

Rezumat al tezei

Designing low latency, fault tolerant Sensor Networks based on Network Science

(Proiectarea rețelelor de senzori cu latență redusă și toleranță la defecte bazat pe Știința Rețelelor)

elaborata de ing. Alexandru IOVANOVICI

in vederea obtinerii titlului stiintific de Doctor in domeniul

Calculatoare si Tehnologia Informatiei

Conducator stiintific: Prof. dr. ing. Mircea VLADUTIU

1. Contextul general al cercetarilor din teza.

Intr-o lume dominata de tehnologie, in care accesul la cele mai noi dispozitive de comunicatie si procesare a informatiei a devenit din ce in ce mai usor observam o serie de fenomene globale emergente, care schimba in oarecare masura conceptia pe care o avem in mod traditional despre *calcul*. Pe deoparte paradigma producator-consumator de informatie, specifica erei in care sistemele de calcul in retea foloseau arhitectura clasica de client-server, s-a fuzificat astfel incat odata cu expansiunea conceptelor precum Web 2.0 si mai nou chiar Web 3.0 fiecare entitate participante la schimbul de informatii poate deveni la momente diferite de timp atat consumator cat si producator de informatie.

Pe de alta parte asistam la o crestere mai mult decat exponentiala a volumului de date care sunt produse la orice moment de timp pe glob. De la trimiterea unui pachet in Internet referitor la starea unui echipament industrial si pana la fluxurile de date audio-video partajate de fiecare dintre noi prin intermediul site-urilor specifice, totul in jurul nostru este reprezentat de date. Dimensiuni de stocare de ordinul peta-bytilor sunt ceva uzual in domeniul Big-Data de ceva ani, iar latime de banda a conexiunilor ultra-rapide de fibra optica coroborata cu costurile din ce in ce mai scazute, fac ca aceasta tendinta sa fie pe un trend ascendent.

In acest context care in mod plastic a fost descris de Raymond Kurzweil ca si unul care duce spre "singularitate" tehnologica si informationala, se disting doua domenii aparent disjuncte, care care au reprezentat punctele de placare ale cercetarilor din aceasta teza. Este vorba in primul rand de domeniul ingineresc al *retelelor de senzori*, care reprezinta din ce in ce mai mult coloana vertebrala a unei mari varietati de sisteme industriale de comanda si control, sau cel putin de achizitie de date si de monitorizare, iar in cel de-al doilea plan ne referim la domeniul retelelor complexe, vazute ca domeniul de cercetare distinct, aflat la interfata dintre teoria grafurilor si aplicatiile sale in domenii variate precum sociologia, biologia, medicina si ingineria.

Un subdomeniu de interes pentru cercetarile din teza, prin prisma metricilor specifice pe care le pune la dispozitie este cel al *retelelor sociale*. Majoritatea dintre noi suntem familiarizati cu acest concept din perspectiva utilizatorului, al consumatorului de servicii oferite de o mare varietate de site-uri si platforme reunite sub denumirea generica de site de socializare, dar din punct de vedere stiintific ele reprezinta un substrat extrem de util si de important pentru desfasurarea unei serii de "experimente" specifice stiintelor sociale si au oferit in ultimii ani validarea necesare unor serii de ipoteze specifice referitoare la modul de organizare a retelelor de prietenie sau de agregare a

persoanelor cu interese si gusturi comune din punct de vedere social si profesional. In acest context a fost pusa in evidenta relatia de tip *power-law* in ceea ce priveste distributia gradelor nodurilor unei retele sociale, astfel incat o un numar extrem de mic de indivizi au un grad mare (numar mare de prieteni) acest numar scazand dupa o relatie de tip *power law*.

Din punctul de vedere al retelelor de senzori, cu toate ca acestea se afla in avangarda sistemelor de montitorizare si control atat in domeniul aplicativ-industrial, dar si din punct de vedere al cercetarii, exista o serie de probleme care pot fi indetificare si care la ora actuala reprezinta adevarate provocari pentru cercetarea in domeniu. In mod cert rezolvarea, chiar si partiala, a acestora ar permite o si mai mare adoptare a tehnologiilor specifice in domenii din ce in ce mai diversificate de activitate umana.

