

CERCETĂRI ȘI SOLUȚII PENTRU REȚELELE DE CONTORIZARE INTELIGENTĂ

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Ingineria Sistemelor

autor: ing. Paul-Onuț NEGÎRLA

conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ioan SILEA

luna iunie anul 2022

Cuprins

1.	Introducere.....	1
1.1	Scopul și obiectivele cercetării	3
1.2	Structura lucrării de cercetare	3
2.	Stadiul actual – metode și sisteme utilizate în rețelele de contorizare inteligentă	5
2.1	Provocări uzuale în procesul de actualizare.....	6
2.2	Funcționalități și oportunități în viitorul contoarelor inteligente.....	8
2.3	Direcții de cercetare	9
3.	Cercetări privind impactul metodelor de actualizare de la distanță a contoarelor inteligente	10
4.	Îmbunătățirea disponibilității prin segmentarea datelor în rețelele smart grid PLC	14
5.	Considerații privind măsurarea nivelului semnalului în rețelele de senzori fără fir pentru estimarea poziției nodurilor	19
6.	Concluzii finale și contribuții personale	22
6.1	Perspective de cercetare.....	23
	Bibliografie selectivă	24

1. Introducere

În contextul actual, premegător crizei sanitare COVID-19, dar și al creșterii costului energiei, sectorul energetic joacă un rol deosebit de important atât din punct de vedere economic cât și politic. Producția de energie electrică din surse regenerabile face ca utilizarea pe scară largă a contoarelor inteligente să fie esențială datorită flexibilității și performanțelor conferite de o rețea inteligentă de distribuție. O astfel de rețea este capabilă să transmită informații în timp real de la fiecare punct de consum și totodată poate să primească actualizări de program de la distanță fără a fi necesară intervenția unor operatori în teren. Capacitatea de a putea actualiza echipamentele rețelei inteligente de distribuție într-un mod eficient și robust stă la baza dezvoltării continue a capacităților tehnologice și a siguranței cibernetice a întregii rețele energetice. De asemenea, o altă componentă importantă din sistemul energetic modern este reprezentată de tehnologiile de comunicații specifice contoarelor inteligente, capabile să comunice cu nodurile de rețea ale furnizorilor în timp real în pofida mediilor de transport impropii, puternic afectate de interferențe.

În lucrarea de față intitulată "CERCETĂRI ȘI SOLUȚII PENTRU REȚELELE DE CONTORIZARE INTELIGENTĂ" este analizată o problemă actuală, dar care va fi de mare interes și în viitor care se referă la problema actualizării la distanță a contoarelor inteligente de energie. În industria tehnologiilor informației, probabilitatea apariției unor vulnerabilități de securitate este luată în calcul încă de la fazele incipiente ale dezvoltării unui nou proiect. De aceea, arhitecții de sistem se asigură că aceste programe pot fi actualizate în viitor printr-un proces care nu necesită interacțiunea manuală a unui operator. Acest proces poartă denumirea de OTA upgrade sau "Over The Air" upgrade și este singurul mod prin care actualizările pot ajunge la milioane de echipamente în timp util și cu costuri minimale. Dacă acest proces nu funcționează, ar însemna că operatori ai companiilor trebuie să se deplaseze la fiecare loc de consum pentru o actualizare manuală a fiecărui echipament. În contextul în care avem zeci de milioane de contoare inteligente instalate pe teritoriul unei țări [1], costurile și timpul necesar pentru a actualiza manual aceste dispozitive nu fac fezabilă o astfel de abordare.

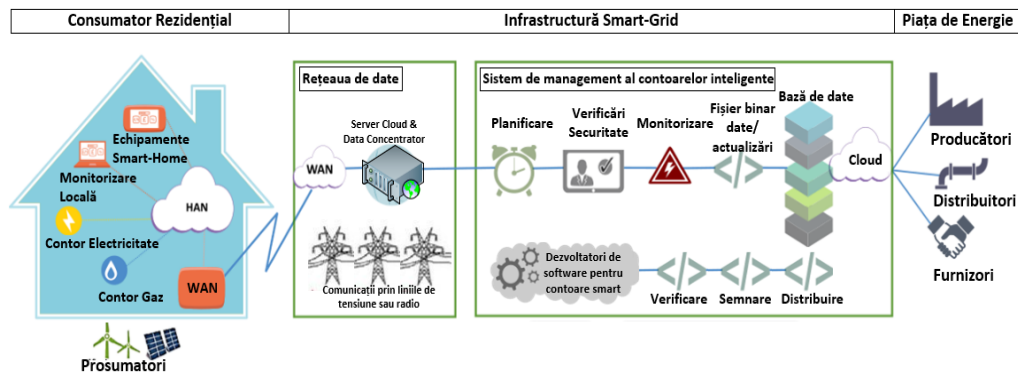


Fig. 1. – Vedere de ansamblu a sistemului de contorizare inteligentă

În figura 1 se prezintă o vedere de ansamblu a întregului sistem de contorizare energetică, de la producător la consumatorul final. Piața de energie este compusă din trei entități: producători, distribuitori și furnizori. Infrastructura de contorizare este asigurată de către distribuitori și furnizori în colaborare cu companiile producătoare de contoare inteligente, companii care au în sarcină mentenanța, actualizarea echipamentelor de contorizare, precum și asigurarea fluxului de date de la utilizatorii finali către furnizorii contractați de aceștia.

Puternica interconectare dintre componentele sistemului energetic fac din gestionarea riscului unei funcționări defectuoase a contoarelor inteligente în cazul unui atac sau a unei defecțiuni majore o sarcină deosebit de importantă. Oprirea coordonată, datorită unui atac cibernetic sau a unui defect, a unor porțiuni semnificative din rețea va avea repercusiuni majore asupra stabilității întregului sistem național și nu numai.

Plecând de la analiza problemelor contoarelor inteligente, motivația cercetării constă în găsirea unor soluții de actualizare rapidă în masă, sigură, folosind infrastructura actuală pentru a proteja sistemele integrate în cazul unor defecte sau a unor probleme de securitate. Tema cercetării tratează metodele prin care fiabilitatea și securitatea sistemelor integrate folosite în contoarele inteligente pot fi îmbunătățite prin tehnici de actualizare, validare și protecție a programelor încărcate în memoriile interne ale acestora.

1.1 Scopul și obiectivele cercetării

Scopul principal al acestei lucrări este dezvoltarea unui sistem de actualizare fiabil și securizat în rețelele de distribuție cu acoperire limitată a comunicațiilor de date vizând cercetări asupra următoarelor elemente din structura sa:

- componentele software și hardware necesare la nivel local în cadrul fiecărui sistem integrat pentru asigurarea fiabilității și a securității programelor de contorizare inteligentă;
- metodele de transport a actualizărilor software prin medii cu semnal radio slab sau prin intermediul liniilor de tensiune supuse interferențelor;
- optimizarea transportului și efectuarea actualizărilor la nivel local între nodurile adiacente în funcție de calitatea semnalului.

Deoarece probabilitatea este mai mare ca un atacator să compromită un punct slab dintr-un sistem informatic în detrimentul componentelor bine fortificate [2], iar gradul de siguranță a întregii rețele este dat de către aceste puncte, studiul întreprins vizează preponderent echipamentele de contorizare vulnerabile. Așadar, obiectivele cercetării urmăresc găsirea unor soluții fezabile ce pot fi aplicate inclusiv echipamentelor cu capabilități tehnice restrânse, urmărind astfel actualizarea periodică de la distanță a elementelor din întregul sistem energetic.

1.2 Structura lucrării de cercetare

Teza este structurată în patru părți având în total șapte capitole (Fig. 2) repartizate conform figurii de mai jos:

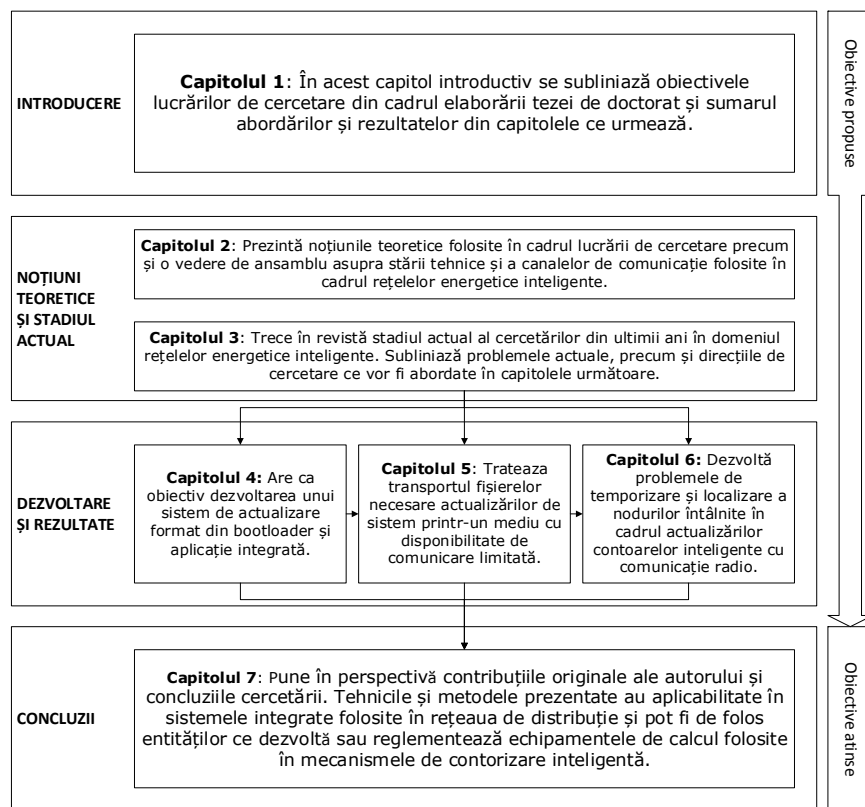


Fig. 2. - Structura tezei de doctorat

În continuare, succint, sunt prezentate aspectele tratate în fiecare din cele șapte capitole.

În **primul capitol** se acoperă tematica aleasă, motivația autorului și încadrarea acesteia în actualul context social și economic. În acest capitol introductiv se subliniază obiectivele lucrărilor de cercetare din cadrul elaborării tezei de doctorat și sumarul abordărilor și rezultatelor din capitolele ce urmează. De asemenea se pune accent pe actualitatea subiectului ales și pe perspectivele de cercetare deschise de tratarea subiectului ales.

