

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ ȘI
ȘTIINȚA CALCULATOARELOR
Calculatoare și tehnologia informației

ing. **Ghenadie COROTINSCHI**

TEZA de DOCTORAT

Rezumat

Contribuții privind arhitecturile Internet of Things

Conducător științific:

Prof. univ. dr. ing. **Vasile-Gheorghică GĂITAN**

Suceava, 2020

Această lucrare a beneficiat de suport logistic și financiar prin proiectul *“BRAIN-IN Sisteme de automatizare inteligente pentru managementul clădirilor, producției și automatizări industriale”*, contract 138/27.09.2016, finanțat prin Programul Operațional Competitivitate, Axa prioritară 1-“Cercetare, dezvoltare tehnologică și inovare (CDI) în sprijinul competitivității economice și dezvoltării afacerilor”, Acțiunea 1.2.1. “Stimularea cererii întreprinderilor pentru inovare prin proiecte de CDI derulate de întreprinderi individual sau în parteneriat cu institutele de CD și universități, în scopul inovării de procese și de produse în sectoarele economice care prezintă potențial de creștere”.

Această lucrare a beneficiat de suport logistic prin proiectul *“Centrul integrat de cercetare, dezvoltare și inovare pentru Materiale Avansate, Nanotehnologii și Sisteme Distribuie de fabricație și control (MANSiD)”*, contract nr. 671/09.04.2015, cofinanțat din Fondul European de Dezvoltare Regională (FEDR) prin Programul Operațional Sectorial “Creșterea Competitivității Economice”

Doresc să adresez mulțumirile mele domnului Vasile Gheorghică GĂITAN pentru îndrumarea și susținerea oferită de-a lungul întregii perioade de formare prin studii doctorale.

Nu în ultimul rând doresc să mulțumesc familiei și soției mele Raluca, pentru răbdarea și înțelegerea de care au dat dovadă în momentele când am lipsit din sânul familiei pentru efectuarea cercetărilor pe teme abordate în această lucrare.

Cuprins rezumat

1. Obiectivele cercetării și structura lucrării de cercetare	6
a. Viziune.....	6
b. Obiective.....	7
c. Structura lucrării de cercetare	8
2. Rezumatul tezei de doctorat	10
3. Contribuții.....	19
a. Contribuții teoretice	19
b. Contribuții practice	19
c. Diseminarea rezultatelor	20
4. Bibliografie teză de doctorat.....	22

Cuprins teza de doctorat

Listă de figuri.....	Error! Bookmark not defined.
Listă de tabele	Error! Bookmark not defined.
Listă de abrevieri.....	Error! Bookmark not defined.
1. Viziune	Error! Bookmark not defined.
1.1. Obiectivele cercetării	Error! Bookmark not defined.
1.2. Structura lucrării de cercetare	Error! Bookmark not defined.
2. Introducere	Error! Bookmark not defined.
2.1. Definiția IoT.....	Error! Bookmark not defined.
2.2. Istoria IoT.....	Error! Bookmark not defined.
2.3. Viziunea actuală asupra IoT.....	Error! Bookmark not defined.
2.4. Direcțiile de cercetare și inovare în domeniul IoT.....	Error! Bookmark not defined.
3. IoT și tehnologiile viitoare.....	Error! Bookmark not defined.
3.1. Cloud computing-ul	Error! Bookmark not defined.
3.1.1. SaaS-Software ca serviciu.....	Error! Bookmark not defined.
3.1.2. PaaS-Platforma ca serviciu	Error! Bookmark not defined.
3.1.3. IaaS- Infrastructura ca serviciu	Error! Bookmark not defined.
3.1.4. BPaaS – Business-ul ca serviciu	Error! Bookmark not defined.
3.2. Fog Computing	Error! Bookmark not defined.
4. Evoluția în managementul datelor și a platformelor de date în universul IoT ...	Error! Bookmark not defined.
4.1. Hadoop.....	Error! Bookmark not defined.
4.2. NoSQL	Error! Bookmark not defined.
5. Rețelele de date și telecomunicațiile	Error! Bookmark not defined.
6. Convergența protocoalelor de comunicație în IoT.....	Error! Bookmark not defined.
6.1. Message Queuing Telemetry Transport(MQTT).....	Error! Bookmark not defined.
6.2. Constrained Application Protocol (CoAP).....	Error! Bookmark not defined.
6.3. Advanced Message Queuing Protocol (AMQP).....	Error! Bookmark not defined.
6.4. Data distribution Service(DDS).....	Error! Bookmark not defined.
6.5. Extensible Messaging and Presence Protocol(XMPP)	Error! Bookmark not defined.
7. Sisteme de operare utilizate în comunicațiile IoT.....	Error! Bookmark not defined.
7.1. FreeRTOS	Error! Bookmark not defined.
7.2. Contiki.....	Error! Bookmark not defined.
7.3. TinyOS.....	Error! Bookmark not defined.

7.4.	RIOT	Error! Bookmark not defined.
7.5.	Alte sisteme de operare și librării IoT.....	Error! Bookmark not defined.
8.	Platforme cloud de dezvoltare a aplicațiilor IoT.....	Error! Bookmark not defined.
9.	Contribuții privind arhitecturile Internet of Things	Error! Bookmark not defined.
9.1.	NET Core	Error! Bookmark not defined.
9.2.	Arhitectura IoT propusă.....	Error! Bookmark not defined.
9.2.1.	Sistem de analiză și predicție(SAP)	Error! Bookmark not defined.
9.2.2.	Componenta de acces la baze de date și istorice.....	Error! Bookmark not defined.
9.2.3.	Sistem de management al mesajelor	Error! Bookmark not defined.
9.2.4.	Aplicația de achiziție a datelor	Error! Bookmark not defined.
9.2.5.	Componentele de interconectare	Error! Bookmark not defined.
10.	Concluzii generale, contribuțiile teoretice și practice	Error! Bookmark not defined.
10.1.	Concluzii finale.....	Error! Bookmark not defined.
10.2.	Contribuții	Error! Bookmark not defined.
10.2.1.	Contribuții teoretice	Error! Bookmark not defined.
10.2.2.	Contribuții practice	Error! Bookmark not defined.
10.2.3.	Diseminarea rezultatelor	Error! Bookmark not defined.
11.	Bibliografie	Error! Bookmark not defined.
Anexe	Error! Bookmark not defined.
Anexa 1.	Cod sursă server istorice	Error! Bookmark not defined.
Anexa 2.	Teste de performanța server istorice	Error! Bookmark not defined.
Anexa 3.	Teste de performanță a serverelor MQTT.....	Error! Bookmark not defined.
Lucrări publicate	Error! Bookmark not defined.

