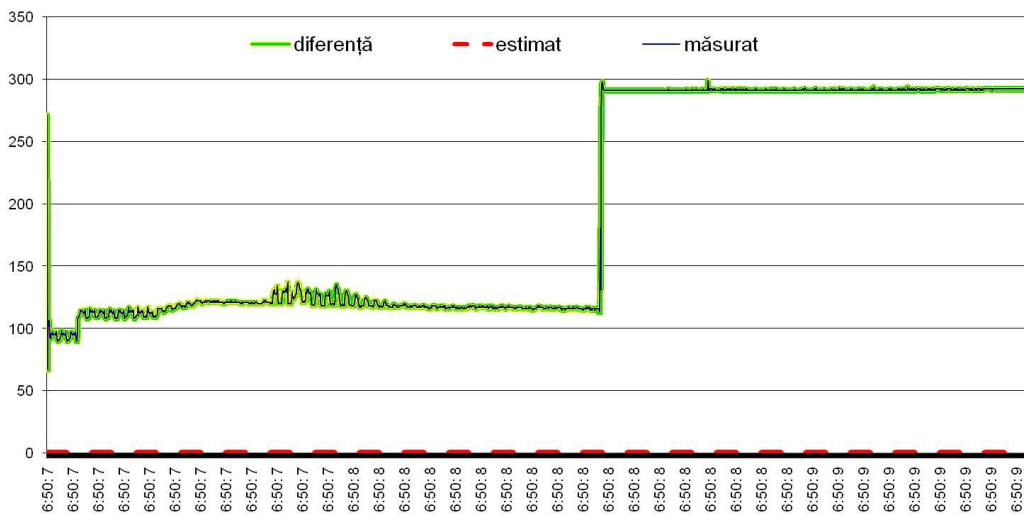


Fig.5.12 Profilul de start-up determinat pentru implementarea cu timer-e. Pe axa Ox este referința de timp pe sistemul de calcul, axa Oy conținând valorile logice obținute pe sistemul de monitorizare. Nu sunt posibile estimări ale factorilor de consum.

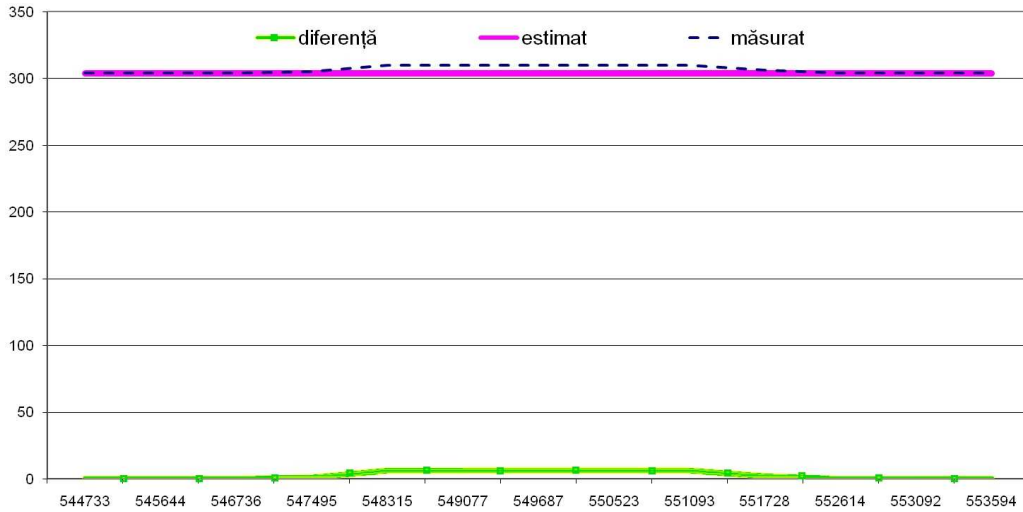


Fig.5.13 Consumul introdus de managementul timer-elor.
Axa 0y conține valorile logice achiziționate prin sistemul de monitorizare, axa 0x fiind referința de timp în μ s pe sistemul de calcul. Diferențele determinate sunt cuantificate pentru implementarea prin factori dinamici.

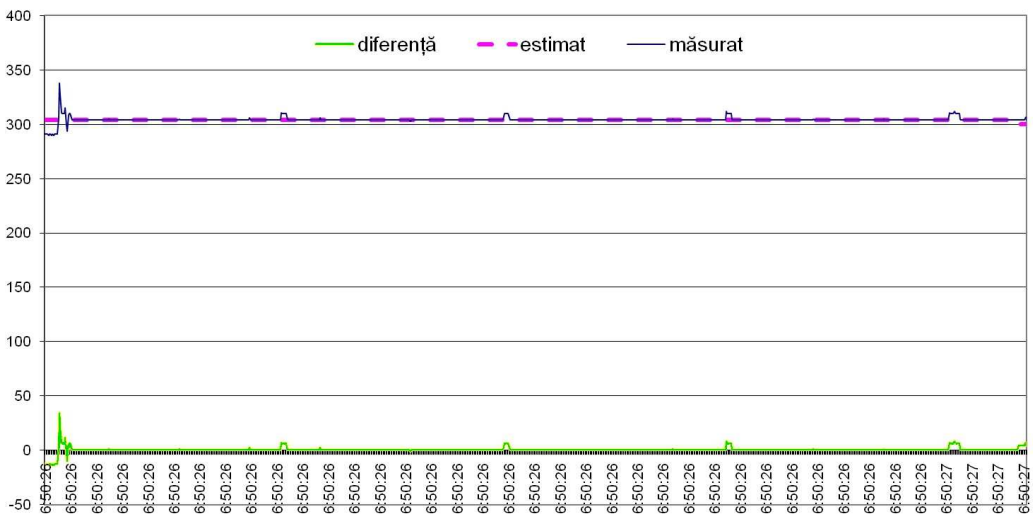


Fig.5.14 Consumul introdus de managementul timer-elor.
Axa 0x este referința de timp pe sistemul de calcul, iar axa 0y conține valorile logice achiziționate prin sistemul de monitorizare. Se poate observa acțiunea periodică a acestor factori dinamici.

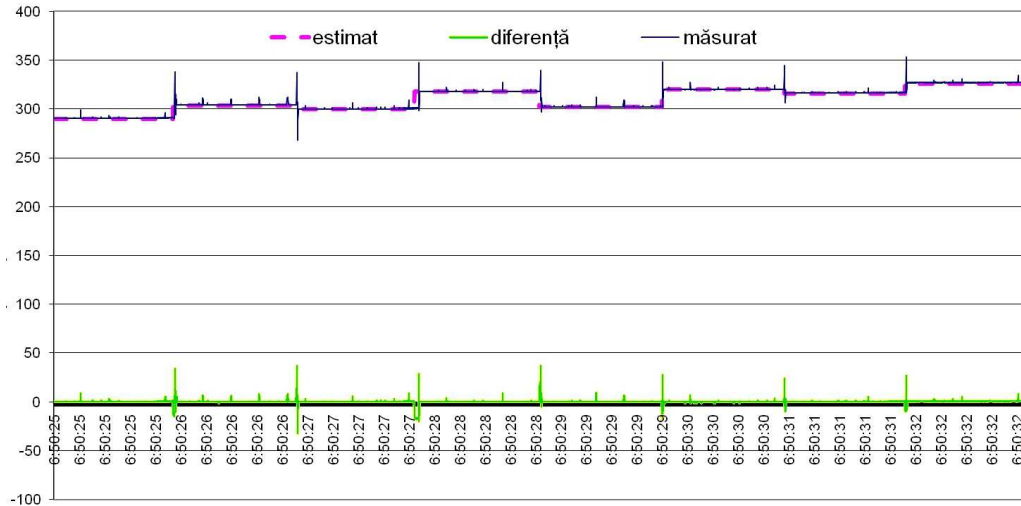


Fig.5.15 Profilurile de consum asociate LED-urilor la implementarea cu timer-e. Pe axa 0x este referința de timp pe sistemul de calcul, axa 0y conținând valorile logice obținute pe sistemul de monitorizare. Se observă diferențele datorate transmisiei mesajelor și timer-elor utilizate la nivelul sistemului de operare.

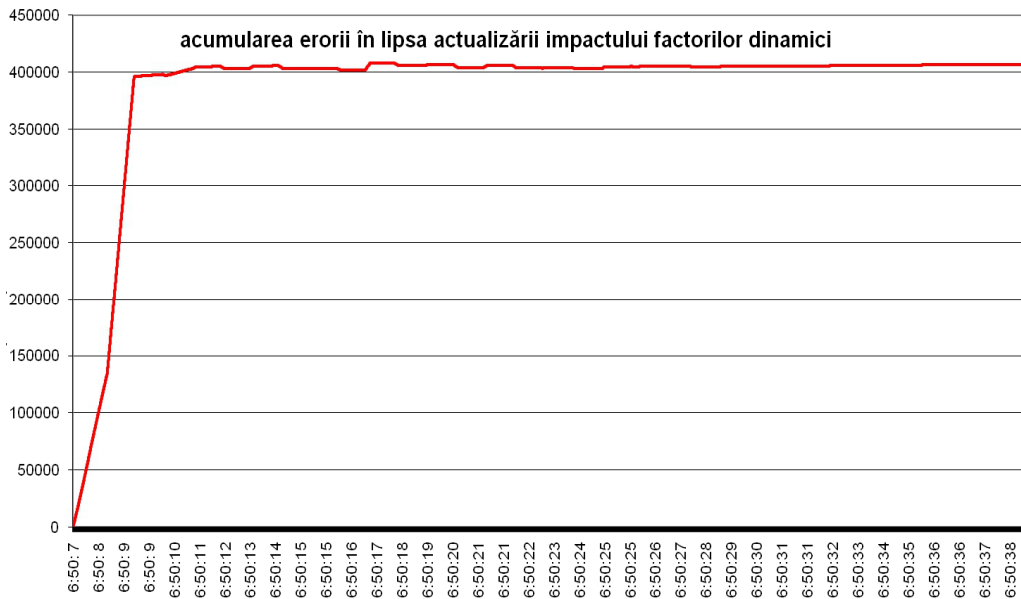


Fig.5.16 Acumularea erorii prin estimarea consumului la implementarea cu timer-e. Axă 0y conține acumularea diferenței, în valori logice, între consumul măsurat și cel estimat la nivel de nod prin factori statici, axa 0x fiind referința de timp în μ s pe sistemul de calcul.

5.3.4 Sincronizarea

Utilizând referințe diferite pentru monitorizarea variațiilor în timp a unor fenomene fizice, se pot obține informații diferite despre același fenomen, în același interval de timp, pe senzor și pe un alt sistem de testare. Un exemplu în acest sens este și integrarea în timp a consumului de energie pe un nod *WSN*. Pentru a detecta și corecta acest gen de probleme, atât senzorul *WSN* cât și sistemul extern prin care se face monitorizarea trebuie să ofere informații precise despre timpul la care datele respective au fost eșantionate.

Monitorizarea consumului total de curent nu se poate face fără utilizarea unui sistem de achiziție capabil să corecteze *alunecările* între semnalele de sincronizare între fiecare nod monitorizat și echipamentele prin care se face achiziția de date despre nodul respectiv. Astfel, urmărind fig.5.17 și fig.5.18, se observă o creștere a erorii de estimare a consumului total de energie direct proporțională cu eroarea introdusă de alunecarea semnalelor de sincronizare. Acest aspect a fost tratat în capitolul precedent, fiind rezolvat în mediul de test dezvoltat în laborator prin trimiterea pe rețeaua *CAN* a unor mesaje de configurare a corecției de timp, pentru calculele de consum asociate fiecărui canal analogic (comanda *0Bh*).

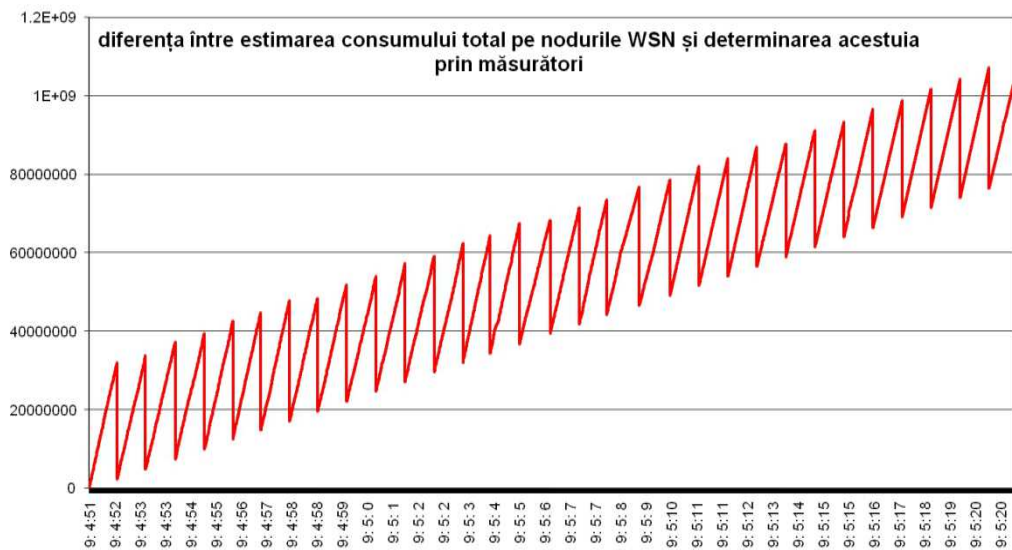


Fig.5.17 Diferența între consumul total estimat și consumul total măsurat. Se observă corelația acestor valori cu alunecările bazei de timp din fig.5.18

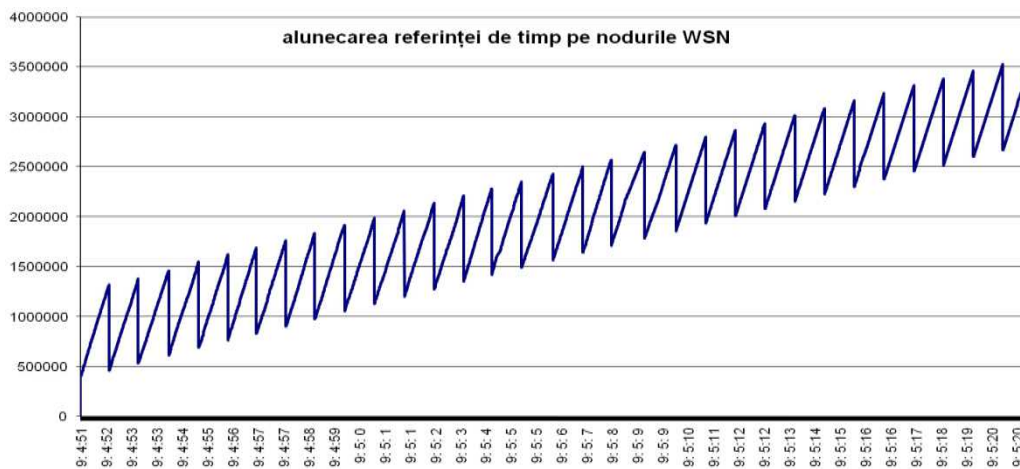


Fig.5.18 Alunecarea bazei de timp, în μs , între un nod MICAZ și o placă cu microcontroler MC9S12C128. Corecțiile periodice sunt datorate recepției datelor de la senzorul MICAZ.

5.4 Concluzii

În acest capitol, au fost descrise cele două metode de monitorizare propuse: o metodă pentru monitorizarea consumului în laborator și o metodă concepută și utilizată pentru monitorizarea consumului de energie pe fiecare nod al unei rețele WSN în timpul utilizării acesteia.

Ca elemente de noutate aduse, prima metodă, spre deosebire de soluțiile existente în platformele de testare a rețelelor WSN actuale, permite configurarea mai multor plaje de consum, în timp ce a doua metodă oferă posibilitatea de a obține estimări ale consumului a căror precizie poate fi îmbunătățită exponențial, prin monitorizarea unor noi factori. Din punct de vedere teoretic, când se iau în considerare condițiile la limită, metoda este similară soluțiilor hardware performante fără a implica dezavantajele acestora legate de energia consumată, costuri și alte resurse implicate.

Alte elemente originale sunt legate de dinamica definirii profilurilor de consum, acestea fiind legate nu numai de starea modulelor unui nod, ci mai degrabă de prezența sau nu a mai multor factori relevanți pentru consumul de energie, precum și de corecția consumului total cu factori definiți ca dinamici.

Dezavantajele metodei online prezentate sunt legate de precizia instrumentelor folosite pentru determinarea impactului pe care fiecare factor identificat îl are asupra consumului, dar și de dificultatea de a determina consumul de energie pe intervalele de timp în care microcontrolerul funcționează în regim cu consum redus având dezactivate *timer*-ele. În acest caz este imposibil de determinat durata acestor intervale folosind doar resursele locale. Acest dezavantaj are implicații și în integrarea unui model al bateriei în situațiile în care se încearcă determinarea influenței efectului de relaxare.

Monitorizarea online a consumului de energie poate fi utilizată pentru planificarea operațiilor efectuate de un nod, ținând cont de limitările surselor de energie utilizate, sau, prin integrarea unor modele matematice ale acestor surse,

pentru a obține suportul necesar în determinarea, în timp real, a intervalului de timp rămas pentru funcționarea rețelei. În cazul metodelor de monitorizare propuse prin această lucrare, se pot integra modele ale surselor de energie atât pe plăcile de monitorizare, pentru determinarea offline a energiei disponibile la nivel de nod prin măsurarea consumului, cât și pe nodurile *WSN* pentru a obține această informație online, prin estimarea energiei consumate.

6. MODELE MATEMATICE ALE BATERIEI

6.1 Proprietăți și clasificări ale bateriilor

Modelarea matematică a bateriilor pe baza reacțiilor fizico-chimice este considerată un domeniu de cercetare matur, unele dintre modelele actuale descriind cu o bună precizie comportamentul bateriilor prin intermediul unor sisteme de ecuații diferențiale. În contextul rețelelor *WSN*, modelele matematice ale bateriei sunt utilizate, în general, prin intermediul unor simulatoare în etapele de proiectare și dezvoltare a rețelei pentru estimarea duratei de utilizare a acesteia, în analiza impactului diferitelor strategii asupra consumului de energie, pentru dimensionarea bateriilor prin prisma raportului preț/performanță la nivelul aplicației, în alte dispozitive electronice fiind folosite și în timpul utilizării acestora pentru monitorizarea stării de încărcare a bateriei.