În **cel de-al doilea capitol** se prezintă noțiunile teoretice folosite în cadrul lucrării de cercetare, precum și o vedere de ansamblu asupra stării tehnice și a canalelor de comunicație folosite în cadrul rețelelor energetice inteligente. În analiza inițială se concluzionează limitările echipamentelor instalate în teren și se subliniază durata de viață tehnologică de cel puțin 30 de ani de funcționare pe care acestea trebuie să o îndeplinească după instalare. Tot în cadrul aceluiași capitol începe analiza stadiului actual al standardelor tehnologice folosite în industrie pentru actualizarea sistemelor integrate de la distanță. Capitolul descrie procesul de stocare, descărcare și de instalare a actualizărilor prin metodele cunoscute momentan. Se menționează două categorii de probleme:

(i) În prima categorie se discută problema rulării programelor de actualizare la nivel local în cadrul sistemelor integrate, protejarea conținutului intern precum și a fiabilității și a verificărilor de autenticitate necesare în execuția aplicațiilor de contorizare inteligentă.

(ii) În cea de-a doua categorie se discută problema transportului securizat și optim al fișierelor de actualizare sub format binar prin mediile de transport cu disponibilitate redusă, remarcându-se performanța scăzută oferită de metodele uzuale.

În **capitolul 3** se trec în revistă lucrările de specialitate publicate în ultimul deceniu în domeniul rețelelor energetice inteligente. Se subliniază neajunsurile industriei și domeniile de cercetare descrise de literatura recentă, iar astfel se observă că există încă provocări majore legate de managementul și actualizarea contoarelor inteligente instalate în teren precum și provocări legate de infrastructura de comunicații de date atât pentru tehnologiile prin fir cât și pentru cele radio.

Capitolul 4 are ca obiectiv studiul impactului procesului de actualizare asupra contoarelor inteligente și dezvoltarea unui sistem de actualizare format din bootloader și aplicație integrată. Aplicația acoperă atât nevoile de fiabilitate precum și cele de securitate folosind o combinație de metode uzuale optimizate pentru mediul actual al rețelei energetice, totodată încadrându-se în cerințele de sistem uzuale ale unui contor inteligent.

În cadrul **capitolului 5** se tratează problema transportului fișierelor necesare actualizărilor de sistem printr-un mediu cu disponibilitate de comunicare limitată prin metode de secționare a fișierelor la dimensiuni egale cu unitatea de transmisie maximă acceptată de către rețelele de comunicație prin liniile de înaltă tensiune sau prin medii de comunicație radio.

În **capitolul 6** se dezvoltă problemele de localizare a nodurilor întâlnite în cadrul actualizărilor contoarelor inteligente cu comunicație radio. Localizarea contoarelor radio și algoritmi de estimare a distanței au, ca puncte de plecare, informații diferite furnizate de echipamentele de transmisie/recepție integrate. În acest capitol, a fost proiectat și implementat un sistem pentru achiziționarea indicatorului puterii semnalului recepționat (RSSI). S-a pus accent pe variația indicatorului de putere a semnalului recepționat (RSSI) în funcție de distanța și orientarea geometrică a nodurilor și a mediului, atât în spații interioare, cât și în cele exterioare.

În ultimul capitol, **capitolul 7**, se pun în perspectivă contribuțiile originale ale autorului și concluziile cercetării. Tehnicile și metodele prezentate au aplicabilitate în sistemele integrate folosite în rețeaua de distribuție și pot fi de folos entităților ce dezvoltă sau reglementează echipamentele de calcul folosite în mecanismele de contorizare inteligentă. Capitolul se încheie cu perspectivele de cercetare ulterioară și concluziile finale.

2. Stadiul actual – metode și sisteme utilizate în rețelele de contorizare inteligentă

Pentru a putea asigura îmbunătățiri în ceea ce privește eficiența, fiabilitatea, flexibilitatea și rentabilitatea investițiilor pentru toți producătorii, operatorii și clienții implicați într-o rețea inteligentă de distribuție a energiei, este necesară dezvoltarea unor soluții informatice moderne la nivelul tuturor elementelor ce o alcătuiesc. O astfel de infrastructură de comunicații trebuie să fie robustă, fezabilă și suficient de rapidă pentru a putea asigura schimbul de date în timp util de la furnizor la clientul final și invers. Acest capitol trece în revistă stadiul actual al cercetărilor în cadrul arhitecturilor de rețele inteligente de distribuție subliniind cercetările privind procesul de actualizare a programelor integrate și a capabilităților de comunicații necesare pentru asigurarea performanței, fiabilității și economiei rețelei de contorizare inteligentă.

Rețeaua de distribuție inteligentă este gândită pentru a rezolva problemele rețelei de energie printre care amintim: fiabilitatea scăzută, întreruperile dese, emisiile mari de gaze cu efect de seră, siguranța și securitatea energetică [3]. Una dintre definițiile pentru rețeaua inteligentă cunoscută și sub denumirea de „smart grid” este aceea că rețeaua inteligentă este o rețea de comunicații suprapusă rețelei energetice prin ajutorul căreia se colectează și analizează datele de la diferite componente ale unei rețele pentru a prezice oferta și cererea de energie. În final, aceste informații pot fi utilizate pentru gestionarea și controlul distribuției de energie [4].

Problemele și soluțiile studiate în literatura recentă acoperă atât avantajele și dezavantajele contoarelor inteligente cât și problemele nerezolvate. Printr-un proces stabil de actualizare a programelor integrate în contoarele inteligente, utilizatorii și furnizorii vor putea primi acces la o multitudine de funcționalități și îmbunătățiri pe măsură ce acestea vor fi implementate de către industrie [5].

Figura 3 de mai jos prezintă o vedere de ansamblu a subiectelor de cercetare din cadrul rețelelor de contorizare inteligentă precum și a legăturilor dintre acestea. Se observă că în sistemul energetic se dezvoltă noi funcționalități și îmbunătățiri tehnologice care pot fi implementate sub forma de software de către dezvoltatorii contoarelor inteligente. Prin intermediul rețelei de date funcționalitățile și modificările ajung sub forma unor actualizări de software sau de configurație la contoarele inteligente, iar acestea transmit înapoi date și parametri de consum ce pot fi folosiți în viitoare cercetări reluând întregul proces.

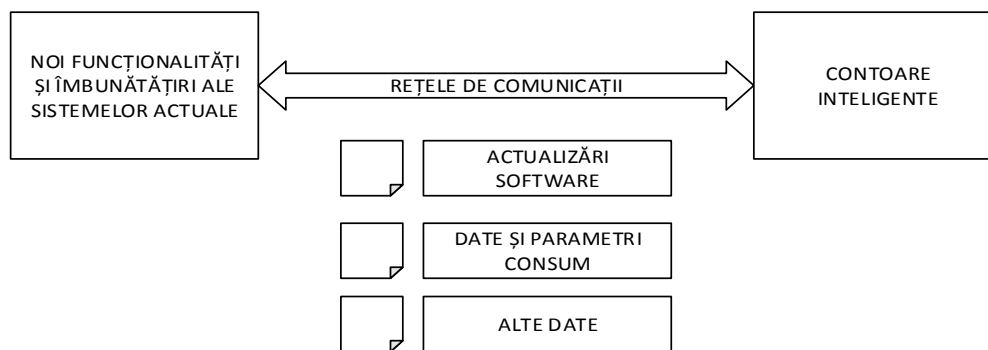


Fig. 3. - Vedere de ansamblu a subiectelor de cercetare în cadrul rețelelor de contorizare inteligentă precum și a legăturilor dintre acestea

În finalul capitolului 3, "Stadiul actual - metode și sisteme utilizate în rețelele de contorizare inteligentă", s-au enumerat metodele curente de actualizare implementate la nivelul contoarelor instalate în sistemele naționale și s-au analizat cerințele acestor metode atât din considerente tehnologice ce țin de securitate, ușurința de implementare și constrângeri hardware, cât și din alte puncte de vedere ce pot sublinia fezabilitatea sau neajunsurile cu care industria se confruntă în mod curent.

2.1 Provocări uzuale în procesul de actualizare

Pe măsură ce sistemele încorporate sunt supuse actualizării de la distanță, siguranța și securitatea dispozitivelor sunt cei doi factori cheie luați în considerare. Starea de funcționare a dispozitivului trebuie menținută înainte și după actualizare și funcționarea corectă a dispozitivului nu poate fi periclitată. Accesul fizic la dispozitivele instalate deja pe teren este rareori o abordare fezabilă pentru efectuarea actualizărilor de firmware, iar prin urmare fiabilitatea și robustețea dispozitivului sunt concepte de proiectare care nu trebuie compromise în niciun caz în timpul dezvoltării software. Pe de altă parte, producătorii trebuie să se asigure că dispozitivul va fi utilizat numai în scopul pentru care a fost construit și reconvertirea acestuia pentru alte scopuri, de cele mai multe ori rău intenționate, trebuie prevenită, iar logica internă a dispozitivului nu trebuie să permită acest lucru. De asemenea, trebuie luată în considerare și siguranța fișierelor de actualizare și a altor programe software care părăsesc serverul producătorului împreună cu o proprietate intelectuală care trebuie protejată cu aceleași principii de securitate și siguranță.

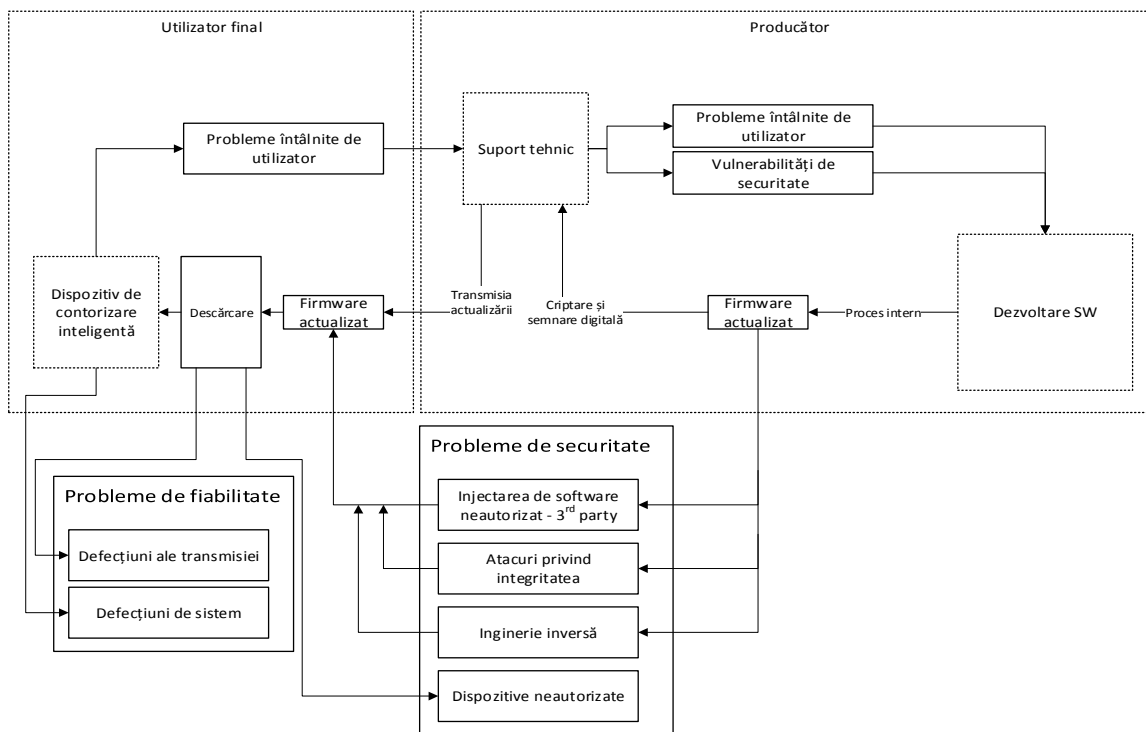


Fig. 4. - Problemele majore din procesul de instalare și dezvoltare a noului firmware.