1. Obiectivele cercetării și structura lucrării de cercetare

a. Viziune

În ultimii ani, progresul tehnologiilor informaționale la nivel hardware și software a dus la o dezvoltare accentuată a unor ramuri tehnologice noi. Cercetările referitoare la aplicabilitatea și implementarea de noi soluții, utilizând tehnologiile informaționale, au determinat, atât automatizarea multor sectoare economice, precum agricultura, transporturile sau rețelele de distribuție, cât și dezvoltarea unor sectoare noi cum ar fi automatizările casnice sau dispozitivele de monitorizare a stării de sănătate. Prin utilizarea dispozitivelor de comunicație wireless, care au un consum de energie scăzut, s-a început procesul de modernizare a tuturor sectoarelor economice, prin interconectarea acestora și extragerea de date pentru o gestionare mai eficientă a resurselor.

Utilizarea tehnologiilor în diferitele domenii economice a dus la apariția unor noi modele de business precum cel al ramurilor „smart” din cadrul fiecărui domeniu economic: „smart-agriculture”, „smart grid”, „smart logistic”, „smart home” sau „smart medical care”. Autorii lucrărilor [1], [2] utilizează dispozitive wireless și tehnologii de tip cloud pentru extinderea conceptului de „smart-agriculture”, prin monitorizarea parametrilor precum umiditatea, temperatura și chiar mișcarea insectelor și transmiterea unor alerte către fermieri. Modernizarea principalelor sisteme energetice și implementarea conceptului „smart-grid” este o prioritate la nivel de autorități centrale și regionale. În acest sens, Uniunea Europeană se implică activ în procesul de cercetare a principalelor probleme și găsirea unor soluții tehnologice eficiente în dezvoltarea unor „smart-grid”-uri [3]. Aceasta implică utilizarea unor rețele de alimentare cu energie monitorizate în permanență, interconectate cu o rețea de contori inteligenți ce indică în timp real consumul din rețea, precum și platforme de analiză a datelor pentru o predicție a consumurilor și executarea unor acțiuni preventive în cuplarea/decuplarea unor producători de energie sau decuplarea unor consumatori industriali în favoarea celor casnici în situații de criză. O altă abordare este cea a eficientizării procesului de generare a energiei, prin descentralizarea procesului de producție și utilizarea unor sisteme de cogenerare. Această abordare a fost propusă de către autorii [4], unde a fost implementată o soluție de automatizare a unui grup de cogenerare, interconectată cu sistemul de distribuție a energiei termice și electrice către utilizatorii finali, în acest caz fiind vorba de un campus universitar compus dintr-un ansamblu de 11 de cămine studentești.

Procesul de interconectare a dispozitivelor prin tehnologii de comunicație specifice și prin gestionarea integrată a dispozitivelor, a fost înglobat sub un nou concept denumit “*Internet of Things*”. Scopul principal ce se dorește a fi realizat prin intermediul IoT constă în asigurarea conectivității dispozitivelor prin interconectarea acestora la Internet. Acest concept tinde să evolueze rapid spre o nouă formă de interacțiune dintre dispozitive, spre o interconectare mai strânsă, denumită “*Internet of everything (IoE)*”. IoE este o extensie a IoT și dorește extinderea acestei paradigme prin includerea persoanelor, a proceselor și a bazelor de date în arhitecturile implementate și realizarea unei inter-conectivități mai strânse între aceste domenii prin facilitarea schimbului de informații. Principalul obiectiv este standardizarea procesului de comunicație dintre principalii actori ai universului IoT prin utilizarea unor protocoale de comunicație eficiente de tipul “*People-to-Machine*”(P2M) și “*Machine-to-Machine*”.

Domeniul IoT s-a diversificat rapid adaptându-se la principalele domenii de activitate economică, iar principalele categorii IoT cu interes major, atât din partea cercetătorilor, cât și a autorităților [5], [6] sunt următoarele:

- *Industrial Internet of Things (IIoT)* – cuprinde totalitatea sectoarelor industriale ce utilizează echipamente de producție interconectate și care pot schimba informații pentru a îmbunătăți procesul de producție prin detecția erorilor și optimizarea fluxurilor de producție.
- *Internet of Medical Things (IoMT)* – acest sector este dezvoltat prin înglobarea dispozitivelor IoT în cadrul procesului medical prin utilizarea unor dispozitive de monitorizare a stării de sănătate, precum și prin utilizarea telemedicinii pentru prevenția și diagnosticarea unor boli pentru categorii de persoane care nu au acces facil la astfel de servicii. Un astfel de sistem a fost descris în cadrul articolului [7], unde autorii prezintă un mod de utilizare a soluțiilor IoT pentru diagnosticarea problemelor cardiace prin folosirea unor dispozitive EKG distribuite către medicii de familie.
- *Smart Cities* – înglobează o serie de sisteme utilizate în rețelele de transport (electricitate, gaze sau apă), în utilități și infrastructura urbană, unde sunt create rețele de senzori și contori inteligenți care fac schimb de informații pentru a optimiza producția și distribuția în timp real.
- *Smart Homes* – reprezintă multitudinea sistemelor informatice din cadrul unor case și clădiri care include: dispozitivele inteligente, televizoarele, termostatele, sistemele de climatizare și sistemele de securitate. Toate acestea fac schimb de informații pentru a oferi un confort sporit utilizatorului final și pentru a îmbunătăți eficiența energetică a caselor/clădirilor.

Universul dispozitivelor IoT ce țin sectorul dispozitivelor *smart homes* a cunoscut o ascensiune extraordinară. Conform companiei de cercetare Gartner, sectorul automatizărilor de clădiri va avea un ritm de creștere de aproximativ 42% în 2020 [8]. În cazul clădirilor, sistemele de automatizare sunt omogene, de cele mai multe ori se utilizează echipamente de la același producător și a unui singur protocol de comunicație. În cazul utilizatorilor casnici, acest lucru nu este posibil datorită multitudinii de dispozitive și a diversității acestora. Unele dispozitive folosesc medii de comunicare wireless (Wi-Fi, Bluetooth, Z-Wave sau ZigBee), altele pot rula utilizând conexiuni cu fir și protocoale de comunicație precum Modbus sau KNX.

