

TEZĂ de DOCTORAT

Rețele wireless de senzori în medii cu constrângeri de energie

Wireless Sensor Networks in Energy Constrained Environments

REZUMAT

Autor: ing. Dan Ștefan Tudose

Conducător științific: prof. dr. ing. Nicolae Țăpuș

FACULTATEA DE AUTOMATICĂ ȘI CALCULATOARE
UNIVERSITATEA POLITEHNICA BUCUREȘTI
BUCUREȘTI - 2011

Introducere

În ultimele decenii, tehnologia a deschis calea către miniaturizarea și specializarea dispozitivelor de calcul, ceea ce a permis apariția unui număr tot mai mare de sisteme de calcul incorporate, care interacționează, îmbunătățesc și se integrează în viața de zi cu zi. Această teză prezintă rezultatele cercetării autorului în domeniul calculului proactiv și al rețelelor de senzori wireless, cu contribuții în recoltarea de energie, creșterea eficienței energetice și a autonomiei dispozitivelor embedded, algoritmi de planificare și monitorizare a rețelelor de senzori, culminând cu dezvoltarea unui framework pentru gestionarea rețelelor wireless de senzori.

În 1991, Mark Weiser [1] a preconizat un secol 21 în care computerele personale vor fi înlocuite de un număr considerabil de dispozitive integrate în rețea, complet integrate în mediul lor înconjurător până la punctul în care acestea ar deveni de neobservat, sau chiar invizibile pentru un utilizator de rând.

Rețelele de senzori wireless sunt o tehnologie care poate oferi o contribuție semnificativă pentru atingerea paradigmei de "ubiquitous computing" definite de Weiser. Acestea ar trebui să reprezinte o nouă revoluție în domeniul calculatoarelor, la fel cum au fost calculatoarele mainframe și computerele personale înaintea lor.

Importanța tot mai mare de contextualizării informației a determinat apariția unei suite întregi de aplicații inteligente care facilitează integrarea lumii digitale în cea fizică. Micșorarea consumului de energie, în special, devine un subiect tot mai important în viețile noastre.

Rețelele de senzori wireless sunt supuse unor constrângeri severe, care sunt de obicei dependente de aplicațiile ce rulează pe acestea. Restricțiile sunt date de obicei de dimensiune, număr de noduri, disponibilitatea unei surse de energie și capabilități de procesare. Cu toate acestea, o constrângere care prevalează în aproape toate aplicațiile ce folosesc rețele de senzori este autonomia rețelei, ceea ce se definește prin capabilitatea acesteia de-a se auto-organiza, gestiona și repara, fără a fi nevoie de intervenția umană.

Scopul acestei teze constituie proiectarea unor mecanisme eficiente de adunare și procesare a informației contextuale. Activitatea de cercetare descrisă în această teză se axează pe descoperirea unor mecanisme prin care rețelele wireless de senzori pot atinge independența energetică prin captarea și utilizarea eficientă a energiei regenerabile din mediul înconjurător.

Aplicațiile rețelelor wireless de senzori sunt diverse și tind să includă o gamă largă de cerințe pentru servicii, zone de desfășurare, topologie, durată de funcționare, fiabilitate și așa mai departe. Prin urmare, primul țel al acestei teze a fost extragerea și definirea componentelor și cerințelor care sunt generice și se referă la toate categoriile de rețele de senzori. În scopul formulării obiectivelor de cercetare este importantă și o clasificare a principalelor tipuri de rețele de senzori wireless în clase care împărtășesc caracteristicile menționate anterior.

Tehnicile de optimizare prezentate în această teză nu se limitează numai la aplicații software și algoritmi. Este prezentat, de asemenea, un studiu al tehnicilor de hardware de scădere a consumului de energie în care se pune accent pe implementarea unor algoritmi inteligenți de gestionare a energiei și a circuitelor electronice întâlnite la nivelul unui nod senzorial

De asemenea, cercetarea a fost făcută în direcția sistemelor de recoltare de energie sau energy harvesting prin studierea celor mai promițătoare surse de energie regenerabilă și de adaptare a circuitelor care captează această energie la un nod de senzori wireless. Scopul acestui demers este acela de-a prelungi durata de funcționare a nodului, în unele cazuri o perioadă nedeterminată.

Cea mai mare contribuție a acestei teze este dezvoltarea unui framework de gestionare a rețelelor de senzori wireless care oferă facilități de monitorizare și de acționare pentru insule formate din rețele eterogene de senzori wireless. Suita rezolvă problemele care afectează toate rețelele moderne de senzori, cum ar fi monitorizarea de diferiți parametri, alocarea task-urilor și a profilurilor de energie prin furnizarea unei infrastructuri flexibile de monitorizare, care este ușor de configurat și adaptat pentru orice infrastructură nouă sau existentă de rețea de senzori.

Planul tezei de doctorat

Capitolul 1 prezintă stadiul actual al cercetării în domeniul rețelelor de senzori wireless. În acest capitol sunt descrise principalele arhitecturi precum și caracteristicile comune pentru toate tipurile de rețele de senzori wireless. Se prezintă de asemenea o analiză în profunzime a componentelor unui nod senzorial în cadrul căreia se pune accent pe stadiul actual al consumului de energie pentru fiecare circuit în parte. Un studiu cu privire la principalele protocoale folosite în rețelele de senzori și middleware este, de asemenea, prezentat, cu accent pe două dintre cele mai des întâlnite stive de protocoale care rulează pe nodurile senzoriale: Zigbee și 6LoWPAN. Acest capitol se încheie prin stabilirea obiectivelor de proiectare pentru o arhitectură de nod senzorial bazată pe tehnologii low-power.

O clasificare a rețelelor de senzori wireless și actuatorare este prezentată în **Capitolul 2**. În acest capitol sunt identificate caracteristicile generice care sunt prezente la toate rețele de senzori, cum ar fi mediul în care acestea funcționează, infrastructura la care sunt atașate și constrângerile de durată de viață și consum de energie. Pe baza acestor proprietăți, rețelele de senzori sunt clasificate în trei grupe majore: rețele de senzori pentru mediu (ESN), rețele de senzori pentru comunitate (CSN) și rețele de senzori corporale (BSN).

În acest capitol ne vom concentra, de asemenea, pe standardele care sunt folosite pentru modelarea rețelelor de senzori și actuatorare wireless. Aceste standarde se împart în două mari categorii: definite de entitățile de standardizare care folosesc XML sau alte limbaje de mark-up și cele care folosesc ontologii.

Capitolul 3 analizează subiectul captării de energie din surse regenerabile, sau a recoltării de energie și aplicabilitatea acestuia la nivelul unei rețele de senzori wireless. Studiul are ca scop aplicarea unui model matematic pentru recoltarea de energie și determinarea impactului pe care această tehnică o are asupra timpului de viață pentru rețelele de senzori.

De asemenea, este propus un nou model matematic pentru consumul de energie electrică al circuitelor emițător radio folosite de către nodurile senzoriale. Acest model este folosit în estimarea cu succes a consumului global de energie al unei rețele de senzori wireless cu topologie single sau multi-hop.

Sunt evaluate din punctul de vedere al eficienței cele mai promițătoare surse de recoltare de energie cunoscute până în prezent, cum ar fi modulele piezoelectrice, termice și fotovoltaice. Studiul tratează și o altă metodă de recuperare a energiei ce folosește captarea semnalelor de radiofrecvență din spectrul microundelor și convertirea acestora într-o tensiune continuă folosind antene cu rectificare. Fiecare sistem de recoltare este supus unei analize atente prin realizarea unor experimente prin care se dorește determinarea aplicabilității sistemelor respective în domeniul rețelelor de senzori wireless.

În **Capitolul 4** sunt analizate principalele medii de stocare a energiei utilizate de nodurile senzoriale wireless din punctul de vedere al eficienței cu care acestea pot înmagazina și elibera sarcina electrică. Un accent deosebit este pus pe tipurile noi de medii de stocare de energie, cum ar fi super-condensatoarele. Avantajele pe care acestea le prezintă față de sistemele clasice de stocare a energiei ce folosesc baterii sau acumulatori precum și aplicabilitatea acestora în cadrul rețelelor de senzori wireless sunt studiate în detaliu.

Sparrow este o arhitectură de rețea wireless de senzori care a fost construită ca o platformă de cercetare pentru tehnicile de recoltare de energie descrise în capitolul anterior. Aceasta a fost folosită, de asemenea, pentru a implementa și testa o serie de aplicații wireless, inclusiv IEEE 802.15.4 [2], 6LoWPAN și ZigBee [3]. În acest capitol sunt prezentate o serie de circuite de recoltare de energie pentru un nod senzorial wireless. Acestea sunt evaluate din punctul de vedere al contribuției la creșterea timpului total de funcționare pentru nodul senzorial.

Capitolul 5 detaliază Check, un framework pentru managementul rețelelor de senzori wireless dezvoltat în cadrul cercetării doctorale. Acesta oferă mijloace facile de monitorizare și actare a rețelei wireless precum și a parametrilor pe care aceasta îi monitorizează. Componenta principală a acestui framework este un algoritm de planificare neconvențional în care constrângerea principală nu este timpul de finalizare a unui task, ci consumul de energie derivat din rularea acelui task pe nodurile senzoriale. Cum rețelele de senzori sunt rareori supuse la constrângeri critice de timp, o abordare mai elegantă este de a proiecta un algoritm de planificare care prioritizează consumul de energie și afinitatea task-ului respectiv. Check oferă, de asemenea, un sistem centralizat de monitorizare, control și reconfigurare, care este absolut necesar pentru scalarea conectivității în rețelele de senzori eterogene. Ultima componentă a Check framework este un serviciu de nivel înalt de auto-reparare a rețelei în cazul funcționării defectuoase a nodurilor senzoriale sau în cazul pierderii conectivității radio pe anumite rute în rețea.

În **Capitolul 6** sunt prezentate o serie de aplicații pentru rețelele de senzori wireless care au fost proiectate în scopul de a valida conceptele și rezultatele cercetării menționate în capitolele anterioare. Prima aplicație este proiectată special pentru un mediu rezidențial și constă într-un sistem de tip home automation. Scopul acestui proiect a fost studierea comportamentului unei rețele de nodurilor senzoriale într-un mediu rezidențial și determinarea gradului în care rezultatele experimentale din energy harvesting sunt validate atunci când sunt aplicate pentru o platformă reală.

A doua aplicație este situată într-un mediu urban și presupune desfășurarea de noduri senzoriale mobile cu sarcina de-a colecta date și de-a le transmite la un coordonator central. Scopul proiectului este de a culege date despre mediu, cum ar fi poluarea aerului și nivelul contaminanților din atmosferă generați de traficul de automobile. Aceste date sunt centralizate la nivelul unui server și puse la dispoziția publicului larg prin intermediul unei interfețe web colaborative.

Capitolul 7 prezintă într-o formă concisă concluziile cercetărilor efectuate în teză și elaborează asupra activităților viitoare. În această secțiune sunt prezentate într-o formă succintă principalele contribuții pe care cercetarea efectuată le-a adus domeniului rețelelor de senzori wireless și al sistemelor incorporate, în general.

Capitolul 1

Rețele wireless de senzori

Rețelele de senzori wireless (WSNs) sau, mai general, rețelele de senzori și actuatori wireless (WSANs) sunt folosite într-o multitudine aplicații de achiziție și prelucrare de date și de control. Ele constau din dispozitive autonome, care sunt utilizate în scopul de a monitoriza și a măsura parametrii specifici pentru o anumită zonă geografică. Dezvoltarea inițială a rețelor de senzori wireless a fost datorată aplicațiilor militare și a constat în mare parte în supravegherea și managementul câmpului de luptă. Aplicațiile civile au urmat la scurt timp și rețelele de senzori au pătruns în domenii precum monitorizarea mediului, automatizarea locuințelor, asistență medicală sau gestionarea traficului.

Parametrii măsurați sunt de obicei cei de mediu, cum ar fi intensitatea luminii, umiditatea, presiunea sau temperatura. Avantajul de WSN peste sistemele tradiționale de măsurare este faptul că pot fi luate simultan mai multe măsuratori ale acelorași parametri din locații diferite de către nodurile senzoriale. Acest lucru contribuie la o mai bună înțelegere a fenomenului monitorizat prin furnizarea unei imagini de ansamblu ce reiese din distribuția spațială a datelor măsurate.

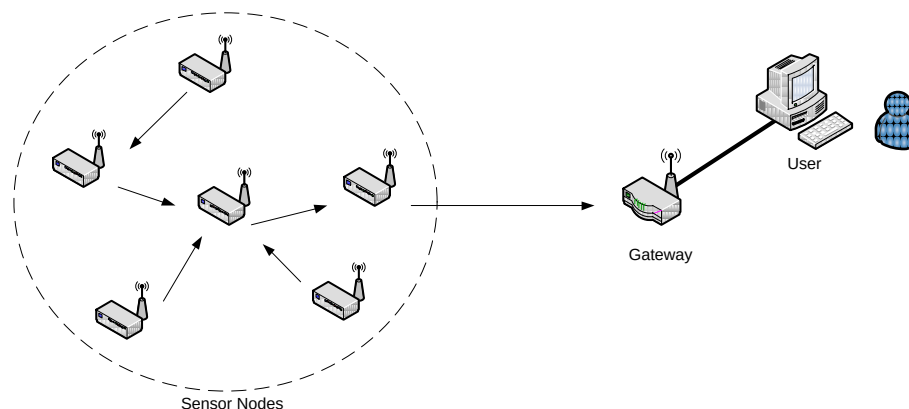


Figura 1. Arhitectură WSN tipică

Rețeaua este de obicei compusă din mai multe noduri, care pot fi identice sau care au scopuri și capacități diferite. Ca regulă generală, toate nodurile trebuie să dispună de capacități de prelucrare pentru a eșantiona datele de la senzori și de un mijloc de transmisie a datelor colectate prin intermediul rețelei. Acest lucru este, de obicei, realizat prin integrarea unui microprocesor low-cost sau a unui microcontroler împreună cu un emițător-receptor radio sau infraroșu.

Constrângerile date de costul și dimensiunea nodurilor de senzori wireless pot conduce la limitări similare a parametrilor de design, cum ar fi dimensiunea memoriei, capacitatea de stocare a energiei, viteza procesorului și lățimea de bandă. Cele mai multe noduri WSN au la dispoziție cantități limitate de energie: unele arhitecturi se bazează exclusiv pe baterii dar există

și o serie largă de aplicații care folosesc tehnici de recoltare a energiei regenerabile disponibile în mediu prin panouri solare, generatoare eoliene sau de vibrații sau generatoare termoelectrice. Prin urmare, nodurile WSN tind să fie sisteme încorporate mici, cu puține resurse de prelucrare și cu o lățime de bandă a comunicației scăzută, de obicei prin legături radio de mică distanță.

Nodurile senzoriale formează o rețea cu o topologie ce poate varia de la radial, cu un singur hop, ierarhică arborescentă până la cea de mesh ad-hoc. Traficul de date este dirijat spre unul sau mai multe noduri de rețea care au rolul de colectori, cunoscute și sub numele de gateway-uri. Acestea realizează și interfațarea cu o rețea clasică de calculatoare, cum ar fi un LAN sau Internet, care duce în cele din urmă la utilizatorul final.

1.1 Consumul de energie în rețelele de senzori wireless

Nodurile senzoriale sunt componentele principale ale unui WSN. Ele au capacități limitate de comunicare, senzoriale și de prelucrare de date, datorate costului lor redus. După cum sugerează și numele, rolul principal al unui nod senzorial este de a măsura parametri din mediul său înconjurător și de a disemina datele rezultate în rețea. Comunicarea poate funcționa și invers, în cazul în care nodurile primesc comenzi de la entitățile de supraveghere din rețea.

Această teză se concentrează pe descrierea tehnicilor de optimizare a consumului de energie pentru rețele de senzori wireless. Astfel, următoarea discuție se va concentra pe aspectele legate de consumul de energie pentru toate componentele nod senzor. Arhitectura tipică a unui nod senzorial este prezentată în Figura 2.

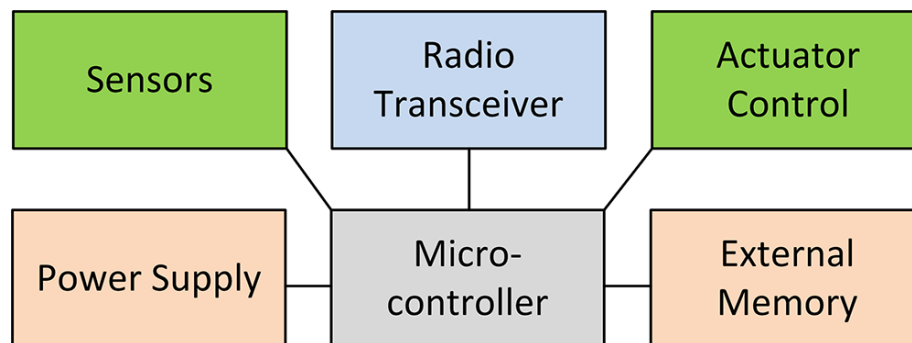


Figura 2. Structura de a typical WSN mote

Componentele principale ale unui nod senzorial sunt microcontroler-ul, transceiver-ul radio, memoria externă, sursa de alimentare și ansamblul de senzori.

Microcontrolere sunt preferate în proiectarea nodurilor datorită costurilor reduse și a capacităților bune de calcul. În cadrul nodului, rolul lor este de a coordona și controla funcționalitatea fiecărei componente și de a prelucra datele generate de către acestea.

MCU-urile tipice utilizate în nodurile senzoriale sunt arhitecturi pe 8, 16 sau 32-biți bazate pe logica CMOS și au cantități rezonabile de memorie flash, EEPROM și RAM atașate, împreună cu circuite analogice, cum ar fi convertoare analog-digitale și transceivere radio. Prin urmare, modelarea consumului de energie pentru un astfel de circuit integrat complex nu este o sarcină trivială și este strâns legată de curentul absorbit de la sursa de alimentare sau baterie.