Figura 4. prezintă delimitările procesului de actualizare între entitățile principale implicate, utilizatorul final și compania producătoare de contoare inteligente. Actualizările de program apar de cele mai multe ori ca urmare a unui defect de tip software sau ca urmare a unei vulnerabilități de securitate descoperite în industrie. În urma dezvoltării software a unui nou program firmware în cadrul companiei de producției a contoarelor inteligente, va rezulta un fișier binar criptat și semnat digital cu chei specifice fiecărui producător. Fișierul binar ce conține actualizarea ajunge apoi la serviciul de suport tehnic, iar acesta va decide ce lot de contoare trebuie să fie actualizate și va indica acestor contoare disponibilitatea descărcării unui nou firmware. De asemenea, figura prezintă și principalele puncte de atac în timpul procedurii de actualizare a firmware-ului, puncte pe care le vom aborda în următoarele capitole. Se vor discuta problemele de fiabilitate a echipamentelor de contorizare și problemele de fiabilitate a procesului de descărcare, precum și problemele de securitate apărute de-a lungul întregului proces de actualizare.

Noțiunile teoretice enumerate în capitol 2, „Noțiuni teoretice”, subliniază faptul că un mecanism de actualizare software adecvat pentru sistemele cu disponibilitate redusă trebuie să asigure următoarele cerințe:

- Trebuie să fie tolerant la erori de sistem și să poată relua procesul de actualizare de unde a fost oprit anterior. Integritatea sistemului nu trebuie să fie afectată de către întreruperile bruște ale surselor de alimentare.
- Dispozitivul va putea reveni la o versiune anterioară corectă când acest lucru se impune de către starea defectuoasă a echipamentului actualizat. Modurile de recuperare sunt acceptabile în anumite situații, dar nu pe dispozitive care necesită întreținere redusă sau dispozitive cu acces fizic dificil.
- Echipamentul va fi protejat împotriva executării programelor malițioase care nu au fost semnate de o sursă de încredere sau de către producător.

- Sistemul integrat va fi protejat împotriva pirateriei software și a atacurilor de acest tip. Se impun implementarea mecanismelor de protecție criptografice și dezactivarea tuturor interfețelor de citire fizică a memoriilor hardware.
- Cerințele de resurse trebuie menținute la minimum pe dispozitivele integrate, iar unde este disponibil, se vor utiliza resursele unui server extern cât mai mult posibil.
- Sistemele de actualizare trebuie să se asigure că procesul nu se va bloca într-o stare intermediară. Procesul de actualizare trebuie să folosească o arhitectură cu caracter atomic.

2.2 Funcționalități și oportunități în viitorul contoarelor inteligente

În ultimii ani, evoluțiile tehnologice și contextul economic și social au dus la apariția unor multitudini de noi tehnologii încorporate în echipamentele de contorizare inteligentă. În figura 5 a fost prezentat un scurt istoric al contoarelor inteligente și progresul acestora până în prezent.

Institutul Național de Standarde și Tehnologie (NIST) al SUA, a propus în 2014 [6] o listă de funcționalități cheie ce trebuie implementate într-un timp cât mai scurt de către industria energetică. Ulterior acestea au fost preluate și la nivel european și național [7].

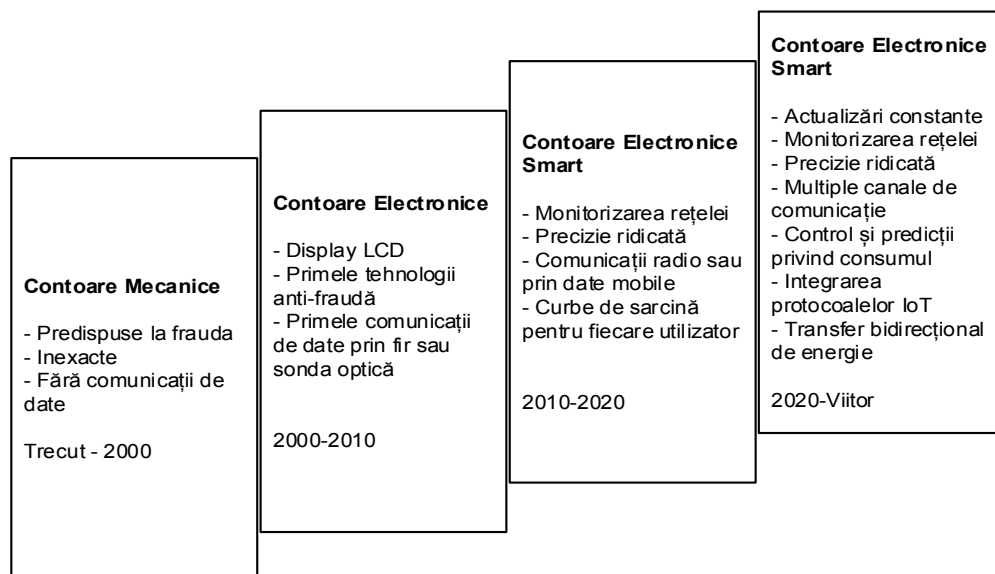


Fig. 5 - Evoluția în timp a funcționalităților oferite de rețeaua de contoare inteligente

2.3 Direcții de cercetare

În acest capitol au fost prezentate lucrări și metode din literatura de specialitate publicate în perioada 2010-2021, referitoare la viitorul rețelelor de contorizare inteligentă și provocările ce trebuie depășite pentru implementarea pe scară largă a noilor funcționalități propuse de către industrie.

Rețelele de tip Smart Grid pot rezolva problemele legate de fluxul bidirecțional de informații și energie, problemele de fiabilitate și de securitate ale rețelelor energetice tradiționale. Utilizarea și producția energiei într-un mod inteligent atât la nivel național cât și rezidențial pot pune capăt risipei de energie și pot rezolva problemele cauzate de cererea crescândă de energie. Acest lucru este posibil prin tehnicile de monitorizare, analiza și control prezentate la începutul capitolului. Așadar, se poate desprinde concluzia că pentru gestionarea și economisirea energiei contoarele inteligente joacă un rol esențial, iar până la finalul anului 2022 se preconizează că vor fi instalate 200 de milioane de noi contoare inteligente pe parcursul implementării a mai mult de 50 de proiecte derulate la nivel european.

Pentru transmiterea datelor se remarcă două tehnologii populare în implementarea acestor proiecte și anume: tehnologii radio sub protocolul ZigBee și tehnologii de comunicație prin liniile de alimentare electrică sub protocolul NB-PLC. Ambele tehnologii folosesc concentratoare de date ce deservește o anumită arie, iar conexiunea de la concentrator către serverele centrale se face prin tehnologii de date mobile. Aceste alegeri au la bază costurile reduse de implementare și flexibilitatea relativ ridicată a protocoalelor alese, dar acestea se confruntă cu provocări de coexistență într-un domeniu frecvență deja aglomerat, provocări legate de securitatea canalului de comunicație și provocări legate de congestii de date și lipsa unei metode de comunicație în timp real.

Un nou domeniu de cercetare apărut recent ia în considerare atât problemele apărute în rețelele de contorizare inteligentă, cât și problemele întâlnite în echipamentele de tip Internet of Things (IoT) folosite în automatizările proiectelor de tip smart home. Propunerile generale sunt acelea de standardizare și înglobare a celor două tehnologii într-un sistem smart grid asistat de IoT care adresează problemele de interoperabilitate și integrare a noilor dispozitive, folosirea distribuită a puterii de procesare pentru analiza volumului uriaș de date și utilizarea unei topologii de comunicații hibride ce poate adresa problemele de congestie și securitate a datelor informatice. Sistemele de contorizare inteligentă asistate de echipamentele IoT reprezintă o integrare a două lumi emergente și promițătoare.

Aplicațiile de contorizare și control rulate în programele contoarelor inteligente necesită o rețea rapidă, fiabilă și securizată. Literatura studiată menționează că localizarea nodurilor de rețea poate conferi un suport adițional algoritmilor de optimizare, dar poate îmbunătăți atât deciziile luate în direcționarea pachetelor prin rețea, cât și reduce timpii de rezolvare a unui defect fizic prin identificarea rapidă a acestuia în spațiul geografic. În mediile fizice ce nu permit instalarea echipamentelor GPS localizarea se face pe baza indicatorilor de semnal radio, iar deși autorii propun mai multe metode de localizare a contoarelor inteligente, acestea se confruntă cu o complexitate de calcul ridicată și de multe ori se bazează doar pe indicatorul de semnal RSSI, care poate suferi modificări semnificative în funcție de factorii de mediu.

O parte esențială în proiectele de contorizare inteligentă aflate în derulare o constituie metodele și sistemele de actualizare a firmware-ului la distanță. Deoarece

tehnologiile implicate în rețelele energetice inteligente evoluează în mod accelerat, este important ca fiecare echipament instalat în teren să aibă ulterior acces la actualizări software care pot aduce funcționalități adiționale sau pot îmbunătăți securitatea contoarelor și implicit a întregii rețele. Au fost analizate multiple tehnici și structuri standardizate de actualizare la distanță a sistemelor integrate și au fost evidențiate principalele provocări și limitări care pornesc de la constrângerile echipamentelor hardware sau ale rețelei de comunicație. În plus, au fost discutate schemele de securizare a întregului proces de update prin criptare, semnare și alte procese de verificare a integrității și autenticității programelor rulate de contoarele inteligente. De asemenea, în cadrul acestui capitol, au fost analizate instrumente de analiză și metode de optimizare a transmisiei de date ce pot juca un rol important în actualizarea contoarelor inteligente instalate în zone cu acces redus la rețelele de date și s-au sugerat direcțiile de cercetare în acest domeniu.

În concluzie, există încă provocări majore care necesită investigarea în continuare a unor probleme importante de cercetare deschise în domeniul rețelor de contorizare inteligentă și în managementul contoarelor inteligente deja instalate.