Monitorizarea bateriei unui nod în timpul utilizării rețelei (monitorizare online poate fi utilizată pentru a face adaptarea la context a strategiilor implementate pentru prelungirea duratei de funcționare, astfel încât să se maximizeze gradul de utilizare al rețelei (definit în contextul aplicației ca un interval de timp mai lung pentru funcționarea rețelei, o cantitate mai mare de date extrase, etc.).

Printre parametrii de care depinde capacitatea bateriei (starea de încărcare) la un moment dat se regăsesc:

- caracteristicile fizice:
 - tipul materialului din care sunt confecționați electrozii, electrolitul și separatorul;
 - dimensiunea și geometria electrozilor;
 - distanța între electrozi;
 - rezistența internă.
- temperatura mediului ambiant;
- forma și durata variațiilor consumului de curent;

Ținând cont de constrângerile prezentate în capitolul 2, pentru a utiliza un model al bateriei în monitorizarea online a unui nod *WSN*, acesta trebuie să ofere informații despre starea de încărcare a bateriei la acel moment implicând operații care se execută într-un timp scurt cu un efort de calcul redus (operanți nume întregi) și un număr acceptabil de parametri. Caracteristicile fizice ale bateriei se regăsesc sub forma unor parametri configurabili (valori constante pentru un anumit tip de baterie) în timp ce temperatura și variațiile consumului de curent depind de context, fiind parametri variabili.

Comportamentul bateriilor este neliniar, iar un model corect al bateriei trebuie să cuprindă următoarele aspecte [90]:

autodescărcarea: se manifestă ca o diminuare în timp a sarcinii electrice disponibile chiar dacă nu este conectat nici un consumator (efect determinat de rezistența internă a bateriei);

efectul de recuperare (relaxare): la rate de consum foarte mici, concentrația elec-

tronilor din electrolit redevine omogenă prin difuzia acestora, acest comportament al bateriei fiind văzut din exterior ca o recuperare parțială a capacității;

efectul ratei de capacitate: la rate de consum foarte mari, capacitatea efectivă a bateriei este mai mică decât capacitatea nominală, efect datorat rarefierii electronilor din jurul electrodului și a difuziei electronilor în electrolit la o rată mult mai mică decât consumul;

influența temperaturii: la temperaturi mai mari, reacțiile electrochimice de reducere oxidare sunt accelerate;

atenuarea capacității (la acumulatori): se manifestă prin „îmbătrânirea” acumulatorilor odată cu creșterea numărului de cicluri descărcare-încărcare, reacția inversă fiind indusă pentru o cantitate tot mai mică de material activ.

Modelele dezvoltate pentru baterii pot fi asociate unor clase (fig.6.1):

modele liniare: sunt elementare și nu consideră niciuna dintre proprietățile enunțate anterior; capacitatea bateriei este determinată succesiv, prin scăderea din capacitatea anterioară a sarcinii consumate până când se ajunge la o valoare prag la care bateria se consideră complet descărcată; aceste modele necesită un minim efort de calcul, dar sunt cele mai dezavantajoase din punct de vedere al preciziei;

modele electrice: sunt bazate pe scheme electrice care au un comportament echivalent cu cel al bateriilor;

modele stohastice: sunt concepute pe baza unor observații și simulări fiind calibrate cu date obținute experimental;

modele electrochimice (PDE): sunt modele bazate pe sisteme de ecuații cu derivate parțiale, ecuații care descriu procesele fizico-chimice care au loc la nivelul anodului, catodului și separatorului; sunt rezolvate prin integrare numerică și au soluții foarte apropiate de comportamentul sistemului real; sunt cele mai complexe dar și cele mai precise, fiind luate ca referință din acest punct de vedere pentru validarea unor alte modele ale bateriei;

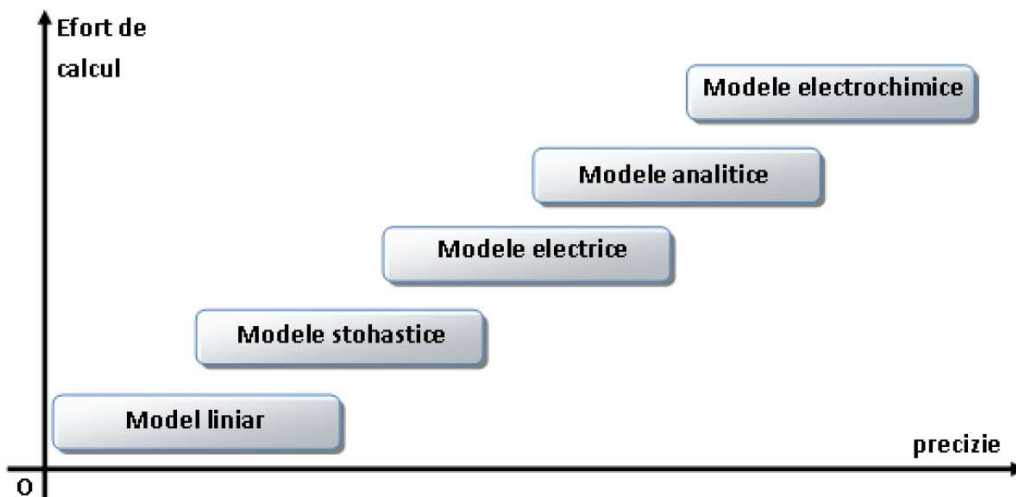


Fig.6.1 Precizia și efortul de calcul in modelele bateriei.
Clasificarea este orientativă.

modele analitice: sunt obținute prin simplificări ale modelelor electrochimice, fiind mai puțin precise dar implicând un efort de calcul mult inferior.

În acest capitol vor fi analizate, din punct de vedere al constrângerilor existente la nivelul nodurilor *WSN*, unele modele matematice ale bateriei, reprezentative pentru fiecare clasă enunțată.

Pentru implementarea modelelor bateriei s-a considerat sistemul de monitorizare a consumului prezentat în capitolul anterior, unde puterea consumată la un moment dat și intervalul de timp în care acel consum este constant sunt parametrii variabili. Se consideră că ceilalți parametri ai bateriei au valori constante, fiind utilizați pentru calibrarea modelelor.

6.2 Modelul liniar

Denumirea acestor modele ale bateriei este o consecință a relației dintre sarcina disponibilă și consumul de energie, aceasta fiind de tip liniar. Cel mai simplu model liniar se poate descrie prin relația (6.1):

$$\underset{[mAh]}{\text{Capacitatea}_{t_n}} = \underset{[mAh]}{\text{Capacitatea}_{t_{n-1}}} - \underset{[mA]}{I_{consumat}} \underset{[h]}{(t_n - t_{n-1})} \quad (6.1)$$

unde *Capacitatea* inițială este valoarea nominală, specifică fiecărui tip de baterie, iar lungimea intervalelor de timp $[t_{n-1}, t_n]$ este determinată de variațiile consumului de curent, astfel încât $I_{consumat}$ să fie constant pe aceste intervale.

Durata de funcționare a unui nod *WSN* se poate estima foarte ușor pe baza modelării liniare a bateriilor pentru o capacitate a bateriei cunoscută și un profil de consum predefinit. De exemplu, în cazul în care nodul funcționează într-o stare cu consum redus ($10 \mu A$) și doar odată la fiecare minut transceiverul se activează pe o durată de $10 ms$ cu un consum de $50 mA$ necesar pentru a transmite un mesaj, prin utilizarea modelului liniar și a unei baterii *UR18650E* de la *Panasonic* având tensiunea de $3,6 V$ și o capacitate de $2150 mAh$ ($7,74 Wh$), se va obține un timp de funcționare al nodului estimat la aproximativ 175 de zile ($15.179.446$ secunde).

Din punct de vedere al implementării în nodurile *WSN*, implementare justificată doar pentru noduri cu comportament necunoscut aprioric (trecerea din stări cu consum redus în alt regim de funcționare se realizează în funcție de context), operații mai complexe apar la reprezentarea și conversia datelor. Capacitatea bateriei variază teoretic între 0 și $2150 mAh$ pentru cazul descris anterior, pentru valorile logice asociate acesteia fiind necesară reprezentarea pe cel puțin $16 biți$, obținându-se astfel o rezoluție de minim $32,8 \mu Ah$.

Curentul electric $I_{consumat}$ are o plajă de variație considerată de la 0 la $100 mA$ (sunt și senzori la care valoarea depășește $150 mA$) dar rezoluția trebuie să cuprindă și regimul de funcționare cu consum redus ($10 \mu A$ în exemplul considerat). Prin urmare, datorită rezoluției, valorile logice ale parametrului variabil $I_{consumat}$ se vor reprezenta pe minim $16 biți$. Intervalele de timp în care $I_{consumat}$ este constant sunt cuprinse între $10 \mu s$, în cazul vârfurilor datorate numărătoarelor utilizate ca baze de timp (fig.6.2), și câteva ore în cazul funcționării în moduri cu consum redus, astfel că o posibilă reprezentare a valorilor logice pe $16 biți$ la o rezoluție de $10 \mu s$

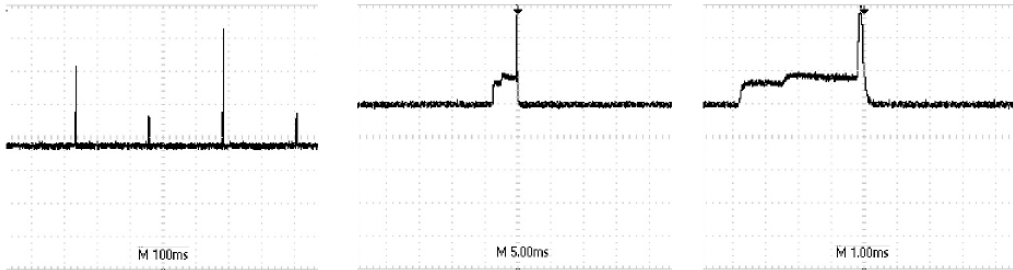


Fig.6.2 Vârfuri de consum datorate circuitelor timer (ATmega128L).
Reprezentările sunt capturi realizate la diferite baze de timp: 100 ms, 5 ms și 1 ms.

nu va putea cuprinde perioadele cu consum constant mai mari de o secundă și invers, rezoluțiile care permit reprezentarea unor intervale mari de timp nu pot fi utilizate pentru perioade scurte. În astfel de situații, implementarea modelului trebuie să cuprindă calcule care să ofere rezultate corecte relativ la rezoluțiile cerute la nivelul aplicației.

Pentru implementarea operației de înmulțire din relația (6.1) sunt necesare adaptări ale rezoluției termenilor. În (6.2) este detaliată operația de înmulțire fiind luate ca referință aceleași mărimi fizice dar valori diferite pentru domeniul valorilor fizice, valorile logice și rezoluția pentru fiecare termen.

$$\text{Consum}(t_n, t_{n-1}) = I_{\text{consumat}} \times \left\{ \begin{array}{l} \Delta t < t_{\text{prag}} : (t_n - t_{n-1}) \\ \quad [ms] \\ \quad [0..t_{\text{prag}}] \\ \quad 0..2^Z - 1 \\ \quad rez \cong \frac{t_{\text{prag}}}{2^Z} \\ \\ \Delta t \geq t_{\text{prag}} : (t_n - t_{n-1}) \\ \quad [h] \\ \quad [0..t_{\text{max}}] \\ \quad 0..2^V - 1 \\ \quad rez \cong \frac{t_{\text{max}}}{2^V} \end{array} \right. \quad (6.2)$$

$$\begin{array}{l} \text{Consum}(t_n, t_{n-1}) \\ \quad [mAh] \\ \quad [0..Cons_{\text{max}}] \\ \quad 0..2^X - 1 \\ \quad rez \cong \frac{Cons_{\text{max}}}{2^X} \end{array} \times \begin{array}{l} I_{\text{consumat}} \\ \quad [mA] \\ \quad [0..I_{\text{max}}] \\ \quad 0..2^Y - 1 \\ \quad rez \cong \frac{I_{\text{max}}}{2^Y} \end{array}$$

Lucrându-se cu valori reale mapate pe valori întregi, este necesară adaptarea rezoluțiilor cu care sunt reprezentate mărimile fizice folosind un coeficient de corecție k , astfel încât să existe o corelație între valorile mărimilor fizice, la executarea operației de atribuire. Coeficientul de corecție k pentru valorile logice se determină conform expresiei (6.3):

$$\frac{Cons_{max}}{2^x} = \begin{cases} k_1 \cdot \frac{I_{max}}{2^y} \cdot \frac{t_{prag}}{2^z \cdot 1000 \cdot 3600} \\ k_2 \cdot \frac{I_{max}}{2^y} \cdot \frac{t_{max}}{2^v} \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$k_1 = \frac{2^{2+y+z-x} \cdot Cons_{max}}{9 \cdot 10^5 \cdot I_{max} \cdot t_{prag}} \quad (6.3)$$

$$k_2 = 2^{y+v-x} \cdot \frac{Cons_{max}}{I_{max} \cdot t_{max}}$$

unde x descrie numărul de biți pe care se reprezintă valoarea logică maximă a consumului de sarcină din baterie; y descrie numărul de biți pe care se reprezintă valoarea logică maximă a curentului consumat; z și v identifică numărul de biți pe care se reprezintă valoarea logică maximă a intervalului de timp considerat pentru un consum constant în ms respectiv în ore.

Pentru reprezentarea valorilor logice pe 16 biți ($x = y = z = v = 16$), corecția adimensională k din relația (6.3) devine:

$$k_2 = 2^{16} \frac{Cons_{max}}{I_{max} \cdot t_{max}} \quad (6.4)$$

$$k_1 = \frac{2^{18}}{9 \cdot 10^5} \frac{Cons_{max}}{I_{max} \cdot t_{prag}} \approx \frac{3}{10} \frac{Cons_{max}}{I_{max} \cdot t_{prag}}$$

Valorile maxime ale mărimilor fizice din relația (6.4) se adaptează domeniilor logice astfel încât valoarea corecției să fie mai mică sau egală cu 1. Valorile subunitare introduc erori la adaptarea consumului la capacitatea bateriei (implică o pierdere în precizie) în timp de valorile supraunitare denotă o mai bună precizie pentru reprezentarea capacității bateriei relativ la determinarea consumului. Luând în considerare constrângerile din punct de vedere al resurselor de calcul la nivelul unui nod *WSN*, această alegere a domeniilor de variație pentru valorile fizice și logice trebuie să evite, unde este posibil, operațiile de înmulțire și împărțire prin substituirea acestora cu operații de deplasare aritmetică (de obicei prin utilizarea în aceste operații a constantelor care sunt puteri ale lui 2).

Aplicând în relația (6.4) ipotezele anterioare, se obține:

$$k_1 \approx 2^{16} \frac{2150}{100 \cdot 655,35} = 9,8 \cdot 10^{-3} \approx 2^{-7} + 2^{-9} \quad (6.5)$$

$$k_2 = 2^{16} \frac{2150}{100 \cdot 8} = 176.128$$

Valoarea corecției k_2 din relația (6.5) implică faptul că ipoteza considerată pentru acest caz nu este implementabilă, fiind necesară înmulțirea cu o constantă care se reprezintă pe mai mult de 16 biți. Implementarea corecției k_1 din relația (6.5) presupune efectuarea unei operații de înmulțire, a două operații de deplasare la dreapta la nivel de bit și o adunare, toate acestea având operanzi pe 16 biți.

Pierderea în precizie datorată adaptării rezoluției la cuante echivalente cu $33\mu Ah$ este relevantă pentru intervale mici cu consum redus, în cazul unui consum de $10\mu A$ pentru maxim 100 ms eroarea fiind de 2 %.

Precizia se poate îmbunătăți prin extinderea valorilor logice utilizate pentru reprezentarea capacității bateriei la 32 biți, rezoluția acesteia devenind: $0,5 \cdot 10^{-6} mAh$.

6.2.1 Concluzii

Implementarea modelelor liniare ale bateriei la nivelul unui senzor fără fir respectă constrângerile din rețelele WSN, implicând operații care se execută într-un timp scurt cu un efort de calcul redus (operanzi numere întregi) și un număr acceptabil de parametri. Aceste modele pot fi sintetizate prin următoarele concluzii:

- sunt justificate doar când timpul de funcționare în diferite profile de consum sau procentul din durata de funcționare aferent acestor profile nu se poate determina aprioric;
- introduc un consum minim de resurse (cod, date, timp de execuție și implicit energie consumată), fiind implementate prin câteva operații relativ simple: scăderi, adunări, deplasări la nivel de bit, înmulțire și uneori împărțire;
- precizia este determinată de structura microcontrolerului utilizat, fiind mai bună dacă se poate opera cu date de dimensiuni mai mari respectiv cu rezoluții ale numărătoarelor interne la nivel de microsecundă;
- influența temperaturii și a celorlate caracteristici ale bateriei nu sunt luate în considerare, aspect care alterează semnificativ precizia cu care este estimată energia disponibilă la un moment dat;
- presupun doar evaluarea unor expresii matematice pentru fiecare modificare a curentului consumat;
- stabilirea valorilor maxime ale parametrilor și a rezoluției acestora se face în funcție de:
 - valorile maxime și minime a curentului, când există consum;
 - durata intervalelor cu consum de curent constant (minime și maxime);
 - arhitectura microcontrolerului utilizat (setul de instrucțiuni, dimensiunea registrelor interne, rezoluția numărătoarelor);
 - valorile coeficienților sau ale expresiilor obținute pentru adaptarea rezoluțiilor (se urmărește utilizarea de puteri ale lui 2);
 - erorile care apar prin adaptarea rezoluției consumului la rezoluția cu care este reprezentată capacitatea bateriei.

6.3 Modele analitice

Modelele analitice ale bateriei sunt obținute prin reformulări sau simplificări ale modelelor care descriu procesele fizico-chimice din interiorul bateriilor. Principalul avantaj față de modelele pe baza cărora au fost obținute constă în simplificarea calculelor, reducerea numărului de parametri și implicit a operațiilor efectuate.

Prin această secțiune sunt analizate două modele analitice reprezentative ale bateriei, modelul Rakhmatov-Vrudhula [91] și modelul chinet (KIBAM) [92].

6.3.1 Modelul Rakhmatov-Vrudhula

Acest model analitic este descris în [91] atât sub aspectul unui consum de curent constant cât și din punct de vedere al unui consum variabil. Din punct de vedere al analizei prin prisma constrângerilor existente la nivelul unui nod WSN, se va demonstra în acest capitol că modelul dezvoltat pentru un consum constant este relevant.