2. Proiectarea retelelor de senzori

Cercetarile din teza se axeaza pe o problematica specifica, referitoare la aspecte ce tin de proiectarea unei retele de senzori, luand in cosiderare constrangeri din prisma limitarilor energetice, dar si pastrarea metricilor de fiabilitate in limite impuse.

Din acest punct de vedere teza, contine o capitol dedicat (Cap. 2) prezentarii in maniera clara si concisa a notiunilor si conceptelor specifice domeniului de cercetare specific retelelor de senzori, punand accent pe evidentierea problemelor ramase deschise asupra careia se va focusa cercetarea prezenta.

Se pleaca de la o plasare in spatiul economic a problemei avute in vedere, care evidentieaza prevalenta sectorului industrial. Aceasta va impune o serie de cerinte si constrangeri specifice care sunt luate in considerare in cercetarile viitoare (Illustration 1).

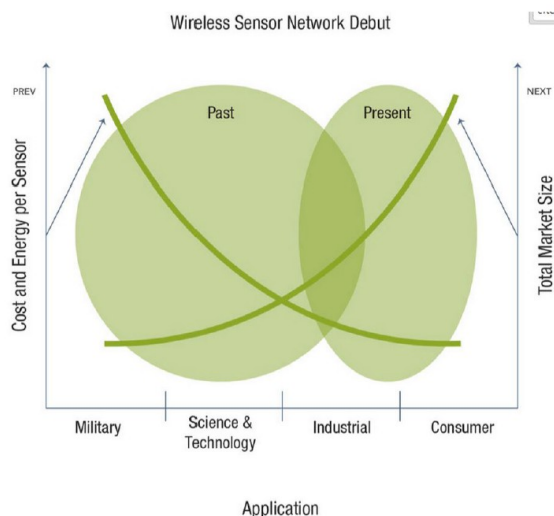


Figure 1: Plasarea pe piata a domeniului retelelor de senzori si a aplicatiilor specifice

Mai apoi se face o trecere in revista a principalelor dezvoltari din punct de vedere tehnologic, care sunt integrate la ora actuala in cele mai moderne echipamente folosite in proiectarea si implementarea unei serii de retele de senzori referite in literatura de specialiate. Dintre acestea se

face o prezentare detaliata a modului de functionare si a caracteristicilor energetice pentru modulul ZigBee EM35, caracterizat prin una dintre cele mai bune eficiente energetice de pe piata (<microAmper in modul de deep sleep), dar si integrarea unor facilitati moderne, cerute de utilizatori precum criptoprosesor tip AES pe aceeasi pastila de 7x7mm in capsula QFN.

Astpectele ce tin de eficienta energetica sunt un punct aparte al acestei teze si in consecinta mare parte din cercetari sunt dedicate optimizarii consumului energetic. In acest context este prevazut un subcapitol axat strict pe aceasta problema, in care se face o trecere in revista a surselor tipice de energie (baterii, acumulatori, surse regenerabile), dar sunt scoase in evidenta si limitarile ce se impun datorita conditiilor adverse de implementare, a accesului dificil pentru schimbarea sursei de energie sau pur si simplu a costurilor prea mari, care fac aceasta operatiune nerentabila. Din acest punct de vedere, figura 2, prezinta in mod comparativ evolutia principalelor elemente ale unui sistem de calcul, dar si rata extrem de scazuta de evolutie tehnologiilor de fabricare a bateriilor.

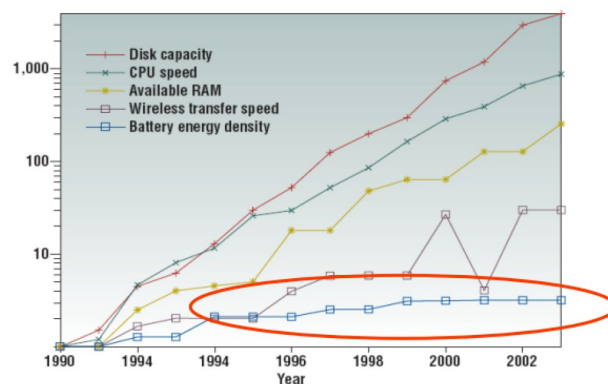


Figure 2: Evolutia tehnologiei bateriilor comparativ cu restul elementelor componente ale unui nod de senzori

Plecat de la acestea se face o analiza a consumului energetic pe unitati functionale ale unui nod de retea de senzori si pe functiile indeplinite de acesta, fiind scoasa in evidenta prevalenta consumului datorat aspectelor ce tin de comunicatii. Analiza este facuta asupra unui node MICA2, puternic referit in literatura de specialitate si pentru care exista date pertinente ce reprezinta puncte de comparatie valide (Fig 3).