De obicei, consumul cel mai mare de energie electrică într-un nod este localizat la nivelul transmițătorului radio. Datorită designului lor, transceivere consuma aproape aceeași cantitate de energie atunci când recepționează ca și atunci când emit date. Această energie este, de obicei, cu trei ordine de mărime mai mare decât bugetul mediu de energie al unui microcontroler. Pentru a conserva energie, transceivere au de obicei unul sau două stări low-power (inactiv sau sleep), care le permit să rămână într-o stare latentă și să fie pornite rapid în cazul recepției sau transmisiei de date:

- *Shutdown* - emisia-recepția este oprită și circuitul consumă energie numai din cauza curentului de leakage. Ieșirea din această stare de funcționare poate lua o perioadă lungă de timp ($\sim$ ms).
- *Sleep/Standby* - nodul este într-o stare de consum redus de energie dar se poate reîntoarce la funcționalitate completă într-un de timp foarte scurt
- *Listen* - radioul este în starea Rx, în care ascultă pentru orice fel de pachete de date primite. Datorită acestui fapt, consumul de energie este mai mare decât în modurile anterioare.
- *Transmit* - circuitele radio sunt în stare Tx. Consumul de energie este dominat de etajul de amplificare RF.

În majoritatea nodurilor senzoriale, circuitele de memorie sunt prezente doar ca parte integrantă a microcontroller-ului, cum ar fi Flash sau RAM. Resursele de memorie pentru un nod tind să fie limitate din cauza costurilor pentru cele mai multe aplicații, iar tendința generală este aceea de-a minimiza alocarea memoriei din cauza costului ridicat de scriere și citire de date. Datorită arhitecturii low-power și a costului redus, cele mai multe noduri senzoriale utilizează bateriile ca sursă principală de energie. Bateriile sunt celule electrochimice care stochează sarcina electrică printr-o reacție chimică. Există mai multe tipuri de baterii care utilizează tipuri diferite de procese chimice, au capacități diferite de stocare a energiei și o gamă largă de dimensiuni și costuri. Prin urmare, nu toate bateriile sunt potrivite pentru a fi folosite la alimentarea un nod senzorial și anumite caracteristici trebuie selectate cu grijă atunci când trebuie luată o decizie legată de tipul bateriei sau acumulatorului care va alimenta nodul respectiv [4]:

- Densitate mare de energie;
- Diferență cât mai mică dintre volumul total și cel activ pentru o celulă;
- Tensiune scăzută pentru o celulă (0.5 – 1.0 V);
- Configurare facilă a celulelor în ansambluri serie-paralel pentru a genera o gamă cât mai mare de tensiuni și curenți de alimentare fără a fi nevoie de circuite stabilizatoare de tensiune;
- Celule reîncărcabile, în cazul în care nodul folosește recoltarea de energie.

Majoritatea bateriilor folosite de nodurile wireless se încadrează în trei categorii: NiMH (NiMH), Li-Ion (Li-Ion), și Litiu Polimer (Li-Po).

Toate bateriile au parametri standard, cum ar fi tensiunea nominală, cicluri de încărcare, densitatea de energie, timpul de încărcare, curentul maxim în sarcină și rata de descărcare, iar acestea diferă de la o categorie la alta. Deși toate cele trei tipuri de baterii sunt bine adaptate pentru utilizarea în toate rețelele de senzori wireless, caracteristicile lor unice pot face ca un grup să fie mai potrivit pentru o anumită aplicație. Găsirea combinației perfecte este un proces care implică cunoașterea tuturor parametrilor și cerințelor aplicației, un proces care de foarte multe ori se reduce la găsirea unui echilibru între preț și performanță.

Senzorii sau traductoarele sunt elementul principal de măsură al unui nod wireless. Ei sunt responsabili cu conversia un parametru fizic, cum ar fi temperatura sau umiditatea într-o ieșire măsurabilă care pot fi digitizată și prelucrată de către circuitele nodului. Din cauza constrângerilor de proiectare, senzorii care sunt considerați adecvați pentru un nod trebuie să fie de dimensiuni mici, să aibă un consum mic de energie și să se adapteze la condițiile de mediu. De asemenea, pentru a fi utilizați în număr mare, senzorii trebuie să aibă un cost redus și să poată să funcționeze într-o densitate mare pe unitatea de volum și fără interferențe.

Marea majoritate a nodurilor senzoriale folosesc numai senzori pasivi omnidirecționali, datorită costurilor scăzute și cererilor scăzute de consum de energie. Fiecare dintre acești senzori are o arie de acoperire dată pentru care poate raporta cu suficientă precizie valorile măsurate.

În funcție de tipul de senzor și de precizie, consumul de energie poate varia în mod semnificativ, de la senzori pasivi low-power, cum ar fi accelerometrele, senzorii de temperatură, luminozitate, umiditate, la cei de mare putere, cum ar fi traductoare ultrasonice de nivel, senzori digitali de imagine sau traductoare industriale de presiune, pentru care puterea consumată poate fi cu unul sau două ordine de mărime mai mare decât cea cheltuită de emițător-receptorul radio.

Capitolul 2

Clasificarea rețelelor wireless de senzori

Aplicațiile care folosesc rețelele de senzori wireless sunt foarte diverse, ceea ce dovedește faptul că în spatele termenului se ascunde o gamă largă de cerințe pentru serviciile oferite, topologiile de rețea, natura implementării, durata de funcționare, etc. Prin urmare, în scopul de a defini componente generice și a cerințelor pentru WSN, este utilă clasificarea acestora în funcție de un set de caracteristici și cerințe comune.

Trei clase generice de rețele WSN au fost identificate:

- Environmental Sensor Networks (ESN): implementate la scară largă, cu constrângeri severe de durată de funcționare
- Community Sensor Networks (CSN): scară medie de integrare, sunt de obicei atașate la o infrastructură existentă, cum ar fi cea din interiorul clădirilor de birouri și locuințe
- Body Sensor Networks (BSN): implementate la scară mică, atașate de obicei utilizatorului și mișcându-se odată cu ele.

2.1 Rețele de senzori de mediu

Aplicația rețelelor de senzori de mediu este strict legată de locația în care acestea sunt utilizate: funcționalitatea lor principală este aceea de-a monitoriza mediul prin colectarea datelor de la senzori și raportarea lor unui server central. În plus, un ESN poate include elemente de acționare, în scopul de a realiza o buclă de control: de exemplu, o aplicație tipică este activarea unui sistem de irigații în momentul în care umiditatea din sol a scăzut sub un anumit nivel. Rețelele ESNs pot fi desfășurate într-o mare varietate de locații și pot executa o multitudine de cereri, prin urmare, nodurile lor senzoriale pot avea parametri de configurare foarte diferiți. De asemenea, este destul de dificilă definirea unui mediu tipic pentru rețelele ESN: de fapt, ele pot fi folosite în aplicații ce variază de la monitorizarea integrității structurale până la aplicații de management agricol.

De obicei, rețelele ESN sunt organizate ierarhic și constau din trei tipuri de dispozitive: nodurilor cu resurse limitate (RLN), noduri router și noduri de colectare a datelor. Nodurile cu resurse limitate sunt entitățile cele mai numeroase din cadrul rețelei; scopul lor principal este de a monitoriza unul sau mai mulți parametri de mediu și sunt echipate cu interfețele radio de mică putere (cum ar fi IEEE 802.15.4), o sursă de energie limitată și resurse minime de calcul.

Routerele pot fi dotate cu o interfață radio mai sofisticată (mai fiabilă, lățime de bandă mai mare, consum de energie crescut), precum și cu o interfață cu consum redus de energie. În plus, routerele au o durată de viață mai mare (datorată bateriilor de capacitate mare sau a unei conexiuni directe la rețeaua de electricitate). Routerele sunt, de asemenea, responsabile de conexiunea rețelei cu lumea exterioară (de cele mai multe ori la o rețea bazată pe IP).

Punctul de colectare este de obicei entitatea care guvernează asupra insulei de senzori. Acesta colectează datele venite de la senzori prin intermediul nodurilor router, emite comenzi de tip unicast sau broadcast și efectuează operațiuni la nivel global în rețea, cum ar fi procedurile de configurare, reprogramare, verificare a integrității și așa mai departe.

Figura 3 descrie arhitectura rețelei. Este o structură pe trei niveluri ce constă în noduri colectoare de date, un set de routere și multe noduri RLN. Fiecare router-ul este responsabil de gestionarea unui set unic de senzori. Cu toate acestea, un nod RLN poate ține de două sau mai multe noduri router. Acest lucru mărește redundanța sistemului și rezistența lui în cazul unor defecțiuni.

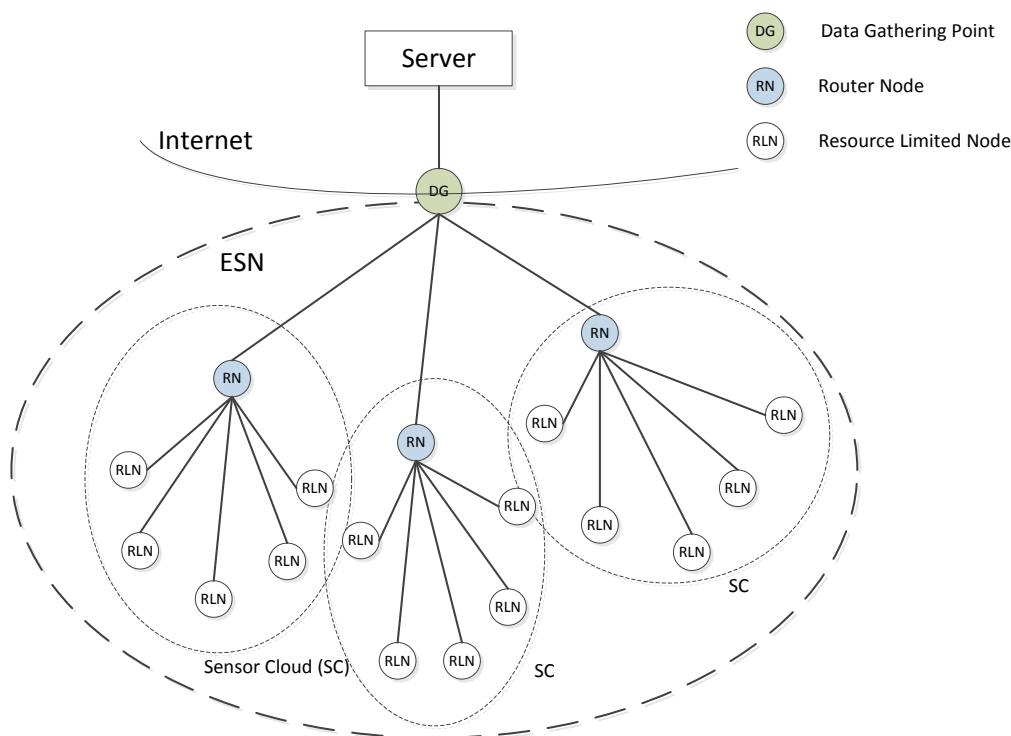


Figura 3. Diagramă tipică a unei rețele ESN. Fiecare sensor cloud (SC) conține un număr de noduri RLN. Nodurile router (RN) conectează fiecare sensor cloud la punctul de colectare de date (DG).

2.2 Rețele de senzori pentru comunitate

O rețea de senzori pentru comunitate (CSN) cuprinde senzori wireless/wired, actuatore și repetitoare. Aceste noduri sunt de obicei atașate clădirilor în locații fixe, sau purtate de către ființele umane. Comparativ cu ESN, rețelele CSN pot fi aplicate pentru medii mai flexibile, cum ar fi un mall, supermarket, sală de gimnastică, etc. Scopul aplicației unui CSN în aceste medii poate fi foarte diferit, de exemplu, aplicarea sa într-un restaurant poate folosi la gestionarea unui sistem de rezervare pentru clienți iar într-un supermarket poate să ofere informații utile cumpărătorilor, cum ar fi prețul și locația mărfurilor căutate.

Nodurile (senzori, actuatori și repetitoare) din rețelele CSN pot varia din punctul de vedere al resurselor și capacităților disponibile. Deși astfel de noduri pot fi uneori mobile, cele mai multe dintre ele sunt, de obicei, statice și atașate de clădiri, deși nu neapărat în interiorul acestora. În ceea ce privește securitatea, rețelele CSN pot fi similare cu ESN, și anume pot fi rețele mari de senzori, fără mecanisme de protecție împotriva atacurilor fizice. Probabilitatea de apariție a unui atac depinde, de asemenea, de mediul în care sunt dispuse rețelele CSN. De obicei, acestea sunt utilizate în medii parțial protejate, ce nu permit accesul fizic al unei persoane la noduri, cum ar fi în cazul ESN.

Nodurile dintr-un CSN pot lucra împreună pentru a oferi un serviciu unic, sau se pot coordona pentru a oferi o gamă de servicii necesare pentru o comunitate. Diferența principală față de un ESN este faptul că aceeași rețea poate fi utilizată de mai multe aplicații diferite care funcționează pentru a ajuta operațiunile dintr-o comunitate, de exemplu, un spital. Figura 4 prezintă o diagramă de desfășurare tipică a unui CSN.

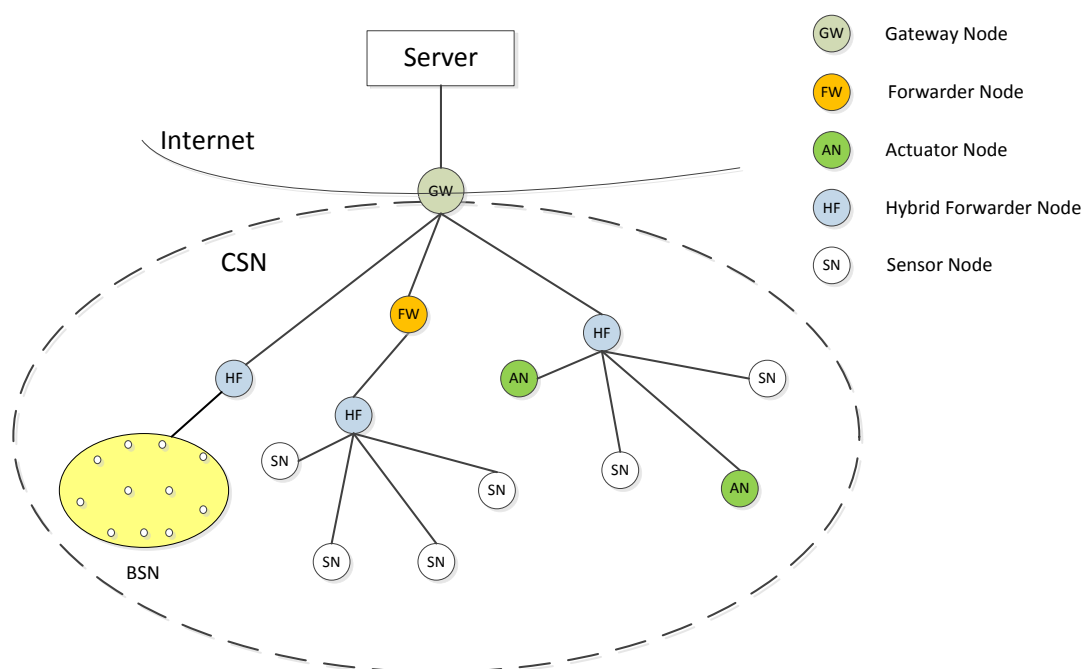


Figura 4. Diagrama unei rețele CSN tipice

2.3 Rețele de senzori corporali

O rețea senzori corporali (BSN) este formată din senzori cablați și/sau wireless și noduri de acționare folosite în apropierea sau în interiorul corpului unui subiect uman. Nodurile de rețea pot fi transportate atașate de corp sau în buzunare, integrate în articolele de îmbrăcăminte, sau chiar implantate în corp. Rețelele BSN pot forma insule de senzori individuale cu o rază de acțiune ce rezidă în jurul corpului subiectului monitorizat.

Dispozitive care intră în componența BSN au o gamă largă de capacități. În timp ce telefoanele mobile sau PDA-urile constituie partea de high-end și oferă conectivitate la alte

rețele, cele mai multe noduri sunt strâns integrate în articolele de îmbrăcăminte sau implantate în corpul uman. Acestea din urmă necesită o dimensiune fizică minimă, oferind astfel doar capacități foarte limitate de procesare .

O rețea BSN este formată dintr-un număr relativ mic de senzori, astfel că pot fi implementate destul de ușor mecanisme de protecție împotriva unui atac pentru toate nodurile senzoriale la costuri rezonabile. De asemenea, faptul că o rețea BSN este purtată pe corp reduce posibilitatea ca atacatorii să manipuleze fizic nodurile respective.

Capitolul 3

Energy Harvesting

Recoltarea de energie este procesul prin care energia din mediul înconjurător este captată și stocată. În ultimii ani, termenul a fost aplicat în principal rețelelor de senzori wireless, în care nodurile senzoriale mici și autonome folosesc acest proces pentru a-și reface resursele de energie [5]. Atunci când se aplică pentru arhitectura unei rețele de senzori, recoltarea de energie crește robustețea și disponibilitatea sistemului oferind, în același timp, posibilitatea independenței energetice. Un nod WSN care are capacitatea de-a recolta energie din mediul înconjurător poate funcționa, practic, pe un interval infinit de timp, fără a fi necesară înlocuirea periodică a bateriilor.

3.1 Modelarea matematică a energy harvesting

Putem aproxima rețeaua de senzori cu un sistem energetic închis, în care fiecare nod acționează atât ca un producător cât și ca un consumator de energie. Putem măsura rata totală de producție a energiei $P_p(t)$ și rata consumului de energie, $P_c(t)$. Excesul de energie recoltată de nod în orice moment, va fi:

$$E(t) = \int_0^t (P_p(\tau) - P_c(\tau)) d\tau \quad (1)$$

Din această condiție putem trage concluzia că nodul este independent din punct de vedere energetic dacă este satisfăcută următoarea formulă:

$$E(t) > 0 \quad \forall t > 0 \quad (2)$$

Sistem cu recoltare de energie fără stocare: În acest caz, sistemul adună energie din mediul înconjurător și se alimentează direct, fără a exista un mod de-a stoca energia suplimentară.