Comunicarea dintre diversele dispozitive lasă un mare gol în ceea ce privește integrarea acestora în cadrul unor platforme de management și gestiunea lor în mod unificat. Fiecare dezvoltator de dispozitive implementează propria platformă de gestiune a dispozitivelor sau, de cele mai multe ori, dezvoltă o aplicație mobilă ce poate fi utilizată pentru configurarea și monitorizarea dispozitivelor IoT.

b. Obiective

Scopul acestei lucrări îl constituie cercetarea modalității prin care se poate crea o platformă unificată de management a dispozitivelor IoT din cadrul locuințelor. În cadrul platformei se dorește definirea unor identități unice pentru fiecare dispozitiv care trebuie să poată fi configurat și utilizat în *modul offline* -conexiune ce va fi utilizată preponderent în cazul rețelelor cu circuit închis, cum ar fi casele de vacanță, unde conexiunea la internet nu este posibilă dar sunt necesare definirea unor automatizări și a unor scenarii. În *modul conexiune parțială*-sistemul va putea trimite unele alarme și se va realiza notificarea utilizatorilor în cazul unor situații de avarie sau depășiri de praguri la unele mărimi monitorizate și se va iniția trecerea casei în mod avarie, dacă este cazul. În *modul online*- casa are asigurată o conexiune la Internet în permanență și se pot efectua scenarii complexe utilizând o platformă cloud unificată, atât pentru comandă, supraveghere sau analize complexe asupra datelor colectate, cât și pentru evidențierea unor tipare în utilizarea sistemului și sugerarea unor îmbunătățiri.

Majoritatea platformelor de management a dispozitivelor IoT iau în calcul doar managementul dispozitivelor care au asigurată o conectivitate la Internet și care implementează protocoale de comunicație bazate pe evenimente, lăsând în spate rețelele de senzori ce nu au asigurată o conexiune în permanență la internet. Prezenta lucrare urmărește cercetarea și implementarea unui astfel de sistem ce poate fi utilizat și de către dispozitivele cu o conexiune parțială la internet, cum ar fi dispozitivele de achiziție a datelor cu conexiune GSM, prin utilizarea unor soluții de gateway-uri poziționate la marginea cloud-ului, problemă prezentată în cadrul articolului [9].

În universul soluțiilor cloud a apărut o diversificare a conceptului *Cloud computing*, aceasta evoluție include oferirea de soluții software prin intermediul platformelor cloud (SaaS - software as a Service), până la infrastructura în cloud (IaaS - Infrastructure as a Service) sau chiar facilitarea unor procese de afaceri în cloud (BPaaS – Business Process as a Service). Pentru a putea implementa o soluție care să se preteze pentru sistemele de tip smart home este necesară o analiză a principalelor tipuri de platforme cloud, a avantajelor și a dezavantajelor fiecărui tip de soluție pentru a putea construi o soluție cloud aplicabilă unui număr mare de automatizări de case și clădiri.

Componenta de stocare a datelor achiziționate de la dispozitivele IoT este foarte importantă în primul rând prin prisma trasabilității anumitor dispozitive. Valorile stocate pot fi folosite în definirea unor componente de vizualizare a istoricelor, dar și pentru diferiți algoritmi de analiză și predicție. În contextul diversificării mediilor de stocare (stocare în sistem de fișiere, soluții de servere de baze de date sau stocare în cloud), dar și a formatului datelor stocate (conținut media, înregistrări de tip text sau date de la senzori) este necesară o analiză a evoluției platformelor precum și a principalelor tipuri de servere de baze de date relaționate (SQL) sau ne-relaționate (NoSQL).

Lucrarea va face o analiză și a principalelor protocoale de comunicație utilizate în cadrul universului IoT. Este necesară o analiză a arhitecturilor existente, a celor bazate pe *magistrale de date* precum și celor bazate pe *dispatcher (broker)*. Sunt necesare analize ale avantajelor platformelor atât atunci când se utilizează o comunicație bazată pe *mesaje*, cât și atunci când se utilizează *fluxuri de date*. O importanță deosebită o au și actorii implicați în procesul de comunicație, unele protocoale de comunicație sunt mai performante atunci când se comunică între servere, fapt care implică un nivel de securitate mai ridicat al transportului de date (XMPP, AMQP). Aceste protocoale de comunicație vin cu un cost mai mare la nivelul consumului de bandă de internet utilizată, altele vor fi mai avantajoase în comunicațiile dintre dispozitivele de achiziție de date și gateway-uri prin utilizarea unor mesaje cu încărcătura mică (MQTT).

În cadrul procesului de implementare a arhitecturii IoT se va cerceta posibilitatea definirii și implementării unei soluții care să poată fi utilizată, atât pe dispozitive cu consum redus de energie, precum RaspberryPI cât și pe servere dedicate în cazul unui sistem cu un număr mare de dispozitive IoT. De asemenea, se va cerceta posibilitatea mutării acestei arhitecturi în cloud.

În cadrul sub-capitolului următor va fi definită structura lucrării de cercetare și principalele teme abordate la nivel de capitol.

c. Structura lucrării de cercetare

În cadrul prezentei lucrări s-au sintetizat principalele caracteristici ale domeniului IoT. Acest domeniu este unul “fierbinte” prin prisma implicării a multor dezvoltatori de echipamente și soluții IT.

În cadrul **capitolului 2** se va prezenta tematica conceptului IoT și caracteristicile definiției ale unui dispozitiv sau platformă, cu ajutorul cărora acestea pot fi catalogate ca fiind dispozitive

IoT. Vom studia începuturile acestui domeniu, viziunea actuală dar și direcțiile viitoare de cercetare și inovare.