Modelul a fost construit pe baza principiului difuziei electronilor în electrolit (ecuația căldurii) și este descris prin următoarele ecuații și condiții la limită:

$$\begin{aligned} -J(x,t) &= D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \\ \frac{\partial C(x,t)}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C(x,t)}{\partial x^2} \\ \frac{i(t)}{\nu F A} &= D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=0} \\ 0 &= D \frac{\partial C(x,t)}{\partial x} \Big|_{x=w} \end{aligned} \quad (6.6)$$

unde:

- $C(x,t)$ este concentrația speciilor active (electroni și ioni) la momentul $t \in [0, L]$ și distanța $x \in [0, w]$;
- $C^* = C(x, 0) \forall x$, este concentrația inițială;
- $J(x,t)$ este fluxul speciilor active în momentul t la distanța x ;
- D identifică coeficientul de difuzie;
- $i(t)$ reprezintă curentul electric;
- $F = 96485,31 C \text{ mol}^{-1}$ este constanta lui Faraday;
- A reprezintă aria suprafeței electrodului.

Plecând de la relația dată pentru $C(0,t)$ în [91], avem:

$$C(0,t) = C^* - \frac{2iw\sqrt{t}}{\nu F A \sqrt{\pi D}} - \frac{4iw}{\nu F A D \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \left[-m\sqrt{\pi} + \frac{\sqrt{Dt}}{w} e^{-\frac{w^2 m^2}{Dt}} + \sqrt{\pi} m \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{mw}{\sqrt{Dt}}\right) \right] \quad (6.7)$$

unde $\operatorname{erf}(y)$ este funcția eroare care pentru $y \ll 1$ poate fi rescrisă sub forma:

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-y^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(2y)^{2n+1}}{(2n+1)!}$$

Considerând primii 3 termeni din dezvoltarea în serie, după calcularea sumei pentru 1000 de termeni, ecuația (6.7) devine:

$$\begin{aligned} C(0,t) = C^* - \frac{2iw\sqrt{t}}{\nu F A \sqrt{\pi D}} - \frac{4iw}{\nu F A D \sqrt{\pi}} \cdot \frac{10\sqrt{Dt}}{3(Dt)^5 w} & \left[300(Dt)^5 - 15150\sqrt{\pi}(Dt)^{\frac{9}{2}} w \right. \\ & + 100150050(Dt)^4 w^2 - 1025166665(Dt)^3 w^4 + 8874428471430(Dt)^2 w^6 \\ & \left. + 46471109244533332Dt w^8 + 767939313947393539400w^{10} \right] \end{aligned} \quad (6.8)$$

Spre deosebire de expresia propusă în modelul original, expresia (6.8) are avantajul utilizării doar a unor operatori aritmetici, cel mai complex fiind rădăcina pătrată. Exceptând valorile foarte mari, unele fiind reprezentate pe mai mult de 64 de biți, implementarea acestei expresii prin software necesită un efort de calcul mai mic decât forma originală din lucrarea referită, unde funcția $erf(y)$ este aproximată la următoarea formă exponențială:

$$erf(y) \approx 1 - \frac{e^{-y^2}}{\sqrt{\pi} \left(y - \frac{y}{\pi} + \frac{\sqrt{y^2 + \pi}}{\pi} \right)} \quad (6.9)$$

În fig.6.3 sunt comparate rezultatele obținute folosind expresia anterioară cu cele obținute prin utilizarea aproximării din [91].

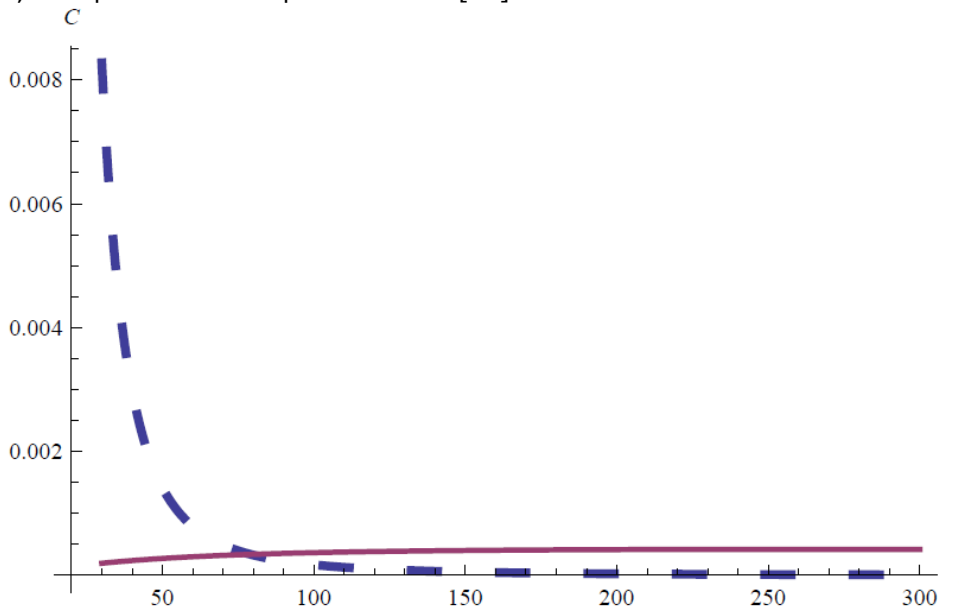


Fig.6.3 Errori pentru aproximarea Rakhmatov-Vruidhula și soluția propusă. Diferența între aproximarea propusă (linie întreruptă), aproximarea din Rakhmatov-Vruidhula (linie continuă) și soluția reală.

Pe axa Ox este reprezentat timpul în secunde iar pe axa Oy diferențele între capacitatea reală C , dată de relația (6.7), și valorile lui C obținute prin aproximările funcției $erf(y)$. Se observă că pentru intervale mici de timp aproximarea propusă se comportă mai slab decât cea din modelul original dar pentru intervale mai lungi, în care curentul consumat este constant, soluția propusă este net superioară, suprapunându-se chiar peste soluția reală.

Considerând constrângerile expuse în capitolul 2, principalele neajunsuri ale soluției propuse pentru implementarea acestui model la nivelul unui nod WSN sunt legate de dimensiunea și tipul operanzilor. Fiind utilizate operații care procesează operanzi reprezentați în virgulă mobilă sau pe 64 de biți, calculele sunt efectuate prin intermediul unor funcții din biblioteca compilatorului, fiind lente și având un consum suplimentar semnificativ atât din punct de vedere al memoriei program cât și din punct de vedere al consumului de energie.

6.3.2 Modelul chinetic

Este un model analitic care implementează efectul de relaxare, fiind dezvoltat pe baza observației că zona din jurul electrodului devine mai „săracă” în electroni pe parcursul intervalelor de timp cu un consum mai mare de energie și se refacă prin difuzia electronilor atunci când consumul este mai mic.

Principiul propus în [92] este explicat sub forma a două recipiente cu fluid care comunică prin partea inferioară, tendința de echilibru fiind ca fluidul să ajungă la același nivel în ambele recipiente ($h_1 = h_2$). Modelul este reprezentat grafic în fig.6.4.

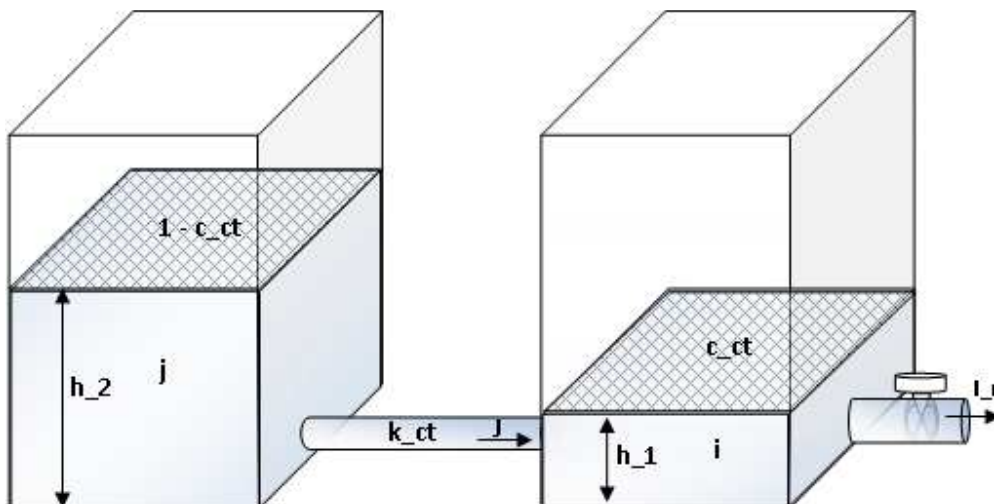


Fig.6.4 Modelarea chinetică a bateriei.

La echilibru, sarcina este distribuită omogen în baterie. Când sarcina electrică (i) din jurul electrodului scade, aceasta se refacă prin difuzia electronilor din electrolit (j) la o rată proporțională cu coeficientul de conductanță k_{ct} și valorile h_1 respectiv h_2 . Capacitatea bateriei este dată de $i+j$, un procent c_{ct} din aceasta fiind distribuită în jurul electrodului.

În primul recipient este reprezentată sarcina electrică distribuită în electrolit (j) care are tendința să refacă sarcina disipată în circuitul exterior (I_n) prin difuzia electronilor. Această difuzie este limitată de coeficientul de conductanță (k_{ct}) în jurul anodului, reprezentat prin intermediul celui de al doilea recipient, astfel încât sarcina din jurul electrodului (i) este parțial recuperată. În jurul electrodului avem un procent (c_{ct}) din sarcina totală, restul fiind prezentă în electrolit.

Modelul chinetic al bateriei (*KiBaM*) [92] este formulat prin relațiile (6.10):

$$\begin{aligned}
 \text{Cap}(t) &= i(t) + j(t) \\
 i(t) &= c_{ct} \cdot \text{Cap}(t) = h_{1}(t) \cdot c_{ct} \\
 j(t) &= (1 - c_{ct}) \cdot \text{Cap}(t) = h_{2}(t) \cdot (1 - c_{ct}) \\
 \frac{di}{dt} &= -I_n(t) + J(t) = -I_n(t) + k_{ct} \cdot [h_{2}(t) - h_{1}(t)] \\
 \frac{dj}{dt} &= -J(t) = -k_{ct} \cdot [h_{2}(t) - h_{1}(t)]
 \end{aligned} \tag{6.10}$$

Comparativ cu modelul liniar prezentat anterior, în cazul modelului chinetic apar și parametri care descriu proprietatea de relaxare a bateriei (k_{ct}) sau efectul ratei de capacitate (c_{ct}).

Pentru o baterie a cărei capacitate este 2150 mAh, cu un raport de distribuție a sarcinii $c_{ct} = 0,625$ și coeficientul de conductivitate $k_{ct} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ min}^{-1}$, efectul ratei de capacitate este evidențiat prin utilizarea modelului pentru o descărcare constantă de 50 mA, caz în care bateria va fi considerată descărcată chiar dacă 822,52 mAh (38 % din capacitatea nominală) nu au fost utilizați, circuitul alimentat funcționând doar 26 de ore comparativ cu 43 de ore cât este valoarea obținută prin utilizarea modelului liniar în aceleași condiții.

Efectul de relaxare se observă prin utilizarea modelului chinetic pentru o baterie cu parametri anteriori dar un consum de curent variabil. Pentru un profil de consum periodic cu 50 mA pentru 10 ms și 10 μ A pentru restul perioadei de o secundă, gradul de utilizare a sarcinii disponibile în baterie crește la 94 % (doar 116,22 mAh rămân neutilizați). O reprezentare grafică a comportamentului acestui model pentru diferite profile de consum este realizată în fig.6.5.

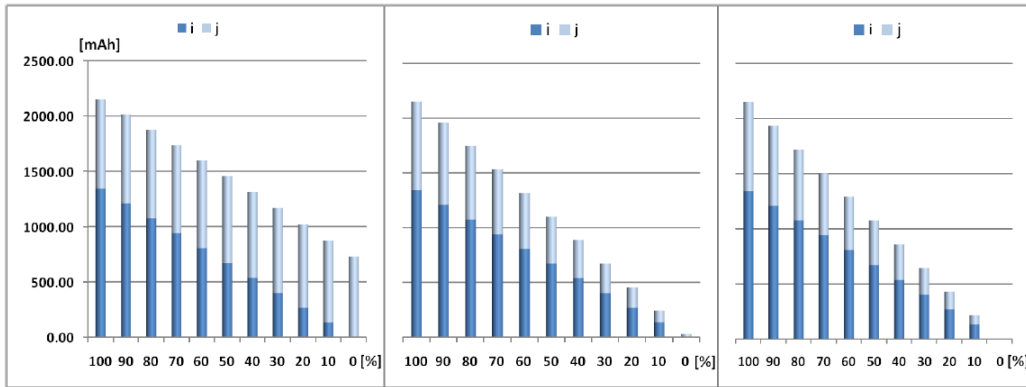


Fig.6.5 Comportamentul modelului chinetic la diferite profile de consum.

Capacitatea bateriei distribuită în cele 2 variabile i și j este prezentată la diferite grade de descărcare pentru o baterie de 2150 mAh cu $c_{ct} = 0,625$ și $k_{ct} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ min}^{-1}$. Primul grafic este asociat unui consum constant de 50 mA, al doilea are un profil de consum de tip puls cu 50 mA pentru 10 ms și 10 μ s pentru restul perioadei de o secundă iar ultimul grafic corespunde unui profil asemănător dar cu extinderea perioadei la un minut.

În analiza acestui model din punct de vedere al constrângerilor existente în nodurile WSN se va considera timpul la care valoarea curentului consumat se schimbă (model discret), similar metodei prezentate pentru modelul liniar. Fiind un model diferențial, valorile variabilelor se vor determina la capătul intervalelor de

timp în care curentul consumat este constant pentru fiecare segment intermediar din acest interval. Aceste intervale sunt delimitate de fiecare variație a consumului de curent. Cel mai mic segment de timp dintr-un interval în care curentul este constant determină rezoluția modelului, aceasta având valoarea de $10\ \mu\text{s}$ în cazul nodului *WSN* considerat în secțiunea anterioară. Valorile mici ale acestei cuante de timp au avantajul că acoperă intervalele scurte cu consum constant dar introduc un consum de resurse de calcul semnificativ.

Pentru a fi implementat, algoritmul din relația (6.10) se poate descrie sub forma următoare:

```

01: kibam()
02: IN:
03: t_n //interval consum constant [us]
04: I_n //consum in [uA]
05: t_us //rezolutia [us]
06: OUT:
07: i, j
08: {
09:   I_n*=t_us; //scalare consum la cuanta de timp
10:   n=t_n/t_us; //segmentare interval de timp
11:   while(n-){ // parcurgere interval pe segmente
12:     if(i<I_n) return 0; // baterie descarcata
13:     j-=J; // corectie difuzie (relaxare)
14:     i=i-I_n+J; // corectie consum
15:     h1=i/c_ct;
16:     h2=j/(1.0-c_ct);
17:     J=(h2-h1)*k_ct*t_us/60000000L; // min^{-1}->us^{-1}
18:   }
19:   return 1;
20: }

```

Utilizând această implementare pentru cazul anterior ($50\ \text{mA}$ consum constant), la o cuantă de $100\ \mu\text{s}$ numărul de actualizări ale capacității bateriei este aproximativ $955,8 \cdot 10^6$ în timp ce numărul total de actualizări (bucle) în cazul unei rezoluții de $1\ \text{ms}$ este $955,8 \cdot 10^5$.

Varianta descrisă a algoritmului a fost concepută pentru bateriile pe bază de acid utilizate în sistemele eoliene și nu ia în considerare tipul și dimensiunea datelor respectiv adaptările unităților de măsură și ale rezoluției variabilelor utilizate. Analiza acestor elemente trebuie făcută pentru fiecare expresie în funcție de contextul aplicației. Din punct de vedere al operațiilor descrise, se utilizează doar 4 înmulțiri, 3 împărțiri cu valori constante care pot fi substituite prin alte operații deoarece au valori constante ca împărțitor și 6 adunări sau scăderi. Din acest punct de vedere se pretează implementarea modelului la nivelul unui nod *WSN*, dar problemele apar la dimensiunea datelor și, mai ales, la numărul de bucle executate într-un interval de timp, număr care interferează cu constrângerile de timp real în cazul intervalelor lungi de timp cu consum constant mic (regim cu consum redus) specifice rețelelor *WSN*.

La o cuantă de $10\ \mu\text{s}$, bucla *while* va fi executată de 100 de ori pentru fiecare milisecundă, numărul de execuții ale buclei la revenirea dintr-o stare de așteptare de o oră fiind în acest caz $36 \cdot 10^7$.

Dacă presupunem că durata de execuție a unei bucle este $x \mu s$, timpul necesar pentru determinarea capacității bateriei la schimbarea regimului de funcționare în cazul descris anterior este $360 \cdot x$ secunde.