Dispozitivele care incorporează un astfel de sistem pot funcționa la orice moment de timp t numai atunci când:

$$E_p(t) \geq E_c(t) \quad (3)$$

Desigur, lipsa unui mediu de stocare va înseamnă că toată energia acumulată când $E_p(t) < E_c(t)$ va fi pierdută. De asemenea, când $E_p(t) \geq E_c(t)$, surplusul de energie $E_p(t) - E_c(t)$ va fi pierdut.

Sistem cu recoltare de energie și mediu de stocare ideal: Pentru simplitate, vom alege mai întâi un mediu ideal de stocare a energiei. Această baterie ideală poate stoca o cantitate infinită de energie și o poate furniza sarcinii instantaneu, fără pierderi. În acest caz, aplicarea regulilor de conservare a energiei ne dă următoarea ecuație:

$$E_c(t) = E_p(t) + E_{B_0} \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (4)$$

$$\int_0^t P_c(\tau) d\tau = \int_0^t P_p(\tau) d\tau + E_{B_0} \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (5)$$

unde E_{B_0} este cantitatea de energie stocată în baterie la $t=0$.

Sistem cu recoltare de energie și mediu de stocare ne-ideal: Ultimul pas în procesul de modelare este să se ia în considerare natura ne-ideală a mediului de stocare a energiei. Există doi parametri care sunt relevanți pentru această problemă, și anume pierderile care apar în timpul procesului de încărcare și pierderile de energie din mediul de stocare pe perioade lungi de timp. Pentru aceasta, vom introduce doi parametri noi: eficiența de încărcare, η , care este strict mai mică decât unitatea și puterea de leakage, $P_{leak}(t)$, care modelează câtă energie este pierdută de mediul de stocare la momentul t . Un alt parametru important care trebuie să fie luat în considerare este faptul că orice mediu de stocare are o capacitate maximă, care e definită ca E_B .

Aplicarea aceluiași legi de conservare a energiei la noul model ne generează următoarele relații:

$$E_{B_{max}} \geq E_{B_0} + \eta \cdot E_P - E_C - E_{leak} \geq 0 \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (6)$$

$$E_{B_{max}} \geq E_{B_0} + \eta \cdot \int_0^t P_p(\tau) d\tau - \int_0^t P_c(\tau) d\tau - \int_0^t P_{leak}(\tau) d\tau \geq 0 \quad \forall t \in [0, \infty) \quad (7)$$

3.2 Modelarea consumului pentru emițătoarele radio

Cercetarea în domeniul circuitelor radio cu consum redus de energie este motivată în principal de potențialele aplicații pentru piața de telefonie mobilă și a sistemelor embedded. În majoritatea țărilor puterea emisiei radio este reglementată o anumită valoare și la un anumit duty-cycle pentru benzile ISM standard, [6], [7]. În Europa, pentru banda de 434MHz, acesta trebuie să fie mai mic de 10% și mai mic de 1% pentru banda de 868MHz. Factorul de umplere se calculează ca fiind procentul de timp pentru care transmițătorul radio emite pe durata unui interval de timp prestabilit, de exemplu o oră. Pentru a crește disponibilitatea unei rețele de senzori, ciclarea funcționării este unul dintre primii parametri care trebuie evaluați, deoarece are un efect drastic de îmbunătățire a eficienței energetice a rețelei.

În cele ce urmează, vom prezenta un model de estimare a consumului de energie de radio într-o rețea de senzori wireless. Problema principală constă în estimarea energiei necesare pentru a trimite un pachet de n biți de date de la transmițător la receptor, ca în Figura 5.

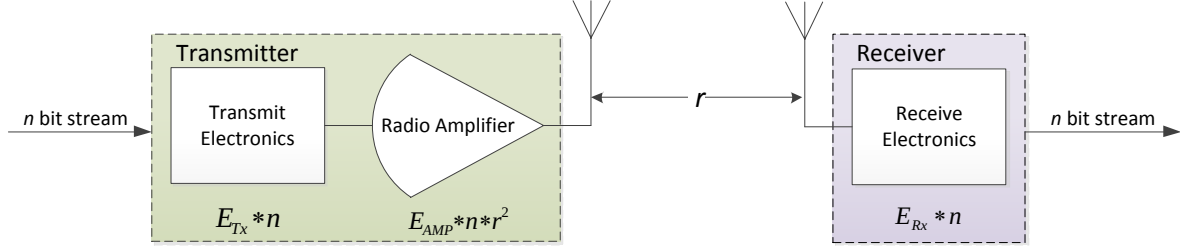


Figura 5. Modelul radio pentru transmisia a n biți de informație

Pentru a trimite un pachet de n biți de date la o distanță de r metri, transmițătorul va avea nevoie de următoarea cantitate de energie:

$$E_{Tx}(n, r) = E_{tc}(n) + E_{amp}(n, r) \quad (8)$$

unde $E_{tc}(n)$ este energia de care circuitul de transmisie are nevoie pentru a procesa cei n biți de date și $E_{amp}(n, r)$ este energia consumată de etajul de amplificare de radiofrecvență pentru a trimite aceiași n biți la distanța de r metri.

Puteam să rescriem relația (8) prin detalierea lui $E_{amp}(n, r)$:

$$\begin{aligned} E_{Tx}(n, r) &= E_{tc}(n) + E_{amp}(n, r) \\ &= n \cdot E_{trans.} + n \cdot \varepsilon_{amp} \cdot r^\gamma \end{aligned} \quad (9)$$

unde $E_{trans.}$ este energia necesară pentru a procesa un singur bit de către circuitul de transmisie, ε_{amp} este energia disipată de etajul de amplificare RF și α reprezintă coeficientul de atenuare al mediului în care se face transmisia.

În mod asemănător putem să exprimăm energia necesară pentru a recepționa cu succes n biți de date:

$$E_{Rx}(n) = E_{rc}(n) = n \cdot E_{recv}. \quad (10)$$

Până în prezent, ne-am concentrat asupra modelării comunicației dintre două noduri, dar același model poate fi scalat pentru a estima consumul de energie la nivelul întregii rețele. Pentru aceasta, există două cazuri care necesită a fi luate în considerare: o rețea în care nodurile comunică direct cu nodul gateway și o rețea multi-hop în care mesajele sunt transmise de la vecin la vecin până când ajung la nodul gateway așa cum este descris în [8], [9], [10], [11].

Figura 6 prezintă o rețea liniară tipică de senzori wireless în care nodurile sunt răspândite la distanțe egale unul față de celălalt. Pe baza ecuațiilor (8) și (10), se poate estima costul energiei de comunicare într-o astfel de rețea.

Pentru cazul single-hop, nodul comunică direct gateway-ul. Consumul de energie pentru nodul al N -lea din rețeaua liniară poate fi exprimat ca:

$$\begin{aligned} E_b(N, n, r) &= E_{Tx}(n, N \cdot r) \\ &= n \cdot E_{trans.} + n \cdot \varepsilon_{amp} \cdot (N \cdot r)^\gamma \end{aligned} \quad (11)$$

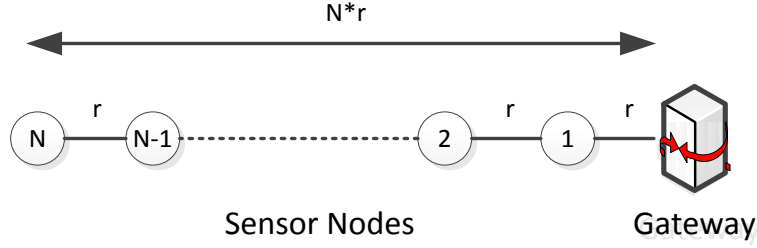


Figura 6. O rețea liniară de senzori wireless

Pentru scenariul multi-hop, al N-lea nod trebuie să trimită mesajul celui mai apropiat nod din direcția nodului gateway. Energia totală în acest caz va fi o sumă de N transmisii și $N-1$ recepții peste o distanță de un singur hop:

$$\begin{aligned}
 E_{MH}(N, n, r) &= N \cdot E_{Tx}(n, r) + (N - 1) \cdot E_{Rx}(n) \\
 &= N \cdot n \cdot (E_{trans.} + \varepsilon_{amp} \cdot r^\gamma) + (N - 1) \cdot n \cdot E_{recv.} \\
 &= n \cdot (N \cdot (E_{trans.} + E_{recv.} + \varepsilon_{amp} \cdot r^\gamma) - E_{recv.})
 \end{aligned} \tag{12}$$

unde n reprezintă numărul de biți din mesaj.

Putem generaliza relația (12) pentru cazul în care toate nodurile transmit un mesaj de n biți către nodul gateway:

$$\begin{aligned}
 E_{MH}^{all}(n, r) &= \sum_{i=1}^N E_{MH}(i, n, r) = N \cdot E_{Tx}(n, r) + (N - 1) \cdot E_{Rx}(n) \\
 &= \frac{N \cdot (N + 1)}{2} \cdot n \cdot (E_{trans.} + \varepsilon_{amp} \cdot r^\gamma) + \frac{N \cdot (N - 1)}{2} \cdot n \cdot E_{recv.}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Aceeași generalizare poate fi aplicată și pentru scenariul single-hop modelat de ecuația (11):

$$E_b^{all}(n, r) = \sum_{i=1}^N E_{Tx}(n, i \cdot r) = n \cdot N \cdot E_{trans.} + n \cdot \varepsilon_{amp} \cdot r^\gamma \cdot \sum_{i=1}^N i^\gamma \tag{14}$$

Folosind ecuațiile (13) și (14) putem calcula care sunt condițiile pentru care comunicația directă cu nodul gateway are un cost energetic global mai mic decât comunicația multi-hop:

$$E_b^{all}(n, r) < E_{MH}^{all}(n, r) \tag{15}$$

Putem apela la câteva ipoteze simplificatoare pentru a explicita relația de mai sus. În primul rând, putem presupune că energia necesară pentru a procesa un bit de informație pentru transmisie este egală cu cea pentru recepția aceluiași bit. Acest lucru este posibil datorită faptului că majoritatea transceiverelor radio folosesc aceleași circuite pentru ambele scopuri:

$$E_{trans.} = E_{recv.} = E_{circ.} \quad (16)$$

În al doilea rând, putem presupune o valoare constantă pentru coeficientul de atenuare pentru mediul în care rețeaua este instalată. În majoritatea cazurilor, acest coeficient este estimat pentru propagarea în vid și are valoarea $\gamma = 2$.

Folosind aceste două ipoteze, putem rescrie relația (15):

$$\frac{E_{circ.}}{\varepsilon_{amp}} > \frac{N + 1}{3} r^2 \quad (17)$$

Putem calcula același raport pentru un mediu afectat de perturbații, cum ar fi un mediu industrial în care traficul pe canalul de comunicație radio este bruiat sau interferă cu alte rețele. Pentru acest caz, coeficientul de atenuare crește la o valoare apropiată de 4:

$$\frac{E_{circ.}}{\varepsilon_{amp}} > \frac{(N + 1)(6N^2 + 15N + 16)}{30} r^4 \quad (18)$$

unde N reprezintă numărul de noduri iar r distanța dintre două noduri alăturate.

3.3 Circuite pentru energy harvesting

Pe parcursul acestei teze au fost studiate mai multe surse pentru recoltarea de energie, cum ar fi energia solară, energia termică, energia recoltată din vibrații și cea de radio-frecvență. Din punct de vedere energetic, toate sursele de energie menționate mai sus au valori de densitate de energie mult mai mici în comparație cu sursele convenționale de energie, cum ar fi bateriile sau celulele de combustibil.

3.3.1 Convetoare de vibrații

Recoltarea de energie din vibrații se bazează pe efectul piezoelectric, și anume capacitatea unui material de a genera energie electrică atunci când este supus unui stres mecanic, cum ar fi întinderea sau comprimarea. Invers, o deformare mecanică poate fi obținută în cazul în care cristalul piezoelectric este supus la o anumită tensiune.

Există mai multe surse care pot fi folosite pentru a produce o sarcină electrică prin efect piezoelectric. Zgomotul acustic, vibrațiile dispozitivelor și vehiculelor sau chiar mișcarea omului sunt unele din sursele cercetate în [12], [13], [14].

Efectul piezoelectric generează un curent alternativ, variind ca putere de la câțiva microwați la miliwati, suficient pentru a alimenta un dispozitiv mobil sau de mică putere [15], [16], [17].

Schema electrică echivalentă a unui dispozitiv piezoelectric este dată în Figura 7. Acesta se comportă ca o sursă de înaltă tensiune în curent alternativ, în serie cu un condensator și un rezistor parazit. Rezistența serie poate fi neglijată pentru cele mai multe scenarii de utilizare, deoarece are o valoare mică.

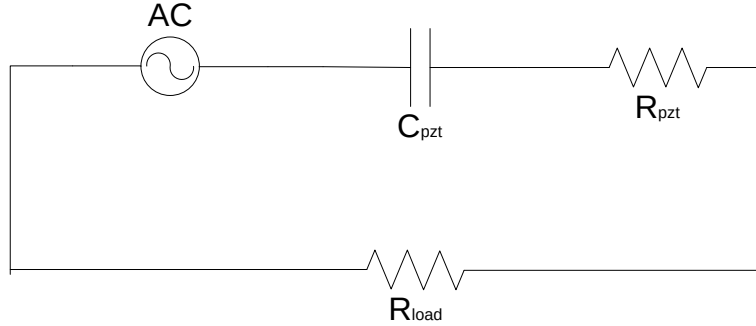


Figura 7. Circuitul electric echivalent pentru un generator piezoelectric

Expresia pentru tensiunea generată de materialul piezoelectric este dată de relația (19):

$$V_{open} = -\frac{td}{\epsilon S} S \quad (19)$$

unde d este coeficientul de stress mecanic, t este grosimea materialului, S reprezintă efortul mecanic aplicat, s este un coeficient de conformare a materialului iar ϵ este permitivitatea electrică a materialului.

Curentul de scurtcircuit pentru un element piezoelectric este dat de:

$$I_{sc} = fdASY \quad (20)$$

unde f reprezintă frecvența de oscilație, S este efortul mecanic aplicat, A este suprafața materialului, d este coeficientul de stress mecanic iar Y este modulul de elasticitate Young.

Putem să presupunem că pentru o sarcină medie, modulul piezoelectric va genera jumătate din tensiunea de mers în gol la jumătate din curentul de scurtcircuit. Folosind această ipoteză și relațiile din (19) și (20), putem calcula puterea generată de modulul piezoelectric:

$$P = \frac{1}{2} V_{open} \frac{1}{2} I_{sc} = \frac{1}{4} \left(\frac{td}{\epsilon S} S \right) (fdASY) = \frac{fVk}{s} S^2 \quad (21)$$

unde $V = tA$ și reprezintă volumul elementului piezoelectric.

Modulele piezoelectrice folosite pentru colectarea energiei din vibrații au o structură flexibilă, care poate fi atașată la sursa de vibrații. Modulul este format din două cristale piezoelectrice laminate pe o foaie flexibilă de metal, de obicei din oțel. O masă de rezonanță este adăugată la un capăt iar celălalt capăt este fixat pe sursa de vibrații.

3.3.2 Convertoare termoelectrice

Conversia termoelectrică se bazează pe observația că un gradient termic între două conductoare realizate din materiale diferite, va genera o tensiune. Acest fenomen este cunoscut sub numele de efect Seebeck. Aceasta are loc atunci când o tensiune V este indusă într-un element care este supus unui gradient de temperatură ΔT . Tensiunea generată este direct proporțională cu gradientul de temperatură:

$$V = \alpha \Delta T \quad (22)$$

unde α poartă numele de coeficient Seebeck.

Relația de mai sus este în principal exploatată în termocupluri pentru măsurarea exactă a temperaturii. Cu toate acestea, în cazul în care mai multe termocupluri sunt conectate termic în paralel, acestea pot genera suficientă energie pentru a rula un dispozitiv de putere redusă, cum ar fi un nod de senzori wireless sau chiar să încarce o baterie de capacitate mică [18].

Un model electric echivalent al unui generator termoelectric (TEG) este prezentat în Figura 8. TEG acționează ca o sursă de tensiune în curent continuu, cu o rezistență serie parazită.

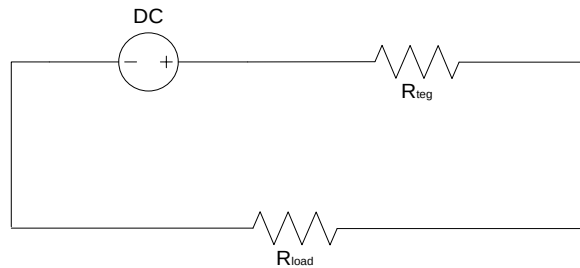


Figura 8. Modelul electric echivalent al unui modul termoelectric

Bazându-ne pe modelul de mai sus putem exprima puterea generată de modulul termoelectric P_i :

$$P_i = \frac{(2\alpha\Delta T)^2}{4R_{TEG}} \quad (23)$$

O serie de experimente au fost realizate pentru a determina dacă un TEG poate fi utilizat pentru a alimenta un nod WSN. Elementul termoelectric folosit a fost un modul Peltier evaluat la 18V, 2A și capabil de a funcționa pentru o diferență de temperatură maximă de 50 de grade Celsius între cele două armături.

Fiecare armătură a elementului a fost echipată cu un radiator din aluminiu și imersată într-o baie de lichid. Temperatura unei armături a fost controlată prin încălzirea lichidului în care a fost scufundată, în timp ce a doua armătură a fost păstrată la o temperatură constantă.

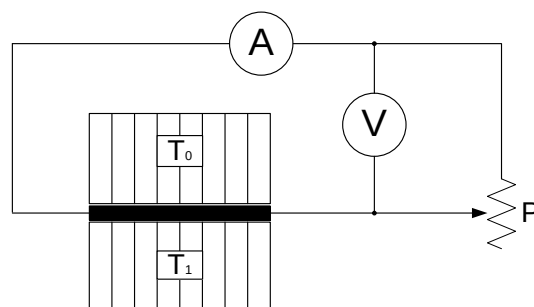


Figura 9. Montajul experimental folosit pentru determinarea eficienței conversiei termoelectrice.