Capitolul 3 prezintă stadiul actual al conceptului IoT, care este cercetat prin prisma eforturilor realizate până în prezent în implementarea *Cloud Computing*-ului și a principalelor tipuri de cloud-computing (SaaS, PaaS, IaaS și BPass), dar și a beneficiilor ce pot fi aduse de către platformele cloud dispozitivelor IoT. Este prezentat, de asemenea, un nou concept, cel al *micro-cloud*-urilor sau *fog-computing*, unde sunt transferate o parte din responsabilitățile platformelor cloud către dispozitivele de tip gateway de la marginea cloud-ului.

Pentru o dezvoltare rapidă și eficientă a IoT sunt necesare platforme și servere de stocare a datelor eficiente, în contextul unor tipuri distincte de fluxuri de date achiziționate. **Capitolul 4** oferă o perspectivă de ansamblu a principalelor sisteme de baze de date ce pot fi utilizate pentru stocarea valorilor achiziționate de la dispozitivele IoT.

Capitolul 5 oferă o analiză a tipurilor de rețele de comunicație și a protocoalelor ce se utilizează în funcție de fiecare topologie de rețea. Aceste rețele vor fi analizate prin prisma ariei geografice pe care o cuprind (WPAN, WLAN, WMAN sau WWAN), a vitezelor de comunicație și a tipurilor de rețea (*mesh*, *star* sau *ring*).

Orice sistem informațional are nevoie de un protocol de comunicație adaptat cerințelor legate de particularitățile dispozitivelor implicate în comunicație. În cadrul **capitolului 6** vom analiza convergența protocoalelor de comunicație în domeniul IoT. Unele dintre aceste protocoale se vor folosi pentru comunicațiile dintre servere, deoarece este necesară o securitate mai mare a datelor transmise. Aceste protocoale au un consum relativ mare de lățime de bandă utilizată, altele sunt mai eficiente în cazul dispozitivelor IoT ce folosesc surse de energie pe bază de baterii și au nevoie de protocoale de comunicație ce nu implică un consum energetic mărit.

Majoritatea dispozitivele IoT folosesc un sistem de operare de timp real (RTOS- Real Time Operating System) care, de cele mai multe ori, are la bază Linux. În **capitolul 7** sunt sintetizate principalele caracteristici ale sistemelor de operare grupate pe mai multe categorii: *sistemele open-source*, *sistemele de operare proprietare* sau *librăriile software și middleware-uri*.

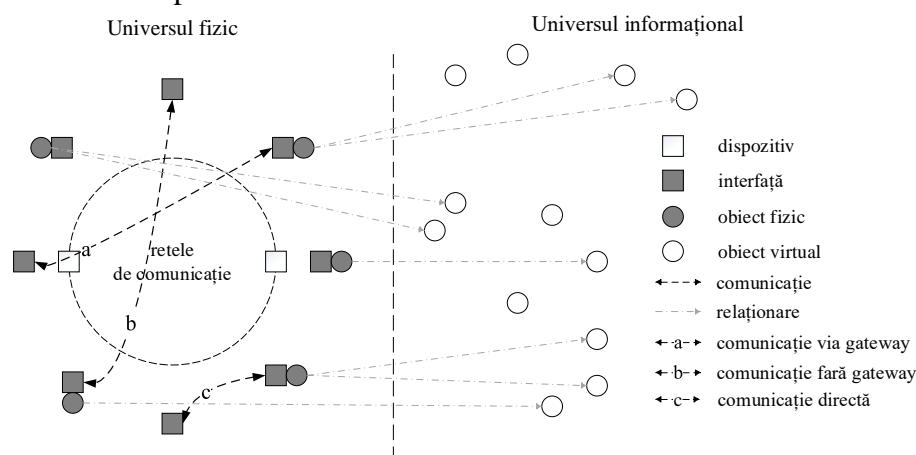
În cadrul **capitolului 8** am făcut o analiză a principalelor platforme cloud de tip IoT cât și o clasificare a acestora pe diferite categorii *vizualizarea datelor*, *modelul de cloud* sau *interfețele de programare API*.

Capitolul 9 reprezintă contribuțiile proprii referitoare la arhitectura IoT propusă, care include: *sistemul de analiză și predicție*, *componenta de acces la baza de date*, *sistemul de management al mesajelor*, *componenta de achiziție a datelor* și *componentele de interconectare*. Sunt oferite studii comparative legate de alegerea fiecărei componente și tehnologiile utilizate.

Concluziile sunt prezentate în cadrul **capitolului 10** împreună cu contribuțiile teoretice și practice cât și diseminarea rezultatelor în reviste de specialitate.

2. Rezumatul tezei de doctorat

În cadrul prezentei lucrări s-au sintetizat principalele caracteristici ale domeniului IoT. Acest domeniu este unul “fierbinte” prin prisma implicării a multor dezvoltatori de echipamente și soluții IT. **Capitolul 1** reprezintă viziunea de ansamblu asupra lucrării de cercetare cât și principalele teme de cercetare. **Capitolul 2** oferă o vedere de ansamblu a terminologiei domeniului IoT, precum și a principalelor caracteristici definitorii ale unui sistem informațional care poate fi încadrat în universul IoT conform ITU (International Telecommunication Union). Este prezentată, de asemenea, o perspectivă de ansamblu asupra tipurilor de obiecte ce pot fi definite în cadrul universului IoT.

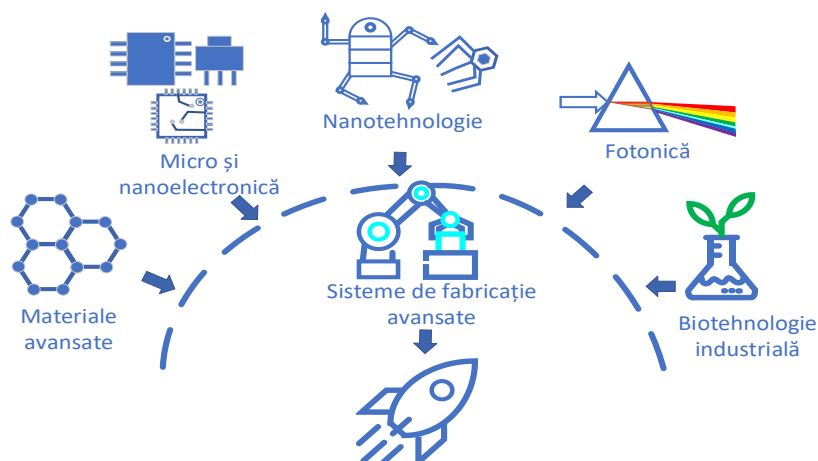


Figură 2-1 Perspectivă de ansamblu a obiectelor IoT (Sursa: ITU-T)

S-au definit tipurile de dispozitive în funcție de poziția lor în lanțul de achiziție și analiză a datelor, acestea fiind grupate în: *dispozitive utilizate în transportul datelor*, *dispozitive de achiziție de date*, *dispozitive de percepție*, *dispozitive de acționare* și *dispozitive cu uz general*.