3. Cercetări privind impactul metodelor de actualizare de la distanță a contoarelor inteligente

Pornind de la stadiul actual al rețelor de contorizare inteligentă, împreună cu concluziile conceptelor teoretice descrise anterior, în capitolul intitulat "Cercetări privind impactul metodelor de actualizare de la distanță a contoarelor inteligente" se propun și analizează metode prin care procesul de actualizare poate fi implementat la nivel software fără compromisuri de funcționalitate sau securitate venite din constrângerile tipului de hardware utilizat. Metodele criptografice folosite în acest capitol folosesc funcții de dispersie pentru implementarea algoritmului de verificare a integrității programului firmware, criptarea memoriilor de stocare prin standardul avansat de criptare (AES) cu chei de până la 128 biți pentru protejarea proprietății intelectuale, iar pentru transportul fișierelor securitatea va fi asigurată de canale de comunicație bazate pe chei simetrice și prin protocolul HTTPS.

Implementarea sistemului de actualizare propus a fost împărțită în două componente de bază după cum urmează: Prima componentă a sistemului de actualizare la distanță a contoarelor inteligente este acoperită de o soluție de tip bootloader secundar (încărcător de program) cu funcții de decriptare a imaginilor, autentificare digitală a acestora precum și instalare a noului software. Cea de-a doua componentă software a fost integrată în aplicația contorului inteligent și aceasta se ocupă de autentificarea cu serverul producătorului pentru a putea descărca într-un mod sigur o imagine software, apoi de stocarea acesteia și va urmări în același timp să nu influențeze în niciun fel mărimile contorizate în tot procesul de actualizare. Pentru dezvoltarea sistemului integrat compatibil cu cerințele standardului SUIIT [6][7], a fost ales un sistem bazat pe microcontrollerul STM32L475 ce beneficiază de 128 KB memorie RAM și 256 KB memorie Flash.

Întrucât cerințele SUIIT nu permit transportul unei imagini software în moduri nesecurizate, pachetul firmware va fi stocat într-o a 3-a zonă de memorie, destinată descărcărilor de imagini criptate și semnate. Transferul imaginii actualizate în sectorul inactiv se va face de către aplicație atunci când toate etapele de verificare și validare au fost finalizate. O hartă a memoriei flash este ilustrată în figura 6.

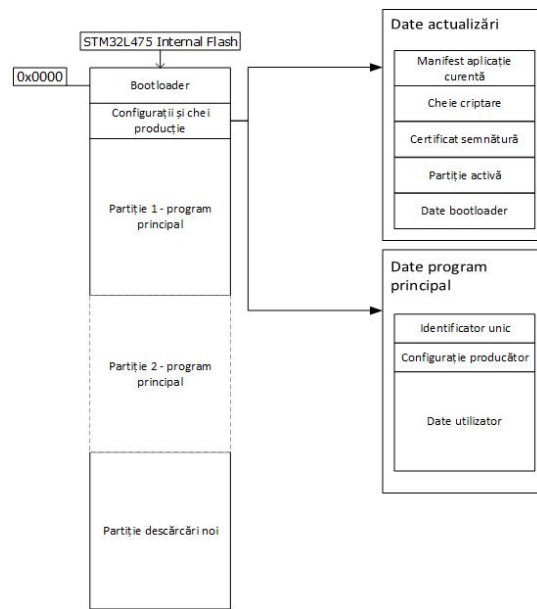


Fig. 6. - Structura memoriei nevolatile de tip flash din cadrul microcontrollerului STM32L475 utilizat în implementarea experimentală a sistemului de actualizare la distanță.

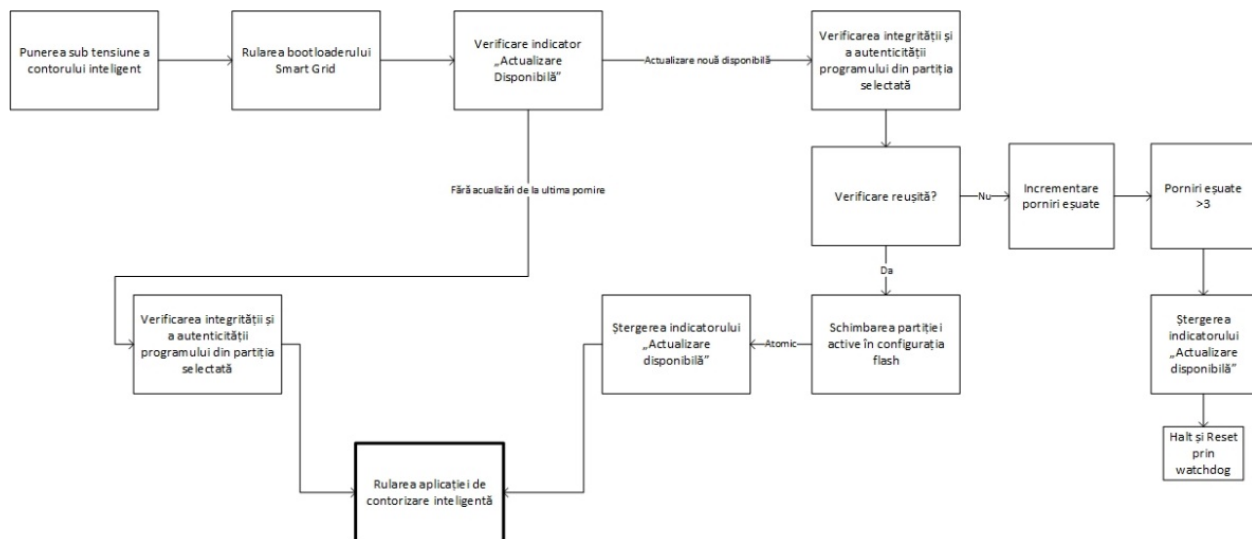


Fig. 7. - Diagrama de proces a încărcătorului (i.e. bootloader) de tip smart-grid propus.

Echipamentele de contorizare inteligentă au pe lângă cerințele de fiabilitate și securitate obișnuite și cerințe stricte legate de timpul necesar bootloaderului să parcurgă toate etapele și să ruleze aplicația de contorizare corespunzătoare [8]. Așadar, odată descărcată imaginea firmware ce conține actualizarea contorului, verificarea integrității imaginii, verificarea semnăturii autorului și decriptarea într-o partiție inactivă se vor face la nivelul aplicației și nu la nivelul procesului de boot, pentru a nu întârzia pornirea aplicației de contorizare. Bootloaderul va fi responsabil doar de alegerea partiției active și de verificarea integrității aplicației ce urmează să fie rulate. Întregul proces de încărcare și verificare a aplicației actualizate nou instalată este descris în figura 7 mai sus.

Simplitatea și păstrarea proceselor ce au loc în cadrul încărcătorului de program la un nivel minim vin din nevoia păstrării unui program cât mai robust întrucât bootloadele de acest tip nu pot fi actualizate și sunt scrise o singură dată în toată durata de operabilitate a contorului inteligent. Un al doilea motiv este strâns legat de viteza cu care acești pași trebuie executați pentru a putea rula programul de contorizare cât mai repede, evitând pierderi și goluri în curbele de profil de consum.

Similar, în diagrama din figura 8, sunt descriși pașii executați la nivelul aplicației de contorizare în cadrul modului software responsabil de descărcarea și salvarea actualizărilor.

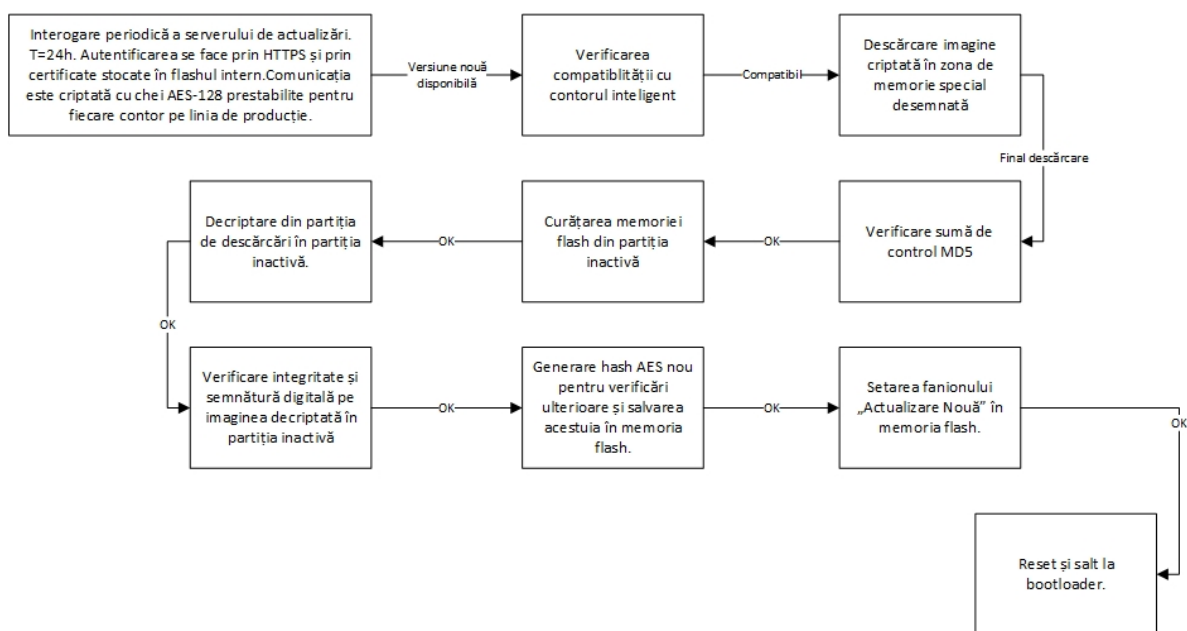


Fig. 8. - Diagrama de proces a aplicației de actualizare a echipamentelor de tip smart-grid.

Pe baza standului experimental descris în figura 9, au fost rulate teste experimentale de tip end-to-end, prin care aplicația de bază a microcontrollerului STM32L475 a fost actualizată în mod repetat, iar cu ajutorul osciloscopului și a unor semnale digitale au fost măsurați timpii de execuție pentru fiecare etapă din procesele descrise în diagrama de proces a încărcătorului de program (figura 7) și în diagrama de proces a modului software responsabil de actualizările firmware a contorului inteligent (figura 8).

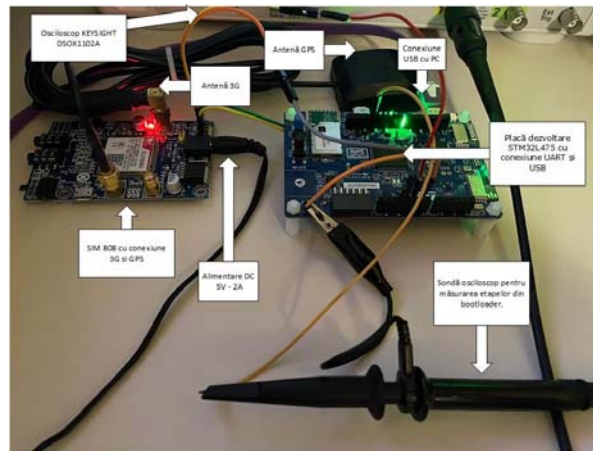


Fig. 9. - Standul experimental cu echipamentele integrate interconectate prin interfețe seriale.