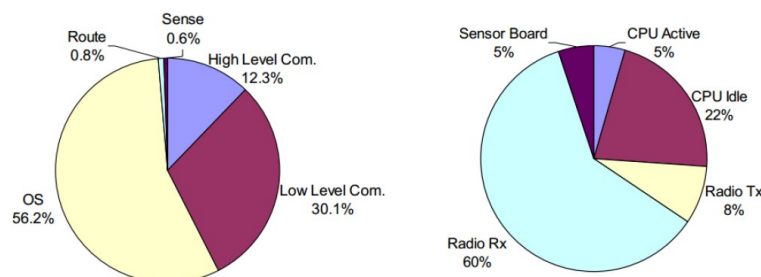


Figure 3: Analiza consumului pentru modulul MICA2

Ca si punct urmator in strategia de cercetare se face o analiza aprofundata a impactului pe care il are topologia retelei in ceea ce priveste eficienta energetica, acesta fiind scopul cercetarilor din teza. Din acest punct de vedere sunt analizate doua tipuri distincte de retele, vazute prin prisma

densitatii nodurilor din punct de vedere geografic si a legaturilor din punct de vedere logic. Se fac o serie de estimari energetice din punct de vedere al tehnologiilor wireless abordate: WiFi si ZigBee.

In sectiunea 2.6, elementele principale ale topologiei unei retele sunt introduse si prezentate, fiind definiti o serie de termeni specifici. De asemenea topologiile clasice regulate sunt luate in considerare fiind discutate si din prisma fiabilitatii: punct-la-punct, bi-directionala, stea, *mesh*, celulara si aleatoare.

Un pas urmat in cercetarile prezentate in teza este reprezentat de investigarea plasarii optimale a nodurilor releu din punct de vedere a minimizarii consumului energetic si al imunitatii retelei.

Plecand de la o topologie clasica de tip celular (Fig 4) se scoate in evidente rolul nodurilor releu in functionarea retelei, dar si posibilitatea de a construi o retea de mare viteza care se conecteaza aceste relee in vederea constituirii unui *backbone* de comunicatie.

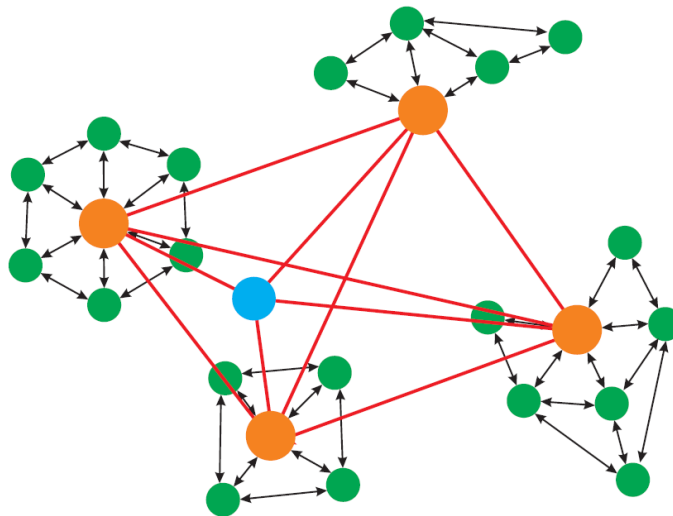


Figure 4: Retea celulara cu noduri releu marcate cu pentagrame

Sunt facute o serie de referinte la bibliografia de specialitate constituita din referinte de actualitate apartinand unor colective de cercetare din institutii de prestigiu din lume si care vor reprezenta termeni de comparatie pentru rezultatele prezentate in teza.