Un potențiomtru a fost folosit pentru a simula o sarcină variabilă în sistem și pentru a reproduce condițiile în care la sistem ar fi conectat un nod senzorial.

Două tipuri de experimente au fost efectuate: primul a fost conceput să măsoare puterea de ieșire a sistemului pe o sarcină statică în timp ce al doilea experiment a măsurat puterea pe o sarcină variabilă.

Pentru primul experiment, o rezistență de sarcină de $1K\Omega$ a fost conectată la generatorul termoelectric. Diferența de temperatură de pe cele două armături a fost variată în timp ce tensiunea și curentul de pe sarcină au fost măsurate la intervale regulate de timp.

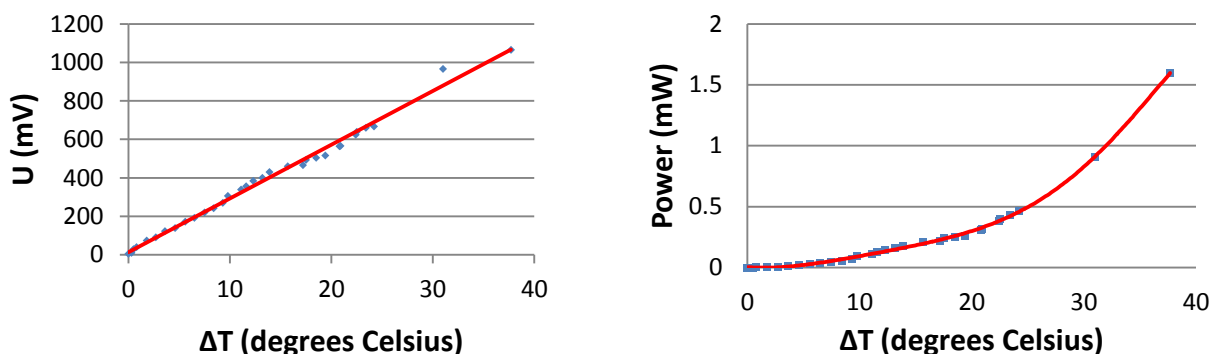


Figura 10. Tensiunea și puterea generate de elementul termoelectric în funcție de diferența de temperatură dintre cele două armături ale elementului.

Puterea generată de elementul termoelectric este dată în Figura 10. Puterea maximă măsurată a fost de 1.6mW pentru un gradient de temperatură de 37.7 Celsius.

Al doilea experiment s-a axat pe măsurarea puterii de ieșire a generatorului pentru o sarcină variabilă. Pentru aceasta, diferența de temperatură între cele două armături ale elementului termoelectric a fost menținută constantă la 35 de grade Celsius. Rezistența de sarcină a fost variată în timp ce valorile curentului și tensiunii pe sarcină au fost măsurate.

Scopul acestui experiment a fost de a determina care este sarcina pentru care puterea produsă de generatorul termoelectric este maximă. Aceste informații sunt utile în proiectarea unui circuit care utilizează energia generată de TEG pentru a încărca o baterie sau un supercondensator. Un astfel de circuit de încărcător poate fi optimizat pentru a urmări acest punct puterea maximă (Figura 11) și să ofere cea mai bună performanță în orice situație.

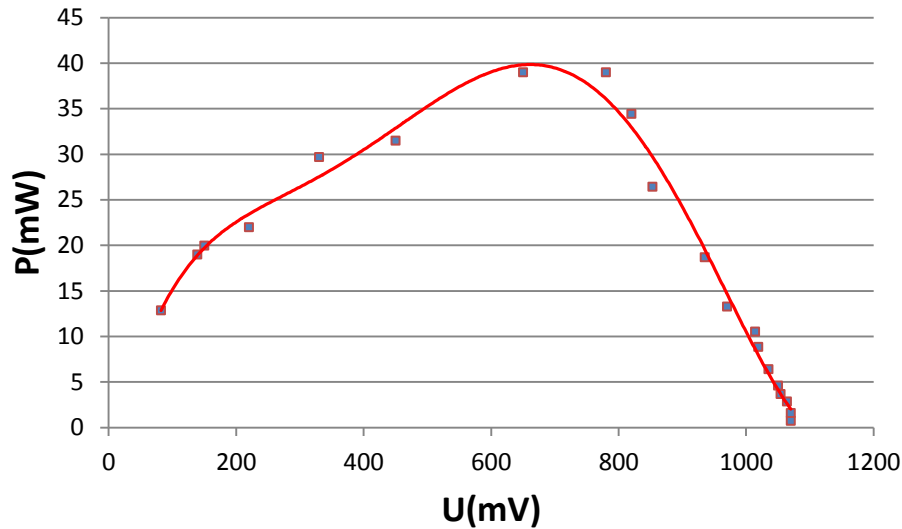


Figura 11. Puterea maximă generată în funcție de diferența de potențial generată la ieșirea termoelementului.

Captarea de energie folosind convertoarele termoelectrice poate fi adaptată pentru a fi utilizată de nodurile WSN care se află într-un mediu ce prezintă variații de temperatură. În acest scop, un nod poate fi plasat pe o suprafață fierbinte, cum ar fi un radiator sau chiar pe o fereastră, pentru a folosi diferența de temperatură dintre interior și exterior.

3.3.3 Convertoare fotovoltaice

Unitatea de bază a unui convertor solar este celula fotovoltaică. Acesta este un dispozitiv semiconductor cu două terminale, care se comportă ca o diodă atunci când nu este iluminat și generează o tensiune atunci când este supus unui flux luminos. O celulă solară se comportă ca o sursă de tensiune, cu un curent care depinde de iluminarea incidentă.

Atunci când o celulă solară nu este conectată la o sarcină, diferența de tensiune la bornele sale are o valoare maximă. Acest lucru este cunoscut sub numele de tensiunea de circuit deschis, sau V_{oc} și poate fi exprimată ca:

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \ln \left(e^{\frac{J_{sc}}{J_0}} + 1 \right) \quad (24)$$

unde J_{sc} este densitatea curentului fotovoltaic la scurtcircuit. Din ecuația (24) putem deduce că tensiunea de ieșire va crește logaritmicește cu intensitatea luminii incidente.

Din punct de vedere electric, circuitul intern al celulei solare este echivalent cu o sursă de curent ideală, care este în paralel cu o diodă. La acest model ideal se adaugă două rezistențe parazite: o rezistență șunt în paralel cu diodă și un rezistor serie. Atunci când este supusă la iluminare, celula produce un curent care este proporțional cu intensitatea luminii incidente.

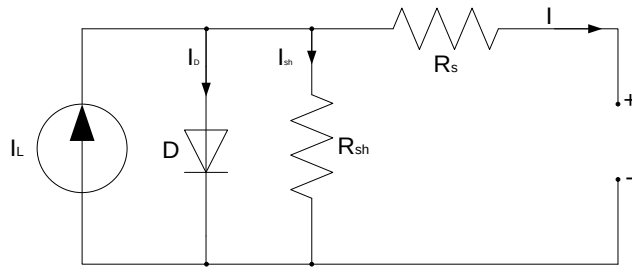


Figura 12. Circuitul echivalent al unei celule fotovoltaice.

Primul experiment a presupus expunerea unei celule fotovoltaice la diferite iluminări și măsurarea caracteristicii tensiune-curent acesteia. Intensitatea luminii a fost măsurată cu un luxmetru și a variat de la expunerea la lumina solară directă (aprox. 28000 lux), condițiile din interiorul unui birou (2000 la 5000 lux), până la cele dintr-o cameră întunecată (100 lux). Curentul și tensiunea de pe rezistența de sarcină au fost măsurate iar caracteristica I-V a celulei este dată în graficul din Figura 13.

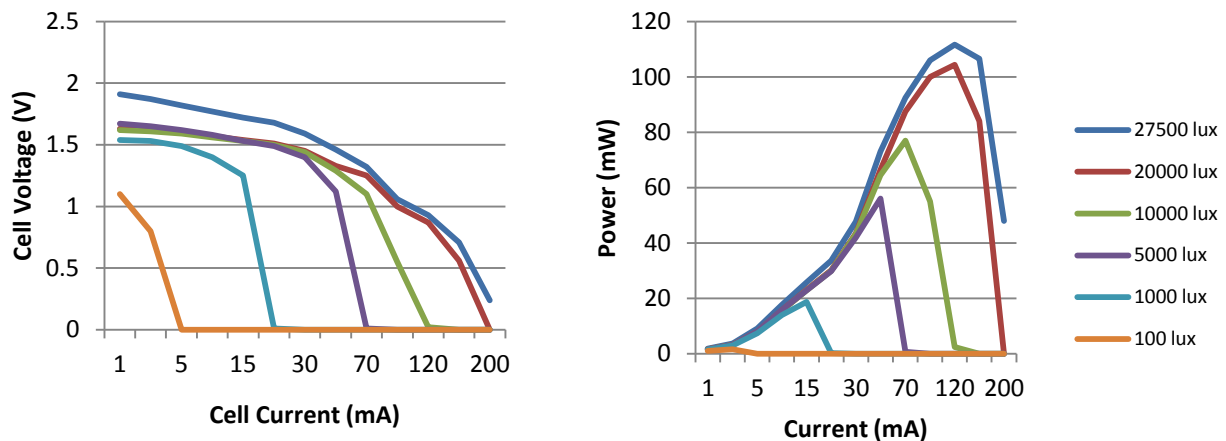


Figura 3. Tensiunea și puterea generată de elementul fotovoltaic pentru o sarcină variabilă la diferite iluminări ale elementului fotovoltaic.

Din figura de mai sus putem trage câteva concluzii. Prima, dictată de modelul prezentat mai devreme, este că panoul fotovoltaic se comportă ca o sursă de curent, care este limitată în tensiune. A doua observație este că putem remarca cu ușurință punctul de transfer maxim de putere din caracteristica curent-tensiune a celulei pentru diferitele iluminări la care aceasta a fost supusă. O altă observație este că, pe măsură ce iluminarea scade, la fel și cantitatea de curent produs de celulă, ceea ce are un efect direct asupra punctului de putere maximă. Din Figura 13 se poate vedea că acest punct este atins la curenți din ce în ce mai mici pe măsură ce iluminarea este în scădere. Datorită acestui comportament, un panou solar nu poate fi utilizat pentru a asigura funcționarea continuă a unui dispozitiv. Cele mai multe sisteme cu recoltare fotovoltaică folosesc un mediu secundar pentru stocarea energiei suplimentare generate de celulele fotovoltaice. Această energie este eliberată în circuit în momentul în care rata de producție a energiei de la celulele solare descrește.

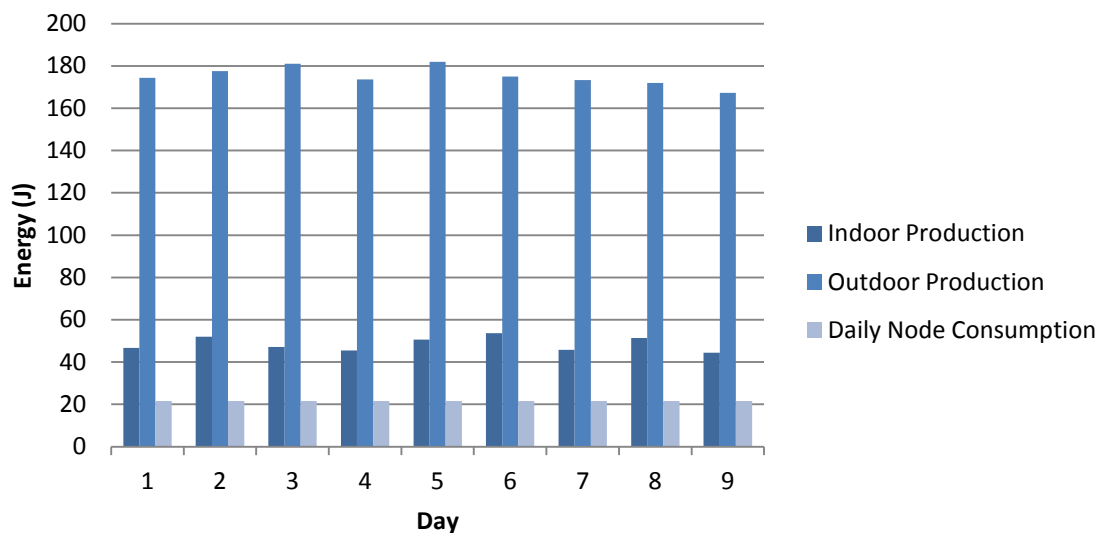


Figura 14. Comparație dintre energia captată în interiorul și în exteriorul unei clădiri

Figura 14 prezintă o comparație a energiei recoltate de către panoul fotovoltaic în două locații diferite: prima a fost situată în exterior, unde panoul solar avea o vizibilitate bună a soarelui pe tot parcursul zilei, iar a doua în interiorul unei clădiri de birouri. Putem vedea o diferență clară între cele două scenarii, din punctul de vedere al producției diurne de energie. Scopul acestui experiment a fost de a determina dacă recoltarea fotovoltaică este capabilă de a alimenta un nod senzor pe termen nedefinit, chiar și în cel mai dezavantajos scenariu. Figura 14 prezintă comparația dintre energia produsă de elementul fotovoltaic și consumul total de energie al nodului senzorial Sparrow prezentat în Capitolul 4.

3.3.4 Convertoare de radiofrecvență

Antenele cu rectificare sunt dispozitive folosite pentru a capta și converti energia undelor de radiofrecvență în energie electrică. Acestea funcționează prin atașarea unui circuit redresor la o antenă care este acordată pe o anumită frecvență. Pentru cele mai multe aplicații, antenele cu redresare sunt utilizate pentru transportul de energie folosind radiația electromagnetică din gama de frecvență a microundelor, datorită randamentului ridicat pe care acestea-l prezintă la conversie. În unele situații, o eficiență de peste 85% [19] a putut fi măsurată. Această randament ridicat a fost principalul motiv pentru studiul aplicabilității antenelor cu rectificare în domeniul nodurilor senzoriale wireless.

Există numeroase publicații care tratează antenele cu redresare și proiectarea lor, cum ar fi [20], [21], [22]. În trecut cercetarea a fost axată pe transmisia și recepția eficientă de microunde de mare putere, dar, în ultimii ani paradigma s-a axat mai mult pe captarea radiațiilor de microunde cu o densitate scăzută de putere [23], [24]. Pentru benzile ISM, unde puterea maximă de emisie este reglementată strict, provocarea este de a avea un design foarte eficient și de dimensiuni rezonabile.

Antenele patch sunt un model simplu și eficient de antene ce pot fi folosite pentru captarea energiei de radiofrecvență. Acestea sunt de obicei formate dintr-un strat conductor care formează suprafața efectivă a antenei, un substrat dielectric izolator și un al doilea strat conductor, cu rol de plan de masă. Datorită acestui fapt, cele mai multe antene patch pot fi cu

fabricate cu ușurință pe un PCB dublu-strat standard, ceea ce scade foarte mult costul lor de fabricație.

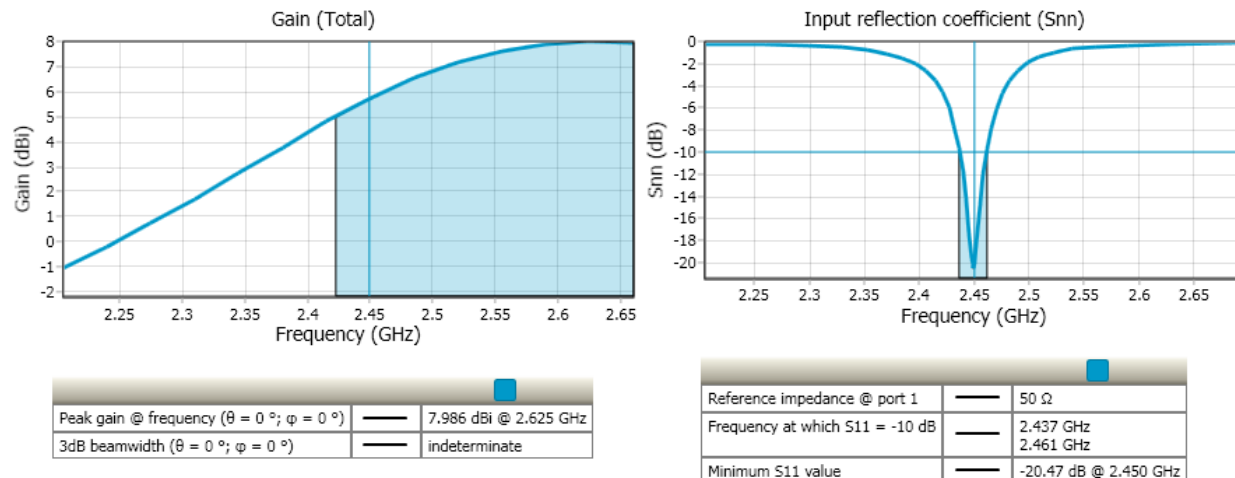


Figura 15. Câștigul și coeficientul de reflexie al antenei proiectate în funcție de frecvență

O astfel de antenă patch a fost simulată, construită și apoi supusă unei serii de experimente pentru a determina dacă recoltarea de energie din undele de radiofrecvență este potrivită pentru alimentarea de la distanță a unui nod senzorial.

Rezultatele simulării arată că antena rezonază la frecvența de 2.45GHz după cum se arată în Figura 15 și că aceasta poate furniza un câștig de aproximativ 6dB pentru acea frecvență, ceea ce este semnificativ, ținând seama de faptul că dimensiunile sale sunt reduse.