Actualizările au fost efectuate într-un mediu controlat, iar rezultatele experimentale au fost trecute prezentate în figura 10. Timpii de descărcare a actualizărilor nu impactează modul de funcționare a contoarelor inteligente, aceste măsurători au doar rol de control și pot conferi un grad sporit de încredere în interpretarea rezultatelor finale. Pe de altă parte, timpii de instalare sunt timpii de execuție în care contorul inteligent nu poate executa alte operațiuni, iar consumul de energie poate să nu fie înregistrat în această perioadă.

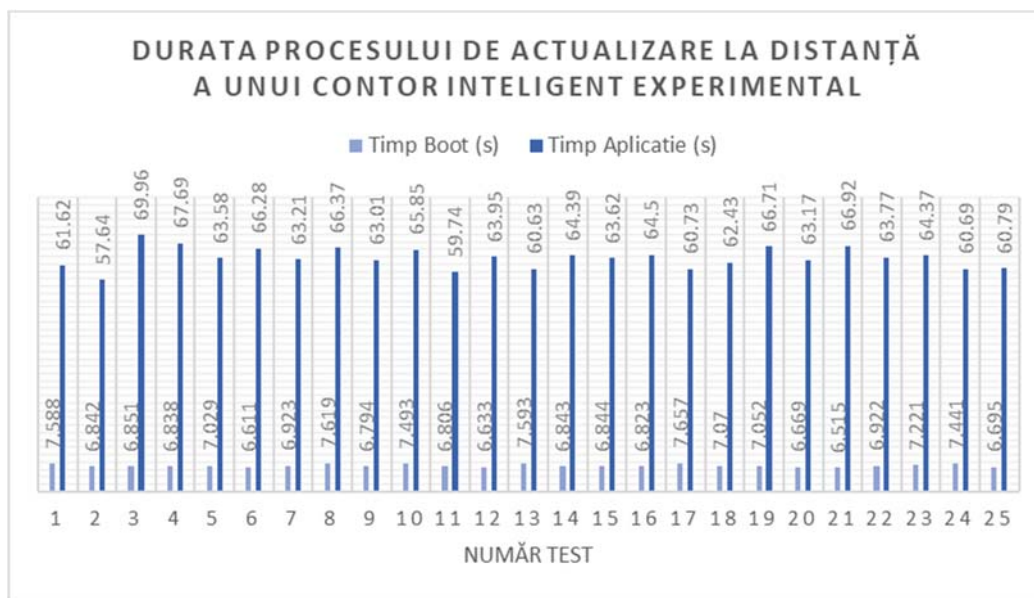


Fig. 10. - Standul experimental cu echipamentele integrate interconectate prin interfețe seriale.

Rezultatele prezentate arată că este posibilă implementarea unui sistem de actualizare la distanță chiar și pentru sistemele low-power cu resurse hardware limitate cum sunt cele găsite în cadrul echipamentelor instalate în rețeaua inteligentă. Pentru îndeplinirea cerințelor minime de securitate și pentru a acoperi toate mecanismele de protecție la defect este necesar un microcontroller cu minim 128 KB RAM și minim 256 KB Flash. Sistemul prezentat bazat pe microcontrollerul STM32L475 a îndeplinit toate cerințele de funcționalitate și securitate cerute de standardul SUIIT și este o soluție potrivită pentru contoarele inteligente conectate în rețelele de tip smart grid.

Impactul asupra operaționalității contorului inteligent în procesul de actualizare a fost redus folosind metodele prezentate, iar timpul mediu de instalare a unui nou firmware în condiții de laborator a fost de 7.0148 secunde.

Metodele prezentate în acest capitol subliniază importanța standardizării procesului de actualizare în rețelele de contorizare inteligentă. Coexistența echipamentelor de contorizare în rețeaua de date a sistemului energetic poate fi puternic afectată de soluțiile alese de producătorii de contoare inteligente. Sincronizarea tehnologiilor alese de dezvoltatori poate avea un impact major asupra întregii rețele, iar interconectarea acestor contoare în sistemul energetic într-un mod coerent poate îmbunătăți atât viteza de transmisie cât și capacitatea de acoperire a zonelor greu accesibile, subiecte ce vor fi tratate în capitolul următor.

4. Îmbunătățirea disponibilității prin segmentarea datelor în rețelele smart grid PLC

Rețelele electrice variază în mărime, de la acoperirea unei singure clădiri la cele naționale care acoperă țări întregi sau chiar la rețele transnaționale care pot traversa continentele. Odată cu lansarea de contoare inteligente în întreaga lume, există cazuri de utilizare în care soluțiile obișnuite eșuează și disponibilitatea în rețea a anumitor contoare este foarte scăzută din cauza condițiilor de comunicație precare. Acest capitol propune un model de segmentare a datelor pentru fișiere de date mari, care trebuie să călătorească în siguranță și în mod fiabil prin rețeaua inteligentă de distribuție. Metoda propusă abordează, în special, îmbunătățirile disponibilității rețelei de tip PLC PRIME prin folosirea adecvată a unor algoritmi de segmentare a datelor la nivelul aplicației și calibrarea acestora pentru rate de transmisie în conformitate cu nivelurile de zgomot prezente în rețeaua electrică.

De-a lungul dezvoltării capitolului, au fost efectuate experimente pe o rețea electrică de mică putere pentru a evalua îmbunătățirile disponibilității prin metoda propusă precum și fezabilitatea actualizărilor de firmware la distanță în cazul unor echipamente ce comunică prin rețele cu un nivel de zgomot ridicat. Rezultatele experimentale arată că metoda prezentată de actualizare a firmware-ului la distanță este fiabilă și practică în zonele în care disponibilitatea echipamentelor inteligente la rețelele de date este scăzută.

Sistemele PLC au o piață divizată între protocoalele PLC G3 și PLC PRIME Narrow Band [9]. Aceste tehnologii, deși au marele avantaj de a nu necesita instalarea unei noi infrastructuri comunicând prin rețeaua electrică, au dezavantajul că rata de succes în transmisia datelor este afectată de interferențele generate de consumatori sau de distanța nodurilor de transmisie dintre gospodăriile adiacente. Cerințele echipamentelor alese de ERBD și Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei sunt potrivite pentru zonele dens populate, dar limitările comunicațiilor prin liniile de tensiune se văd când avem de a face cu un volum foarte mare de date, iar deși instalarea echipamentelor la nivel național încă nu se apropie de sfârșit deja avem nenumărate situații în care cerințele inițiale se dovedesc acum insuficiente.

Standardul global DLMS / COSEM (IEC 62056, EN13757-1) pentru măsurarea energiei inteligente solicită anumite structuri de date, cum ar fi tarifele care se pot schimba dinamic la fiecare două minute sau alegerea contractului prin contor din mai mulți furnizori de energie sau chiar profilarea curbelor de sarcină pentru tarifele din contract suportat la o rezoluție de 1 min pentru toate tipurile de energii (active, reactive, importate / exportate). Astfel de structuri complexe copleșesc de obicei protocoalele alese și pot ușor ajunge la

dimensiuni de mai mulți megabytes. Pe de altă parte, evaluările de performanță ale celor două benzi din sistemele PLC (PRIME și G3) arată că această transmisie poate fi realizată la o viteză mai mare pe PRIME, dar se comportă mai rău în prezența interferențelor sau a zgomotului pe rețea[10, 11].

Rata de eroare a pachetelor în rețelele PRIME crește odată cu dimensiunea pachetelor [12]. Contoarele PRIME înregistrează o disponibilitate scăzută tot mai des, deoarece dimensiunea pachetelor transmise a crescut semnificativ, iar soluțiile hardware propuse în literatura de specialitate nu pot îmbunătăți un contor deja instalat care are pierderi semnificative de pachete. Prin urmare, capitolul curent își propune să îmbunătățească rata de eroare a pachetelor transmise prin rețelele PRIME, care ulterior ar putea duce la îmbunătățirea ratei de succes a actualizărilor la distanță a firmwareului din contoarele inteligente.

Segmentarea datelor la o dimensiune adecvată într-un mod dinamic, fiecărui canal de comunicație, ar putea duce la îmbunătățirea protocoalelor actuale, iar contoarele inteligente, care arareori păstrează o conexiune solidă cu furnizorul de energie, vor putea astfel să obțină actualizări de software într-un mod practic.

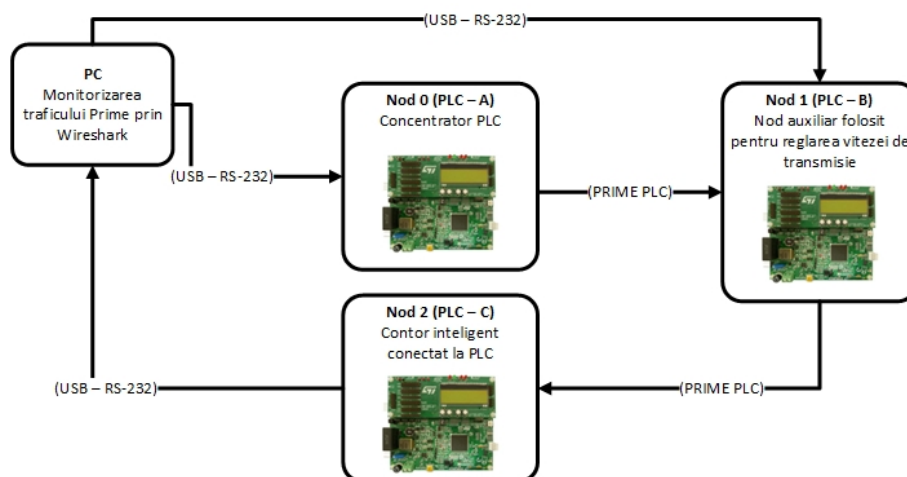


Fig. 11. - Topologia rețelei de evaluare a metodei de segmentare a datelor PowerLine Intelligent Metering Evolution (PRIME).

Figura 11 ilustrează topologia rețelei folosită la evaluarea soluției de segmentare a datelor. Această topologie constă în trei noduri de comunicație conectate la liniile de tensiune bazate pe platformele de evaluare a protocolului de comunicație PRIME. Nodurile sunt de asemenea conectate la un sistem ce poate monitoriza întregul sistem printr-o interfață de diagnostică încorporată. Interfața utilizează o aplicație personalizată dezvoltată special pentru acest test și dispune de comenzi ce pot simula o anumită calitate a rețelei sau ce poate analiza ratele de succes a transmisiilor PRIME între nodurile experimentale. Nodul 2, PLC-C, a fost examinat ca dispozitiv principal în timp ce celelalte două noduri au un rol auxiliar. Nodul 0, rulează o aplicație generică de tip data concentrator PLC-PRIME menținând funcțiile corespunzătoare unei rețele de tip mesh, iar nodul 1 are pe lângă funcțiile de bază capacitatea de a simula o rată de succes a transmisiilor de pachete putând astfel să simuleze condițiile dintr-o rețea cu performanțe scăzute.