3. Stiinta Retelelor

Acest concept impreuna cu terminologia, notiunile si conceptele specifice este abordat in Capitolul 3 al tezei. Plecand de la observatii ce tin de domeniul clasic al teoriei grafurilor, vazute atat din punct de vedere matematic cat si din punct de vedere al stiintei calculatoarelor se face o trecere spre cazurile speciale ale unor grafuri in care topologia (modul de interconectare al nodurilor) este neregulata si in care instrumentele clasice de analiza a grafurilor nu isi mai dovedesc utilitatea.

Din acest punct de vedere sunt introduse cele doua mari categorii de retele complexe, referite in literatura, fiind vorba de retelele de tip *scale-free* si *small-world*. Toate investigatiile din domeniul stiintei retelelor sunt facute din prisma analizei globale a retelei in defavoarea utilizarii

unor metrici locale, specifice nodului sau muchiei. Astfel avem de a face cu distributii ale unor parametri si nu cu valorile lor instantanee (Fig. 5 si 6).

Un alt aspect deosebit de important preluat din stiinta retelelor si adaptat in cazul retelelor de senzori se refera la metrica de centralitate care incearca sa raspuna la o intrebare inerenta subiectiva: "Cat este de important un anumit nod?" sau "Care este cel mai important nod al retelei?". In mod natural raspunsul la aceste intrebari este greu de cuantificat si de dat mai ales atunci cand nu avem informatii despre substratul si fenomenologia modelata de respectiva retea, dar din punct de vedere topologic exista o serie de metrici de centralitate consacrate, care sunt trecute in revista in teza si al caror rol este analizat, cu aplicabilitate in cazul unei retele de senzori. Astfel sunt prezentate metricele de centralitate vazute prin prisma: gradului, a drumului mediu minim, a *betweenness*-ului si a valorilor proprii.

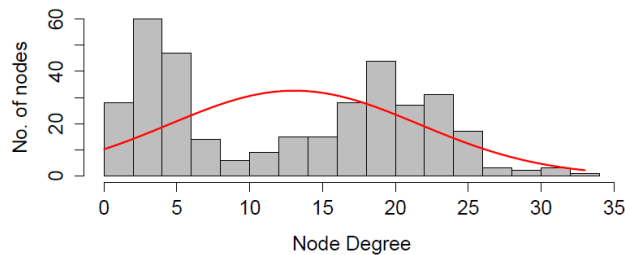


Figure 5: Distributia gradelor nodurilor unei retele aleatoare

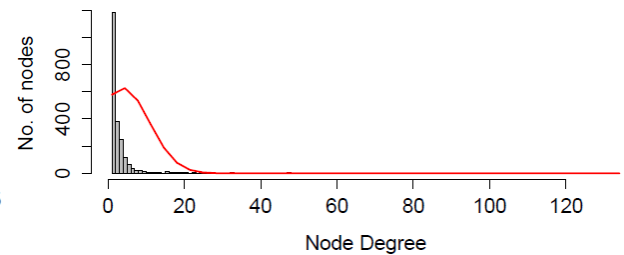


Figure 6: Distributia gradelor nodurilor unei retele de tip scale free

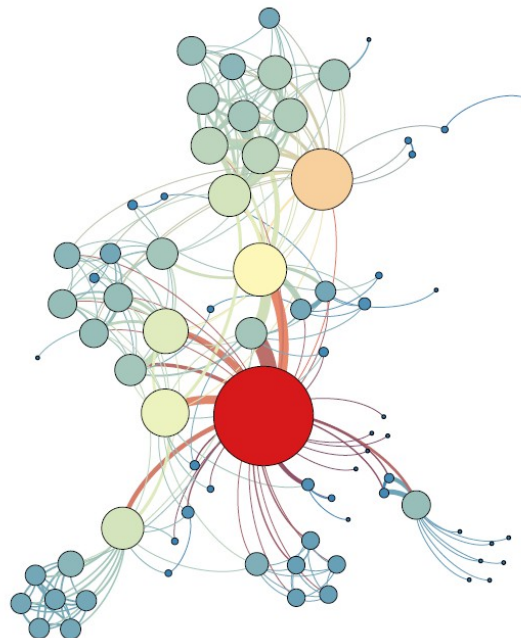


Figure 7: Retea de tip small world in care fiecare nod este marit proportional cu metrica de centralitate

În figura 7 se observa o rețea sintetică de tip small-world în care fiecare dintre noduri este marit proporțional cu valoarea metricii de centralitate. În acest caz este vorba de *betweenness*, dar rezultate similare se obțin, de la caz la caz și în cazul utilizării altor metrici de centralitate.