Eficiența conversiei din energia RF într-o tensiune continuă poate fi exprimată prin raportul dintre puterea disponibilă la ieșirea modului și puterea colectată de antenă din mediu. Această relație poate fi exprimată ca:

$$\eta = \frac{P_{DC}}{P_{recv.}} = \frac{V_{DC}}{R_{load}^2 \cdot P_{recv.}} \quad (25)$$

Pentru a testa eficiența dată de relația de mai sus, o serie de experimente au fost făcute în care s-a folosit modulul de recoltator RF plasat la o distanță variabilă față de o sursă de microunde. Pentru ca scenariul să fie plauzibil, am folosit un router wireless de 2,4 GHz standard, ca sursă de energie. În locul antenei cu care era dotat, routerul a fost conectat la un ghid de undă cilindric și a fost configurat pentru a transmite la puterea maximă, care este în jurul valorii de -10dBm sau 100 μ W. Modulul de colectare a energiei a fost plasat la o distanță variabilă, paralel cu apertura ghidului de undă pentru a asigura transferul maxim de energie. Dispozitivul a fost conectat în paralel cu un condensator de 10mF care a simulat mediul de stocare a energiei. Mai multe măsurători ale curbei de încărcare a condensatorului au fost luate pentru distanțe diferite față de ieșirea ghidului de undă.

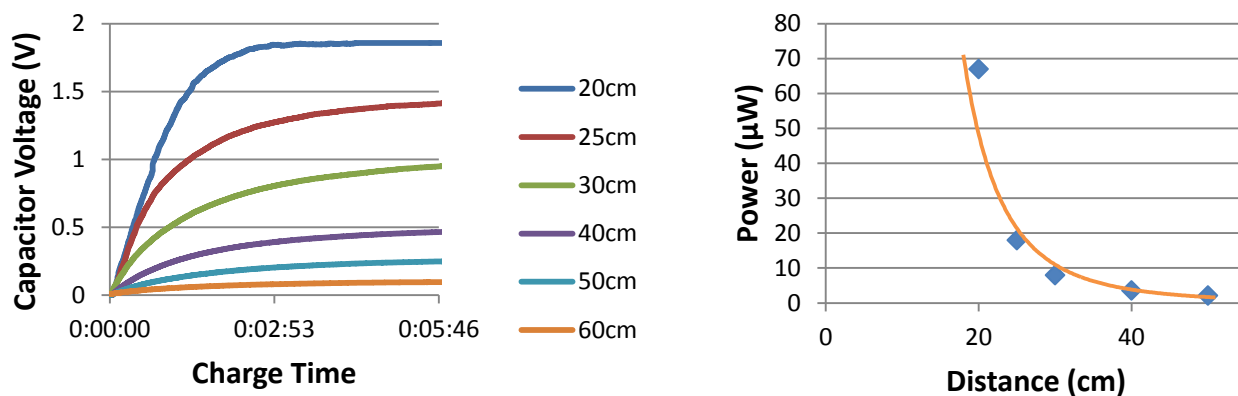


Figura 16. Curbele de încărcare pentru condensatorul conectat la modulul RF și puterea medie captată în funcție de distanța de la emițătorul de microunde

Curbele de încărcare pentru condensator sunt reprezentate grafic în Figura 16 și arată clar că energia este primită de către antena patch și este convertită într-o tensiune continuă. După fiecare încărcare, tensiunea condensatorului atinge o valoare de echilibru, care scade cu distanța. Acest lucru este mai clar prezentat în al doilea grafic din Figura 16, care arată modul în care puterea medie generată la ieșirea modulului RF variază în funcție de distanța de la sursa de microunde.

Capitolul 4

O nouă abordare în proiectarea nodurilor senzoriale wireless

Consumul de energie pentru cele mai multe noduri de senzori wireless este suficient de scăzut încât devine util de investigat posibilitatea folosirii surselor regenerabile de energie pentru alimentarea acestora. Astfel de surse au fost descrise în capitolul anterior și eficiența lor în captarea de energie din mediul înconjurător a fost analizată în această lucrare precum și în alte articole care acoperă acest subiect [25], [26], [27], [28], [29], [30].

Sparrow [31] este o arhitectură de rețea wireless de senzori care a fost construită ca o platformă de cercetare pentru tehnicile de recoltare de energie descrise în capitolul anterior. Acesta a fost, de asemenea, folosită pentru a implementa și testa o serie de aplicații fără fir, inclusiv IEEE 802.15.4, 6LoWPAN și rețele ZigBee. Arhitectura unui nod Sparrow este dată în Figura 17.

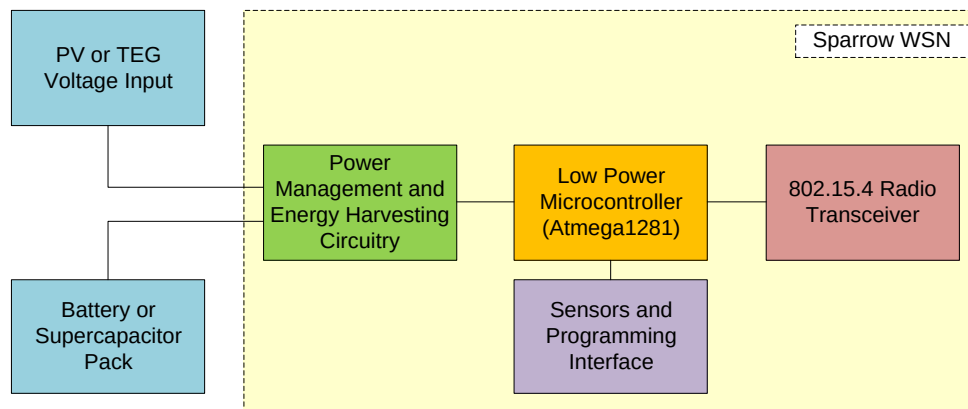


Figura 17. Arhitectura nodului senzorial Sparrow

În acest capitol sunt prezentate rezultatele cercetărilor efectuate în direcția găsirii unui mediu de stocare a energiei adecvat nodurilor senzoriale wireless și a circuitelor de stabilizare și alimentare pentru acest mediu. Aceste circuite au fost proiectate și încorporate în platforma Sparrow prezentată mai sus. Vom studia un nou tip de dispozitive de stocare numite supercondensatoare. Vom evalua eficiența lor la depozitarea și eliberarea sarcinii atunci când acestea sunt folosite în conjunctură cu tehnicile de recoltare prezentate în capitolul anterior și vom determina dacă aceste circuite sunt în măsură să producă și să stocheze suficientă energie pentru a alimenta un nod senzorial pe termen nedefinit.

4.1.1 Super-condensatoare

Un condensator este un element de circuit care constă din două plăci de metal izolate printr-un dielectric. Diferența dintre un condensator clasic și un super-condensator este aceea că cele din urmă înmagazinează sarcina electrostatică sub formă de ioni. Se supun aceleași teorii fundamentale ca și condensatorii obișnuiți, dar au capacități nominale mult mai mari, datorită suprafeței mari a electrozilor sau din cauza dielectricilor foarte subțiri. Deoarece aceste dispozitive stochează sarcină prin procese electrochimice, ele sunt mai apropiate de bateriile convenționale, având densități de energie comparabile cu acestea.

În modelarea unei super-condensator, rezistența echivalentă serie sau ESR trebuie să fie luată în considerare datorită influenței acesteia asupra timpului de încărcare. De asemenea, o importanță semnificativă are și rezistența echivalentă paralel, care are de obicei o mare valoare și este responsabilă pentru fenomenul de auto-descărcare al condensatorului pentru perioade îndelungate de timp. O altă componentă parazită ale acestui model este inductanța echivalentă serie dată de terminalele condensatorului.

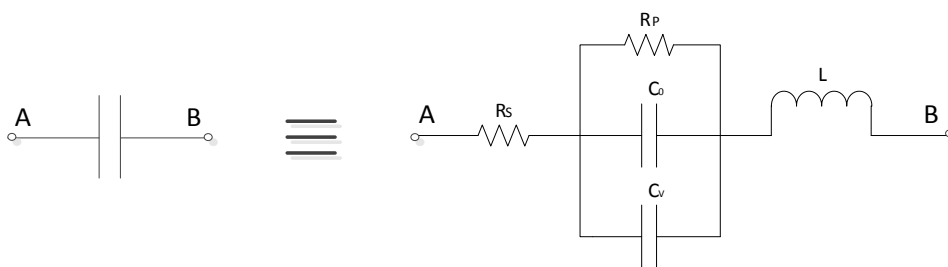


Figura 18. Circuitul electric echivalent al unui condensator

Modelul electric echivalent prezentat în Figura 18 este, totuși, un model simplificat de prim ordin al unui super-condensator. Datorită naturii poroase a electrozilor utilizați de către aceștia, comportamentul lor seamănă mai mult cu cel al liniilor lungi de transmisie. Acest model a fost propus și descris în [32], dar aceasta nu ia în considerare variațiile pe care capacitatea le manifestă din cauza tensiunii sau temperaturii. Acestea sunt abordate în [33], în care Zubieta et. Al. propun o capacitate suplimentară, care are o relație de dependență liniară cu tensiunea de alimentare. De asemenea, modele similare au fost descrise în [34] și [35]. În acestea, condensatorul este modelat ca fiind alcătuit din două părți: o capacitate constantă C_0 și una variabilă, C_V , care este direct proporțională cu tensiunea de alimentare: $C_V = K_V V$, unde K_V este o constantă dată de materialul din care este fabricat condensatorul. Aceste două capacități sunt în paralel, astfel încât să putem calcula capacitatea totală ca fiind: $C = C_0 + C_V$.

Pentru a stabili dacă super-condensatoarele sunt capabile de a înlocui bateriile în alimentarea unui nod de senzori wireless, o serie de experimente au fost efectuate. În toate experimentele am folosit două condensatoare electrice dublu strat: 1F, 5.5V electrolitic fabricat de Panasonic, care are o rezistență internă de 50ohm și 22F, 2.2V RUBYCON, cu o rezistență internă de 0.1Ohm. Rezistența internă este unul dintre cei mai importanți parametri care afectează rata de absorbție a sarcinii pentru un super-condensator. De regulă, acesta scade pe măsura ce crește capacitatea nominală. Pentru a avea o referință pentru experimentele noastre, am folosit, de asemenea, un condensator electrolitic 10000μF și o baterie reîncărcabilă NiMH de mică capacitate.

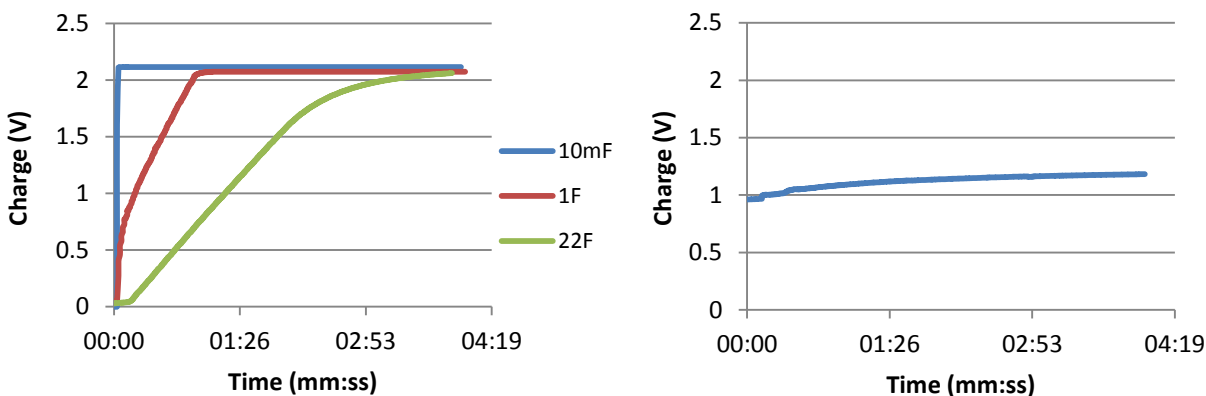


Figura 19. Curbele de încărcare ale condensatoarelor comparate cu o baterie de 300mAh pentru același curent de încărcare

Primul experiment a încercat să determine cât de repede un super-condensator poate stoca o anumită cantitate de energie, comparativ cu o baterie reîncărcabilă și un condensator electrolitic obișnuit. Pentru aceasta, am conectat fiecare condensator la o sursă de alimentare limitată în curent la 50mA și am măsurat timpul de încărcare. Am aplicat aceeași procedură la o baterie de 3.2V NiMH și 300mAh (capacitate similară cu a celui mai mare super-condensator) care a fost anterior descărcată până în jurul valorii de 1V. Graficul din Figura 19 prezintă curbele de încărcare a condensatoarelor în comparație cu cea a bateriei reîncărcabile. Analizând graficul, este clar că toți condensatorii sunt capabili să absoarbă sarcina electrică mult mai repede decât bateria reîncărcabilă. Diferențele timpilor de încărcare dintre diferitele tipuri de condensatoare sunt date mai ales de capacitatea lor nominală. Cu toate acestea, aceste diferențe sunt mici, deoarece chiar și condensatorul 22F ajunge la încărcare completă după doar trei minute. Super-condensatoarele au capacitatea de a stoca sarcina rapid și eficient, acest lucru făcându-le un prim candidat pentru recoltarea piezoelectrică, de exemplu.

Al doilea experiment a constatat în măsurarea timpilor de descărcare pentru condensatoarele din primul experiment. Acest experiment a fost făcut cu scopul de a determina rata de transfer de energie pe care super-condensatorii o pot susține și de a compara această rată cu cea a unei baterii normale. Pentru aceasta, am conectat fiecare dintre condensatori la o sarcină rezistivă 100Ohm fixă și am măsurat timpul de descărcare în sarcină. Acest lucru a fost apoi comparat cu timpul de descărcare a unei 21mAh celule NiMH și a bateriei de 300mAh pe aceeași sarcină.

Rezultatele sunt date în Figura 20:

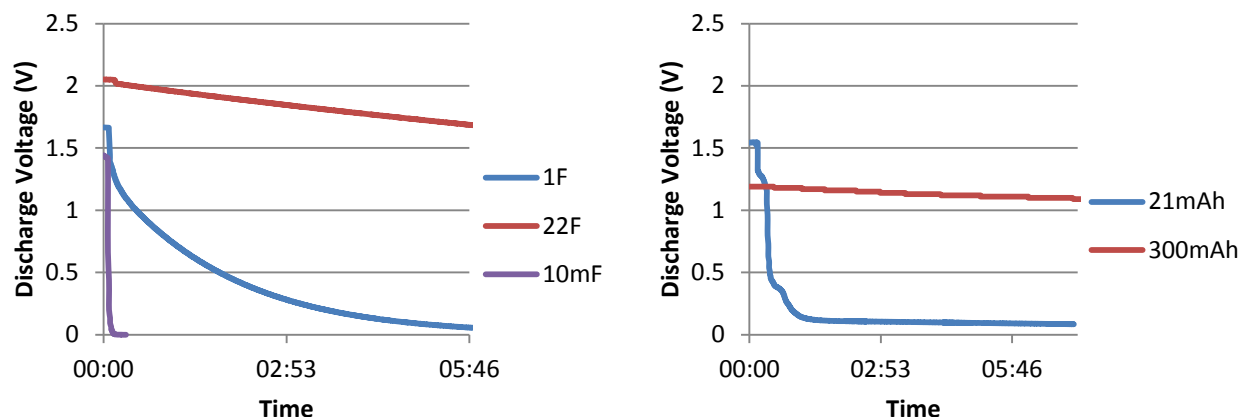


Figura 20. Curbele de descărcare pentru condensatoarele și pentru bateriile reîncărcabile testate pe aceeași sarcină

Rezultatele graficelor de mai sus pot fi justificate prin existența unei diferențe între densitatea de energie a condensatoarelor și cea a bateriilor. Condensatoare au o densitate mare de putere, ceea ce înseamnă că pot elibera sarcina înmagazinată foarte repede, spre deosebire de baterii. Condensatorii obișnuiți au o densitate de energie foarte mică și din această cauză nu pot stoca o cantitate mare de sarcină. Acest tip de comportament este expus în figura de mai sus de către condensatorul de 10000 μF , care are o curbă de descărcare foarte abruptă. Cu toate acestea, super-condensatoarele moderne au o densitate de energie considerabilă, care poate fi comparată cu cea a bateriilor. Acesta este motivul pentru care curba de descărcare a condensatorului 1F este comparabilă cu cea a bateriei de 21mAh și condensatorul 22F prezintă o descărcare chiar mai lentă, comparabilă cu cea a bateriei de 300mAh.

În concluzie, super-condensatoarele sunt foarte foarte eficiente pentru înmagazinarea și eliberarea unor cantități mari de energie nu numai pe intervale mari de timp, precum bateriile reîncărcabile dar și pentru intervale foarte mici de timp.

4.2 Proiectarea circuitelor de încărcare

Principală provocare în proiectarea nodurilor Sparrow a fost proiectarea circuitelor pentru managementul alimentării cu energie. Funcția principală a acestui circuit este de a colecta energie dintr-o celulă fotovoltaică sau de la un modul termoelectric și de a furniza o tensiune stabilă de încărcare pentru un super-condensator. Când nivelul de tensiune de pe condensator depășește un prag predeterminat, nodul WSN este alimentat.

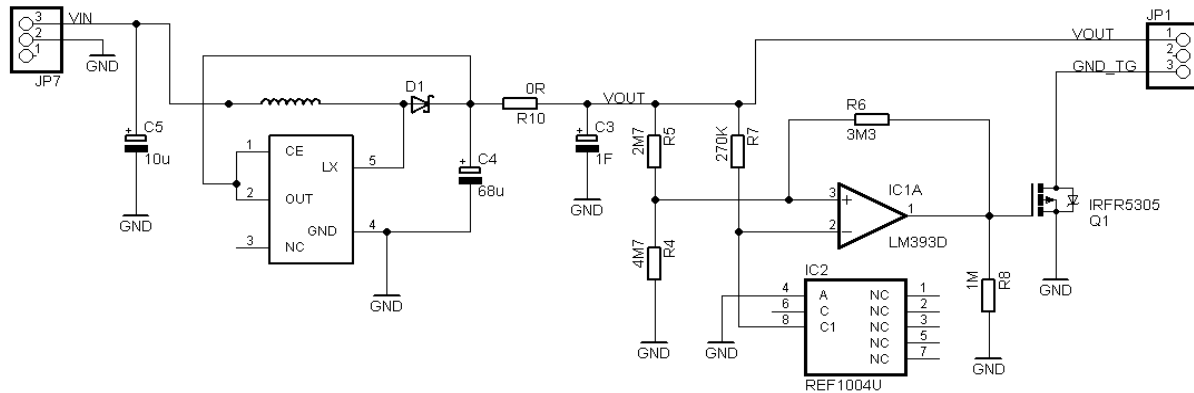


Figura 4. Circuitul unității de captare de energie și power management

Circuitul este compus din două sub-sisteme separate: un stabilizator step-up în comutație și un circuit de monitorizare și control a tensiunii de pe super-condensatorului. Deoarece nodul WSN operează la o tensiune minimă de 1.8V, tensiunea generată de recoltatorul de energie ar putea să nu fie suficient de mare. Prin urmare, un convertor în comutație a fost folosit pentru a furniza o tensiune stabilizată. Aceasta este folosită pentru a încărca un super-condensator de 1F, care joacă rolul de sursă de energie pentru nodul senzorial.