Pentru a evita segmentarea și reasamblarea prin nivelul PRIME, trebuie să ne uităm la substratul său comun de convergență a părților, CPCS. Funcționalitatea CPCS este

responsabilă pentru divizarea datelor de ieșire în segmente constante CMTU de 256 de octeți fiecare. PRIME 1.3.6 acceptă până la 64 de segmente ale CMTUSize. Aceasta duce la o lungime maximă de transmisie de 16.384 de octeți, după care straturile superioare trebuie să gestioneze segmentarea și reasamblarea ulterioară. Segmentarea la nivel de aplicație va urma aceeași structură ca cea de la nivelul fizic PRIME, iar substratul comun de convergență a părților (CPCS) urmărește același format cu cel descris în tabelul 1:

Tabelul 1. - Câmpurile și structura antetului de segmentare PRIME.

Denumire	Lungime	Descriere
Tip	2 bits	Tipul de segment. 0b00: primul segment; 0b01: segment intermediar; 0b10: ultimul segment; 0b11: rezervat
NSegs	N bits	Număr total de segmente - 1.
SEQ	N bits	Număr de secvență a segmentului curent.

În sistemul descris în figura 11 și folosind parametrii descriși mai sus, prin redimensionarea segmentelor conform mărimilor MTU PRIME, următoarele teste au fost efectuate:

- Test 1. Viteza inițială, cu accent pe viteza la care segmentele au avut nevoie de retransmisie în timpul unei transmisii normală a unei citiri zilnice a curbei de sarcină care are o dimensiune LoadProfileDaySize = 1.327.104 octeți.
- Test 2. Test cu segmentarea datelor folosind citiri de curbă de sarcină zilnice configurate pentru un segment de date de dimensiune = 256 octeți. Această abordare împarte datele formate în 5184 segmente.

Rezultatele experimentale prezintă numărul pachetelor retransmise în figura 12a pentru sistemul fără segmentare a datelor, respectiv în figura 12b a sistemului cu segmentare.

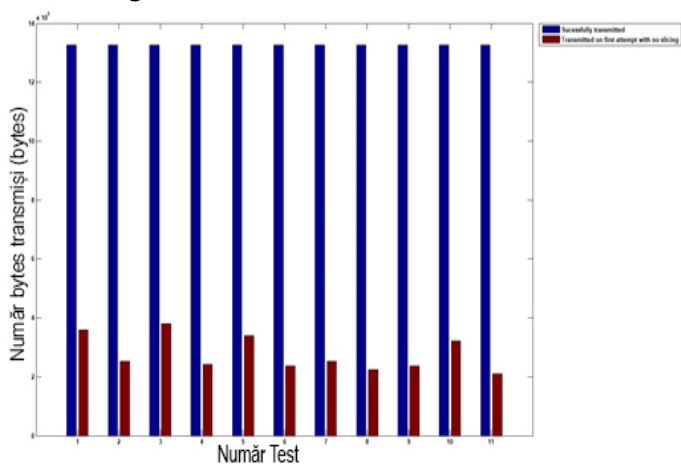


Fig. 12a - Rezultatele inițiale privind citirea curbei de sarcină zilnică prin PLC-PRIME de la PLC-A la PLC-C.

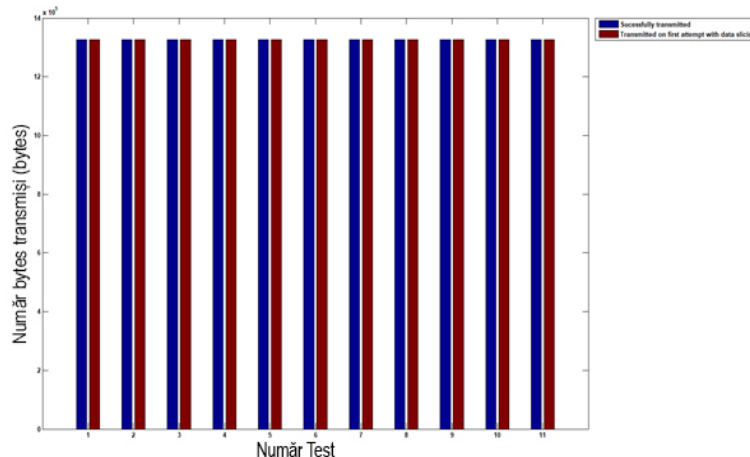


Fig. 12b - Transmiterea citirilor zilnice ale curbei de prin segmente limitate la nivel de aplicație.

Datele au arătat că în decursul testului bazat pe segmentare la nivel de aplicație citirile curbelor de sarcină au ajuns cu succes la destinația vizată, fără pierderi de pachete iar, mai mult, fiecare segment a fost transmis în mod corespunzător într-o singură fereastră de transmisie, fără a fi necesare reîncercări sau retransmisii. Cu toate acestea, viteza de transmisie a scăzut semnificativ în timpul analizei experimentale, prin urmare, acest aspect a fost analizat în etapele următoare.

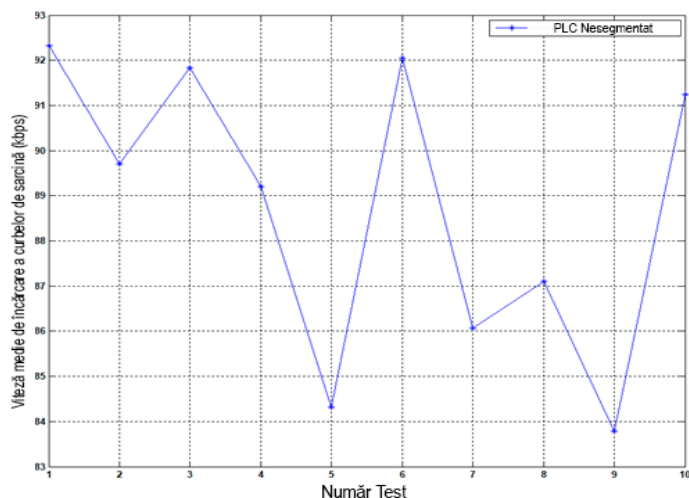


Fig. 12c - Viteze de transmisie observate pe un canal de comunicație PLC ce nu folosește segmentarea datelor la nivel de aplicație.

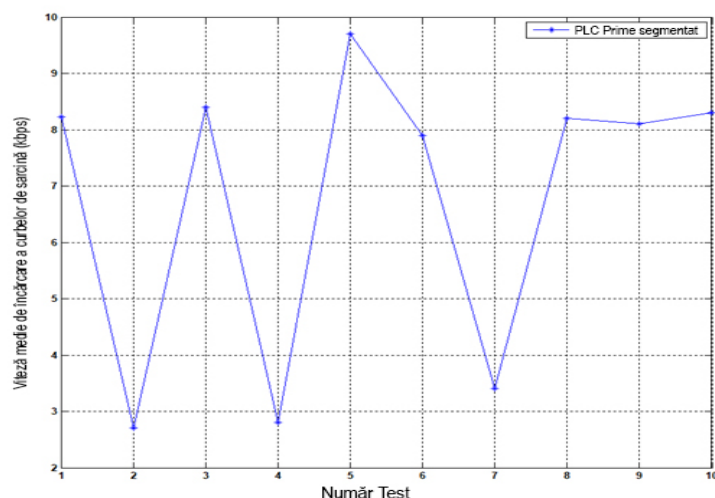


Fig. 12d - Viteze de transmisie observate pe canalul de comunicație de la PLC-A către PLC-C folosind segmentarea datelor la nivel de aplicație.

În figura 12c sunt prezentate rezultatele testelor vitezei de transmisie prin protocolul de comunicație PRIME fără segmentare, nod ce are o conexiune directă cu Nodul 2. Inițial viteza de transmisie s-a încadrat în intervalul [83 kbps, 93 kbps], ceea ce nu este neobișnuit pentru o rețea de linii de joasă tensiune ce nu suferă de interferențe sau de alte probleme de calitate a rețelei.

Având ca obiectiv o rețea ce necesită retransmisia pachetelor cât mai rar posibil și o comunicație cât mai apropiată de modul în care arată o comunicație de date într-un mediu lipsit de interferențe, a fost analizat impactul soluției cu segmente de date care îmbunătățește semnificativ disponibilitatea rețelei, dar cu o viteză vizibil mai mică în comparație cu protocoalele standardizate. În cazul dispozitivelor care ar rămâne pentru o perioadă mai lungă de timp la un nivel de disponibilitate de 0%, viteza de transmisie nu este o problemă imediată, deoarece aceste dispozitive ar fi oricum inaccesibile pentru o perioadă lungă de timp.

În cele din urmă, 12d arată costul plătit pentru a crește disponibilitatea rețelei, viteza de transmisie a scăzut de la o valoare medie de 88,761 kbps la 6,763 kbps, permițând transmiterea unei curbe de sarcină, în formatul cel mai complex, pentru întreaga perioadă a unei zile, în aproximativ 20 de minute.

Ulterior, a fost analizată fezabilitatea metodei de segmentare la nivel de aplicație pentru actualizările de firmware la distanță. Procesul de actualizare prin segmente de date a fost comparat cu procesul de actualizare manuală prin intermediul interfeței sondei optice.

În timpul testelor experimentale, viteza medie de descărcare a actualizării firmware-ului prin intermediul interfeței optice a fost de 15016,3 bps (14,66 kbps), în timp ce prin abordarea PLC cu segmentare de date s-a obținut o viteză medie de 7769,4 bps (7,59 kbps).

O comparație vizuală a vitezelor este reprezentată în figura 13. În timp ce aceasta arată că interfața optică funcționează la viteze ușor mai bune, am arătat că abordarea prin segmentare de date este încă o soluție viabilă, cu viteze într-un interval de valori similar.