Cel de-al doilea aspect preluat și adaptat în mod original din știința rețelelor este referitor la structura de comunitate, care se referă tot la proprietăți topologice ale grafului de a avea o structură a legăturilor care să permită identificarea algoritmică a unor subgrafuri puternic conectate în interior, dar cu slabe legături în exterior. Acest comportament este specific rețelelor de tip social, în care se pot discerne grupuri de persoane care se cunosc “toate-cu-toate”, dar în cazul cărora există mai slabe legături cu persoane din exteriorul “comunității” respective.

4. Algoritmul SIDeWiSe

Se enunță ținta urmărită a investigațiilor, trecând apoi la o soluționare prin propunerea unui algoritmul original, denumit SIDeWiSe și destinat determinării, pentru un set de noduri, a poziției mai bune prin prisma distribuirii uniforme a timpului de propagare. Se prezintă algoritmul, pe pași (Figura 8), la nivel de pseudocod și compară rezultatele ante- și post-aplicării acestuia (Fig. 9). Se observă o dependență cu alură logaritmică a numărului de noduri relev raportat la numărul total de noduri ale rețelei.

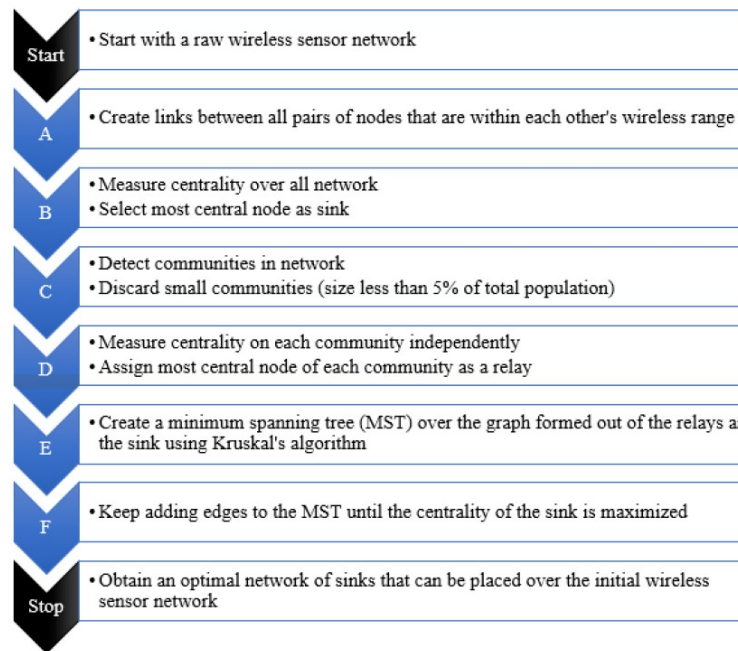


Figure 8: Etapele principale ale metodologiei SIDeWiSe

În paragraful “Hierarchical SIDeWiSe” este expusă o extensie a algoritmului propus în vederea aplicării sale la una dintre țintele de cercetare ale lucrării, anume la traficul rutier urban. Apelând la o strategie stratificată pe 3 niveluri de îmbunătățire, este prezentată o metodologie prin care, la primul nivel, topologia urbană este divizată, în manieră recursivă, în comunități relevante uzitând în acest sens, în mod originală, metrica de centralitate tip *betweenness* (Fig 10).. La al doilea nivel, printr-o metodă de căutare ierarhică de jos în sus, sunt determinate amplasamentele mai bune

pentru semafoarele de trafic din punctele de intersecție cheie stabilite prin intermediul metricii de betweenness centrality. În acest context, sunt obținute rezultate pentru un studiu de caz aplicat la orașul Timișoara, care confirmă identificarea corectă a intersecțiilor cu trafic de congestie sporită.