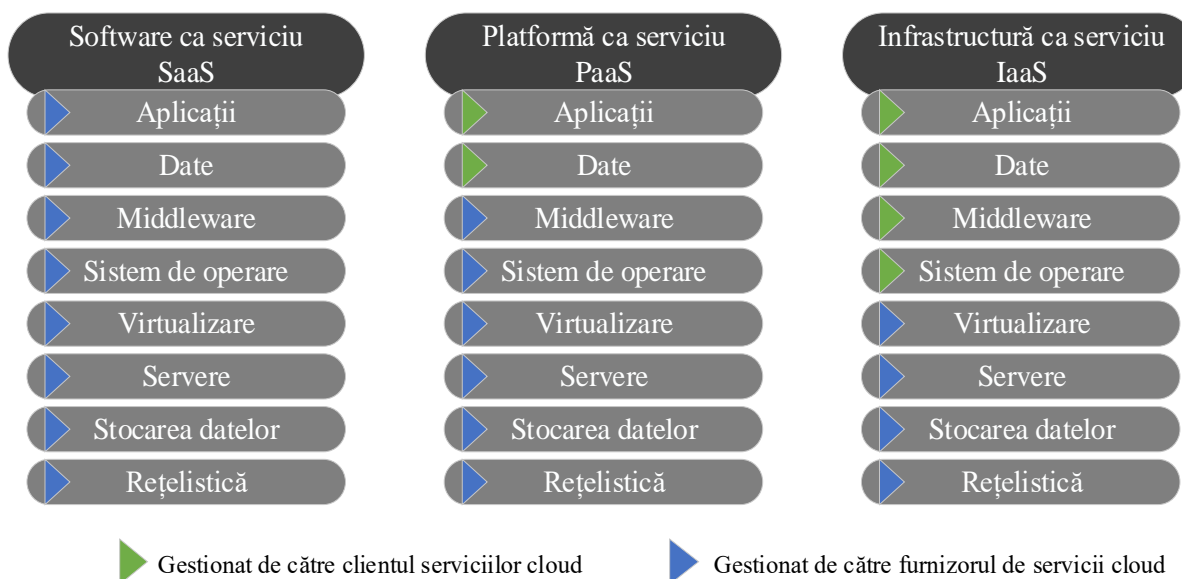
În cadrul aceluiași capitol s-a realizat o scurtă descriere cronologică a principalelor evenimente care au dus la dezvoltarea acestui nou domeniu, cum ar fi, dezvoltarea tehnologiei RFID din timpul celui de-al doilea război mondial. Dezvoltarea IoT nu ar fi fost posibilă fără avansul considerabil al tehnologiilor informaționale, datorat în mare parte dezvoltării rețelei de interconectare dintre diversele mașini care astăzi poartă denumirea de Internet, și care au avut la bază cercetările efectuate de către Charles S. Kline pentru transmisia mesajelor prin intermediul rețelei ARPANET. Prezentarea istoriei IoT continuă cu menționarea părintelui domeniului IoT, Kevin Ashton, de la MIT Auto-ID Center, cel care a folosit pentru prima dată termenul Internet Of Things în anul 1999. Marile companii și instituții au început să dezvolte tehnologii și protocoale de comunicație compatibile cu domeniul IoT.

Viziunea actuală asupra acestui domeniu este sintetizată în cadrul sub-capitolului 1.3, iar o serie de rapoarte ale companiilor Ericsson, Cisco sau Intel relevă importanța acestui domeniu și evidențiază tendințele de creștere a numărului de dispozitive hardware. Implicarea instituțiilor publice precum Uniunea Europeană, prin stabilirea unor comisii de cercetare în domeniul IoT, duce la o direcționare a eforturilor de cercetare în domeniul IoT către unele domenii esențiale precum *sistemele de fabricație avansate*, *biotehnologia industrială*, *materiale avansate*, *dispozitive micro și nano-electronice*, *nanotehnologia* sau *fotonica*.



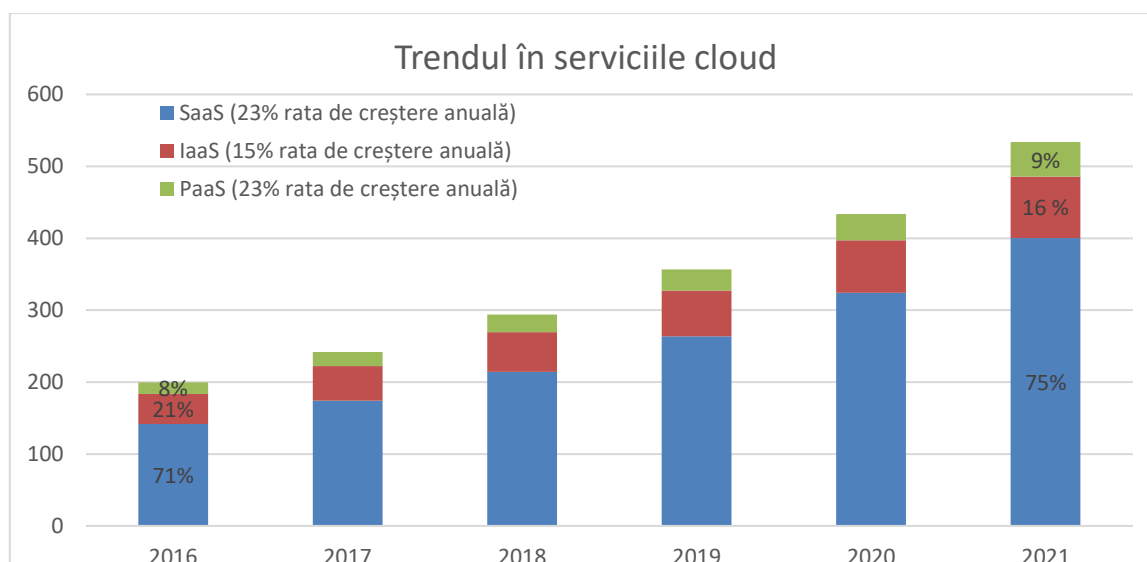
Figură 2-2 Cele 6 tehnologii inovative conform KET