Rolul circuitului de monitorizare este de a alimenta nodul WSN, în funcție de cantitatea de energie stocată în condensator. Această funcție este realizată de un circuit low-power de comparator cu histerezis care monitorizează constant tensiunea de pe super-condensator. În momentul în care aceasta depășește un prag dat de o referință de tensiune, circuitul comută alimentarea nodului senzorial. Circuitul realizează astfel un duty-cycling la nivel hardware, care este foarte eficient din punct de vedere al consumului de energie. Timpul de funcționare poate fi extins prin folosirea unui super-condensator de capacitate mare sau printr-o politică riguroasă de power management software pe nodul senzorial.

Modulul ZigBitA2 produs de MESHNETICS a fost ales ca principala componentă a nodului senzorial. Este un sistem pe un chip (SoC), care include un microcontroller low-power ATmega1281, un emițător-receptor radio Atmel AT86RF230 802.15.4 cu o antenă radio duală.

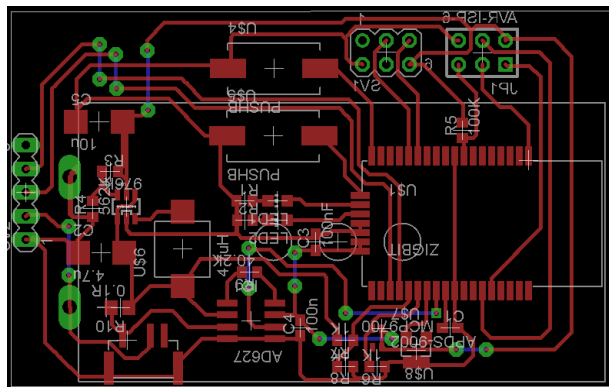


Figura 5. Nodul senzorial Sparrow

Capitolul 5

Un nou framework de management pentru rețelele wireless de senzori

Suita de aplicații de management Check oferă o nouă abordare în monitorizarea și acționarea insulelor formate din noduri WSN eterogene. Acest framework cuprinde algoritmi de planificare, bazați pe scheme multi-hop de rutare pentru rețelele de senzori wireless. Check oferă, de asemenea, un sistem centralizat de monitorizare și de control și un serviciu de reconfigurare. Cea mai mare provocare pentru un astfel de framework este proiectarea unui set de algoritmi pentru a obține datele de monitorizare și pentru a emite comenzi către nodurile wireless într-un mod transparent, eficient și sigur.

5.1 Algoritmi de planificare pentru rețelele WS&AN orientate pe task-uri

5.1.1 Descrierea algoritmilor

În această secțiune este descris un algoritm de planificare neconvențional, în sensul că principala constrângere nu este timpul, ci de energia [36]. În prezent cercetarea în acest domeniu este, în general, axată pe producerea de algoritmi de planificare bazați pe termeni impuși. Abordarea noastră este de a produce un algoritm care să minimizeze importanța timpului de completare a unui task în algoritmul de planificare. În schimb, metrica principală este consumul de energie, urmată de disponibilitatea nodului respectiv și de afinitatea task-urilor pentru anumite noduri din rețea.

Energia consumată în transmiterea/primirea unui mesaj este direct proporțională cu numărul de biți din sarcina utilă a mesajului respectiv. Pentru a modela sarcinile și dependențele dintre acestea vom folosi un graf orientat aciclic (DAG), în care muchiile reprezintă dependențele, costul lor fiind numărul maxim de biți transmiși între sarcini (considerăm că o transmisie are loc după fiecare perioadă).

Definim:

- $T(m_k)$ mulțimea task-urilor alocate nodului m_k
- $P_{idle_{m_k}}$ puterea de mers în gol a nodului m_k
- $B(e_{ij}), e_{ij} \in E$ (E reprezintă mulțimea muchiilor în DAG) este numărul mediu de biți pe secundă transmiși de la task i la task j
- $P_{tr, m_k}, W_{rcv, b, m_k}$ energia necesară pentru a transmite/recepționa un bit către/de la nodul m_k
- $M(v)$ nodul pe care rulează task-ul v

Puterea necesară unui nod pentru a recepționa date poate fi exprimată ca fiind:

$$P_{rcv,v_i} = \sum_{j,v_j \notin M(v_i)} B(e_{ji}) W_{rcv\ b,M(v_i)} \quad (26)$$

O relație asemănătoare poate fi dată pentru transmisia de date:

$$P_{tr,v_i} = \sum_{j,v_j \notin M(v_i)} B(e_{ji}) W_{tr\ b,M(v_i)} \quad (27)$$

Prin urmare, timpul de viață al întregii rețele poate fi exprimat ca fiind:

$$\max_{k,m_k \in M} \frac{W_{m_k}}{P_{idle_{m_k}} + \sum_{i,v_i \in T(m_k)} (P_{rcv,v_i} + P_{tr,v_i})} \quad (28)$$

Luând în considerare faptul că $P_{idle_{m_k}}$ are aproape aceeași valoare pe toate nodurile și că toate nodurile au la dispoziția lor aceeași cantitate de energie din baterii, cea mai importantă componentă rămâne energia consumată de transmisia radio.

Puterea consumată de rețea pentru comunicația radio poate fi exprimată ca:

$$P_{radio} = \sum_{i,j,M(v_i) \neq M(v_j)} B(e_{ji}) K \quad (29)$$

Am redus algoritmul de planificare la o problemă cunoscută pe grafuri numită min k-cut pentru care un algoritm polinomial a fost găsit în 1988. Dacă ne imaginăm o configurație în care sarcinile sunt alocate pe noduri și presupunem că nici un task nu rulează pe mai mult de un nod (putem să forțăm această constrângere prin multiplicarea în avans a tuturor taskurilor care trebuie să ruleze pe toate nodurile) atunci algoritmul de planificare este defapt o partiție a mulțimilor de noduri $\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$ în care fiecare submulțime rezultată conține toate sarcinile care trebuie să ruleze pe nodul respectiv. În teoria grafurilor, acest concept poartă numele de k-cut.

La această soluție ideală trebuie adăugate mai multe constrângeri legate de afinitatea sarcinilor. Prin urmare, există unele sarcini care se pot executa numai pe nodurile compatibile iar altele care pot rula pe toate nodurile (de exemplu, sarcini de detectare). Pentru a pune în aplicare prima constrângere este necesar ca mulțimea de task-uri alocate unui anumit nod să includă numai sarcini compatibile precum și o filtrare a tuturor tăieturilor din graful de sarcini care generează astfel de mulțimi.

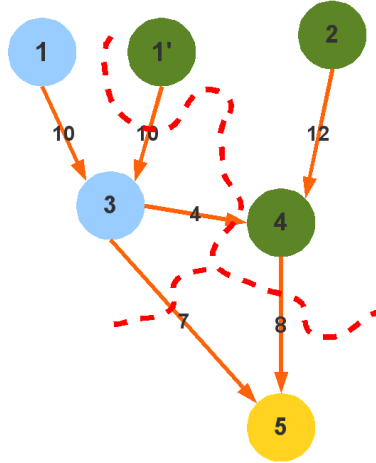


Figura 23: Un graf orientat în care sunt reprezentate task-urile din rețea și costurile energetice asociate comunicației dintre ele. Un task trebuie să fie multiplicat pentru a putea rula pe mai multe noduri.

Algorithm 3. Adapted min K-Cut

```

function AKCut( $V, k, m_i$ )
  if  $k$  is even
    then
       $k' = k - 2$ 
    else
       $k' = k - 1$ 
    end if
  MT  $\leftarrow$  tasks that have multiplicity
   $V' \leftarrow V - MT$ 
   $S \leftarrow$  the set of subsets of  $k'$  elements from  $V'$ 
   $T \rightarrow$  the set of subsets of  $k - 1$  elements from  $V' \cup MT$ 
  Find  $s \in S, t \in T$  such that  $W(\text{cut}(s, t)) = \min$ 
  /* cut( $s, t$ ) splits  $V$  into  $s'$  and  $t'$  */
  /* Find the minimal cut( $s, t$ ) with maximal source set */
   $T(m_i) = \{s'\} \cup \{v_j | v_j \in MT, NA(v_j, m_i) = 1\}$ 
  return  $T(m_i) \cup AKCut(V - s', k - 1, m_{i+1})$ 

```

Algoritmul de planificare suferă de o complexitate algoritmică considerabilă. Pentru folosirea lui la scară largă este nevoie de o soluție diferită, bazată pe un algoritm aproximare. O abordare viabilă ar fi utilizarea teoremei din [37], care precizează că problema k-cut poate fi rezolvată folosind arbori Gomory-Hu în dublul soluției optime. O implementare a acestei soluții este detaliată în [38] [39] pentru de două ori optimul global.

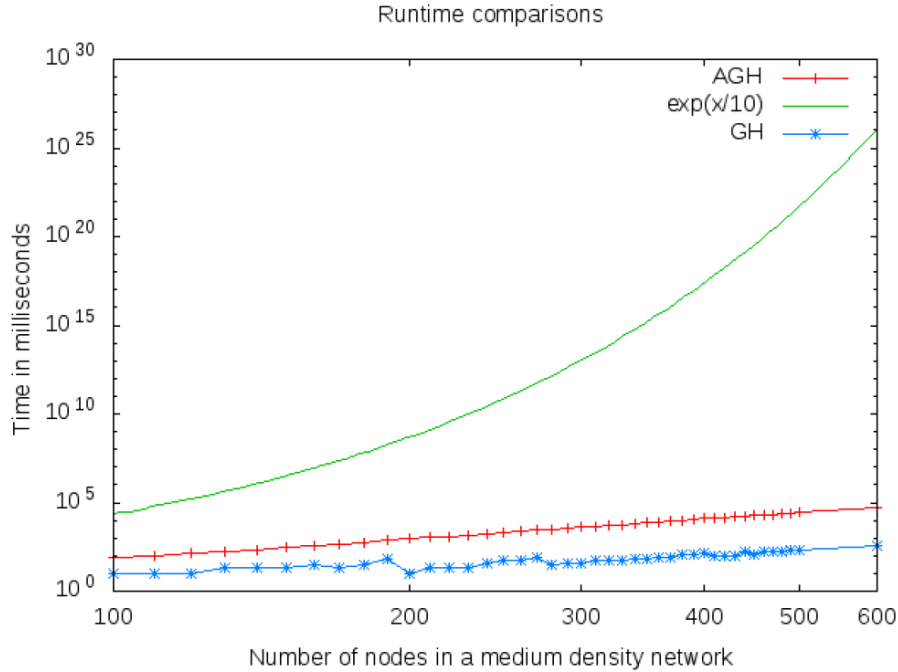


Figura 24: Comparația performanțelor variantelor soluției de aproximare. GH este algoritmul Gomory-Hu standard iar AGH este soluția propusă pentru planificarea task-urilor.

Această soluție de aproximare a problemei de planificare a task-urilor constituie partea principală a serviciului de planificare de sarcini din cadrul framework-ului Check. După cum este prezentat și în Figura 24, acest algoritm reprezintă o alternativă viabilă din punctul de vedere al complexității. Asimptotic, acesta are aceeași complexitate ca și algoritmul Gomory-Hu pe care este bazat, deși constrângerile adiționale pe care algoritmul le ia în considerare induc o întârziere adițională la planificare.

5.2 Serviciul de monitorizare a rețelelor wireless de senzori pentru suita de aplicații Check

O metodă de monitorizare și control pentru rețelele WSN eterogene a fost dezvoltată în cadrul framework-ului Check. Aceasta se bazează pe aplicația Monalisa (Monitoring Agents using a Large Integrated Services Architecture). Metoda noastră folosește un nivel de abstractizare care permite monitorizarea de la distanță și controlul pentru orice fel de WSN, inclusiv cele formate din noduri Sparrow [40].

Un serviciu de monitorizare ("monalisa-wsn"), rulează pe calculatorul la care este legat nodul gateway al rețelei WSN și care procesează întreg traficul de date din și înspre rețea. Serviciul de monitorizare utilizează apoi ApMon, care este un API standard pentru interfațarea cu MonALISA pentru a încărca date într-un repository online. Utilizatorii se pot conecta apoi la acest repository printr-un client grafic și pot vizualiza în timp real datele și parametrii culeși din rețea. Utilizând un protocol de autentificare cu chei asimetrice, utilizatorul se poate conecta la un modul de control Monalisa WSN, care rulează de lângă repository-ul de date. Un serviciu de control ("monalisa-WSN-CTL") se execută pe gateway-ul WSN și se conectează la modulul de

control Monalisa, permițând utilizatorului să trimită date și comenzi către nodurile WSN. Figura 25 prezintă diagrama sistemului de monitorizare și control descris mai sus.

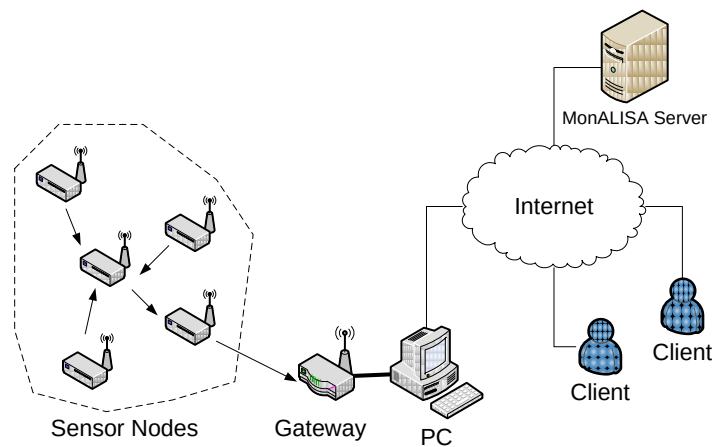


Figura 25. Sistemul de monitorizare WSN implementat pentru Check Framework

Datele din Monalisa sunt organizate ca perechi parametru-valoare ce pot fi aplicate unei entități "gazdă" sau "nod". Gazdele sunt grupate în clustere, care la rândul lor sunt grupate în ferme. Această ierarhie se datorează în principal faptului că MonALISA este utilizată pentru monitorizarea rețelelor Grid. Avantajul aplicației constă în faptul că pune la dispoziție un mod convenabil de a monitoriza parametrii WSN prin publicarea rețelei ca o entitate de tip gazdă, cu o listă de parametri asociați pentru fiecare nod. Numele parametrilor includ o parte care identifică nodul WSN în cadrul rețelei. De exemplu, în cazul unei aplicații care monitorizează temperatura de la o rețea WSN care conține 4 noduri, parametrii pot fi denumiți "temperature1" ... "temperature4". Utilizatorul poate filtra parametrii după nume, în scopul de a se concentra asupra datelor de interes imediat.

Capitolul 6

Aplicații pentru rețelele wireless de senzori

Pentru a valida cercetarea teoretică și experimentală efectuată în capitolele anterioare, este necesară evaluarea comportamentului sistemului și eficiența acestuia atunci când este instalat într-un mediu real. Pentru aceasta, două tipuri distincte de aplicații au fost alese, fiecare cu propriul său set de constrângeri și cerințe.

6.1 Home Automation

În această secțiune este detaliată o nouă arhitectură de rețea wireless de senzori care este special concepută pentru sarcina de home automation [41]. Sistemul se bazează pe rețea WS&AN Sparrow prezentată în capitolul anterior care utilizează recoltarea de energie pentru a maximiza durata de viață și un gateway embedded rezidențial care oferă o interfață intuitivă cu utilizatorul și conectivitate la Internet. Avantajele sistemului sunt scalabilitatea, consumul redus de energie, autonomia și versatilitatea.

6.1.1 Nodurile senzoriale

Pentru acest proiect au fost folosite noruile Sparrow v2 [31], prezentate în Capitolul 4, care rulează un sistem de operare de proiectat special pentru utilizarea în WSNs, numit Contiki [42]. Acesta oferă un mecanism rudimentar de multithreading și o stivă IPv6 construită peste IEEE802.15.4. Sistemul are două versiuni de firmware Contiki, unul care rulează pe nodurile senzoriale la intervale regulate de timp și are rolul de a colecta date. A doua versiune de firmware Contiki rulează pe un nod coordonator care are sarcina de a comunica cu gateway-ul embedded.

Fiecare nod senzorial poate interfața cu o gamă largă de senzori: temperatură, presiune, umiditate, intensitate luminoasă, proximitate, detectoare de gaze, calitatea aerului, etc

Există două tipuri de noduri senzoriale: de măsură, identice cu cele descrise mai sus și repetoare, care sunt alimentate de la rețea și au funcția adițională de-a măsura consumul de energie electrică al unui consumator legat la rețea prin nodul respectiv. Modulul este identic cu nodurile de măsură dar este dotat cu o extensie pentru alimentare și pentru măsurarea curentului și tensiunii alternative de la rețeaua electrică.

6.1.2 Nodul gateway

Entitatea care are rol de gateway pentru sistem este un single-board computer pe arhitectură ARM care rulează embedded Linux și are o serie de interfețe de comunicație, cum ar fi un port ethernet pentru conectivitate la Internet, o interfață digitală pentru un panou LCD cu touchscreen și o interfață serială care-i permite conectarea la nodul coordonator al rețelei WSN. Funcționalitatea software a gateway-ului este descrisă de punctele următoare:

- Colectarea datelor de la nodurile fără fir (se comportă ca un gateway pentru WSN).