Eliminarea acestor bucle se poate face reanalizând ecuațiile (6.10) și descriind comportamentul bateriei sub forma unui sistem dinamic autonom neomogen:

$$\begin{aligned} Cap(n) &= A \cdot Cap(n-1) + B \\ &= i(n) + j(n) \end{aligned} \quad (6.11)$$

și determinarea soluțiilor pentru $i(n)$ și $j(n)$ la sfârșitul intervalului de timp cu consum constant, știind că soluția ecuațiilor de forma (6.11) pentru $A \neq 1$ este:

$$Cap(n) = A^n \cdot Cap(0) + B \frac{A^n - 1}{A - 1} \quad (6.12)$$

Conform ecuațiilor (6.10), $i(n)$ și $j(n)$ se pot rescrie ca:

$$\begin{aligned} i(n) &= i(n-1) - I_{-n} + j(n-1) \\ &= i(n-1) - I_{-n} + k_{-ct} \left[\frac{j(n-1)}{1 - c_{-ct}} - \frac{i(n-1)}{c_{-ct}} \right] \end{aligned} \quad (6.13)$$

$$\begin{aligned} &= i(n-1) \frac{c_{-ct} - k_{-ct}}{c_{-ct}} + j(n-1) \frac{k_{-ct}}{1 - c_{-ct}} - I_{-n} \\ j(n) &= j(n-1) - j(n-1) \\ &= j(n-1) - k_{-ct} \left[\frac{j(n-1)}{1 - c_{-ct}} - \frac{i(n-1)}{c_{-ct}} \right] \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$= i(n-1) \frac{k_{-ct}}{c_{-ct}} + j(n-1) \frac{1 - c_{-ct} - k_{-ct}}{1 - c_{-ct}}$$

Prin substituirea lui $i(n)$ și a lui $j(n)$ în (6.11) cu a doua expresie din (6.13) respectiv (6.14) se va obține:

$$\begin{aligned} Cap(n) &= i(n-1) + j(n-1) - I_{-n} \\ &= Cap(n-1) - I_{-n} \\ &= Cap(0) - n \cdot I_{-n} \end{aligned} \quad (6.15)$$

unde $Cap(0)$ este capacitatea bateriei la începutul intervalului de timp cu consum constant. Soluția ecuației (6.15) este capacitatea bateriei la sfârșitul intervalului de timp n și va fi utilizată pentru a-l elimina pe $i(n-1)$ din expresia lui $j(n)$ respectiv a lui $j(n-1)$ din expresia lui $i(n)$:

$$i(n) = i(n-1) \frac{c_{-ct} - c_{-ct}^2 - k_{-ct}}{c_{-ct}(1 - c_{-ct})} - I_{-n} + \frac{k_{-ct}}{1 - c_{-ct}} [Cap(0) - (n-1) \cdot I_{-n}] \quad (6.16)$$

$$j(n) = j(n-1) \frac{c_{-ct} - c_{-ct}^2 - k_{-ct}}{c_{-ct}(1 - c_{-ct})} + \frac{k_{-ct}}{c_{-ct}} [Cap(0) - (n-1) \cdot I_{-n}] \quad (6.17)$$

Soluțiile acestor ecuații se obțin conform relației (6.12):

$$i(n) = i(0) - c_{ct} \cdot I_n \cdot n + \frac{1}{k_{ct}} \left[\left(\frac{c_{ct} - c_{ct}^2 - k_{ct}}{c_{ct}(1 - c_{ct})} \right)^n - 1 \right] \cdot [c_{ct} \cdot I_n - 2c_{ct}^2 I_n + c_{ct}^3 I_n - c_{ct} \cdot Cap(0) \cdot k_{ct} + i(0)k_{ct}] \quad (6.18)$$

$$j(n) = j(0) - (1 - c_{ct}) \cdot I_n \cdot n + \frac{1}{k_{ct}} \left[\left(\frac{c_{ct} - c_{ct}^2 - k_{ct}}{c_{ct}(1 - c_{ct})} \right)^n - 1 \right] \cdot [c_{ct} \cdot (2c_{ct} \cdot I_n - c_{ct}^2 I_n + Cap(0)k_{ct} - I_n) - k_{ct} \cdot (Cap(0) - j(0))] \quad (6.19)$$

unde $i(0)$, $Cap(0)$ și $j(0)$ sunt valorile la începutul intervalului, n este numărul segmentelor de timp cuprinse în intervalul cu consum constant, I_n este valoarea cu care capacitatea bateriei se diminuează pe un segment de timp. Exceptând elementele enunțate, care au valori variabile pentru diferite valori ale consumului și a duratei acestuia, restul au valori constante.

Implementarea modelului sub forma unui sistem dinamic presupune evaluarea expresiilor (6.18) și (6.15) pentru fiecare interval de timp cu consum constant:

```

01: kibam_init()
02: IN:
03:  c_ct    //raport distributie sarcina
04:  k_ct    //coeficient de conductivitate
05:  Capacitatea //capacitatea bateriei
06: OUT:
07:  c0, i, j, constante
08:  { c_ct2 = c_ct*c_ct;
09:    c_ct3 = c_ct2*c_ct;
10:    k_ct_1 = 1/k_ct;
11:    c_pn = (c_ct-c_ct2-k_ct)/(1-c_ct)*c_ct;
12:    c_in = c_ct - 2*c_ct2 + c_ct3;
13:    c_cap = c_ct * k_ct;
14:    c0=Capacitatea;
15:    i= c0*c_ct;
16:    j= c0*(1-ct);
17:  }

01: kibam()
02  IN:
03:  t_n    //interval consum constant [us]
04:  I_n    //consum in [uA]
05:  t_us   //rezolutia [us]
06: OUT:
07:  c0, i, j
08:  {
09:    I_n*=t_us;//scalare consum la cuanta de timp
10:    n=t_n/t_us; //segmentare interval de timp

```

```

11: T1= i - c_ct*I_n*n;
12: T2_1 = (pow(c_pn,n) - 1)*k_ct_1;
13: T2_2 = c_in*I_n -c_cap*c0 + k_ct*i;
14: T2 = T2_1 * T2_2;
15: i = T1 + T2;
16: if(i<=0) return 0;
17: c0 = c0 - I_n*n;
18: j = c0 - i;
19: return 1;
20: }

```

Numărul operațiilor ce trebuie efectuate pe parcursul evaluării capacității este comparabil cu numărul operațiilor necesar la implementarea utilizând bucle. Exceptând cazurile în care este necesară adaptarea rezoluției valorilor logice la mărimile fizice, este necesară efectuarea unei singure operații de împărțire dar, spre deosebire de implementarea anterioară, apare și o operație de ridicare la putere.

Din punct de vedere al timpului necesar pentru evaluarea expresiilor din relațiile (6.15) și (6.18), o influență semnificativă are evaluarea operației de ridicare a unei valori constante la puterea n , aceasta realizându-se prin intermediul unei funcții de bibliotecă cu costurile aferente detaliate în *capitolul 2*.

Prin numărul redus de parametrii, forma intuitivă și modelarea a două proprietăți importante ale bateriilor, modelul chinetic a devenit foarte popular, precizia acestuia fiind îmbunătățită prin modificarea sau detalierea unor aspecte, o altă variantă cunoscută fiind cea propusă în [93] (denumită model chinetic modificat), aceasta utilizând lanțuri Markov și elemente de probabilități.

6.3.3 Concluzii

Prin această secțiune au fost analizate două modele analitice ale bateriei din perspectiva utilizării acestora pentru monitorizarea cantității de sarcină electrică disponibilă la nivelul unui nod dintr-o rețea de senzori fără fir.

Pentru primul model analizat s-a încercat adaptarea la constrângerile existente în nodurile WSN, din punct de vedere al resurselor disponibile, a cazului care descrie comportamentul bateriei la un consum de curent constant. Complexitatea algoritmului a fost redusă astfel încât evaluarea consumului să se facă printr-o singură trecere în cazul unei încărcări constante, fiind folosiți doar operatori aritmetici clasici fără a fi necesare bucle. Cel mai mare efort de calcul este necesar pentru procesarea funcției rădăcină pătrată și pentru a obține puterea de ordinul 10 a unor numere reprezentate pe mai mult de un octet. Problemele care împiedică implementarea acestui model pentru monitorizarea online, în nodurile WSN, sunt datorate numărului mare de constante numerice și valorilor foarte mari pe care le au acestea, unele reprezentându-se pe mai mult de 64 de biți.

Al doilea model analizat este cunoscut în literatură sub denumirea de model chinetic și presupune o singură implementare pentru ambele regimuri de consum (constant sau variabil). Operațiile aritmetice necesare sunt elementare fiind utilizate doar comparații, adunări, înmulțiri și împărțiri, ultimele fiind în număr redus, iar prin faptul că implică valori constante se pot substitui prin câteva operații de deplasare, înmulțire și adunare. Neajunsurile acestui model sunt legate de forma diferențială a modelului și de reprezentarea datelor. Definiția modelului sub o formă diferențială implică un număr de iterații invers proporțional cu pasul de discretizare utilizat,

precizia modelului fiind însă dependentă de rezoluția acestui pas de discretizare, în tabelul 6.1 observându-se diferențele între duratele de funcționare estimate pentru același profil de consum când se utilizează rezoluții diferite.

model baterie	$t_{50mA}[ms]$	$t_{10\mu A}[ms]$	Ore	rezoluție[μs]
liniar	60000	0	43	-
kibam	60000	0	26	1000
kibam	60000	0	28	100
liniar	10	990	4223	-
kibam	10	990	3988	1000
kibam	10	990	4164	100
liniar	10	59990	119444	-
kibam	10	59990	117233	100

Tabelul 6.1. Comportamentul modelului KiBaM pentru diferite rezoluții și rate de consum (profil de tip puls) similare nodurilor WSN

Valorile au fost obținute pentru o baterie cu capacitatea de 2150 mAh, alternând un consum de 50 mA cu unul de 10 μ A conform duratelor specificate; bateria considerată are $c_{ct} = 0,625$ și coeficientul de conductivitate $k_{ct} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ min}^{-1}$.

Deși sunt puține operații de efectuat, din cauza dimensiunii pe care sunt reprezentați operanzii și a numărului mare de iterații, aceste modele induc un consum de energie sesizabil și pot interfera cu restricțiile de timp real ale aplicației. Impactul acestor iterații la nivelul aplicației se poate observa prin comparația numărului de bucle necesar pentru diferite rezoluții și profile de consum din tabelul 6.2.

model baterie	$t_{50mA}[ms]$	$t_{10\mu A}[ms]$	rezoluție	iterații	Bucle
liniar	60000	0	-	5160	0
liniar	10	59990	-	14074006	0
liniar	10	990	-	30358893	0
kibam	60000	0	1000	3186	95578459
kibam	60000	0	100	3414	1024078855
kibam	10	990	1000	28717868	1474032109
kibam	10	990	100	29983890	1,49919E+11
kibam	10	59990	100	14068031	4,22041E+12

Tabelul 6.2. Evoluția numărului de iterații și bucle executate prin modelul KiBaM pentru diferite rezoluții și rate de consum (profil de tip puls)

Valori obținute pentru o baterie cu capacitatea de 2150 mAh, cu $c_{ct} = 0,625$ și coeficientul de conductivitate $k_{ct} = 45 \cdot 10^{-6} \text{ min}^{-1}$.

Influența numărului de iterații asupra timpului de execuție poate fi atenuată prin reformularea ecuațiilor care descriu modelul cinetic al bateriei și utilizarea soluțiilor pentru cazul n . În acest fel, costul execuției a n bucle se reduce la evaluarea ridicării unei constante la puterea n cu un efect colateral asupra

consumului de memorie datorat utilizării funcției ridicare la putere, așa cum este exemplificat în capitolul 2. Efectul înlocuirii buclor modelului *KIBAM* cu expresii exponențiale este descris în fig.6.6, unde este prezentat timpul necesar pentru efectuarea operațiilor la fiecare iterație ținând cont de rezoluție. Se observă necesarul de timp semnificativ pentru executarea modelului cinetic original (*kibam1*), aceste valori fiind prohibitive în contextul rețelelor *WSN*, dar și câștigul obținut prin reformularea modelului (*kibam2*).

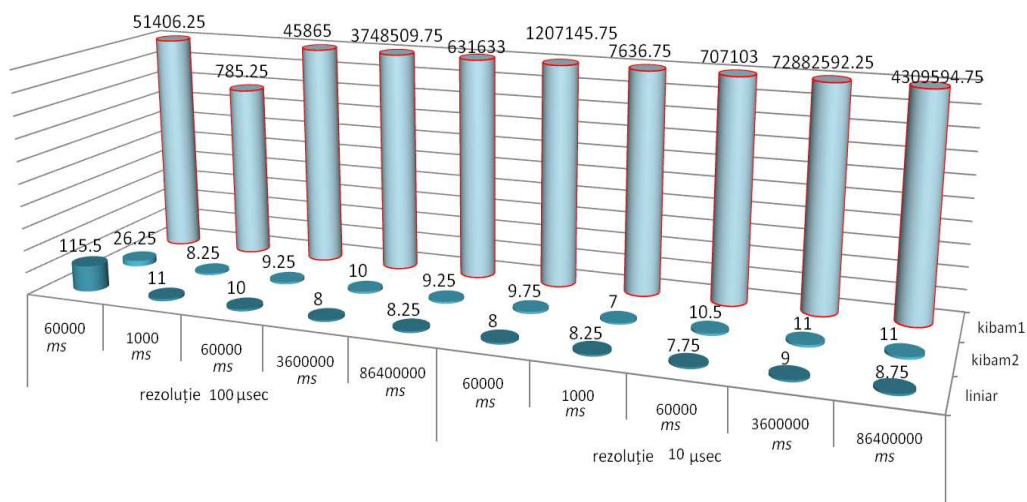


Fig.6.6 Optimizarea timpilor de execuție prin reformularea modelului cinetic. Valorile sunt exprimate în μs și au fost obținute pentru o iterație, cu rezoluția și intervalele de timp specificate. În cazul modelului liniar este specificat timpul total pentru determinarea duratei de utilizare a bateriei.

Rezultatele au fost obținute pe un sistem Linux cu procesor Intel i5.

Rezumând, principalele dezavantaje ale modelelor analitice considerate sunt legate de dimensiunea datelor și efortul de calcul aferent procesării acestora, efort care este semnificativ dacă se are în vedere că nu s-a ținut cont de tipul datelor utilizate, de adaptarea rezoluției valorilor logice și de faptul că doar versiunile simplificate și cele mai puțin precise ale acestor modele ale bateriei au fost utilizate.

6.4 Modele electrice

Modelele electrice ale bateriei descriu comportamentul acestora prin intermediul unor scheme electrice care conțin surse de tensiune, condensatoare și rezistențe. În [94], modelele electrice sunt clasificate pe trei categorii:

modele Thevenin: sursa de tensiune este conectată în serie cu o rezistență și o rețea paralelă RC; în unele variante mai sunt adăugate și alte elemente;

modele bazate pe impedanță: implementează o schemă echivalentă metodei electrochimice cu spectroscopie de impedanță;

modele „runtime”: sunt modelări mai complexe orientate pe simulări în *SPICE* sau alte simulatoare echivalente.

Capacitatea bateriei în modelele electrice este reprezentată printr-un condensator, efectul de autodescărcare și atenuarea capacității la reîncărcări multiple sunt reprezentate prin rezistențe conectate în paralel cu condensatorul anterior iar regimurile tranzitorii sunt descrise prin înserierea unei rezistențe și a mai multor grupuri paralele RC. O astfel de structură este utilizată și în [94,95], schema folosită pentru descrierea comportamentului fiind prezentată în fig.6.7.

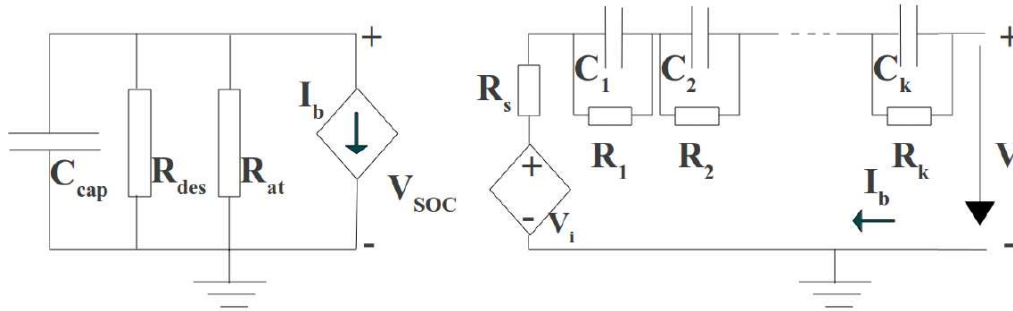


Fig.6.7 Modelare electrică a bateriei.

Circuitul din stânga reprezintă modelul pentru tensiunea în gol, iar cel din dreapta este echivalent comportamentului pentru consum variabil. C_{cap} - capacitatea bateriei; R_{at} - rata de autodescărcare; R_{des} - atenuarea capacității cu numărul de reîncărcări; V - tensiunea la borne; $R_s + R_1 + \dots + R_k$ - rezistența echivalentă serie.

Cantitatea de sarcină disponibilă în baterie (SOC) se modifică după un interval de timp t în funcție de variația curentului electric pe acest interval (i), temperatură (T) și numărul total de reîncărcări (n) dacă pe acest interval are loc un proces de încărcare a bateriei. Relațiile următoare descriu modul în care sarcina disponibilă influențează comportamentul bateriei modelat prin schema din fig.6.7, acestea fiind folosite sub diferite forme în modelele din [94-96].

$$SOC[i(t), T(t), n(t), t] = SOC(0) + \int_0^t \alpha[i(\tau)] \cdot \beta[T(\tau)] \cdot \gamma[n(\tau)] \cdot i(\tau) d\tau \quad (6.20)$$

$$V = V_i(SOC, T) - I_b(t) \cdot R_i(SOC, T) + I_b(t) \cdot \sum_{j=1}^k R_j(SOC) \cdot e^{-\frac{t}{R_j(SOC)C_j(SOC)}}$$

Pentru a obține modelul electric asociat unei baterii este necesară descărcarea acelei baterii prin intermediul unor dispozitive capabile să determine comportamentul acesteia pentru diferite valori ale curentului consumat. Esențială pentru modelarea electrică este caracteristica tensiune-capacitate, aceasta fiind utilizată pentru determinarea elementelor din ecuațiile (6.20), influența neliniară a fiecărui element fiind aproximată sub forma unui polinom de gradul m :

$$Element(SOC) = c_0 + c_1 \cdot SOC + c_2 \cdot SOC^2 + \dots + c_m \cdot SOC^m \quad (6.21)$$

$$Element \in \{V_i, R_i, R_j, C_j\}, j = \overline{1..k}$$

Valorile pentru $\alpha(i)$, $\beta(T)$, și $\gamma(n)$ din relațiile (6.20) sunt extrase din tabele de interpolare, metoda de obținere a acestora din caracteristicile tensiune-capacitate fiind prezentată și în [96].

Aceste modelări prin scheme electrice echivalente ale bateriei se pot adapta ușor la contextul rețelelor *WSN*, microcontrolerele fiind, în general, capabile să detecteze valoarea tensiunii la bornele bateriei prin faptul că tensiunea de referință a convertoarelor analog-numerice este generată intern prin joncțiunile unor semiconductoare, nefiind afectată de variațiile tensiunii de alimentare. De asemenea, multe noduri sunt prevăzute cu senzori de temperatură astfel încât, prin determinarea consumului de curent la un moment dat, aceste variabile (V , i și T) se pot utiliza pentru obținerea capacității bateriei (*SOC*).

6.4.1 Determinări sporadice ale capacității

Determinarea capacității la momentul de timp t cu ajutorul modelării electrice se poate face prin mai multe metode, cea mai simplă soluție din punct de vedere al resurselor implicate fiind determinarea directă a capacității bateriei din caracteristica *tensiune-capacitate* pentru o anumită rată de descărcare.

Ca metodologie, capacitatea bateriei este determinată pe baza unui polinom de grad m , coeficienții cu care tensiunea măsurată se înmulțește fiind memorați în tabele de tip „*look-up*”. Dacă este cazul, valorile pentru coeficienții polinomului utilizat în calcularea *SOC* se pot determina pentru diferite rate de încărcare la diverse temperaturi, astfel încât la selecția acestor valori să fie utilizate ambele mărimi (i și T).