În cadrul **capitolului 3** sunt sintetizate principalele tehnologii de dezvoltare a IoT cum ar fi *cloud computing* precum și eforturile ce au fost realizate în implementarea acestui concept de către companiile inovatoare precum Amazon. De asemenea, au fost prezentate avansurile tehnologice ce au permis dezvoltarea unor întregi ramuri ale IoT, cum ar fi cele ale serviciilor în cloud. Aceste platforme pornesc de la a oferi clienților servicii precum *software-as-a-service*, *platform-as-a-service*, *infrastructure-as-a-service* sau *business-as-a-service*.



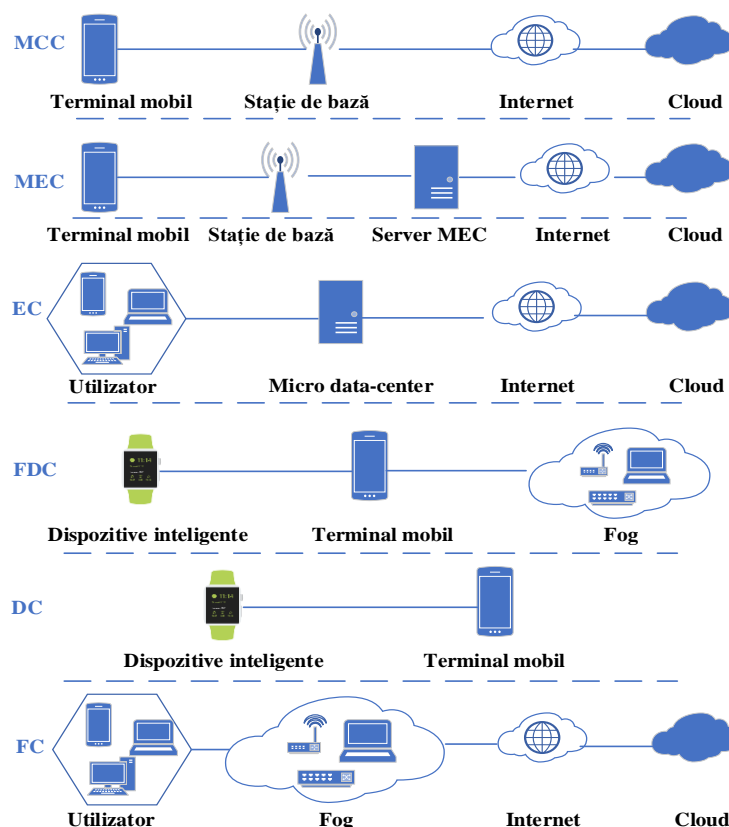
Figură 2-3 Evoluția serviciilor din cloud

Au fost sintetizate, atât principalele caracteristici ale acestor noi servicii, cât și tendințele actuale și prognozele referitoare la evoluția acestor noi sectoare.



Figură 2-4 Figură 3 3 Trendul în serviciile cloud

În cadrul acestui capitol, o atenție deosebită o acordăm unui nou concept, *fog computing-ul*, concept care încearcă să descentralizeze o parte din operațiile de analiză și procesare a datelor prin mutarea algoritmilor de procesare și stocare a datelor către marginea cloud-ului. Tehnologia Fog Computing-ului rezolvă problemele legate de congestia și întârzierile din rețea. Conceptul de "*Fog Computing*" sau "*fogging*" asigură putere de calcul, spațiu de stocare a datelor și servicii de rețea la marginea rețelei. De asemenea, asigură o platformă inteligentă de management a infrastructurii de aplicații IoT în timp real și distribuite sau a aplicațiilor în curs de dezvoltare. S-au identificat mai multe paradigme, pe lângă cel de *Fog Computing*(FC): *Mobile Cloud Computing*(MCC), *Mobile-Edge Computing* (MEC), *Edge Computing*(EC), *Dew Computing*(DC) și *Fog-Dew Computing*(FDC).



Figură 2-5 Tipologii de micro cloud-uri

Capitolul 4 oferă o analiză a evoluției managementului datelor și a platformelor de date în cadrul universului IoT. Sunt analizate principalele caracteristici referitoare, atât la bazele de date tradiționale (SQL), cât și a noilor tehnologii precum bazele de date ne-relaționale (NoSQL). Este oferită o perspectivă de ansamblu a principalelor soluții de stocare a fluxurilor mari de date cum ar fi structurile de fișiere de tip Hadoop, iar cercetările companiilor Forester sau Gartner evidențiază principalele soluții software existente. De asemenea, în cadrul acestui capitol au fost sintetizate principalele caracteristici ale sistemelor de stocare a datelor în baze de date NoSQL.