- Furnizarea unei interfețe directe pentru setări de bază și de control prin intermediul unui touch screen.
- O interfață web pentru setări extinse, vizualizarea și controlul WSN.
- Procesarea datelor din rețea și publicarea acestora pe un server Monalisa [43].

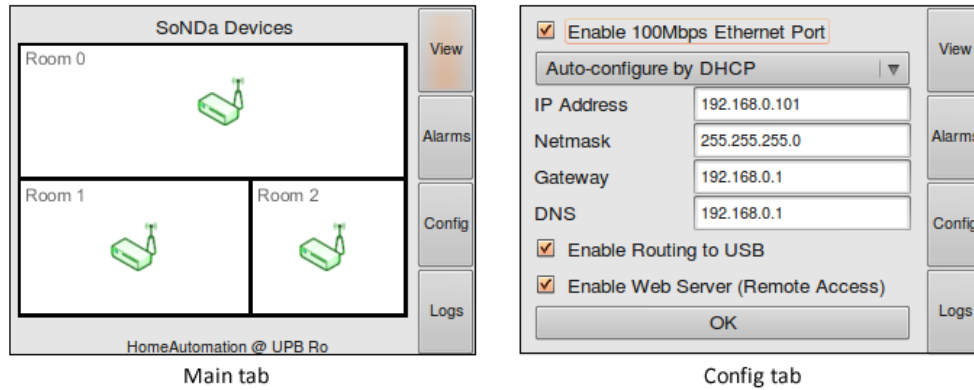


Figura 26 Capturi de ecran cu meniurile nodului gateway.

După cum arată Figura 26, ecranul principal prezintă o hartă a domiciliului (ce poate fi editată și configurată de către utilizator), împreună cu senzorii care sunt instalați în fiecare cameră. Utilizatorii pot, de asemenea, vizualiza rapid disponibilitatea nodurilor, valorile de la ele, alarmele și evenimente pe care sistemul le-a înregistrat, inclusiv evoluția parametrilor în timp, sub forma unui grafic.

6.2 Monitorizarea mobilă a poluării atmosferice

În această secțiune este prezentat un sistem mobil pentru măsurarea poluării pentru mediul urban [44]. Scopul proiectului a fost proiectarea, testarea și a instalarea un dispozitiv de măsurare care poate obține informații despre calitatea aerului din împrejurimile sale. Datele culese sunt stocate temporar într-o memorie buffer și apoi trimise periodic pe un server on-line. Datele colectate pot fi accesate de către public în timp real prin intermediul unei interfețe web on-line. Utilizatorii pot selecta și vizualiza diferitele gaze și concentrațiile măsurate pentru acestea suprapuse pe o hartă interactivă a orașului.

6.2.1 Descrierea sistemului

Sistemul este compus din două componente de bază:

6.2.1.1 Unitatea mobilă

Unitatea Mobilă este însărcinată cu recoltarea informațiilor de la senzorii încorporați; parametrii sunt: gaze combustibile, monoxid de carbon, temperatura, contaminanți ai aerului și gazele de eșapament generate de combustia de benzină/diesel. Parametrii mășurați sunt transmiși printr-o legătură GSM la un server web și afișate direct pe un ecran LCD încorporat. Fiind un dispozitiv mobil, proiectat a fi încorporat pe un automobil, Unitatea Mobilă se bazează doar pe sursa de alimentare a mașinii, fără a necesita alimentarea din surse regenerabile. Întregul sistem poate fi inclus cu ușurință în computerul de bord al autovehiculului iar informațiile live despre

parametrii de poluare ar putea fi puse la dispoziția conducătorului auto prin intermediul afișajului de pe tabloul de bord.

6.2.1.2 Infrastructura on-line de stocare și vizualizare a datelor

Această unitate oferă accesul utilizatorilor la datele și statisticile de poluare culese de unitățile mobile. Aplicația web interoghează periodic baza de date și afișează informațiile culese care pot fi filtrate după intervalul de timp în care au fost culese și după locație. Înregistrările multiple care sunt în directă proximitate temporală și spațială sunt mediate. Drept consecință directă, sistemul permite o supraveghere mai strictă a surselor mobile de poluare, care până în prezent nu au putut fi monitorizate de la distanță.

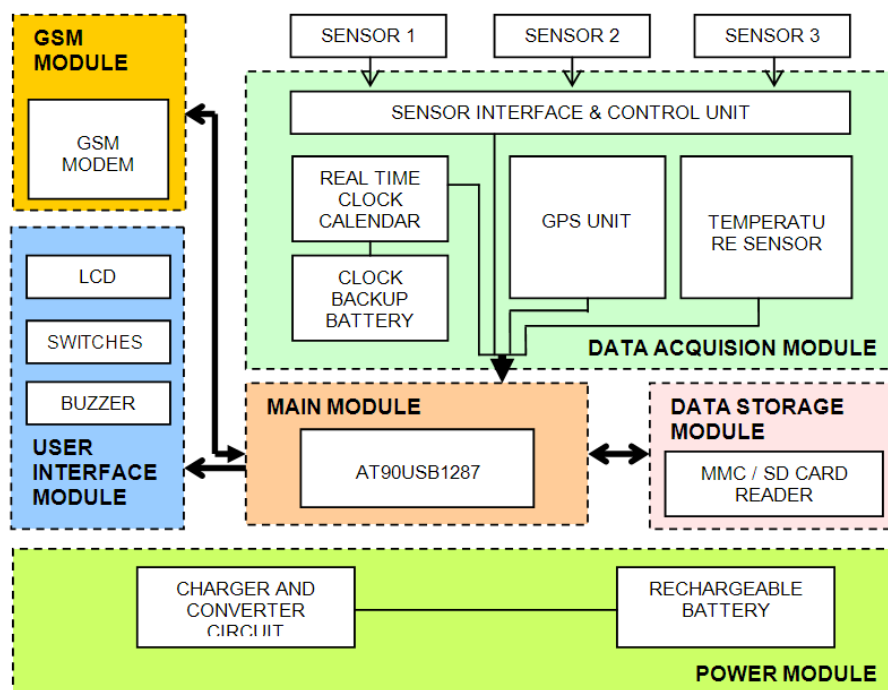


Figura 27 Diagrama hardware a unității mobile

6.2.2 Software Design

6.2.2.1 Unitatea Mobilă

Microcontrolerul citește periodic date de la senzori și le stochează în memoria flash, împreună cu datele de poziționare și eticheta de timp de la modulul GPS. Informațiile de la senzori sunt afișate de asemenea pe ecranul LCD al unității mobile într-un meniu. Utilizatorul poate selecta vizualizarea valorilor instantanee sau poate vedea graficul cu variația în timp a datelor pentru fiecare tip de gaz măsurat. Din memoria sistemului, datele colectate sunt trimise printr-un modem GSM/GPRS la serverul de date la intervale regulate.

6.2.2.2 . Serverul de date

Serverul este un calculator de tip desktop care este permanent conectat la Internet [45] și are un modem GSM atașat prin portul USB. Un daemon special a fost scris pentru interfațarea modemului la o bază de date MySQL care poate prelucra apeluri simultane de date de la mai multe unități mobile. Pentru vizualizarea, o aplicație Flex interoghează baza de date și suprapune datele extrase de la senzori peste o hartă a orașului, folosind Google Maps API. Utilizatorii pot naviga prin date și filtra concentrația individuală pentru gazele măsurate sau toți poluanții simultan peste harta orașului. Aceștia pot, de asemenea, filtra datele după o perioadă dorită de timp sau selecta valorile individuale pentru fiecare punct de măsură.

6.2.3 Testarea sistemului

Primele teste ale prototipului am fost efectuate prin măsurători statice ale poluanților atmosferici pe perioade lungi de timp. Unitatea Mobilă a fost plasată într-o poziție fixă pe acoperișul clădirii a facultății noastre și senzorii au fost expuși la atmosferă. Variațiile nivelurilor concentrației pentru CO₂, NO_x și CO/HC au fost măsurate pe parcursul a douăsprezece ore. Aceste valori au fost comparate cu valorile obișnuite care apar în timpul ciclurilor diurne [46], [47].

Măsurătorile arată concentrații foarte mici de NO_x, stabile în jurul valorii de 0.05ppm. De asemenea, concentrația de gaz de CO₂ variază în timpul ciclului zi-noapte, scăzând de la aproximativ 430ppm, după-amiaza până la 350ppm dimineața.

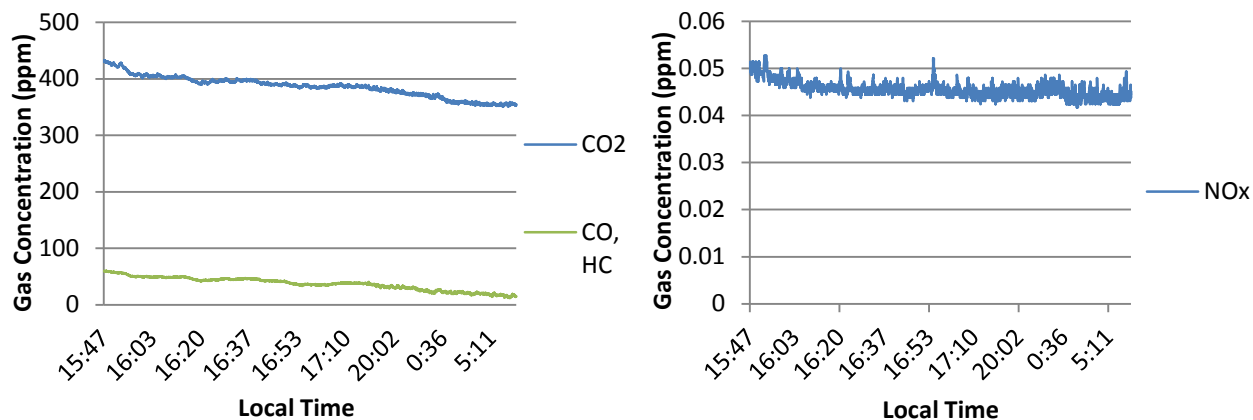


Figura 28. Concentrațiile CO₂, NO_x și CO/HC petru o poziție fixă

Concentrațiile de CO și hidrocarburi sunt relativ constante pentru întreaga perioadă, deși se constată o micșorare a acestora spre dimineață. Acest lucru pare să fie corelat cu micșorarea traficului de automobile pe perioada nopții.

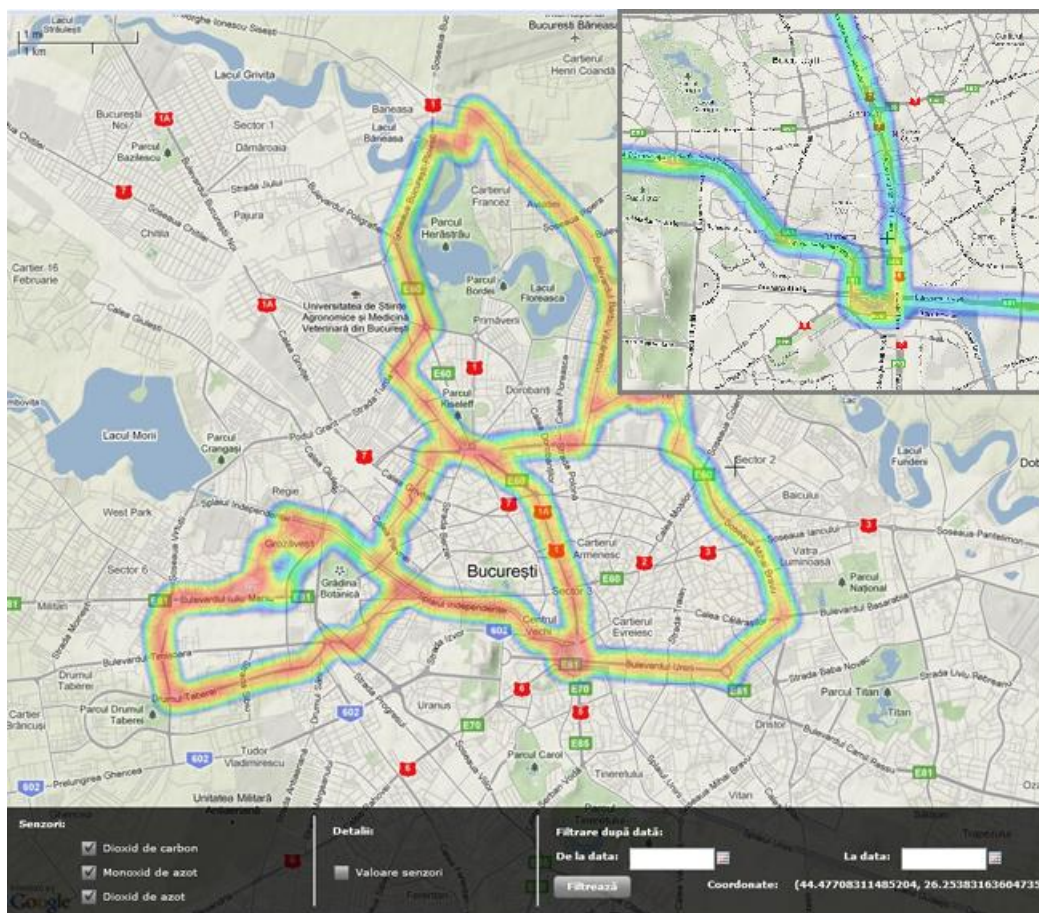


Figura 29. Captură de ecran a interfeței web ce arată poluarea atmosferică a unora dintre cele mai aglomerate artere din București. Captura din medalion arată poluarea atmosferică din zona Piața Unirii.

Testele mobile au constat din instalarea prototipului unității mobile pe un autovehicul și măsurarea datelor live din trafic pe o parte din arterele cel mai circulate din București. Rezultatele obținute sunt prezentate în Figura 29, ce arată poluarea atmosferică prin cele zonele monitorizate și o concentrație mai mare decât media pentru zona Piața Unirii, produsă din cauza faptului că datele au fost măsurate la o oră de vârf, cu trafic puternic.

Capitolul 7

Concluzii

Deși rezultatele cercetării au fost prezentate întotdeauna într-o manieră top-down, această teză a fost construită dintr-un număr mare de pași și iterații. Pentru a stabili abordarea corectă asupra problemei eficienței energetice pentru rețelele de senzori wireless am pornit de la o definiție a ceea ce înseamnă rețelele de senzori wireless, care sunt principalele domenii în care acestea sunt folosite și, mai ales, de ce sunt acestea soluția preferată pentru problema respectivă.

Teza abordează domeniul rețelelor senzoriale wireless din perspectiva consumului de energie și al optimizării acestuia pentru a oferi o disponibilitate și un timp de funcționare cât mai mare. Pentru realizarea acestui deziderat, am stabilit că timpul de viață și capacitatea bateriilor sunt doi parametri cruciali, precum și maniera în care acești parametri sunt exploatați de către software-ul care rulează pe nodul senzorial. A fost făcută o trecere în revistă a celor mai comune tipuri de circuite, controlere, transceivere și senzori care sunt folosite în nodurile de senzori wireless și o clasificare a fost făcută din punctul de vedere al consumului de energie al fiecărei componente în parte. În urma acestui studiu s-a ajuns la concluzia că principalul vinovat pentru consumul de energie în cadrul unui nod senzorial nu este de prelucrarea datelor ci comunicația radio. Prin urmare, proiectarea un algoritm care minimizează traficul de mesaje în rețea va conduce automat la creșterea duratei de funcționare a rețelei.

Rețelele de senzori au fost clasificate în funcție de trăsăturile lor comune, cum ar fi scara la care acestea sunt implementate, locația în care acestea sunt instalate, infrastructurile de care acestea sunt atașate și constrângerile legate de durata de funcționare. Pe baza acestor proprietăți, am clasificat rețelele de senzori în trei grupe majore: rețele de senzori pentru mediu (ESN), rețele de senzori pentru comunitate (CSN) și rețele de senzori corporale (BSN), fiecare având propriile sale particularități și caracteristici.

O altă clasificare a fost făcută din perspectiva modelării rețelelor de senzori wireless prin clasificarea lor în două mari categorii: cele definite de către entitățile de standardizare folosind XML sau tabele de valori și cele definite prin intermediul ontologiilor.

Recoltarea de energie din surse regenerabile a fost abordată ca o soluție la consumul de energie și la epuizarea bateriei nodurilor senzoriale. Am constatat că, dacă sunt aplicate corect și adaptate la constrângerile specifice aplicației vizate, acestea pot servi ca o sursă de energie alternativă viabilă pentru toate clasele de rețele de senzori enumerate mai sus. Un model matematic a fost aplicat pentru recoltarea de energie, în scopul de a defini și a înțelege mai bine fenomenul. Am experimentat și evaluat randamentul a patru tipuri de module ce captează energia surselor regenerabile: piezoelectric, termoelectric, fotovoltaic și de radiofrecvență. În urma rezultatelor experimentale, am ajuns la concluzia că modulele fotovoltaice oferă cel mai bun

randament și, în consecință, a fost folosite în circuitele nodurilor senzoriale proiectate în etapele următoare.

O nouă arhitectură de rețea senzorială wireless a fost proiectată și realizată, care încorporează cunoștințele obținute în urma experimentelor cu sursele regenerabile de energie menționate anterior. Sistemele de stocare a energiei la nivelul nodului senzorial au fost deasemenea studiate iar rezultatele au indicat faptul că bateriile electrochimice sunt o soluție sub-optimală în atingerea independenței energetice la nivel de nod. În schimb, un nou mediu de stocare a fost propus în forma super-condensatoarelor. Acestea oferă rezultate mult mai apropiate de cele optime din punctul de vedere al încărcării și al capacităților de stocare a energiei. Toate aceste cunoștințe au fost folosite pentru a proiecta un nou tip de nod senzorial care a fost folosit pentru validarea experimentală a modelului matematic și a rezultatelor teoretice.