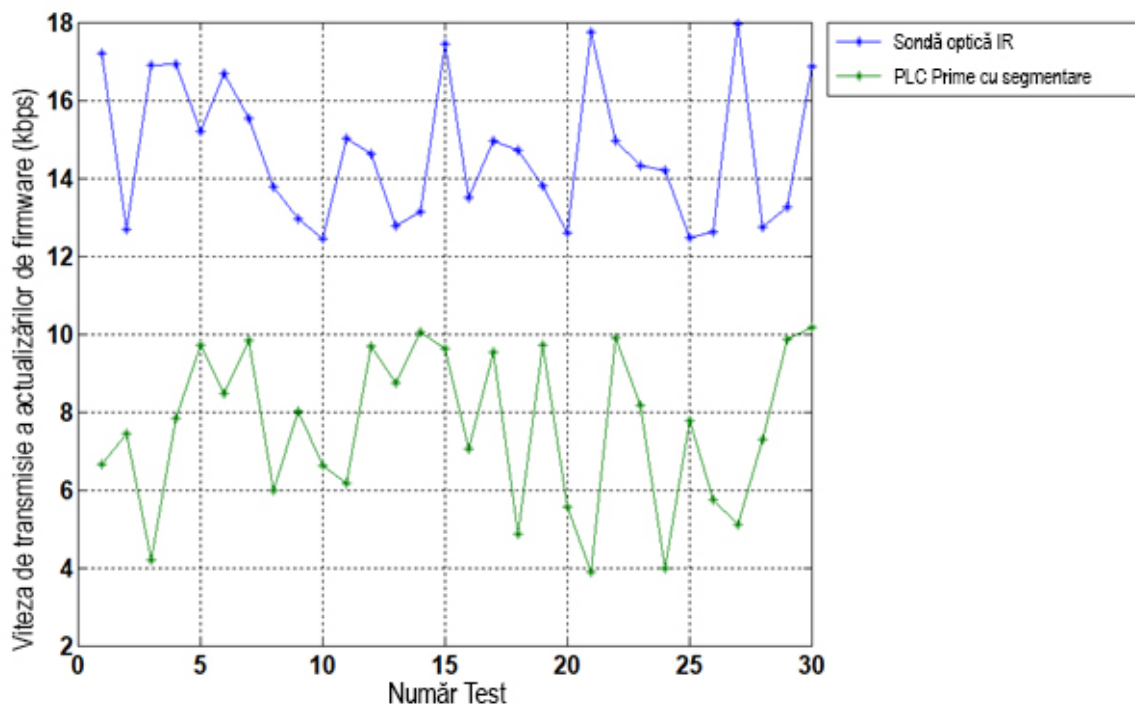


Fig. 13 - Reprezentarea vizuală a rezultatelor testelor de viteză de actualizare

După cum o arată și rezultatele prezentate anterior, prin reducerea segmentelor transmise într-o anumită fereastră de timp, s-a arătat că rata de retransmisie a fost redusă semnificativ, iar comunicarea PLC cu segmente de date poate îmbunătăți disponibilitatea prin transmiterea a cel puțin un segment de la contorul inteligent vizat ori de câte ori există o scurtă fereastră de disponibilitate. În plus, procesul de actualizare a firmware-ului poate atinge în continuare viteze comparabile cu aceeași operațiune efectuată manual de un operator din teren, fără costurile de logistică pe care le implică această metodă. Acest lucru înseamnă că nodurile care se află la capătul rețelei într-o rețea PRIME pot fi actualizate și nu mai sunt lăsate nesecurizate din cauza imposibilității de a obține o actualizare completă în aceeași fereastră de disponibilitate.

5. Considerații privind măsurarea nivelului semnalului în rețelele de contorizare fără fir pentru estimarea poziției nodurilor

Rețelele de senzori fără fir (WSN) sunt utilizate pe scară largă în diferite sisteme de monitorizare inclusiv în sistemele de contorizare și monitorizare a consumului de energie. Având în vedere natura distribuită a acestor rețele, un număr tot mai mare de studii de cercetare se concentrează asupra unor aspecte importante precum: maximizarea autonomiei rețelei, localizarea nodurilor și securitatea accesului la date. Algoritmii de localizare a nodurilor și de estimare a distanței au ca punct de plecare diferite informații furnizate de noduri, iar nivelul intensității semnalului este adesea un astfel de punct de plecare. În acest capitol a fost proiectat, implementat și testat un sistem de achiziție a indicatorului de intensitate a semnalului recepționat (RSSI).

Prin cercetările efectuate, se recomandă efectuarea de măsurători de semnal, la fața locului, atunci când se are în vedere extinderea ariei rețelei. În lucrare sunt prezentate aspecte legate de măsurătorile nivelului semnalului (utilizând RSSI) atunci când tensiunea de alimentare a nodurilor și orientarea senzorilor (în aceeași locație) nu rămân întotdeauna aceleași.

Rezultatele și experimentele prezentate în lucrare sunt utile pentru realizarea a cel puțin două aplicații precum urmează:

- un sistem de identificare a poziției contoarelor inteligente pe teren sau a consumatorilor casnici într-o locuință dotată cu senzori inteligenți/prize inteligente.
- un sistem de citire a consumului de energie de la fiecare dintre apartamentele de pe scara unei clădiri cu mai multe niveluri.

În acest capitol, a fost proiectat, implementat și testat un sistem de achiziție RSSI pentru a utiliza această măsură ca un set de date de intrare pentru dezvoltarea viitoare a algoritmilor de estimare a distanței și a locației contoarelor inteligente. Scopul sistemului este de a permite utilizatorului să măsoare nivelurile RSSI între nodurile active din sistem și în ambele direcții de transmisie.

Consumul total de curent este dat de (5.1):

$$C_{Total} (mA) = C_{CPU} + C_{Outputs} + C_{Transceiver}, <mA>. \quad (5.1)$$

Valoarea de interes este consumul total de curent al nodului atunci când se află în modul TX activ, deoarece aceasta constituie singura valoare ce ar putea fi modificată în mod dinamic de un algoritm de transmisie de date eficient din punct de vedere energetic.

Protocolul de comunicare conferă două comenzi de control, care pot fi utilizate pentru a măsura și controla consumul de curent în timpul unei transmisii. Variația consumului de curent în raport cu valorile scrise prin intermediul acestor comenzi pot fi observate în fig. 14a, respectiv 14b pentru valoarea liniarizată.

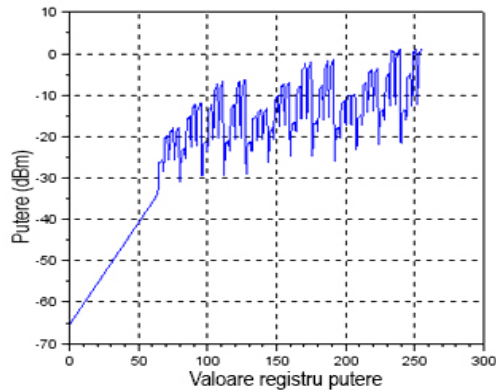


Fig. 14a - Variația neliniară a nivelului de putere de transmisie în funcție de setarea registrului.

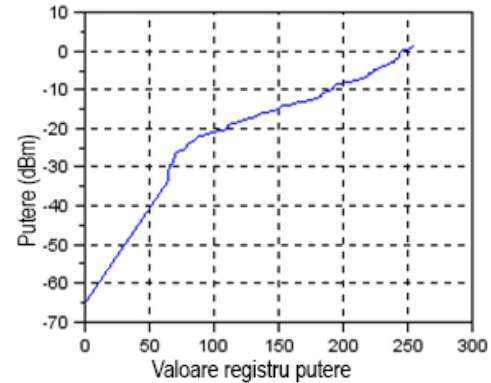


Fig. 14b - Liniarizarea nivelului de putere de transmisie în funcție de setarea registrului de putere al emițătorului.

În cazul unui nod, măsurătorile de curent efectuate în funcție de puterea de emisie diferă în funcție de nivelul de încărcare a bateriei folosite, prin urmare, autonomia unui astfel de senzor, estimată prin măsurarea tensiunii bateriei, influențează acuratețea estimării distanței, pe baza măsurătorii RSSI.

Figura 15 arată diferența de consum de curent atunci când există o scădere de 0,48 volți în sursa de alimentare.

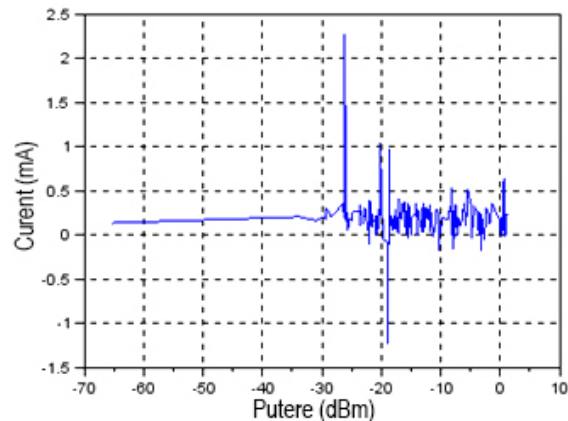


Fig. 15 - Consumul de curent în funcție de puterea de transmisie.
Diferența de consum de curent cauzată de o cădere de tensiune de 0,48 volți.

De asemenea în cadrul experimental s-au efectuat mai multe seturi de măsurători pentru a evalua nivelul RSSI în diferite condiții de orientare spațială. Figurile 16a și 16b arată variația nivelului RSSI cu distanța măsurat în aer liber, respectiv în interior. Figurile 17a și 17b arată variația nivelului RSSI în funcție de poziționarea verticală, respectiv în planul orizontal.

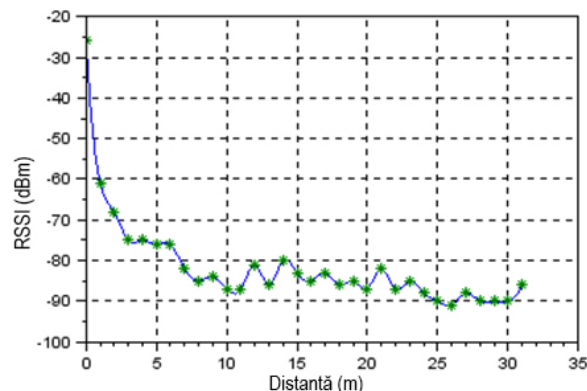


Fig. 16a. - Nivelul RSSI în funcție de distanță. Măsurători în câmp deschis.

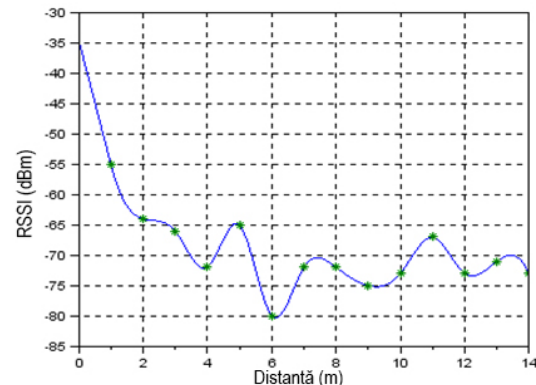


Fig. 16b. - Nivelul RSSI în funcție de distanță. Măsurători în interior pe un coridor de 14 m lungime și 1,5 m lățime.