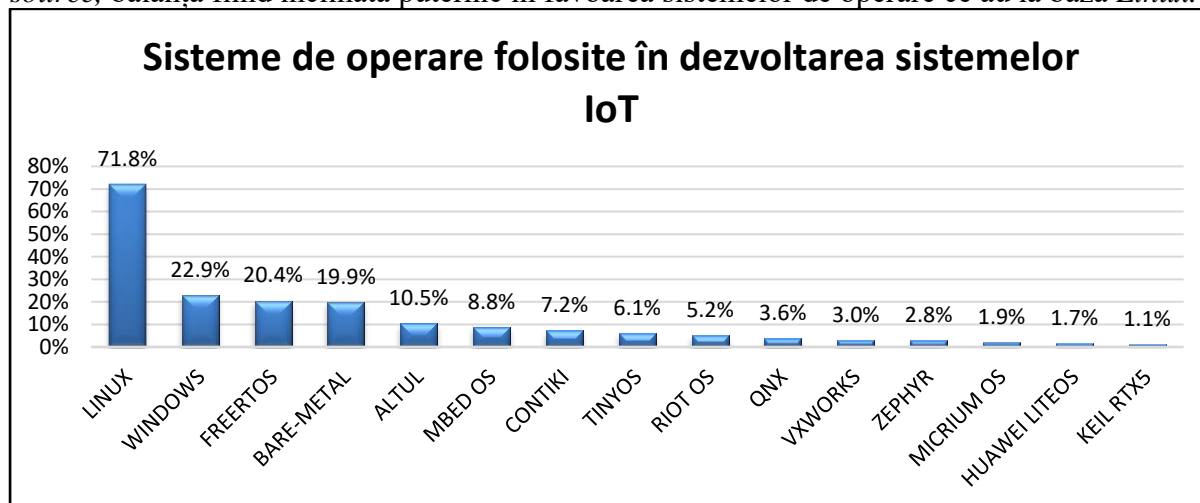
Evoluția domeniului IoT nu ar fi fost posibilă fără avansul tehnologic semnificativ al rețelelor de date și comunicații. Aceste rețele, precum și protocoalele de comunicație care au făcut posibilă dezvoltarea domeniului IoT, sunt sintetizate în cadrul **capitolului 5**. Sunt evidențiate caracteristicile definitorii ale fiecărui protocol în parte și aplicabilitatea acestor protocoale pentru diferitele tipuri de rețele wireless: *WPAN*, *WLAN*, *WMAN* și *WWAN*.

Datorită diferitelor topologii de rețea ce pot face parte din universul IoT, securitatea trebuie să fie un capitol esențial în definirea oricărei soluții de tip IoT, iar unele dintre problemele cu care se confruntă orice platformă sau software care dorește integrarea unor echipamente și soluții IoT este securitatea datelor, păstrarea intimității utilizatorilor finali și asigurarea unor medii de comunicație securizate.

În cadrul **capitolului 6** s-au cercetat principalele protocoale de comunicație folosite de către dispozitivele IoT. O parte dintre aceste protocoale, precum MQTT, au obținut un avans considerabil în ultimii ani datorită ușurinței de a fi implementate pe dispozitive ce dispun de resurse limitate de procesare sau unde este necesar un management eficient al surselor de energie, cum ar fi dispozitivele ce rulează cu baterii. Alte protocoale, XMPP sau AMQP, sunt

folosite cu succes în comunicațiile dintre servere datorită existenței unor componente de securitate implementate nativ în nucleul protocolului.

Capitolul 7 vine cu o analiză detaliată a principalelor sisteme de operare folosite de către dispozitivele și gateway-urile IoT. Studiul și cercetările precum cele ale companiei Eclipse, relevă faptul că o mare parte din dezvoltatorii de soluții IoT folosesc sisteme de operare de tip *open-source*, balanța fiind înclinată puternic în favoarea sistemelor de operare ce au la bază *Linux*.



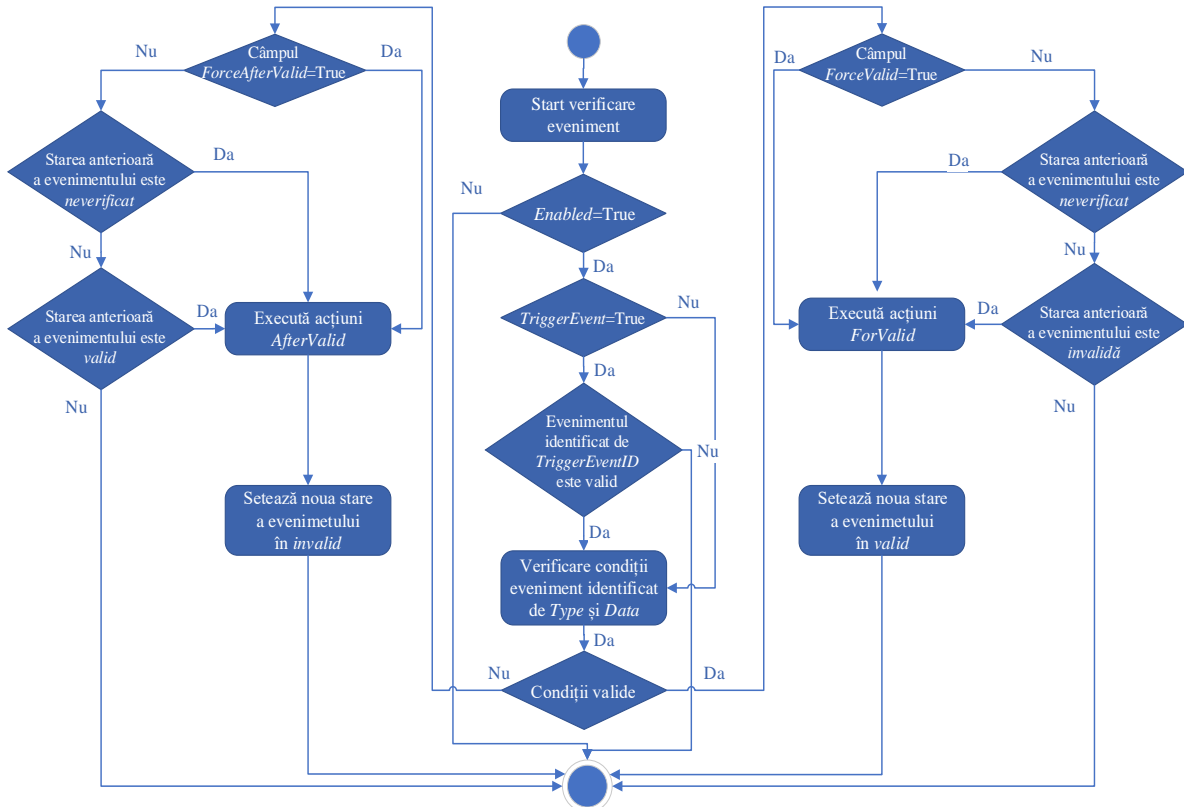
Figură 2-6 Sisteme de operare IoT

Sistemele de operare au fost grupate în 3 categorii mari: *sisteme open-source*, *sisteme de operare proprietare* și *librării software și middleware-uri*. În cadrul acestui capitol au fost cercetate principalele sisteme de operare de tip RTOS (Real Time Operating System): FreeRTOS, Contiki, TinyOS și RIOT.