Această metodă implică erori care diferă în funcție de gradul polinomului utilizat dar și de tipul bateriei, soluția fiind totuși implementată în cazul unor sisteme mobile unde tensiunea la bornele bateriei are variații mari în raport cu capacitatea bateriei.

O privire de ansamblu asupra variației tensiunii la bornele bateriei în raport cu sarcina disponibilă este oferită în fig.6.8, unde sunt considerate două tipuri diferite de baterii comerciale (*Li-ion* și *Ni-MH*). Descărcarea bateriilor este reprezentată pe axa orizontală ca procent din capacitatea inițială a bateriei, pe axele verticale fiind reprezentată tensiunea la bornele bateriei, în volți. Variația tensiunii în raport cu capacitatea bateriei *Ni-MH* (*Panasonic HHR200A*) este descrisă în fig.6.8-a pentru un consum constant (1.0 C) la diferite valori ale temperaturii și în fig.6.8-b pentru o temperatură de 20°C, aceste grafice fiind preluate din [97].

Caracteristica tensiune-capacitate pentru bateria Litiu-ion considerată (*Panasonic CGR18650CH*) este preluată din [98] și prezentată în fig.6.8-c pentru un consum constant (1,0 C) iar în fig.6.8-d pentru diferite rate de consum la o temperatură de 25°C.

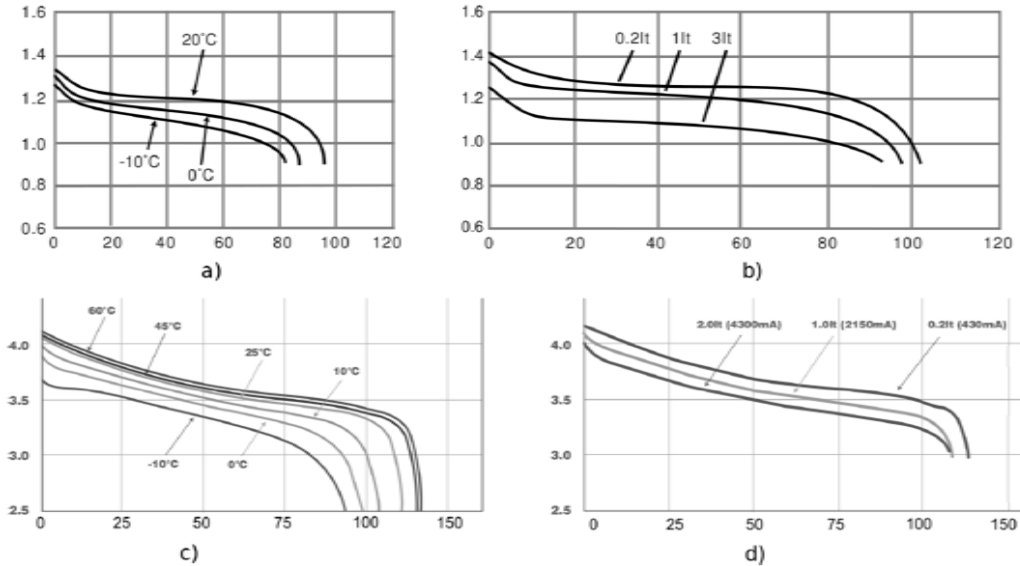


Fig.6.8 Variația tensiunii la borne în funcție de capacitatea bateriei.

Baterii Ni-MH [97]: a) V/%C la un consum constant (1.0 C); b) V/%C la o temperatură constantă (20°C). **Baterii Li-ion** [98]: c) V/%C la un consum constant (1.0 C); d) V/%C la o temperatură constantă (25°C).

Dacă în cazul bateriei Li-ion variația tensiunii este relativ uniformă (fig.6.8-c,d), se observă că pentru bateria Ni-MH (fig.6.8-a,b), valoarea tensiunii este aproape constantă pentru intervalul 20 - 70% C, valorile obținute pentru SOC în acest interval fiind afectate de erori mai mari.

Implementarea acestei variante a modelelor electrice la nivelul unui nod WSN, utilizând un polinom de grad m presupune următoarele operații:

```

01: // Sunt necesare masuratori si determinari experimentale
02: // pentru a obtine:
03: // 1.caracteristica V-SOC pentru k rate de consum constant
04: // in cazul a l temperaturi diferite (k*l masuratori)
05: // 2.determinarea pentru cele k*l cazuri a coeficientilor
06: // unui polinom de gradul m:
07: // SOC = f(V) = c0 + c1*V + ... + cm*V^m
08: TB_i = {i1, i2, ..., ik}; // cele k valori ale consumului
09: TB_T = {T1, T2, ..., Tl}; // cele l valori ale temperaturii
10: TB_c = {i1, ..., ik
11: /*T1*/{{c111, c112,..., c11m}, ..., {c1k1, c1k2,..., c1km}},
12: /*T2*/{{c211, c212,..., c21m}, ..., {c2k1, c2k2,..., c2km}},
13: ...
14: /*Tl*/{{c1l1, c1l2,..., c1lk}, ..., {clk1, clk2,..., clkkm}}
15: }
16:
17: electric_1()
18: IN:
19: i, valori constante
20: OUT:
21: SOC
22: {

```

```

23: i_idx = get_idx(TB_i,i,k);
24: T = get_ADC(T_ch);
25: T_idx = get_idx(TB_T,T,l);
26: V = get_ADC(v_ch);
27:
28: SOC=TB_c[T_idx,i_idx,0];
29: for(idx=1;idx<=m;idx++){
30:     SOC+=TB_c[T_idx,i_idx,0]*V;
31:     V*=V;
32: }
33: return SOC;
34: }

```

Se observă numărul mic și complexitatea redusă a operațiilor utilizate, pentru un polinom de gradul m fiind necesare doar $2m$ adunări, m înmulțiri și un număr variabil de comparații necesare pentru determinarea indexului în tabelă.

Spre deosebire de modelele anterioare, deoarece capacitatea este calculată sub formă de procente pe baza unor calcule ce implică valori constante, nu este necesară adaptarea rezoluției cu care sunt reprezentate mărimile fizice. Chiar dacă sunt foarte eficiente din punct de vedere al resurselor de calcul necesare, aceste modele sunt afectate de erori în fiecare etapă, începând de la precizia măsurătorilor efectuate la determinarea parametrilor bateriei, aproximările caracteristicii printr-un polinom, aproximarea coeficienților, precizia cu care se măsoară tensiunea la borne, ajustarea consumului și a temperaturii la valorile prederminate și acumularea acestor erori prin evaluarea polinomului. Toate acestea conduc la o precizie a estimării capacității bateriei inferioară altor modele.

6.4.2 Determinări recurente ale capacității

Un alt mod de implementare al modelelor electrice ale bateriei presupune determinarea capacității folosind prima expresie din relația (6.20). Plecând de la ipoteza că pe un interval de timp t în care consumul electric al unui nod WSN este constant nu avem variații semnificative ale temperaturii, și considerând că durata tuturor intervalelor de timp în care curentul nu variază poate fi determinată, atunci termenii α , β , γ și i din prima expresie a relației (6.20) sunt constanți pe aceste intervale. Considerând că durata de funcționare a unui nod WSN este o sumă de astfel de intervale, capacitatea bateriei la sfârșitul unui interval de timp k se poate rescrie sub forma:

$$SOC(k) = SOC(k-1) - \alpha[i(k)] \cdot \beta[T(k)] \cdot \gamma[n(k)] \cdot i(k)t \quad (6.22)$$

unde α , β și dacă e cazul γ , sunt tabele de interpolare care se obțin pe baza caracteristicilor determinate prin măsurări.

Implementarea acestui model fără a ține cont de reîncărcare este:

```

01: TB_a = {{ i1, i2, ..., ik}, // k valori pentru consum
02:         {vi1, vi2, ..., vik}};
03: TB_b = {{ T1, T2, ..., Tl}, // l valori pentru temperatura
04:         {vT1, vT2, ..., vTl}};
05:
06: electric_2()
07: IN:
08: SOC, i, t, valori constante
09: OUT:
10: SOC
11: {
12:   for(idx=0; i<TB_a[0,idx] && idx<k; idx++);
13:   a = idx<k ? TB_a[1,idx]+(TB_a[1,idx+1]-TB_a[1,idx])*
14:             (i-TB_a[0,idx])/(TB_a[0,idx+1]-TB_a[0,idx]);
15:             : TB_a[1,k];
16:
17:   T = get_ADC(T_ch);
18:   for(idx=0; T<TB_b[0,idx] && idx<l; idx++);
19:   b = idx<l ? TB_b[1,idx]+(TB_b[1,idx+1]-TB_b[1,idx])*
20:             (T-TB_b[0,idx])/(TB_b[0,idx+1]-TB_b[0,idx]);
21:             : TB_b[1,l];
22:
23:   SOC -= a*b*i*t;
24:   return;
25: }

```

6.4.3 Concluzii

Utilizarea modelelor electrice ale bateriei în nodurile WSN pentru determinarea sarcinii disponibile presupune utilizarea unor resurse de calcul relativ puține. Prin similaritățile între relațiile (6.1) și (6.22) se poate spune că implementarea recurentă a modelului electric este o variantă îmbunătățită a modelului liniar, câștigul în precizie fiind însoțit de mai multe calcule și implicit adaptări mai complicate ale rezoluției.

Varianta bazată pe determinări sporadice este ideală din punct de vedere al interferenței cu aplicația, dezavantajele acesteia fiind legate doar de precizia valorilor obținute și de faptul că un câștig mic în precizie se obține cu un consum mare de memorie și efort de calcul pentru determinări experimentale.

6.5 Modele stohastice

Sunt modele bazate pe probabilități care descriu comportamentul bateriei la un nivel mai abstract decât alte modelări (electrice, analitice, electrochimice). Principiul pe baza căruia sunt dezvoltate aceste modele este determinarea experimentală a unor parametri ai bateriei și utilizarea acestora în determinarea probabilistică a comportamentului bateriei.

Un model stohastic reprezentativ este cel propus de Chiasserini și Rao în [99], acesta fiind orientat pe consumul de energie asociat pachetelor de mesaje

trimise de dispozitivele electronice mobile. Acesta utilizează lanțuri Markov pentru a descrie comportamentul bateriei, capacitatea nominală a acesteia fiind reprezentată ca un număr de $N+1$ stări ale unei înlănțuiri de tip *Markov*. Fiecare stare reprezintă cantitatea de energie necesară pentru a trimite un pachet de mesaje, valoarea nominală N fiind definită ca numărul de pachete care se pot trimite în intervalul de timp scurs până la descărcarea bateriei (momentul în care tensiunea la bornele bateriei scade până la o valoare de prag) prin transmiterea neîntreruptă a acestora. Această valoare nominală este considerată mai mică decât capacitatea teoretică, exprimată în T unități de sarcină.

Modelul propus în [99] este prezentat în fig.6.9.

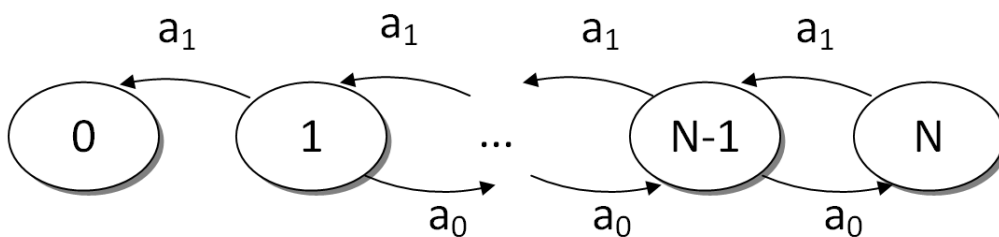


Fig.6.9 Modelul stohastic Chiasserini-Rao [99].

N - baterie încărcată la capacitatea nominală, 0 - baterie descărcată, a_0 probabilitatea efectului de recuperare (relaxarea bateriei), a_1 - probabilitatea de a trimite un pachet.

Când capacitatea bateriei la un moment t corespunde stării i , probabilitatea de a fi necesară trimiterea unui pachet de mesaje și de a trece în starea $i-1$ este a_1 , iar posibilitatea de a recupera sarcină electrică și de a avea o tranziție în starea $i+1$ are o probabilitate a_0 . Bateria se consideră descărcată în momentul tranziției în starea 0 .

Implementarea acestui model pentru determinarea capacității la nivelul unui nod *WSN* presupune adaptarea acestuia la un profil de consum cunoscut (eliminarea probabilității pentru trimiterea unui mesaj, această operație fiind bine determinată) și executarea periodică a următoarelor operații:

```

01: stochastic_1()
02: IN:
03: i, m, a0
04: OUT:
05: i, (SOC)
06: {
07:   if(m) // apel datorat transmiterii unui pachet
08:     if(-i <= 0) // probabilitatea tranzitieii este 1
09:       return 0; // baterie descarcata
10:     else
11:       return SOC(i); // tranzitie in i-1
12:     p = generat_aleator(0, 1);
13:     if (p<a0)
14:       i++; // tranzitie in i+1 cu probabilitatea a0
15:     return SOC(i);
16: }

```

Se observă că această implementare necesită un efort de calcul inferior modelului liniar, fiind apropiată din punct de vedere al resurselor implicate de

metoda contorizării mesajelor descrisă în capitolul 3 dar având în plus o implementare a efectului de relaxare.

Precizia acestui model este îmbunătățită semnificativ prin modificarea probabilităților utilizate în funcție de context și prin considerarea celorlalte proprietăți ale bateriei. Pentru determinarea duratei de funcționare a sistemelor electronice mobile încorporate, în [100] este utilizat un model Chiasserini-Rao modificat, acesta fiind reprezentat în fig.6.10.

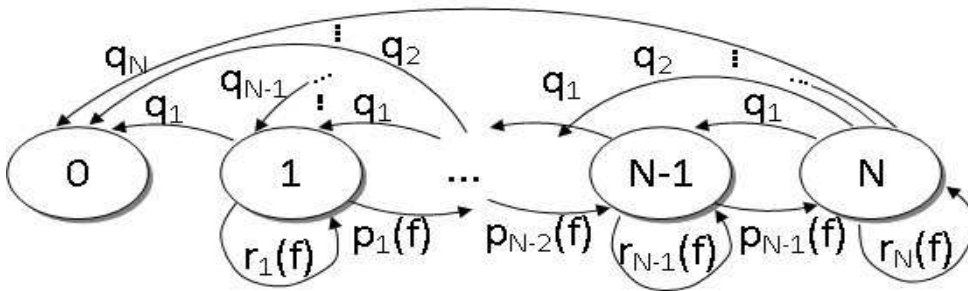


Fig.6.10 Modelul stohastic Chiasserini-Rao modificat [100].

- q_0 - probabilitatea efectului de recuperare,
- q_i - probabilitatea de a pierde i unități de sarcină (tranziție din starea j în starea $j-1$),
- $p_j(f)$ - probabilitatea apariției efectului de recuperare în starea j și faza f ,
- $r_j(f)$ - probabilitatea de a rămâne în aceeași stare de încărcare j în timpul fazei f .

Față de modelul din fig.6.9 a fost adăugată posibilitatea de a pierde un număr variabil de unități de sarcină la un interval de timp, sunt posibile situații de a rămâne în aceeași stare cu probabilitatea r (consum 0) precum și ponderarea probabilității de apariție a efectului de recuperare p cu sarcina disponibilă în baterie, astfel încât posibilitatea de trecere dintr-o stare j în starea $j+1$ scade exponențial pe măsură ce bateria se descarcă. De asemenea, a fost introdusă noțiunea de fază (f), aceasta fiind o valoare variabilă care crește în funcție de numărul total de unități de sarcină consumate, astfel încât probabilitatea p de a reveni din starea j în $j+1$ depinde și de acest parametru.

Valorile lui $f \in \{1, 2, \dots, f_{max}\}$, având corespondente intervale în domeniul unităților de sarcină astfel încât d_f va lua valori specifice structurii bateriei, cu $d_0 = 0$ și $d_{f_{max}+1} = T$.

Considerând q_0 probabilitatea de a nu avea consum și q_i probabilitatea de a pierde i unități de sarcină pe un interval de timp, tranzițiile între stări se vor realiza conform probabilităților [100]:

$$p_j(f) = \begin{cases} q_0 \cdot e^{-g_N(N-j)-g_C(f)}, & f = 0 \\ q_0 \cdot e^{-g_N(N-j)-g_C(f)d_f}, & f = \frac{1 \cdot f_{max}}{1}, j = \overline{1, N-1} \\ r_j(f) = q_0 - p_j(f), & j = \overline{1, N-1} \\ r_n(f) = q_0 \end{cases} \quad (6.23)$$

unde valori mai mici ale lui g_N corespund unei conductivități mai bune, evidențiind efectul de relaxare iar valorile mai mari corespund unei rezistențe interne mai mari; g_C ține cont de impactul curentului asupra efectului de relaxare.

Tot în lucrarea [100] este propusă o schemă de implementare a acestui algoritm care să considere și efectul ratei de capacitate la un consum mai mare de curent. În acest scop se definește o tabelă cu unități de sarcină corespunzătoare pentru fiecare consum efectiv, astfel încât numărul de unități de sarcină care se scade este mai mare, fiind preluat din această tabelă, care se completează cu valori obținute utilizând modele bazate pe sisteme de ecuații diferențiale.

Implementarea acestui algoritm se face prin apeluri periodice ale algoritmului următor pentru determinarea stării viitoare în funcție de valoarea medie a curentului consumat pe ultima perioadă de timp:

```

01: stochastic_2()
02: IN:
03: I, j, f, R[], Eff[]
04: OUT:
05: j, f
06: {
07:   r = generat_aleator(0, 1);
08:   Ieff = Eff[I]; // adaptarea unitatilor consumate la efic. bateriei
09:   if( Ieff > 0 ){ // tranzitie in j-Ieff
10:     j -= Ieff;
11:     f = actualizare(Ieff);
12:   }
13:   else
14:     if (r < R[j, f])
15:       j++; // tranzitie in j+1
16:   return i;
17: }

```

Se observă că din punct de vedere al operațiilor efectuate la fiecare iterație că și a doua formă propusă pentru acest model necesită un efort de calcul foarte mic, câștigul în precizie fiind obținut cu un consum foarte mare de memorie. Numărul de unități de sarcină se alege în funcție de consum și de capacitatea bateriei, valorile fiind de ordinul 10^6 . Astfel, considerând reprezentarea probabilităților pe un octet, dimensiunea tabelii R va fi de $2 \cdot 10^6$ octeți, o singură familie de microcontrolere din cele descrise în capitolul 2 dispunând de astfel de resurse.