Din punctul de vedere al analizei comparative a rezultatelor obținute în raport cu cele referite în literatura de specialitate se compară cu Chua et al. (2012) în care se urmărește o metodologie similară, dar asupra căreia algoritmi prezentați obțin o îmbunătățire constantă a latentei medii cuprinsă între 31% și 46% dependent de particularitățile rețelei analizate. În cazul de față latenta rețelei este asociată numărului de pași pe care îi necesită traversarea rețelei, în medie, de către un pachet cu sursă-destinație aleatoare.

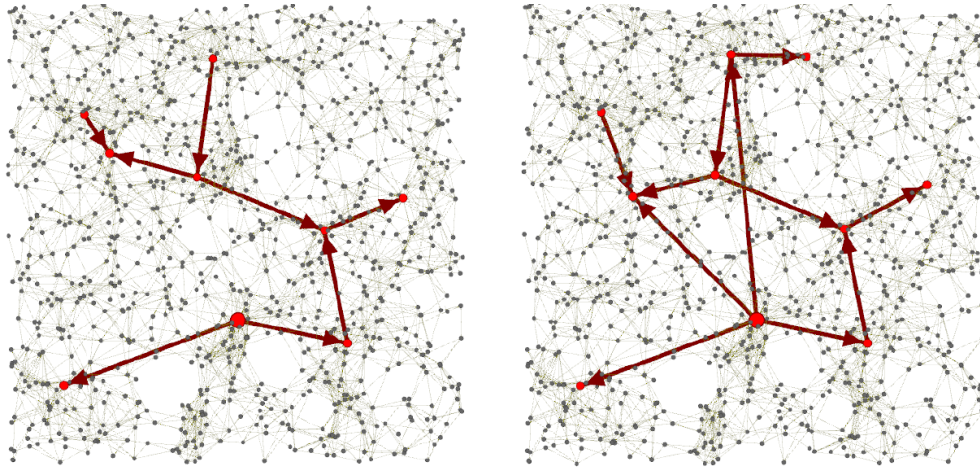


Figure 9: Rezultatele rularii algoritmului SIDEWISE în cazul unei rețele sintetice cu 1000 de noduri

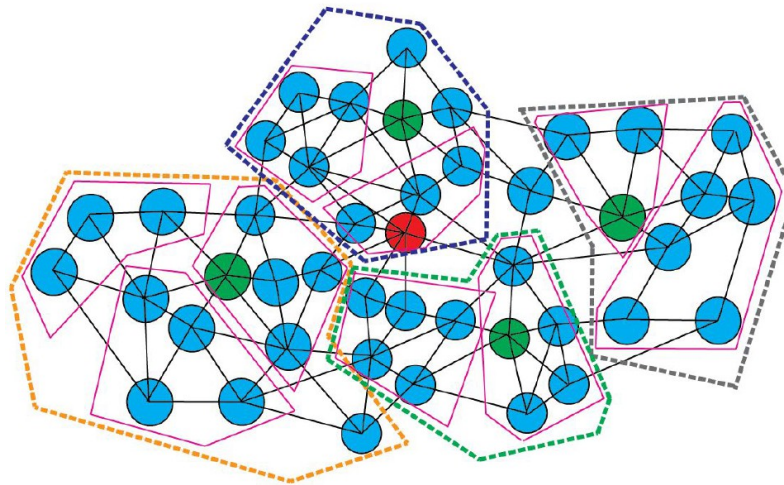


Figure 10: Organizarea multi-nivel a unei rețele, obținută în urma rularii algoritmului SIDEWISE

5. Analiza fiabilitatii rețelei

În capitolul 5, sunt cuprinse investigațiile cu privire la dependabilitatea rețelelor de senzori, precum la îmbunătățirea acestora prin strategii de toleranță la defectare. În primele trei paragrafe sunt analizate atribute fundamentale de dependabilitate, cum ar fi cele de securitate, de siguranță și de „graceful degradation”, pentru ținta fundamentală a tezei reprezentată de rețelele de senzori, sens în care se uzitează de repere de literatură consacrate. Sunt făcute referiri consistente relativ la taxonomia defectelor și la corelația defect-eroare pe întregul parcurs al unui produs de la cercetare-proiectare la manufacturare și, apoi, la exploatare și sunt analizate câteva defecte tipice care pot afecta rețelele de senzori, cum ar fi funcționarea eronată a unui nod sau întreruperea unei conexiuni, dar și atacurile de natură malițioasă. Paragraful al patrulea „Fault tolerant metrics” abordează metricile convenționale folosite la aprecierea cantitativă a fiabilității, mentenabilității și disponibilității corespunzătoare sistemelor în general, cu accent asupra timpilor medii de defectare și reparare.