Această teză nu ar fi fost completă fără o abordare a problemei și din perspectiva software, și anume prin cercetarea întreprinsă în protocoalele, serviciile și framework-urile care conferă rețelelor de senzori wireless un scop și o aplicabilitate. Rezultatul acestei cercetări a fost suita de aplicații denumită Check, care este un framework de management ce poate să ruleze peste insule WSN eterogene, furnizând acestora servicii și funcționalitate extinsă.

Ca o parte importantă a Check Management Framework, am implementat un nou tip de algoritm de planificare a task-urilor într-o rețea de senzori în care constrângerea principală nu este timpul de finalizare a sarcinii, ci consumul de energie. Am modelat și a evaluat complexitatea algoritmului și comportamentul acestuia atunci când e aplicat unei rețele date de noduri.

O altă componentă importantă a Check este serviciul de monitorizare centralizată a rețelei ce furnizează și funcții de control și de reconfigurare a rețelei peste framework-ul MonALISA.

Pentru a aplica cunoștințele acumulate în timpul acestei cercetări și pentru a valida rezultatele experimentale, o serie de aplicații au fost concepute și implementate cu succes, dintre care remarcăm următoarele.

Prima aplicație este o instalare a unei rețele senzoriale într-un mediu rezidențial cu scopul de-a studia care sunt componentele și serviciile pe care o rețea de senzori orientată pe home automation ar trebui să le ofere.

A doua aplicație a studiat desfășurarea de noduri senzoriale mobile într-un mediu urban cu sarcina specifică de colectare a datelor și transmiterea acestora la un coordonator central. Scopul proiectului este acela de măsurare a parametrilor legați de poluarea atmosferică, cum ar fi nivelul de monoxid de carbon și contaminanții generați de eșapamentul automobilelor și punerea lor la dispoziția publicului larg prin intermediul unei interfețe web intuitive.

Cercetarea realizată în această lucrare a fost validată, de asemenea, de către Comisia Europeană prin cele trei proiecte europene în cadrul cărora aceasta a fost inclusă. De asemenea, cercetarea a fost validată și prin publicarea ei în cadrul unor conferințe naționale și internaționale de prestigiu.

Dintre numeroasele contribuții pe care această lucrare le aduce domeniului rețelelor de senzori wireless, amintim următoarele:

- O clasificare a rețelelor de senzori wireless pe baza criteriilor legate de consumul de energie, cum ar fi durata de viață a bateriei, poziționarea nodurilor senzoriale sau numărul de noduri și complexitatea rețelei.
- A fost studiată aplicabilitatea conceptului de energy harvesting pentru o rețea de senzori wireless. Patru dintre cele mai promițătoare surse de energie regenerabilă au fost investigate: vibrațiile, gradientele de temperatură, energia solară și energia radiației electromagnetice de radiofrecvență iar comportamentul lor a fost modelat matematic. Fiecare sursă a fost analizată din punctual de vedere al energiei totale produse și al capacității lor de-a alimenta un nod senzorial wireless.
- Mediile de stocare a energiei au fost cercetate din punct de vedere al aplicabilității acestora la rețelele de senzori wireless. Bateriile reîncărcabile s-au dovedit a fi sub-optime atunci când sunt utilizate într-un sistem care trebuie să funcționeze fără supervizare și întreținere pentru perioade lungi de timp, cum sunt rețelele de senzori wireless. În schimb, a fost studiată tehnologia emergentă de stocare bazată pe super-condensatori din cauza capacității acestora de a stoca o cantitate mare de sarcină electrică pentru perioade îndelungate, fără nici o degradare semnificativă a performanței de-a lungul timpului.
- O nouă infrastructură de rețea de senzori wireless numită Sparrow a fost construită pentru a testa valabilitatea conceptelor și a rezultatelor teoretice date de studiul metodelor energy harvesting. Rețeaua senzorială a fost folosită și ca testbed pentru studiul protocoalelor și a software-ului dezvoltat în partea a doua a tezei. Experimentele au dovedit că independența energetică și exploatarea susținută pe termen lung a rețelelor senzoriale sunt posibile atunci când se utilizează energia regenerabilă și mediile non-standard de stocare a energiei.
- Două tipuri diferite de noduri de senzori wireless au fost proiectate și construite pentru a servi drept coloană vertebrală pentru rețeaua de senzori wireless. Nodurile implementează conceptele de energy harvesting studiate anterior și sunt proiectate pentru a fi alimentate de la o gamă largă de surse de energie regenerabilă datorită circuitelor dedicate de alimentare.
- Un model matematic pentru estimarea consumului de energie în rețelele senzori wireless multi-hop a fost propus. Modelul ia în considerare topologia rețelei și perturbațiile ce pot apare în mediul de transmisie pentru a furniza un algoritm în baza căruia un nod poate să-și regleze puterea de emisie la un nivel optim.
- Un algoritm neconvențional de planificare a sarcinilor pentru rețelele de senzori wireless a fost dezvoltat ca parte a framework-ului de management Check. Principala constrângere a algoritmului nu este timpul de completare a unui task ci consumul de energie, care trebuie minimizat global. Rezultatele măsurătorilor au arătat că sarcinile sunt programate astfel încât rularea lor în rețea să conducă la un cost energetic optim.

- O metodă inovatoare pentru monitorizarea și controlul parametrilor rețelelor WSN prin intermediul unei interfețe grafice on-line a fost realizată folosind suita de aplicații MonALISA. Datele sunt colectate de la rețea și stocate într-o bază de date distribuită peste Internet, de unde pot fi citite de oriunde din lume folosind un program client grafic. Interfațarea dintre WSN și serviciile de internet se face peste un strat de abstractizare, permițându-se astfel accesul uniform la rețelele formate din noduri construite folosind tehnologii diferite și care rulează software și protocoale diferite.
- Modulele hardware și software dezvoltate în cadrul acestei lucrări au fost testate cu succes în aplicații concrete, în scopul validării ipotezelor teoretice și rezultatelor experimentale obținute. În prima fază au fost realizate teste de laborator iar rezultatele au fost atent analizate și integrate în viitoarele revizii ale hardware-ului și a platformelor software. Faza următoare a presupus testarea rețelei wireless în două spații de aplicație diferite: monitorizarea la scară largă a mediului urban și, la scară mai mică, automatizarea unui mediu domestic.
- O nouă arhitectură de rețea de senzori wireless special concepută pentru sarcina de home automation a fost construită și testată. Sistemul se bazează pe o rețea WS&AN de consum redus care utilizează conceptele de energy harvesting pentru a-și maximiza durata de funcționare și un gateway rezidențial embedded care oferă o interfață facilă pentru interacțiunea cu utilizatorul și conectivitate sigură la Internet.
- A fost dezvoltat un sistem mobil pentru monitorizarea calității aerului și pentru măsurarea poluării atmosferice destinat mediului urban. Sistemul se bazează pe un dispozitiv mobil de măsurare a parametrilor de calitate a aerului care transmite datele unui server central. Datele colectate pot fi accesate în timp real prin intermediul unei interfețe web on-line. Utilizatorii pot selecta și vizualiza diferitele gaze și concentrațiile acestora suprapuse peste o hartă a suprafeței geografice monitorizate.

Lucrări publicate

Razvan Tataroiu, **Dan Tudose**, Remote Monitoring and Control of Wireless Sensor Networks, 17th International Conference of Control Systems and Computer Science – CSCS17. Vol. 1, pp. 187-192, Bucharest, Romania, May 2009.

Andrei Voinescu, **Dan Tudose**, Nicolae Tapus, Task Scheduling in Wireless Sensor Networks, Sixth International Conference on Networking and Services, Cancun, Mexico, March 7-13 2010
DOI : 10.1109/ICNS.2010.10

Dan Tudose, Traian Alexandru Patrascu, Andrei Voinescu, Razvan Tataroiu, Nicolae Tapus, Mobile Sensors in Air Pollution Measurement, 8th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2011 (WPNC'11), Dresden, Germany, April 07-08, 2011.

Dan Tudose, Nicolae Tapus, Energy Harvesting and Power Management in Wireless Sensor Networks, 18th International Conference of Control Systems and Computer Science – CSCS18. Vol. 1, pp. 174-180, Bucharest, Romania, May 2011.

Dan Tudose, Andrei Voinescu, Madi-Tatiana Petrareanu, Andrei Bucur, Dumitrel Loghin, Adrian Bostan, Nicolae Tapus, "Home Automation Design Using 6LoWPAN Wireless Sensor Networks", International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems and Workshops (DCOSS), Barcelona, Spain, June 2011.

Postere

Dan Tudose, Traian Alexandru Patrascu, Andrei Voinescu, Razvan Tataroiu, Nicolae Tapus, Mobile Sensors in Air Pollution Measurement, 8th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2011 (WPNC'11), Dresden, Germany, April 07-08, 2011.

Fișe de specificații

Dan Tudose, Sparrow v2 Wireless Sensor Node Specification Sheet, 2011, [Online]
<http://elf.cs.pub.ro/pm/wiki/media/sparrowv2.pdf>.

Bibliografie

1. **Weiser, M.** *The Computer for the 21st Century*. 1991, Scientific American, No. Communications, Computers, and Network.
2. **IEEE802.15.4.** *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*. s.l. : 802.15.4 IEEE Standard for Information technology, 2006.
3. **ZigBee.** ZigBee Alliance. [Online] <http://www.zigbee.org>.
4. **Pistoia, F.** *Battery Operated Devices and Systems: From Portable Electronics to Industrial Products*. Amsterdam : Elsevier, 2008.
5. **Dan Tudose, Nicolae Tapus.** *Energy Harvesting and Power Management in Wireless Sensor Networks*. Bucharest : 18th International Conference of Control Systems and Computer Science – CSCS18, 2011.
6. **THK.** Regulation On Collective Frequencies For Certain Radio Transmitters And Their Use. [Online] August 2006. <http://www.ictregulationtoolkit.org/en/Publication.2753.html>.
7. **25, ERC REPORT.** Frequency Range 29.7 MHz To 105 GHz And Associated European Table Of Frequency Allocations And Utilisations. [Online] February 1998. <http://www.ero.dk/doc98/official/pdf/Rep025.pdf>.
8. **Ettus, M.** *System Capacity, Latency, and Power Consumption in Multihop-routed SS-CDMA Wireless Networks*. s.l. : Radio and Wireless Conference (RAWCON '98), 1998. pp. pp. 55-58.
9. **Volkan, T. and Meng R.** *Distributed Network Protocols for Wireless Communication*. s.l. : Proceedings of IEEE ISCAS, 1998.
10. **Shepard, T.** *A Channel Access Scheme for Large Dense Packet Radio Networks*. s.l. : Proceedings of ACM SIGCOMM, 1996. pp. pages 219–230.
11. **S. Singh, M.Woo, and C. Raghavendra.** *Power-Aware Routing in Mobile Ad Hoc Networks*. s.l. : Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98), 1998.
12. **S. Roundy, P.K. Wright, and J.M. Rabaey.** *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks with Special Focus on Vibrations*. Norwell, MA : Kluwer Academic Publishers, 2004.
13. **Youfan Hu, Chen Xu, Yan Zhang, Long Lin, Robert L. Snyder, and Zhong Lin Wang.** *A Nanogenerator for Energy Harvesting from a Rotating Tire and its Application as a Self-Powered Pressure/Speed Sensor*. 2011, Vol. Adv. Matter.
14. **Wang, Zetang Li and Zhong Lin.** *Air/Liquid-Pressure and Heartbeat-Driven Flexible Fiber Nanogenerators as Micro/Nano-Power Source or Diagnostic Sensors* . Adv. Mater., 2010.
15. **Nathan S. Shenck and Joseph A. Paradiso.** *Energy Scavenging with Shoe-Mounted Piezoelectrics*. 2001., s.l. : IEEE, May 2001, Vols. IEEE Micro 21, 3, pp. 30-42.
16. **M Wischke, M Masur, M Kröner and P Woias.** *Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes*. 2011, Vol. Smart Mater. Struct. 20.
17. **Lewandowski, B., Kilgore, K., Gustafson, K.** *Design Considerations for an Implantable, Muscle Powered Piezoelectric System for Generating Electrical Power*. 5, s.l. : Springer Netherlands, 2007, Vol. Annals of Biomedical Engineering 34.

18. **Henry A. Sodano, Garnett E. Simmers, Remi Dereux, Daniel J. Inman.** *Recharging Batteries using Energy Harvested from Thermal Gradients*. 1, January 2007, Vol. Journal of Intelligent Material Systems and Structures vol. 18.
19. **Berland, B.** *Photovoltaic Technologies Beyond the Horizon: Optical Rectenna Solar Cell*. Golden, Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2002.
20. **Brown, W. C.** *The history of power transmission by radio waves*. s.l. : IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 1984, Vols. Vol. 32, No. 9.
21. **McSpadden, J. O. and K. Chang.** *A dual polarized circular patch rectifying antenna at 2.45 GHz for microwave power conversion and detection*. s.l. : IEEE MTT-S, Microwave Symp., Dig., 1994.
22. **Ren, Y. J. and K. Chang.** *5.8 GHz circular polarized dual-diode rectenna and rectenna array for microwave power transmission*. s.l. : IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2006, Vols. Vol. 54, No. 4.
23. **Hagerty, J. A., F. B. Helmbrecht, W. H. McCalpin, R. Zane, and Z. B. Popovic.** *Recycling ambient microwave energy with broad-band rectenna arrays*. s.l. : IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques, 2004, Vols. Vol. 52, No. 3.
24. **Akkermans, J. A. G., M. C. van Beurden, G. J. N. Doodeman, and H. J. Visser.** *Analytical models for low-power rectenna design*. s.l. : IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2005.
25. **V. Raghunathan, et al.** *Design Considerations for Solar Energy Harvesting Wireless Embedded Systems*. s.l. : IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks , 2005.
26. **Roundy, S., et al.** *Power Sources for Wireless Sensor Network*. Berlin, Germany : Proc. 1st European Workshop on Wireless Sensor Networks (EWSN), 2004.
27. **Park, C, Liu, J. and Chou, P.H.** *Eco: An ultra-compact low-power wireless sensor node for real-time motion monitoring*. Los Angeles : IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks (IPSN), 2005.
28. **Hande, A., et al.** *Indoor Solar Energy Harvesting for Sensor Network Router Nodes*. s.l. : Journal of Microprocessors and Microsystems Special Issue on Sensor Systems, 2006.
29. **Chou, Pai H. and Park, C.** *Energy-Efficient Platform Designs for Real-World Wireless Sensing Applications*. San Jose, CA : IEEE International Conference on Computer Aided Design, (ICCAD), 2005.
30. **Alberola, J., et al.** *Solar Inexhaustible Power Source for Wireless Sensor Node*. Victoria-Canada : IEEE International Instrumentation and Measurement technology Conference, I2MTC, 2008.
31. **Tudose, Dan.** Sparrow v2 specifications. [Online] 2011.
<http://elf.cs.pub.ro/pm/wiki/media/sparrowv2.pdf>.
32. **R., de Levie.** *Advances in Electrochemistry and Electrochemical Engineering*. 1967.
33. **Zubieta L, Bonert R, Dawson F.** *Considerations in the design of energy storage systems using double-layer capacitors*. s.l. : IPEC Tokyo, 2000.

34. **Dougal RA, Gao L, Liu S.** *Ultracapacitor model with automatic order selection and capacity for dynamic system simulation.* s.l. : Journal of Power Sources , 2004.
35. **Belhachemi F, Raël S, Davat B.** *A physical based model of power electric double-layer supercapacitors.* Roma : IEEE-IAS'00, 2000 .
36. **Andrei Voinescu, Dan Tudose, Nicolae Tapus.** *Task Scheduling in Wireless Sensor Networks.* Cancun, Mexico : Sixth International Conference on Networking and Services, 2010.
37. **Jacokes, B.** Lecture notes on multiway cuts and k-cuts. [Online] 2006.
math.mit.edu/_goemans/18434S06/multicuts-brian.pdf.
38. **Guha, C. Chekuri and S.** *The steiner k-cut problem.* 2006. SIAM J. Discret. Math., vol. 20, no. 1. pp. 261–271.
39. **Checkuri, C.** Approximation algorithms: Lecture on multiway cut problem. [Online] 2009.
www.cs.illinois.edu/class/sp09/cs598csc/Lectures/lecture 7.pdf.
40. **Razvan Tataroiu, Dan Tudose.** *Remote Monitoring and Control of Wireless Sensor Networks.* Bucharest : 17th International Conference of Control Systems and Computer Science – CSCS17, 2009.
41. **Dan Stefan Tudose, Nicolae Tapus, Andrei Voinescu, Madi-Tatiana Petrareanu, Andrei Bucur, Dumitrel Loghin, Adrian Bostan.** *Home Automation Design Using 6LoWPAN Wireless Sensor Networks.* Barcelona : 1st HOBNET Workshop on IPv6 Sensor Networking for Smart/Green Buildings, 2011.
42. **Adam Dunkels, Björn Grönvall, and Thiemo Voigt.** *Contiki - a Lightweight and Flexible Operating System for Tiny Networked Sensors.* 2004. IEEE Emnets.
43. **H. B. Newman, et. al.** *Monalisa: A distributed monitoring service architecture.* Geneva : Technical report, CERN, 2003.
44. **Dan Tudose, Traian Alexandru Patrascu, Andrei Voinescu, Razvan Tataroiu, Nicolae Tapus.** *Mobile Sensors in Air Pollution Measurement.* Dresden : 8th Workshop on Positioning, Navigation and Communication 2011 (WPNC'11), 2011.
45. **Poluarea aerului.** Online Pollution Monitoring Website. [Online] 2011.
<http://www.poluare.com/>.
46. **F. Massen, A. Kies , N. Harpes et al.** Seasonal and Diurnal CO2 Patterns at Diekirch, Luxemburg. [Online] 2011. http://meteo.lcd.lu/papers/co2_patterns/co2_patterns.html.
47. **F. Tsow, E. Forzani, A. Rai, R. Wang, R. Tsui, S. Mastroianni, C. Knobbe, A.J. Gandolfi, and NJ Tao.** *A wearable and wireless sensor system for real-time monitoring of toxic environmental volatile organic compounds.* 2009. Sensors Journal, IEEE.