6.5.1 Concluzii

Modelele bateriei bazate pe probabilități presupun un efort de calcul foarte mic, fiind apropiate de modelările liniare din acest punct de vedere. De asemenea, precizia cu care aceste modele estimează cantitatea de sarcină disponibilă în baterii este destul de mică, îmbunătățirea acestora realizându-se cu un consum excesiv de memorie. Deși aceste modele nu sunt precise, informația despre capacitatea bateriei fiind orientativă, prin faptul că oferă o metrică pentru capacitatea bateriei ținând cont de efectul de relaxare, o modificare a primei variante a modelului stohastic discutat a fost utilizată la implementarea protocolului *H-BAR* pentru a folosi informația despre capacitatea bateriei (starea curentă în lanțul Markov) ca și criteriu pentru selectarea nodurilor din clustere prin care se face redirecționarea informației către centrul de colectare, fiind obținută o îmbunătățire a duratei de funcționare a rețelei de până la 3 ori durată obținută prin utilizarea protocolului LEACH în care alegerea managerului de cluster se face probabilistic [87].

Principiile descrise de prima variantă a modelului stohastic prezentat au fost utilizate de Rao et al. pentru modificarea modelului cinetic al bateriei în [93], modelul mixt obținut fiind utilizat pentru o baterie *Ni-MH* cu o precizie de 2,65 %.

6.6 Modele electrochimice

Modelele electrochimice descriu comportamentul bateriilor prin intermediul unor ecuații diferențiale cu derivate parțiale, ecuațiile unui astfel de model pentru bateriile Li-ion preluat din [101], fiind exemplificate în fig.6.11.

1	$\varepsilon_p \frac{\partial c}{\partial t} = D_{\text{eff,p}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + a_p(1 - t_+)j_p$
2	$-\sigma_{\text{eff,p}} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} - \kappa_{\text{eff,p}} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} + \frac{2\kappa_{\text{eff,p}}RT}{F}(1 - t_+) \frac{\partial \ln c}{\partial x} = I$
3	$\sigma_{\text{eff,p}} \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} = a_p F j_p$
4	$\frac{d}{dt} c_s^{\text{ave}} + 3 \frac{j_p}{R_p} = 0 \text{ and } \frac{D_{s,p}}{R_p} (c_s^{\text{surf}} - c_s^{\text{ave}}) = -\frac{j_p}{5}$
5	$\varepsilon_s \frac{\partial c}{\partial t} = D_{\text{eff,s}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$
6	$I = -\kappa_{\text{eff,s}} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} + \frac{2\kappa_{\text{eff,s}}RT}{F}(1 - t_+) \frac{\partial \ln c}{\partial x}$
7	$\varepsilon_n \frac{\partial c}{\partial t} = D_{\text{eff,n}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + a_n(1 - t_+)j_n$
8	$-\sigma_{\text{eff,n}} \frac{\partial \Phi_1}{\partial x} - \kappa_{\text{eff,n}} \frac{\partial \Phi_2}{\partial x} + \frac{2\kappa_{\text{eff,n}}RT}{F}(1 - t_+) \frac{\partial \ln c}{\partial x} = I$
9	$\sigma_{\text{eff,n}} \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} = a_n F j_n$
10	$\frac{d}{dt} c_s^{\text{ave}} + 3 \frac{j_n}{R_n} = 0 \text{ and } \frac{D_{s,n}}{R_p} (c_s^{\text{surf}} - c_s^{\text{ave}}) = -\frac{j_n}{5}$

Fig.6.11 Ecuațiile care descriu comportamentul electrochimic al bateriilor Li-ion [101]. Ecuațiile pentru electrodul pozitiv (1-4), separator (5,6) și electrodul negativ (7-10). Nu sunt prezentate relațiile pentru condițiile inițiale și condițiile la limită.

Deși sunt cele mai precise modele, fiind utilizate ca referință pentru celelalte modelări matematice ale bateriei, prin numărul mare de ecuații și parametrii dar și din punct de vedere al complexității, aceste modele nu pot fi implementate sub această formă pentru monitorizarea sarcinii existente în bateriile senzorilor *WSN*.

Prin activitățile desfășurate pe parcursul cercetării doctorale au fost obținute unele rezultate interesante din punct de vedere matematic, în încercarea de a obține un nou model matematic al bateriilor care să permită utilizarea ecuațiilor diferențiale ale modelelor electrochimice în condițiile existente la nivelul senzorilor fără fir. Utilizarea acestora este luată în considerare ca o continuare a activităților prezentate, pentru interpretarea rezultatelor obținute fiind necesară o expertiză în domeniul electrochimiei.

6.7 Studiu de caz

Pentru o analiză comparativă a modelelor, din punct de vedere al resurselor disponibile pe platformele studiate, se consideră cazul unui consum de 50 mA pentru minim 10 ms, consum care apare aleator, pe baza unor evenimente din sistemul monitorizat de rețeaua WSN. Astfel, rezoluția cu care sunt reprezentate valorile logice trebuie să permită reprezentarea unui consum de $1,39 \cdot 10^{-4}$ mAh. Pentru o baterie de 2150 mAh, capacitatea bateriei la o rezoluție de reprezentare a mărimilor fizice 10^{-4} necesită $21,5 \cdot 10^6$ unități logice, deci se reprezintă pe minim 32 biți.

Prin utilizarea modelului liniar sunt necesare o operație de scădere pe 32 biți, o operație de înmulțire (considerând operanzi pe 16 biți pentru timp și curent) și în cazul optimizat, o operație de deplasare pentru fiecare iterație.

Pentru celelalte modele, la o reprezentare a datelor pe 32 biți, valorile parametrilor au fost considerate după cum urmează:

- pentru primul model cinetic (Kibam1) cât și pentru varianta optimizată (Kibam2), constantele (c_ct, k_ct, etc.) se preiau din variabile alocate în memoria RAM;
- pentru primul model electric (Electric1) numărul de valori ale curentului este considerat $k = 30$, numărul de intervale pentru temperatură este $l = 20$ iar gradul polinomului $m = 6$;
- pentru al doilea model electric (Electric2) au fost considerate $k = 30$ și $l = 10$
- pentru al doilea model stochastic (Stochastic2) au fost considerate 30 de intrări în tabela de corecție a curentului (Eff), 2150 de stări și $f_{\max} = 1$

Pentru a face distincție între impactul asupra datelor și cel asupra codului generat, toate datele au fost alocate în memoria RAM, aceste constrângeri suplimentare fiind luate în considerare la definirea valorilor pentru parametrii enunțați anterior. Necesarul de resurse de memorie ROM și RAM pentru implementarea modelelor pe platformele analizate în această lucrare este descris în fig.6.12. În fig.6.13, acest necesar este reprezentat relativ la capacitatea memoriei disponibile în microcontrolerele nodurilor studiate. Se observă necesarul mare de resurse pentru stocarea datelor în cazul modelelor care operează cu tabele de date. Din cauza dimensiunii, aceste tabele nu se pot copia în memoria RAM, astfel că modelele *Electric1* și *Stochastic2* nu se vor putea implementa pe nodurile a căror microcontrolere sunt bazate pe memorie Flash de tip serial (nodurile *Redbee*). De asemenea, în cazul modelului *Kibam2*, necesarul suplimentar de memorie ROM poate fi redus semnificativ prin reimplementarea funcției de bibliotecă utilizată pentru obținerea ridicării la putere prin folosirea unor operații cu opranzi întregi.

O concluzie importantă care se desprinde din fig.6.13 este că noile tehnologii pe 32 de biți (Imote2) permit integrarea, fără constrângeri semnificative, a tuturor modelelor bateriei analizate în acest capitol.

Prin analiza comparativă a celor două figuri (fig.6.12 și fig.6.13), se observă variații destul de mari care nu permit enunțarea unor concluzii, despre un anumit model al bateriei, general valabile pentru toate nodurile WSN, prin lucrarea de față oferindu-se suport în alegerea modelului potrivit pentru o anumită platformă, această alegere realizându-se însă în funcție de contextul aplicației

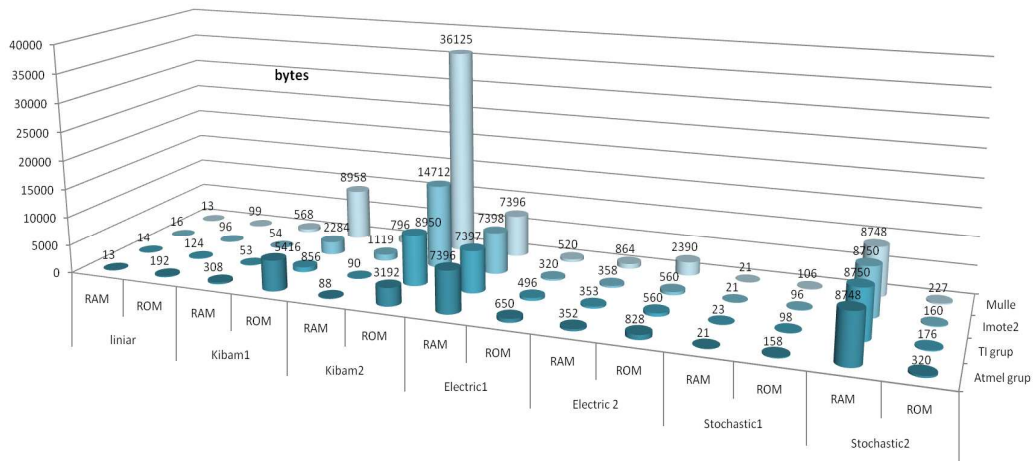


Fig.6.12 Necesarul de memorie RAM și ROM pentru implementarea modelelor bateriei pe platformele analizate. Valorile sunt exprimate în octeți. Prin Atmel grup sunt identificați senzorii MicaZ, Mica2, Mica2Dot și Iris, iar prin TI grup sunt reprezentați Epic, EyesIFX, Telos, Shimmer și Tmote.

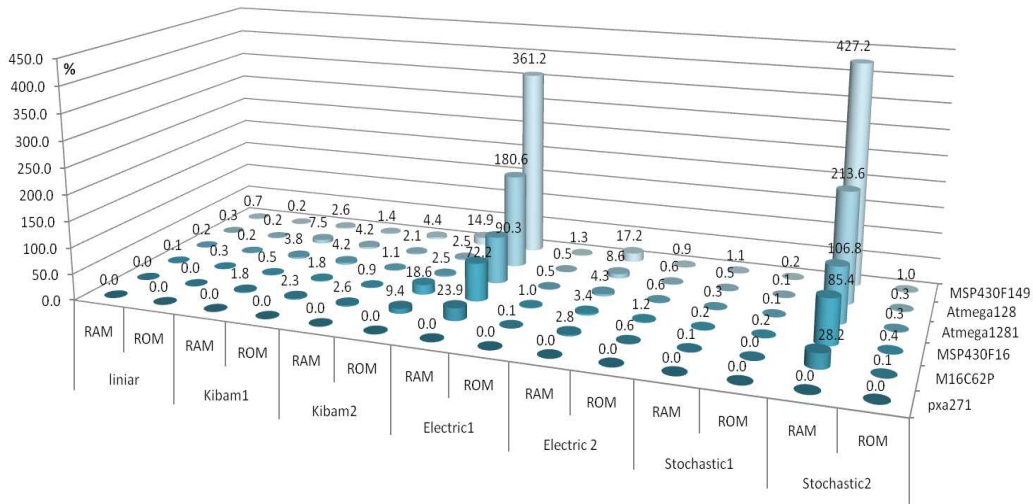


Fig.6.13 Necesarul de memorie RAM și ROM relativ la resursele de memorie disponibile. Valorile sunt exprimate în procente. Pxa271 este utilizat ca element de procesare pe senzorii Imote2; M16C62P este utilizat pe platforma Mulle; MSP430F16x este utilizat de EyesIFXv2, Shimmer, Shimmer2, Telosb și Tmote; Atmega1281 este prezent pe nodurile Iris; Atmega128L pe MicaZ, Mica2, Mica2Dot iar MSP430F149 pe primele variante ale nodurilor EyesIFX și Telos.

7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

Această lucrare se înscrie în efortul de cercetare depus în domeniul rețelelor de senzori *WSN* pentru conservarea energiei disponibile la nivel de nod în scopul creșterii performanțelor rețelei prin prelungirea duratei de funcționare a acesteia. Astfel, s-au prezentat soluțiile propuse pentru monitorizarea în timp-real, atât prin hardware cât și prin software, a consumului de energie la nivel de senzor fără fir în scopul obținerii energiei disponibile în bateriile fiecărui nod al rețelei. Spre deosebire de soluțiile hardware existente, platforma dezvoltată se caracterizează printr-o mai mare flexibilitate, fiind capabilă, pe lângă detectarea curentului consumat pe diferite plaje, să stimuleze nodurile *WSN* pentru simularea diverselor condiții de mediu. În soluția software descrisă se are în vedere estimarea consumului de energie la un moment dat în funcție de impactul operațiilor efectuate de nod la momentul respectiv. Dezavantajele metodei software prezentate sunt legate de precizia instrumentelor folosite în laborator pentru determinarea impactului pe care fiecare factor identificat îl are asupra consumului, dar și de dificultatea de a determina consumul de energie în intervalele de timp în care microcontrolerul funcționează în regim cu consum redus având dezactivate timer-ele, în acest caz fiind imposibil de determinat durata acestor intervale folosind doar resursele locale. Acest dezavantaj are implicații și în integrarea unui model al bateriei capabil să țină cont de influența efectului de relaxare.

De asemenea, prin această lucrare s-a descris sistemul proiectat și dezvoltat în laborator pentru determinări experimentale, s-au analizat constrângerile existente la nivelul unui nod *WSN* din punct de vedere al resurselor disponibile pentru ca mai apoi, luând în considerare datele obținute, să fie studiată posibilitatea de a integra soluțiile de monitorizare propuse cu unele modele matematice ale bateriei, accentul fiind pus pe implementarea la nivelul unui senzor *WSN* pentru monitorizarea în timp real a resurselor de energie disponibile.

Contribuțiile aduse în domeniul rețelelor *WSN* prin această lucrare sunt corelate cu obiectivele enunțate în primul capitol astfel:

- Rezultatele obținute în realizarea primelor două obiective sunt detaliate în capitolul 2, fiind demonstrat utilizând un formalism matematic, printr-o abordare originală, modul în care sarcina disponibilă în bateriile nodurilor *WSN* influențează durata de funcționare a unei rețele. Diferitele topologii ale rețelelor *WSN* au fost reduse la două cazuri considerate nucleul de generatori pentru toate topologiile existente, demonstrația influenței energiei disponibile la nivel de nod asupra rețelei realizându-se prin considerarea uneia din definițiile utilizate în prezent pentru durata de funcționare a acesteia. Îndeplinirea celui de al doilea obiectiv a fost realizată prin enumerarea factorilor care influențează consumul folosind un formalism de tip cauze-efect. Toate aceste rezultate aparțin autorului și au fost prezentate la conferința *CONTI'2010* [102], lucrarea fiind citată de autori străini în baze de date din domeniu;
- În capitolul 3 sunt determinate comparativ resursele disponibile pe platformele *WSN* reprezentative, rezultatele fiind acceptate spre prezentare la conferința internațională *SOFA'2012* [103], proceedingul conferinței

urmând să fie publicat de Springer în seria „Advances in Intelligent and Soft Computing” (indexată ISI proceeding).

- capitolul 4 propune tehnologii inovative pentru validarea offline a aplicațiilor bazate pe rețele WSN. Soluția propusă acoperă, prin flexibilitate, multe din neajunsurile mediilor de testare WSN utilizate în prezent. Elementele de noutate pe care le aduce sunt:
 - stimularea individuală, în mod automat sau la cerere, a nodurilor WSN;
 - utilizarea într-o manieră originală a mecanismului de prioritați și adresare în rețeaua CAN;
 - *extensibilitate* atât prin faptul că permite monitorizarea unor noi noduri WSN prin asocierea acestora unor plăci și conectarea acestora la magistrala CAN, cât și prin posibilitatea de a adăuga, foarte ușor, noi funcționalități, prin implementarea unor noi comenzi;
 - *scalabilitate și caracter generic*.

Arhitectura acestui sistem a fost prezentată la o conferința internațională specializată pe sisteme de achiziție inteligente, IDAACS'2011 [104], o versiune extinsă a lucrării fiind publicată ca un capitol distinct într-o carte apărută la o editură din străinătate [105].

- capitolul 5 propune soluții originale pentru monitorizarea offline respectiv online a nodurilor rețelelor WSN. Acestea pot fi folosite ca suport în creșterea performanțelor rețelei prin prelungirea duratei de funcționare;
 - soluția de monitorizare offline propusă are multe aspecte inovative și acoperă prin flexibilitate, multe din neajunsurile mediilor de testare WSN utilizate în prezent. Elementele de noutate pe care le aduce sunt:
 - monitorizarea configurabilă dinamic pe mai multe plaje de consum;
 - integrarea aplicației WSN cu aplicația de testare;
 - definirea de evenimente și configurarea dinamică de teste automate.
 - aceste rezultate au fost publicate în lucrările [104,105].
 - în soluția de monitorizare online a consumului, precizia cu care se estimează consumul de energie crește exponențial cu numărul operațiilor considerate, operații pentru care valoarea consumului este determinată în laborator. Originalitatea soluției propuse constă în utilizarea *factorilor statici* și a *factorilor dinamici* în obținerea profilelor de consum. Rezultatele obținute au fost prezentate la conferința internațională SACI'2011 [106], modelul matematic fiind publicat într-un jurnal [107].
- elementele de noutate aduse de capitolul 6 constau în modul de abordare al acestei teme, contribuțiile aduse fiind reducerea unor modele analitice la o formă care poate fi implementată pe platformele WSN analizate, obținându-se îmbunătățiri semnificative pentru unele modele analitice (pentru cazul analizat în fig.6.6, în care s-a uilizat un pas de discretizare foarte mic, timpul de de procesare al unei iterații a modelului chinetic a fost redus de cel puțin 100 de ori, prin reformularea ecuațiilor care descriu acest model sub forma unui sistem dinamic și eliminarea buclelor prin determinarea și utilizarea soluției generale a sistemului). Din informațiile disponibile, aceasta

este prima lucrare în care se realizează o analiză a resurselor necesare pentru integrarea modelelor bateriei pe principalele platforme de senzori, rezultatele oferind suport în alegerea modelelor bateriei relativ la constrângerile aplicației. O parte a rezultatelor obținute a fost prezentată la conferințe internaționale (*EUROCON'2011* [108], *SENSORNETS'2012* [109]), alte rezultate fiind publicate într-un jurnal [110] sau trimise spre publicare la alte jurnale.