În încercarea de a particulariza problematica dependabilității pentru obiectivul primar al tezei sale reprezentat de rețelele de senzori, autorul arată că acestora le corespunde un model de defectare tip graceful degradation când pentru descrierea comportamentului sistemului este preferată metrica „Quality of Service (QoS)”. Privitor la abilitatea de a asigura și menține un nivel acceptabil de asigurare a serviciilor rețelei în cazul unei potențiale defectări sau modificări a operării normale, reprezentată de așa numita „network resilience”, se face apel la metrica „diameter stability” care descrie modul în care se modifică lungimea drumului de dimensiune maximă din rețea pe măsură ce anumite noduri se defectează. Se face o analiza a rețelelor generate cu ajutorul algoritmilor SIDeWiSe și h-SIDeWiSe din prisma celor doua metrici prezentate anterior.

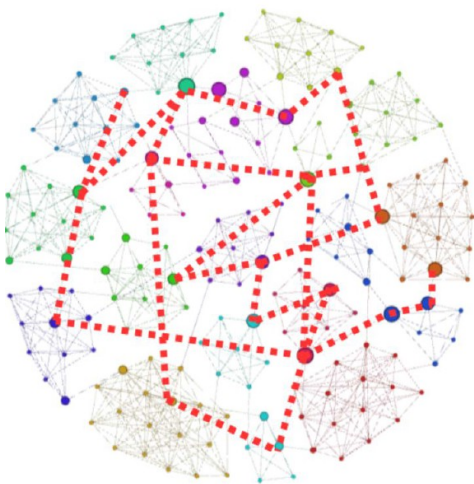


Figure 11: Retea sintetica de tip celular cu 185 de noduri

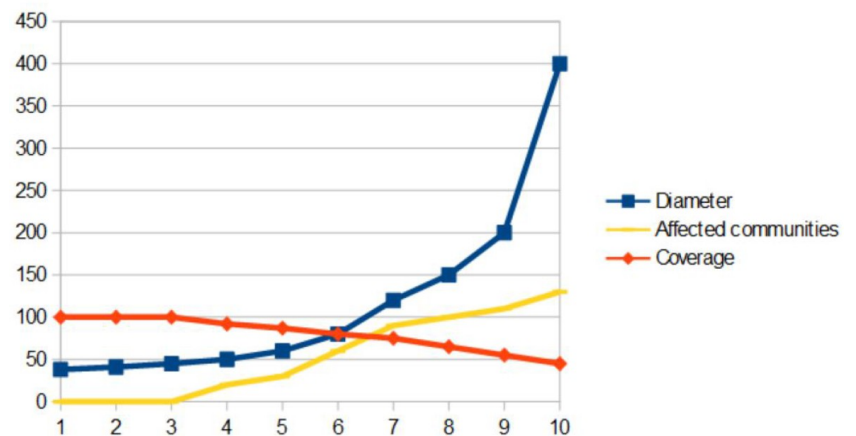


Figure 12: Analiza metricilor de fiabilitate pentru rețeaua din figura 11

6. Retea pentru monitorizarea traficului rutier

Ultimul capitol de esență al lucrării, cel de al șaselea, poartă titlul „Road monitoring sensor

networks” este destinat analizei și sintezei unei rețele destinată monitorizării traficului rutier urban. Se justifică necesitatea unui sistem de trafic inteligent constând din mulțimea mijloacelor tehnice, inclusiv a celor computaționale, care permit controlul deciziilor legate de regulile de circulație pe drumurile publice, context în care un rol determinant revine semaforizării din intersecții. Pentru găsirea unei soluții de control a traficului se relevă necesitatea unor date de timp real referitoare la parametri critici reprezentați de viteza medie de transport și de numărul de vehicule pe o porțiune de drum.