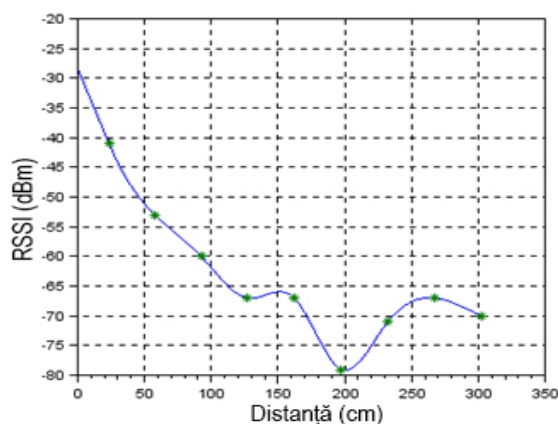


Fig. 17a. - Nivelul RSSI în funcție de orientarea nodului într-o configurație de măsurare verticală cu nodurile poziționate față în față.

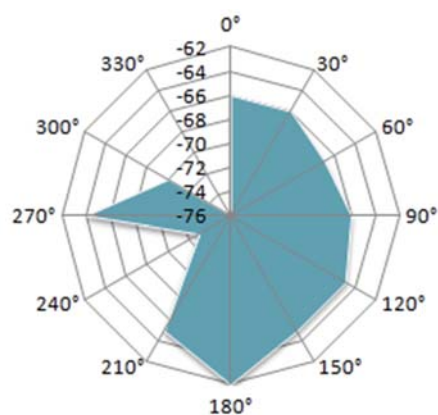


Fig. 17b. - Nivelul RSSI în funcție de orientarea orizontală a nodului într-o configurație de măsurare cu nodurile aflate spate în spate la o distanță de 1m.

Scopul acestui capitol a fost de a evidenția în ce măsură rezultatele experimentelor științifice pot diferi în rețelele de contorizare inteligentă fără fir în funcție de orientarea unui nod față de alte noduri. Ca urmare, într-o aplicație în care se utilizează rețele de noduri fără fir, în funcție de modulul radio folosit, există implicații pentru problemele de autonomie și problemele de localizare în special în cazurile în care poziția și orientarea nodurilor nu este cunoscută.

Sistemul de măsurare RSSI descris în această lucrare, bazat pe protocolul de comunicare cu fir și fără fir propus, și-a dovedit fiabilitatea și compatibilitatea cu rețelele de contorizare fără fir. Pentru a utiliza valorile RSSI ca date de intrare pentru algoritmi de detectare a distanței sau a locației, valorile RSSI nu pot fi utilizate fără etape intermediare de procesare pentru a atenua neliniaritatea valorilor măsurate. Rezultatele măsurătorilor au confirmat că nivelul RSSI variază în funcție de distanță, de orientarea geometrică a senzorilor și de caracteristicile mediului.

Având în vedere rețelele de echipamente fără fir eficiente din punct de vedere energetic cum ar putea fi contoarele inteligente de gaz, este de așteptat ca factorul RSSI să fie o soluție pentru detectarea distanței dintre noduri și, ulterior, să ajusteze puterea de transmisie la o valoare specifică corespunzătoare distanței măsurate. Prin reducerea puterii de transmisie, se reduce consumul de curent al emițătorului-receptorului și, prin urmare, crește autonomia nodului.

6. Concluzii finale și contribuții personale

Capitolul final sintetizează un șir de concluzii privind obiectivele tezei de doctorat, actualitatea temei abordate, respectiv a contribuțiilor personale prezentate în cadrul capitolelor anterioare. De asemenea, capitolul este destinat și prezentării modurilor de valorificare a rezultatelor și a unor elemente tehnice propuse în cadrul lucrărilor de cercetare din domeniul abordat. Capitolul conchide prin enumerarea direcțiilor de studiu identificate pentru viitor și a lucrărilor publicate în urma cercetării doctorale.

Obiectivele principale urmărite în cadrul tezei doctorale au dus la obținerea următoarelor contribuții personale:

S-a elaborat o analiză comprehensivă a tehnologiilor folosite, la nivel global, în rețelele energetice atât din punct de vedere al tehnologiilor folosite de sistemele de contorizare cât și din punct de vedere al tehnologiilor de comunicație alese pentru digitalizarea rețelelor energetice.

A fost realizat un sistem de actualizare pentru sisteme încorporate, acesta fiind compatibil cu caracteristicile tehnice ale contoarelor inteligente aflate în producție. Sistemul este format din bootloader (fig. 7) și aplicație de proces (fig. 8) și are ca obiectiv îndeplinirea tuturor cerințelor din standardul SUIT [6]. Elaborarea sistemului a pus accent pe o fiabilitate ridicată și un grad crescut de securitate informatică atât la nivelul nodului de rețea cât și la nivelul procesului de distribuție a actualizărilor. În procesul de design software s-a avut în vedere obținerea unui sistem de actualizare cu un impactul minimal asupra procesului de contorizare a energiei.

Pentru validarea sistemului mai sus creat a fost realizată o arhitectură completă client (contor inteligent) – server (cloud), iar sistemul de distribuție a fișierelor necesare actualizării software poate converti aplicații în format binar în fișiere criptate și semnate la standardele de securitate actuale. Programele și procesul de distribuție au fost apoi folosite în lucrările experimentale efectuate în publicarea unor lucrări și în elaborarea capitolelor ulterioare.

Cel de-al doilea obiectiv de cercetare a dus la elaborarea unei analize critice privind frecvența și volumul de date transportat de la contoarele inteligente către furnizor prin intermediul liniilor de tensiune.

S-a elaborat un sistem experimental pentru simularea nodurilor de rețea PRIME, în vederea evaluării obiective a metodelor de optimizare propuse ulterior pentru transportul de date prin acest tip rețele și s-a dezvoltat un algoritm de segmentare a datelor la nivel de aplicație de contorizare. Algoritmul optimizează transportul fișierelor de dimensiuni mari prin rețelele PRIME, iar cazurile cele mai uzuale în care acesta poate fi folosite sunt transportul fișierelor necesare actualizărilor sau transportul pachetelor de date ce conțin curbele de sarcină ale fiecărui loc de consum. Algoritmul urmărește creșterea ratei de transmisii reușite pentru a reduce erorile de comunicație în zonele în care calitatea rețelei PRIME este puternic afectată de perturbații. Prin utilizarea segmentării datelor la nivel de aplicație folosind modelul propus, transferurile de date au devenit mai stabile, fără a mai fi nevoie de încercări de retransmitere. În plus, dispozitivele instalate în cadrul unei rețele afectate de interferențe au înregistrat o creștere notabilă a ratei de transmitere cu succes a curbelor de sarcină, precum și o creștere a ratelor de succes pentru actualizarea firmware-ului la distanță. Rezultatele au fost publicate în jurnale de specialitate, iar algoritmul și detaliile standului de simulare a nodurilor de rețea au făcut parte din conținutul articolelor "Web of Science".

Cercetările și analiza indicatorului de semnal RSSI emis de contoarele inteligente bazate pe tehnologii radio au stabilit că acesta poate fi utilizat pentru a estima distanța dintre nodurile rețelei.

S-a conceput și implementat experimental un sistem pentru analiza algoritmilor de localizare bazați pe parametrul de semnal, RSSI. Detaliile privind implementarea acestuia, precum și măsurătorile experimentale și observațiile finale au fost publicate într-un jurnal "Web of Science", iar standurile și metodele experimentale au dus la facilitarea susținerii unor lucrări de laborator din cadrul Universității Politehnica din Timișoara.

Validarea cercetării elaborate în urma prezentei teze de doctorat a fost dobândită prin publicarea unui număr de 10 lucrări științifice. Publicațiile privind domeniul de cercetare ales au fost prezentate la jurnale și conferințe internaționale de prestigiu, iar 4 lucrări, au fost indexate în baza de date "Web of Science".

6.1 Perspective de cercetare

Prin rezultatele obținute și prin analiza teoretică și practică a cercetărilor elaborate în cadrul tezei de doctorat s-au observat mai multe direcții și perspective de studiu în domeniul tezei doctorale.

O primă direcție de cercetare se îndreaptă spre extinderea sistemului de actualizare propus pentru o și mai bună reducere a impactului avut de acest proces asupra aplicațiilor de contorizare inteligentă. Se vor avea în vedere actualizări prin sisteme de operare desemnate echipamentelor integrate.

Un nou orizont de cercetare deosebit de complex îl constituie problema înglobării tehnologiilor de tip Internet of Things în cadrul rețelelor inteligente de distribuție. Actualizările de program ale contoarelor de energie ar putea beneficia de conexiunea de bandă largă a echipamentelor casnice conectate din proximitate prin standardizarea coexistenței celor două familii de echipamente.

Cercetările din teza doctorală au arătat, de asemenea, că există oportunitatea unor optimizări a transportului de date în funcție de topologia rețelei și de calitatea semnalului.

În final, securizarea și digitalizarea întregii rețele de distribuție este un domeniu vast, iar subiectul actualizării contoarelor inteligente de la distanță într-un mod robust și sigur necesită aprofundare în lucrări de cercetare viitoare.

Bibliografie selectivă

- [1] Alaton Clément, Tounquet Frédéric, Benchmarking smart metering deployment in the EU-28 with a focus on electricity, Publications Office of the European Union, 2020
- [2] Viega, John, and Gary R. McGraw. *Building secure software: How to avoid security problems the right way, portable documents*. Pearson Education, 2001.
- [3] Ghasempour, Alireza. "Internet of things in smart grid: Architecture, applications, services, key technologies, and challenges." *Inventions* 4.1 (2019): 22.
- [4] Ghasempour, Alireza. "Optimum number of aggregators based on power consumption, cost, and network lifetime in advanced metering infrastructure architecture for Smart Grid Internet of Things." *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2016.
- [5] Barai, Gouri R., Sridhar Krishnan, and Bala Venkatesh. "Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid-a review." *2015 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*. IEEE, 2015.
- [6] Moran, Brendan, et al. A Firmware Update Architecture for Internet of Things. RFC 9019. IETF, 2021.
- [7] Moran, Brendan, et al., A Concise Binary Object Representation (CBOR)-based Serialization Format for the Software Updates for Internet of Things (SUIT) Manifest, IETF, 2021
- [8] SR EN 50470-1:2007 EN 50470-1:2006 Echipamente de măsurare a energiei electrice (c.a.). Standard european, 2007
- [9] Kearney, A.T. Smart Metering in Romania, 3 September 2012. Romanian Authority for Energy Regulation: Bucharest, Romania, 2012.
- [10] Hoch, M. Comparison of PLC G3 and PRIME. In Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, IEEE, Udine, Italy, 3–6 April 2011; pp. 165–169.
- [11] Matanza, J.; Alexandres, S.; Rodriguez-Morcillo, C. Performance evaluation of two narrowband PLC systems: PRIME and G3. *Comput. Stand. Interfaces* 2013, 36, 198–208.
- [12] A Da Rocha Farias, L.; Monteiro, L.F.; Leme, M.O.; Stevan, S.L., Jr. Empirical Analysis of the Communication in Industrial Environment Based on G3-Power Line Communication and Influences from Electrical Grid. *Electronics* 2018, 7, 194.