Rezumând obiectivele realizate, principalele *tehnologii propuse prin această lucrare pentru a fi folosite ca suport în creșterea performanțelor rețelelor WSN sunt:*

- 1. platforma hardware propusă pentru monitorizarea offline și validarea rețelelor WSN:** s-a proiectat și dezvoltat o platformă pentru testarea și validarea rețelelor de senzori, care permite pe lângă monitorizarea offline a consumului de energie în nodurile WSN, pe mai multe plaaje de consum, și stimularea individuală a nodurilor pentru simularea condițiilor aplicației;
- 2. metoda de monitorizare online a energiei la nivel de nod;**
- 3. modele matematice ale bateriei:** s-au adaptat diferite tipuri de modele ale bateriei la contextul rețelelor WSN pentru monitorizarea online, în timp-real, a resurselor de energie disponibile la nivel de nod.

Câteva din concluziile care se desprind din materialul propus referitor la utilizarea modelelor matematice ale bateriei la nivelul nodurilor WSN sunt:

- variațiile destul de mari din punct de vedere al necesarului de resurse pentru implementarea unui model al bateriei pe diverse platforme, nu permit enunțarea unor concluzii general valabile pentru toate nodurile WSN, prin lucrarea de față oferindu-se un suport în alegerea modelului potrivit pentru o anumită platformă, această alegere realizându-se însă în funcție de contextul aplicației;
- noile tehnologii pe 32 de biți (Imote2) permit integrarea, fără constrângeri semnificative, a unor modele ale bateriei analizate în această lucrare. Modelele analizate prin această lucrare sunt utile pentru unele arhitecturi pe 32 de biți și chiar pentru soluții mixte cu circuite de tip *FPGA* asociate microcontrolerelor, acestea necesitând strategii mult mai avansate pentru managementul și alocarea resurselor astfel încât vor fi necesare evaluări calitative ale capacității bateriei și estimarea intervalului de timp în care nodurile pot funcționa;
- exceptând platforma Imote2 sau altele cu resurse similare acesteia, restul platformelor actuale de senzori WSN permit doar implementarea unor tehnici simple, fără estimarea duratei de funcționare a nodurilor dar oferă suport pentru prelungirea acesteia; astfel, precizia modelelor utilizate este calibrată în contextul aplicației relativ la efortul de calcul și necesarul de memorie introdus de implementarea modelelor matematice ale bateriei.

Continuarea activităților descrise prin această lucrare vizează obținerea unui sistem online, capabil să ofere informație în timp-real despre starea de încărcare a bateriilor din nodurile rețelelor WSN pe baza măsurării tensiunii la bornele bateriei, și a determinării variațiilor de temperatură, similar modelelor electrice, dar cu o precizie mai bună decât a soluțiilor actuale. Se are în vedere utilizarea rezultatelor obținute în analiza ecuațiilor diferențiale ale modelelor electrochimice, obținute prin

utilizarea unor metode din geometria Hamilton-Poisson, scopul acestor analize fiind obținerea pe cale analitică a unor relații între capacitatea bateriilor, tensiunea la borne, curentul consumat și temperatura mediului, similare celor determinate pe cale experimentală în cazul modelelor electrice dar nealterate de erori de măsurare, urmărindu-se combinarea preciziei modelelor electrochimice cu efortul de calcul minimal necesar pentru determinarea temperaturii și a tensiunii la bornele bateriei precum și eliminarea tuturor verigilor intermediare existente în prezent în cazul determinării pe cale experimentală a caracteristicilor modelelor electrice. Păstrarea unui efort de calcul redus este fezabilă, în soluția preconizată fiind utilizate preponderent căutări în tabele și realizarea unor interpolări.

ANEXA A - STRUCTURA UNUI MESAJ CAN 2.0

câmp	format standard	format extins	Descriere
SOF	1 bit		marchează început mesaj; nivel dominant
arbitrare	11 + 1 biți	11 + 18 + 3 biți	determină prioritatea mesajului: valori mai mici -> prioritate mai mare; ultimul bit RTR este dominant; pentru formatul extins, identificatorul are 29 biți cu obligativitatea ca cei 7 cei mai semnificativi biți să nu fie toți recesivi; de asemenea mai apar doi biți: SRR și IDE, ambii recesivi
control	2 + 4 biți		Conține 4 biți pentru lungimea câmpului de date (DLC); în cazul formatului standard conține și bitul IDE, dominant; bitul r0 este rezervat la fel ca și bitul r1 ce substituie IDE în cazul formatului extins;
date	0 .. 64 biți		Conține un număr de octeți dat de câmpul DLC; prin intermediul acestora se transmite informația utilă; transmisia începe cu primul octet, MSB.
CRC	15 + 1 biți		se folosește un cod ciclic redundant pe 15 biți generat cu polinomul: $x^{15} + x^{14} + x^{10} + x^8 + x^7 + x^4 + x^3 + 1$; Al 16-lea bit este întotdeauna recesiv și marchează sfârșitul codului.
ACK	2 biți		Conține un bit ACK și unul DEL. ACK poate fi dominant sau recesiv (transmisie/recepție)
EOF	7 biți		marchează sfârșitul unui mesaj de date; constă în 7 biți recesivi consecutivi.
IFS	3 biți		separă două mesaje consecutive; constă din 3 biți recesivi

Tabelul A.1: Structura unui mesaj CAN 2.0 [80] Sunt exemplificate doar mesajele de tip date.

ANEXA B – COMENZI IMPLEMENTATE ÎN MEDIUL DE TESTARE

Sunt utilizate abrevieri și prescurtări ale comenzilor în locul valorilor numerice pentru a facilita înțelegerea semnificației acestora.

→ *Dev_ID, SW_ver*

← *Dev_ID + SW_ver, "VER xx.y"*

- returnează versiunea de software care este executată de controlerul plăcii de monitorizare; este verificată automat de către aplicația ce rulează pe sistemul de calcul pentru evitarea comenzilor incompatibile.

→ *Dev_ID, Digital_Read, Dig_Ch, Recurrence_in_ms*

← *Dev_ID + Digital_Read + Dig_Ch, Pin_value*

- întoarce valoarea canalului de intrare *Dig_Ch* al plăcii de monitorizare identificată prin *Dev_ID*.

→ *Dev_ID, Digital_Out, Digital_out_Channel, Value*

← *Dev_ID + Digital_Out + Digital_Ch, Pin_value*

- atribuie valoarea *Pin_value* canalului de ieșire digitală cu numărul *Digital_Ch*, de pe placa identificată prin *Dev_ID* și întoarce valoarea acelei ieșiri.

→ *Dev_ID, Analog_Read, An_Ch, Recurrence_in_ms*

← *Dev_ID + Analog_Read + An_Ch, High_byte, Low_byte*

- întoarce un mesaj ce conține valoarea canalului de intrare analogică *An_Ch* a plăcii identificate prin *Dev_ID*, valoare reprezentată pe doi octeți.

→ *Dev_ID, Ext_Analog_Read, An_Ch, Recurrence_in_ms*

← *Dev_ID + Ext_Analog_Read + An_Ch, An_Ch_H, An_Ch_L, Time_H, Time_L*

- similară cu *Analog_Read*, dar întoarce și o valoare în microsecunde a momentului în care prelevarea de informație a fost efectuată.

→ *Dev_ID, PWM_out, Ch, Polarity, Period, DutyCycle*

← *Dev_ID + PWM_out + Ch, Ch*

- generează un semnal PWM pe canalul specificat, cu valoarea inițială specificată prin *Polarity*, perioada fiind dată în milisecunde iar factorul de umplere reprezentând procente ale nivelului de start din perioada semnalului.

→ *Dev_ID, CAC_Measure*

→ *Dev_ID CAC_Measure, An_Ch*

→ *Dev_ID CAC_Measure, An_Ch, An_V_H, An_V_L, Op, Dig_Ch, Dig_V*

← *Dev_ID + CAC_Measure, An_Ch*

- sunt câteva moduri în care poate fi utilizată această comandă pentru achiziția continuă a semnalelor de pe unele canale analogice; este utilizată în special pentru atribuirea pragurilor unui semnal analogic, operatorilor relaționali asociați acestor praguri, a canalelor configurate ca ieșiri digitale asociate intrărilor analogice și a valorilor pe care aceste canale le vor lua când relația descrisă în tabelul B.1 este adevărată. Prima formă a acestei comenzi întoarce operatorii și pragurile atribuite tuturor canalelor analogice, a doua formă șterge toate intrările asociate canalului analogic specificat în timp ce a treia formă adaugă o nouă intrare la structura de date asociată canalului analogic respectiv.

→ *Dev_ID, Time_norm, An_Ch, Nominator, Denominator*

← *Dev_ID + Time_norm, empty message*

- configurează valoarea factorului de corecție pentru alunecările de timp, corecție asociată doar calculelor efectuate pentru datele aferente canalului analogic dat ca parametru; este specificată sub forma raportului a doi octeți

Cod	Operator	Operație
0	valoare[An_Ch] == An_Vx	if (an_val ? Prag_val) Dig_out[y] = dig_val
1	valoare[An_Ch] < An_Vx	
2	valoare[An_Ch] <= An_Vx	
3	valoare[An_Ch] > An_Vx	
4	valoare[An_Ch] >= An_Vx	
5	valoare[An_Ch] <> An_Vx	

Tabelul B.1: Expresii relaționale pentru generarea automată de semnale -

valoare[An_Ch] reprezintă valoarea semnalului achiziționat la pe canalul analogic An_Ch; An_Vx este unul din pragurile asociate acelui canal analogic (An_Ch); Digout[Dig_Ch] identifică canalul Dig_Ch configurat ca ieșire digitală. Dig_V poate fi 0 sau 1 și reprezintă valoarea atribuită canalului de ieșire cand este îndeplinită condiția.

→ Dev_ID, CC_Prof_Mon, An_Ch, Resistor, OffsetH, OffsetL, Mode, Rec, [Rec]

← Dev_ID + CC_Prof_Mon_Mode + An_Ch, Profile_Time

← Dev_ID + CC_Prof_Mon_Mode + An_Ch, Profile_Value

← Dev_ID + CC_Prof_Mon_Mode + An_Ch, Overall_Consumption

- această comandă este utilizată în conjuncție cu o alta care calibrează valoarea tensiunii electrice la un canal de intrare al convertorului analog-numeric cu un reper numeric; prin intermediul acestei comenzi se începe monitorizarea consumului de curent al dispozitivului conectat la intrarea analogică specificată. Curentul electric este măsurat prin intermediul căderii de tensiune pe rezistorul a cărui valoare este specificată ca parametru al comenzii. Dacă există un comutator realizat cu tranzistor între masă și rezistența de șunt, atunci tensiunea colector-emitor este folosită ca offset în parametrii comenzii. Recurența cu care vor fi trimise răspunsurile la această comandă este specificată în milisecunde și se poate reprezenta pe unul sau doi octeți.

În cazul unor mesaje cu format greșit sau dacă parametrii sunt incorecți, un text ASCII va fi returnat de placa de monitorizare în cauză, mesaj care indică posibila sursă a erorii: „bad-len”, „bad-mod”, „bad-pin”, „bad-val”, „bad-ch”, „bad-DC”, „bad-cmd” sau „bad-msg”.

ANEXA C – CONFIGURAREA SOFTWARE-ULUI MEDIULUI DE TESTARE

parametru	Valori	Semnificație
CANbaudrate	0x0014	1 MBit/s
	0x0016	800 kBit/s
	0x001C	500 kBit/s
	0x011C	250 kBit/s
	0x031C	125 kBit/s
CANcmdfile	alfanumeric	numele fișierului ce conține mesajele de trimis către ambele rețele
LOGcfgfile	alfanumeric	numele fișierului ce conține filtrele pentru datele achiziționate
DebugOn	"Y"	dacă parametrul are valoarea "Y" este interpretat ca o cerere pentru crearea unui istoric al fluxului de date
USBbaudrate	Numeric	valoare numerică (ASCII) pentru rata de transfer cu rețeaua WSN, în biți/secundă - implicit este 57600 biți/s
USBdev	Numeric	numărul portului USB prin care se face comunicația de date cu dispozitivul MIB520

Tabelul C.1: Parametrii configurabili ai aplicației software.

Valorile sunt configurate
într-un fișier text, sub forma unor linii *parametru = valoare*.

ANEXA D - CONFIGURAREA MESAJELOR ÎN MEDIUL DE TESTARE

nr.	câmp	valori	semnificație
1	Destinație	0 1	Rețeaua WSN Rețeaua CAN
2	Perioada	numerice	perioada semnalului în zecimal, exprimată în microsecunde
3	ID	numerice	identificatorul mesajului, în zecimal
4	Lungime	numerice	lungimea, în zecimal, a numărului de octeți din câmpul de date
5	data 0	numerice	Octeții câmpului
...			de date
5+N	data N		în zecimal

Tabelul D.1: Câmpurile unui mesaj - valorile sunt configurate într-un fișier text, în format CSV .

Rezultatul configurărilor din tabelul D.2 va fi un fișier text cu informația din mesajele filtrate structurată în formă tabelară, primele două câmpuri fiind implicit adăugate și conțin timpul sistemului la momentul recepției unui mesaj, sub forma: |hh:mm:ss|microsec|. Următoarele câmpuri vor fi cele configurate, în ordinea în care au fost adăugate. În situația în care doar anumite câmpuri din tabelă sunt recepționate la un moment dat, celelalte vor păstra vechea valoare.

Poziție Câmp	Valori	Semnificație
1 Nume	alfanumerice	denumirea câmpului de tabel pentru acel câmp
2 Format	alfanumerice	formatul de afișare al valorilor sub forma unui specificator din limbajul C
3 tip date	numerice	0 - șir de caractere numărul de octeți pe care datele se reprezintă ca întreg fără semn
4 sursa mesajului	numerice	0 - WSN 1- CAN
5 ID	numerice	identificatorul mesajului în zecimal
6 data start	numerice	octetul din câmpul de date de unde începe conținutul mesajului
7 data stop	numerice	ultimul octet din câmpul de date ce aparține acestui mesaj

Tabelul D.2: Configurarea colectării datelor – valorile sunt configurate într-un fișier text, în format CSV

BIBLIOGRAFIE

1. *Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks*. **Gilbert, J. and Balouchi, F.** s.l. : Springer, Oct. 2008, International Journal of Automation and Computing, Vol. 05(4), pp. 334-347.
2. **Comisia Europeană.** *Consultare privind normele referitoare la dispozitivele inteligente, conectate - „internetul obiectelor”*. s.l. : UE, 2012.
<http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/12/360&format=HTML&aged=0&language=RO&guiLanguage=en>.
3. *Battery discharge characteristics of wireless sensor nodes: An experimental analysis*. **Park, C., Lahiri, K. și Raghunathan, A.** s.l. : IEEE, 2005. Proc. IEEE Conf. on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks (SECON). pg. 430-440.
4. **Sohraby, K., Minoli, D. și Znati, T.** *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*. s.l. : John Wiley and Sons, 2007.
5. *Fast-prototyping using the BTnode platform*. **Beutel, J.** 2006. Proc. of the Conf on Design, Automation and Test in Europe. pg. 977-982.
6. *Power meter for energy monitoring of wireless sensor networks at scale*. **Jiang, X., și alții.** s.l. : ACM Press, 2007. In Proc. of the 6th intl conf. on Information processing in sensor networks (IPSN 2007). pg. 186-195.
7. *Meeting lifetime goals with energy levels*. **Lachenmann, A., și alții.** 2007. Proc. ACM SenSys.
8. *Towards a Realistic Energy Model for Wireless Sensor Networks*. **Kellner, S., și alții.** 2008. Proc of IEEE Fifth Annual Conference on Wireless On demand Network Systems and Services. pg. 97-100.
9. *Software-based on-line energy estimation for sensor nodes*. **Dunkels, A., și alții.** Proc of the 4th workshop on Embedded networked sensors EMNETS'07. pg. 28-32.
10. *How long is the lifetime of a wireless sensor network?* **Mak, N.H. și Seah, W.** 2009. n Proceedings of the IEEE 23rd Intl. Conf. on Advanced Information Networking and Applications (AINA 2009). pg. 763-770.
11. *Energy Management in Wireless Sensor Networks with Energy-hungry Sensors*. **Alippi, C., și alții.** 2, Apr. 2009, IEEE Instrumentation and Measurement Magazine, Vol. 12, pg. 16-23.
12. *Automated Sensor-specific Power Management for Wireless Sensor Networks*. **Kim, N., Choi, S. și Cha, H.** 2008. Proc. IEEE Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2008).
13. **Atmel.** ATmega128A Datasheets.
http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc8151.pdf. 2010. revision E.
14. **Texas Instruments.** MSP430x20x1, MSP430x20x2, MSP430x20x3 MIXED SIGNALMICROCONTROLLER. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/msp430f2001.pdf>. 2012.
15. **Polastre, J., Szewczyk, R. și Culler, D.** Telos: Enabling Ultra-Low Power Wireless Research. *Proc. of the 4th int. symp. on Information processing in sensor networks*. 2005.
16. *Using SRAM Based FPGAs for Power-Aware High Performance Wireless Sensor Networks*. **Valverde, J., și alții.** 3, 2012, Sensors, Vol. 12, pg. 2667-2692.
17. **Atmel.** 8-bit AVR Microcontroller with Low Power 2.4GHz Transceiver for ZigBee and IEEE.
<http://www.atmel.com/Images/8266S.pdf>. 2011.
18. **Arago Systems.** WiSMote mini.
http://www.aragosystems.com/images/stories/WiSMote/Doc/wismote_mini_en. 2012.
19. **Freescale Semiconductor.** MC1322x - Advanced ZigBee™- Compliant Platform-in-Package (PiP). http://www.freescale.com/files/rf_if/doc/data_sheet/MC1322x.pdf. 2010.
20. **Redwire.** Redbee 802.15.4 Module. <http://www.redwirellc.com/store/node/3>. 2012.