În paragraful “Methodology and results”, se propune o procedură algoritmică originală de îmbunătățire a controlului traficului pentru structura stratificată pe 3 niveluri amintită anterior. Procedura se distinge prin faptul că este asigurată funcționarea și în regiuni pentru care nu există hărți rutiere actualizate fiind folosită o discretizare a spațiului geografic sub forma unui caroi, precum și o analiză statistică a datelor aferente. Se își valorifică în această conjunctură algoritmul original SIDeWiSe, precum și extensiile ierarhice ale acestuia. Astfel, metodologia de proiectare algoritmică a rețelei de monitorizare pleacă de la identificarea intersecțiilor care necesită semaforizare și se trece la organizarea acestora în structuri de tip comunitate. Se subliniază în acest context luarea în considerație, în manieră originală, a aspectelor de toleranță la defectare, dependabilitatea fiind evaluată prin prisma numărului de noduri de tip releu care pot sa-și piardă buna funcționare degradând astfel performanța rețelei.

Capitolul de încheie cu paragraful “The Timișoara case study”, în care sunt prezentate rezultatele obținute prin aplicarea procedurilor originale propuse pentru cazul controlului traficului în orașul Timișoara și care confirmă corecta identificare a nodurilor cărora le corespund intersecțiile cele mai congestionate (Fig. 13).



6. Concluzii

Lucrarea se încheie cu capitolul al șaptelea, intitulat "Conclusions", și în care se analizează, mai întâi, modul în care rezultatele de natură teoretică și aplicativă obținute răspund provocărilor și problemelor prezentate în capitolul introductiv.

De asemenea sunt prezentate în mod sintetic contribuțiile originale prezentate în teza.

Acestea sunt:

1. Este realizată o analiză critică și aprofundată a problemelor actuale în domeniul rețelelor de senzori, cu accent pe aspectele ce tin de plasarea optimă a nodurilor de tip releu în vederea reducerii consumului energetic și creșterii toleranței la defectare;
2. Se introduce în mod original legătura dintre domeniul rețelelor complexe și problemele din rețele de senzori, fiind introduse o serie de metrici noi pentru descrierea importanței unui nod al rețelei în cadrul topologiei globale;
3. Conceptul de comunitate, specific rețelor complexe este adaptat pentru domeniul rețelelor de senzori pentru a răspunde la o problemă de proiectare și anume identificarea aglomerărilor geografice și topologice de senzori care necesită amplasarea de noduri releu;
4. Este prezentat un algoritm original (SIDeWiSe) pentru proiectarea automată a unei rețele de senzori și amplasarea optimă a nodurilor de tip releu și sink ale rețelei, în vederea minimizării consumului energetic și creșterea toleranței la defectare. Algoritmul este analizat în relație cu algoritmi clasici, fiind scoasă în evidență îmbunătățirea adusă. Se introduce o variantă îmbunătățită a algoritmului, care permite o analiză multi-nivel a rețelei oferind posibilitatea de ierarhizarea a echipamentelor intermediare în manieră arborescentă. Algoritmul exploatează noțiuni și metrici adaptate în mod original din domeniul rețelelor complexe (modularitate, structura de comunități);
5. Se analizează toleranța la defectare a rețelei obținute ca urmare a aplicării acestei metodologii, folosind metrici de fiabilitate bazate pe teoria rețelelor (diameter stability, average path length și distribution of the average path length) fiind evidențiată foarte bună imunitate a rețelei la defecțiuni ale nodurilor de releu: cu 50% din noduri releu pierdute, rețeaua încă este conexă;
6. Toți algoritmi și întreaga metodologie dezvoltată anterior este integrată în prezentarea unui studiu de caz referitor la proiectarea și implementarea unei rețele de senzori pentru monitorizarea traficului rutier urban. Luând în considerare particularitățile topologice ale rețelelor de transport rutier urban – localizarea traficului de date în subrețele - sunt evidențiate avantajele proiectării descentralizate, iar topologia de tip mesh-random, pe care se bazează foarte bine algoritmi propusi este potrivită pentru aceasta.