21. **Bischof, R., Meyer, J. și Feltrin, G.** Wireless Sensor Network Platforms (cap. 69). *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. s.l. : John Wiley & Sons, 2009.
22. *Cross-Layer Design for Energy Conservation in Wireless Sensor Networks*. **Bouabdallah, F., Bouabdallah, N. și Boutaba, R.** 2009. IEEE ICC 2009 proceedings.
23. *Medium access control in wireless sensor networks*. **Kredo II, K. și Mohapatra, P.** 4, 2004, Computer Networks, Vol. 51, pg. 961-994.
24. **Texas Instruments.** CC1000 Single-Chip Very Low Power RF Transceiver. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/cc1000.pdf>. 2007.
25. **Marvell.** PXA270M Processor. http://www.marvell.com/application-processors/pxa-family/assets/pxa_27x_spec_update.pdf. 04 2010.
26. *The Birth of the Fuel Cell 1835-1845*. **Bossel, U.** 2000. European Fuel Cell Forum.
27. *Fuel Cells – Fundamentals and Applications*. **Carrette, L., Friedrich, K.A. și Stimming, U.** s.l. : Wiley, 2001, Fuel Cells, Vol. 1, pg. 5-39.
28. **Hottinen, T.** *Performance limitations and improvements of small-scale free-breathing polymer electrolyte membrane fuel cells*. s.l. : Helsinki University of Technology, 2004. <http://lib.hut.fi/Diss/2004/isbn9512272555/>.
29. *Biofuel Cells for Portable Power*. **Gellett, W., și alții.** 7-8, s.l. : Wiley, 2010, Electroanalysis, Vol. 22, pg. 727-731.
30. **Raju, M.** Energy Harvesting ULP meets energy harvesting: A game-changing combination for design engineers. s.l. : Texas Instruments, 2008. http://www.ti.com/corp/docs/landing/cc430/graphics/slyy018_20081031.pdf.
31. **Salerno, D.** Ultralow Voltage Energy Harvester Uses Thermoelectric Generator for Battery-Free Wireless Sensors. s.l. : Linear Technology, 2010.
32. **Linear Technology.** LTC3108 Ultralow Voltage Step-Up Converter and Power Manager. 2010.
33. **EnOcean.** ECT 310 Perpetuum (EnOcean powered by Thermal Energy). 03 2012. http://www.enocean.com/en/enocean_modules/ECT_310_Data_Sheet_Mar12_02.pdf.
34. **Schwartz, M.** *Smart Materials*. s.l. : CRC Press, 2009.
35. **IEEE.** IEEE standard on piezoelectricity (ANSI/IEEE Std. 176--1987). 1988.
36. **Moheimani, S.O.R și Fleming, A.J.** *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. s.l. : Springer, 2006.
37. **Timoshenko, S.** *Vibration Problems in Engineering*. 2. s.l. : D. VAN NOSTRAND COMPANY INC., 1937.
38. **Mide.** Vulture: Piezoelectric Energy Harvesters. 2010. http://www.mide.com/pdfs/Vulture_Datasheet_001.pdf.
39. *Mechanical Energy Harvester With Ultralow Threshold Rectification Based on SSHI Nonlinear Technique*. **Garbuio, L., și alții.** s.l. : IEEE, 2009, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 56, pg. 1048-1056.
40. *Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply*. **Ottman, G. K., și alții.** 5, s.l. : IEEE, 2002, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 17, pg. 669-676.
41. *A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics*. **Roundy, S. și Wright, P. K.** s.l. : IOP Publishing, 2004, Smart Materials and Structures, Vol. 13, p. 1131.
42. *Towards energy harvesting using active materials and conversion improvement by nonlinear processing*. **Guyomar, D., și alții.** 4, s.l. : IEEE, 2005, IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq. Control, Vol. 52, pg. 584-595.
43. *Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction*. **Lefeuvre, E., și alții.** 10, s.l. : SAGE, 2005, J. Intell. Mater. Syst. Struct., Vol. 16, pg. 865-876.
44. *Active Control based Energy Harvesting for Battery-less Wireless Traffic Sensors: Theory and Experiments*. **Vijayaraghavan, K. și Rajamani, R.** 2007. Proc. of American Control Conference. pg. 4579-4584.
45. *Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics*. **Shenck, N.S. și Paradiso, J.A.** 3, s.l. : IEEE, 2001, IEEE Micro, Vol. 21, pg. 30-42.
46. *Systems for Human-Powered Mobile Computing*. **Paradiso, J.A.** 2006. Proc. of the 43rd Design Automation Conference. pg. 645-650.
47. *A Self-Powered Wireless Sensor for Indoor Environmental Monitoring*. **Leland, E. S., Lai, E.M. și Wright, P.K.** 2004. Proc. of the Wireless Networking Symposium (WNCG).

48. *Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes*. **Wischke, M., și alții**. s.l. : IOP Publishing, 2011, Smart Materials and Structures, Vol. 20, p. 085014.
49. **Fromhold, A.T.** An Introduction to Quantum Mechanics. *Quantum mechanics for applied physics and engineering*. s.l. : Dover Publications, 1991, pg. 4-6.
50. *Solar Cell Efficiency Tables (Version 39)*. **Green, M.A., și alții**. 1, s.l. : Wiley, 2012, Prog. Photovolt: Res. Appl., Vol. 20, pg. 12-20.
51. *Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility*. **Kaltenbrunner, M., și alții**. s.l. : Nature, 2012, Nat. Commun., Vol. 3, p. 770.
52. *Design, modeling, and capacity planning for micro-solar power sensor networks*. **Taneja, J., Jeong, J. și Culler, D. E.** 2008. Proceedings of the 7th Intl. Conference on Information Processing in Sensor Networks. pg. 407-418.
53. **Amatucci, GG.** *Rechargeable hybrid battery / supercapacitor system*. US Patent no. 6,252,762 [ed.] Telcordia Technologies. 2001.
54. *High Power Electric Double Layer Capacitor (EDLC's); from Operating Principle to Pore Size Control in Advanced Activated Carbons*. **Endo, M., și alții**. 3,4, 2001, Carbon Science, Vol. 1, pg. 117-128.
55. *Ultracapacitors: why, how, and where is the technology*. **Burke, A.** s.l. : Elsevier, 2000, Journal of Power Sources, Vol. 91, pg. 37-50.
56. *Ambimax: Autonomous energy harvesting platform for multi-supply wireless sensor nodes*. **Park, C. și Chou, P.** 2006. Proc. IEEE Conf. on Sensor and Ad-hoc Communications and Networks (SECON). pg. 168-177.
57. *Nano-sized transition-metaloxides as negative-electrode materials for lithium-ion batteries*. **Poizot, P., și alții**. s.l. : Macmillan Magazines, 09 2000, Nature, Vol. 407, pg. 496-499.
58. *Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications*. **Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A. și Efthimiou, V.** s.l. : Elsevier, 2009, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pg. 1513-1522.
59. *Batteries: OEM and Industrial - Lithium Ion*. **Panasonic**. 2012.
<http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem/oem/lithium-ion.aspx>.
60. **Pop, V., și alții**. Battery Management Systems. Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications. *Philips Research Book Series (9)*. s.l. : Springer, 2008.
61. *Methods for State-of-Charge Determination and Their Applications*. **Piller, S., Perrin, M. și Jossen, A.** 1, s.l. : Elsevier, 2001, Journal of Power Sources, Vol. 96, pg. 113-120.
62. *A review of state-of-charge indication of batteries by means of a.c. impedance measurements*. **Shalini, R., Munichandraiah, N. și Shukla, A.K.** s.l. : Elsevier, 2000, Journal of Power Sources, Vol. 87, pg. 12-20.
63. *Recent advances in direct methanol fuel cells at Los Alamos National Laboratory*. **Ren, X, și alții**. s.l. : Elsevier, 2000, Journal of Power Sources, Vol. 86, pg. 111-116.
64. *Modeling and Optimization of a Solar Energy Harvester System for Self-Powered Wireless Sensor Networks*. **Dondi, D., Bertacchini, A. și Brunelli, D.** s.l. : IEEE, 07 2008, IEEE Trans. Ind. Electron, Vol. 55, pg. 2759-2766.
65. *SensorSim: A Simulation Framework for Sensor Networks*. **Park, S, Savvides, A. și Srivastava, M.B.** 2000. In Proceedings of the 3rd ACM International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. pg. 104-111.
66. *TOSSIM: Accurate and Scalable Simulation of Entire TinyOS Applications*. **Levis, P., și alții**. s.l. : ACM, 2003. Proceedings of SenSys'03, First ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. pg. 126-137.
67. *Simulating the power consumption of large-scale sensor network applications*. **Shnayder, V., și alții**. s.l. : ACM, 2004. Proc. ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. pg. 188-200.
68. *Castalia: revealing pitfalls in designing distributed algorithms in WSN*. **Boulis, A.** 2007. Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems. pg. 407-408.
69. *EMSTAR: Development with High System Visibility*. **Elson, J., Girod, L. și Estrin, D.** s.l. : IEEE, 12 2004, IEEE Wireless Communications, pg. 70-77.
70. *Avrora: Scalable Sensor Network Simulation with Precise Timing*. **Titzer, B., Lee, D. și Palsberg, J.** 2005. Proc. of the Fourth Int. Conf. on Information Processing in Sensor Networks. pg. 477-482.

71. *Accurate prediction of power consumption in sensor networks*. **Landsiedel, O., Wehrle, K. și Gotz, S.** s.l. : IEEE, 2011. IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNetS-II). pg. 37-44.
72. *An interactive testbed for heterogeneous wireless sensor networks*. **Rensfelt, O., și alții.** 2008. Proc. of the 4th Intl Conf. on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS 2008). pg. 529-551.
73. *TWIST: A Scalable and Reconfigurable Testbed for Wireless Indoor Experiments with Sensor Networks*. **Handziski, V., și alții.** 2006. Proc. of the 2nd Intl. Workshop on Multi-hop Ad Hoc Networks: from Theory to Reality, (RealMAN 2006). pg. 63-70.
74. *MoteLab: A wireless sensor network testbed*. **Werner-Allen, G., Swieskowski, P. și Welsh, M.** 2005, Special Track on Platform Tools and Design Methods for Network Embedded Sensors.
75. **MIT. MISTLAB Internet website.** [Interactiv] <http://mistlab.csail.mit.edu/>.
76. *Kansei: A Testbed for Sensing at Scale*. **Ertin, E., și alții.** 2006. Fifth Intl. Conf. on Information Processing in Sensor Networks (IPSN/SPOTS). pg. 399-406.
77. *PowerBench: A scalable testbed infrastructure for benchmarking power consumption*. **Haratcherev, I., și alții.** 2008. Int. Workshop on Sensor Network Engineering (IWSNE). pg. 37-44.
78. *Poster abstract: The FlockLab Testbed Architecture*. **Beutel, J., și alții.** 2009. Proc. 7th ACM Conf. Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2009). pg. 415-416.
79. *Deployment Support for Wireless Sensor Networks*. **Dyer, M., Beutel, J. și Meier, L.** 2005. Proc. 4th GI/ITG KuVS Fachgesprach Drahtlose Sensornetze. pg. 25-28.
80. **Robert Bosch GmbH.** *CAN Specification 2.0.* 1991.
81. **SofTec Microsystems.** *ZK--S12--B Starter Kit for Freescale HCS12(X) Family (80--Pin QFP ZIF Socket).* 2010. http://www.softecmicro.com/downloads/doc/zk--s12--b_manual.pdf.
82. **Crossbow Technology Inc.** *MPR-MIB Users Manual 7430-0021-07 Rev. B.* 2006. pg. 40-42. www.xbow.com.
83. **Freescale Semiconductor.** *MC9S12C Family. MC9S12GC Family. Reference Manual Rev 01.24.* 2010. http://www.freescale.com/files/microcontrollers/doc/data_sheet/MC9S12C128V1.pdf.
84. **Atmel.** *8-bit Atmel Microcontroller with 128KBytes In-System Programmable Flash (Rev. 2467X-AVR-06/11).* 2011. pg. 1-379. http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2467.pdf.
85. **MAXIM.** *16-Bit RISC Microcontroller-Based Smart Data-Acquisition Systems.* 2008. pg. 9-3217. <http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/MAXQ7665-MAXQ7665D.pdf>.
86. **TinyOS Alliance.** *TinyOS Documentation Wiki.* 2012. http://docs.tinyos.net/tinywiki/index.php/Main_Page.
87. *Hierarchical-Battery Aware Routing in Wireless Sensor Networks*. **Musunuri, R. și Cobb, J.A.** s.l. : IEEE, 2005. Vehicular Technology Conference (VTC). pg. 2311--2315.
88. **MEMSIC.** *MICAz datasheet 6020--0065--05 Rev. A.* <http://www.memsic.com/products/wireless-sensor-networks/wireless-modules.html>.
89. **Crossbow Technology Inc.** *MTS-MDA Series User Manual 7430-0020-03 Rev. A.* 2004. www.xbow.com.
90. *Battery modeling for energy-aware system design*. **Rao, R., Vrudhula, S. și Rakhmatov, D.N.** 11, 2003, Computer, Vol. 36, pg. 77-87.
91. *An Analytical High-Level Battery Model for Use in Energy Management of Portable Electronic Systems*. **Rakhmatov, D.N. și Vrudhula, S.B.K.** s.l. : IEEE, 2001. Proc. 2001 IEEE/ACM Int'l Conf. Computer-Aided Design. pg. 488-493.
92. *Extension of the Kinetic Battery Model for Wind/Hybrid Power Systems*. **Manwell, J.F. și McGowan, J.G.** 1994. Proceedings of EWEC. pg. 284-289.
93. *Battery Model for Embedded Systems*. **Rao, V., și alții.** 2007. VLSID'05, 18th International Conference on VLSI Design held jointly with 4th International Conference on Embedded Systems Design.
94. *Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance*. **Chen, M. și Rincon-Mora, G.A.** 2, s.l. : IEEE, 2006, IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 21, pg. 504-511.
95. *Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations*. **Kroeze, R.C. și Krein, P.T.** 2008. PESC 2008. pg. 1336-1342.

96. *Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation*. **Gao, L., Liu, S. și Dougal, R.A.** 3, s.l. : IEEE, 2002, IEEE Trans. Comp. Pack. Techn., Vol. 25, pg. 495-505.
97. **Panasonic**. Nickel metal hydride batteries. 2005.
<http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem>.
98. —. CGR18650CH Lithium ion. 2011. <http://www.panasonic.com/industrial/batteries-oem/oem/lithium-ion.aspx>.
99. *Pulsed battery discharge in communication devices*. **Chiasserini, C.F și Rao, R.R.** 1999. Proc. 5th Intl. Conf. on Mobile Computing and Networking. pg. 88-95.
100. *Battery Life Estimation of Mobile Embedded Systems*. **Panigrahi, D., și alții.** 2001. Proc. 14th Intl. Conf. on VLSI Design.
101. *Mathematical Model Reformulation for Lithium-Ion Battery Simulations: Galvanostatic Boundary Conditions*. **Subramanian, V.R., și alții.** 4, s.l. : The Electrochemical Society, 2011, Journal of The Electrochemical Society, Vol. 154, pg. A260-A271.
102. *A Glance on WSN Lifetime and Relevant Factors for Energy Consumption*. **G. Girban, M. Popa.** s.l. : IEEE, 2010. Proc. International Joint Conferences on Computational Cybernetics and Technical Informatics, (ICCC-CONTI 2010). pg. 523-528.
103. *A Brief Outline of Computational Limitations on Actual Wireless Sensor Networks*. **Girban, G. și Popa, M.** s.l. : IEEE, 2012. SOFA 2012.
104. *WSN testing environment with energy consumption monitoring and simulation of sensed data*. **Girban, G. și Popa, M.** s.l. : IEEE, 2011. Proc. 6th IEEE Intl. Conf. on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS 2011). pg. 181-185.
105. **Girban, G. și Popa, M.** Wireless Sensors Network Testing Environment Based on CAN Protocol. [autorul cărții] V. Haasz. *Advanced Distributed Measuring Systems - Exhibits of Application*. s.l. : River Publishers, 2012, pg. 35-66.
106. *On-line software solution for power consumption monitoring on WSN nodes*. **Girban, G. și Popa, M.** s.l. : IEEE, 2011. Proc. 6th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI 2011). pg. 181-185.
107. *On the Energy Constraint in Wireless Sensor Networks*. **Popa, M. și Girban, G.** 1, s.l. : Editura Universitatii de Nord, 2011, CJECE, Vol. 4, pg. 101-106.
108. *A Geometric Approach of a Battery Mathematical Model for On-Line Energy Monitoring*. **Aron, A., Girban, G. și Kilyeni, S.** s.l. : IEEE, 2001. Proc. Intl. Conf. on Comp. as a Tool (EUROCON). pg. 454-457.
109. *On-line Monitoring of Battery State in Wireless Sensor Networks - Using Two Battery Models in WSN Constraints*. **Aron, A., Girban, G. și Popa, M.** 2012. Proceedings of Sensornets 2012. pg. 91-94.
110. *About the solution of a battery model*. **Aron, A., Girban, G. și Pop, C.** 2011, BSG Proceedings, Vol. 18, pg. 1-10.

INDEX

—A—

achiziție de date, 15, 21, 50, 63, 70

—B—

biocelule de combustie, 42

Bluetooth, 11, 29, 60

broadcasting, 65

—C—

CAN, 57

capacitatea bateriei, 12, 19, 20, 27, 53, 97, 113

CISC, 29

comunicare, 15, 25, 50

CSV, 76

—D—

DECT ULE, 11

durata de funcționare, 11, 13, 15, 16, 18, 19, 26, 40, 50, 55, 60, 77, 125

—F—

factori consum, 13

factori de consum

dinamici, 82

statici, 82

FLASH, 31

—G—

gcc, 32

—H—

Harvard, 29

HopsNo, 26

—I—

internetul obiectelor, 11

—K—

KNX, 11

—L—

latența de trezire, 22

—M—

M2M, 11

mediu de testare, 13

memorare, 22

model baterie, 97

modele baterie, 13, 27, 97

monitorizare noduri

online, 97

monitorizarea nodurilor, 12, 27, 60

offline, 13, 77

online, 13, 77

multicasting, 65

—N—

nivel dominant, 66

nivel recesiv, 66

nod operațional, 18, 19

nod potențial, 18, 19

noduri WSN, 29

—P—

pile de combustie, 41

pipe, 75

point-to-point, 65

prag de comunicare, 19

prag de rentabilitate, 21, 61

procesare, 22, 25, 29, 39, 50

—R—

RAM, 31

rată de eșantionare, 22

releu, 60, 71

rețele WSN, 11, 12

RISC, 29

—S—

select, 75

simularea condițiilor, 13

SoC, 25, 55, 70

stocare, 29

surse de energie, 29

—T—

task, 84

tensiunea de decuplare, 23

testbed, 58, 76

timer, 84

—V—

von Neumann, 29

—W—

Wi-Fi, 11, 59

WPAN, 29

—Z—

ZigBee, 11, 29, 31

Z-Wave, 11