Principalele platforme de dezvoltare a aplicațiilor cloud au fost analizate în cadrul **capitolului 8**. Aspectele cheie luate în considerare la analiza principalelor platforme au fost: *posibilitatea înregistrării datelor în timp real*, *vizualizarea datelor*, *modelul de tip cloud*, *analiza datelor*, *configurarea dispozitivelor*, *interfețele de programare API* și *costurile de utilizare*.

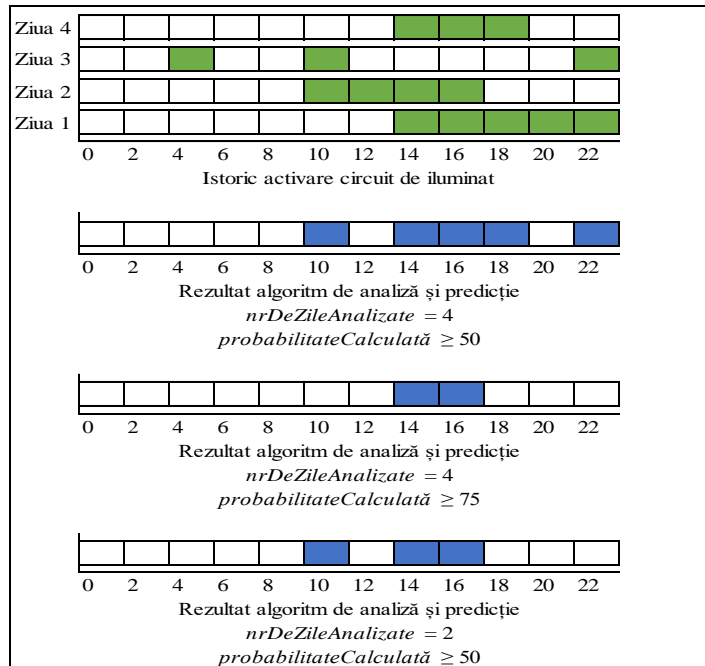
Capitolul 9 descrie arhitectura IoT propusă și implementată pe baza cercetărilor ce au stat la baza acestei lucrări. În implementarea arhitecturii s-a folosit platforma de dezvoltare .NET Core. Această platformă suportă mai multe sisteme de operare: Microsoft, macOS și Linux și poate fi folosită pentru dispozitive, platforme cloud sau dispozitive embedded/IoT. Arhitectura propusă a fost dezvoltată pe sub-componente: *sistemul de analiză și predicție*, *aplicația web*, *serverul de baze de date*, *serverul de management al mesajelor* și *sistemul de achiziție a datelor*.

Sistemul de analiză și predicție oferă un mod unificat de definire a unor rutine de program denumite evenimente, și a unor acțiuni atunci când sunt întrunite condițiile de validare ale evenimentului. Sunt, de asemenea, descriși **principalii algoritmi ai procedurii de verificare a evenimentelor** precum și un **algoritm de auto-învățare** pe baza identificării anumitor acțiuni ale utilizatorului.



Figură 2-7 Diagrama verificării evenimentelor

Stocarea datelor este realizată de un sistem hibrid ce utilizează, atât baze de date relaționale, pentru setările de sistem, cât și o componentă de acces la baze de date NoSQL, pentru înregistrările de istorice. Ambele componente, atât de acces la bazele de date relaționale, cât și cele NoSQL, sunt accesate cu ajutorul ORM-urilor pentru a asigura o compatibilitate cu cât mai multe servere de baze de date.



Figură 2-8 Rezultate algoritm de analiză și predicție

Arhitecturile IoT sunt într-o continuă schimbare, din acest motiv, o atenție deosebită a fost acordată *politicii de versionare a bazelor de date* prin utilizarea fișierelor de migrări. Principalii algoritmi ai componente de acces la baza de date au fost descriși utilizând diagrame UML, astfel încât acești algoritmi să poată fi implementați și în cadrul altor limbaje de programare (în afara de C#). Sistemul de stocare al istoricelor poate fi folosit și de către alte dispozitive și platforme datorită implementării unei arhitecturi de tip REST, cu interfețe de testare ce utilizează librăria Swagger. *Algoritmii adaptivi de selecție a datelor stocate în cadrul serverului de istorice*, ce fac posibilă returnarea unui set restrâns de date în funcție de perioada selectată, ajută la utilizarea datelor de istorice și pe dispozitive cu putere de procesare scăzută. Aceste dispozitive vor avea un set de valori restrânse în funcție de perioada de timp selectată, iar subsistemele ce trebuie să afișeze grafic valorile parametrilor vor oferi o experiență mai plăcută utilizatorului final (graficele vor încărca datele mult mai repede iar la operațiile de mărire sau micșorare a perioadei vizualizate se va efectua un nou apel de selecție a înregistrărilor de istorice).

Perioadă	Interogare colecție neindexată(ms)			Interogare colecție indexată(ms)		
	Interogări pe baza de date	API REST	API REST cu algoritm adaptiv	Interogări pe baza de date	API REST	API REST cu algoritm adaptiv
> 30 zile (2 luni)	11968	114564.1	12069.2	103.7	106774.1	263.6
≤ 30 zile	12377.6	72712.5	12112.6	98.3	68821.3	352.3
≤ 24 ore	11848	13987.8	12128.4	91.5	1419.1	367.2
≤ 6 ore	11688.5	11805.9	11951.2	92.2	832.5	247.8
≤ 1 oră	11914.2	11510.9	11813.4	90.8	260	186.2

Figură 2-9 Timpuri de execuție cu algoritm adaptiv și fără

O analiză detaliată a fost făcută asupra principalelor servere de tip MQTT pentru stabilirea celei mai bune soluții în implementarea unui *sistem de management al mesajelor*. S-a implementat o arhitectură client-server ce are ca scop transmiterea și recepția unui fișier împărțit în fișiere de 256, 512 sau 1024 octeți. S-au cuantificat următorilor timpi: *total time(TT)*, *time for arrival of the first package(TAFP)* și *broker sending time(BST)*. Pe baza datelor furnizate de testele efectuate s-a decis folosirea brokerului de mesaje care a avut cei mai buni timpi în cadrul procedurii de actualizare a datelor.

Timp (ms)	Mosquitto (Bytes)			ActiveMQ (bytes)			HiveMQ (bytes)		
	256	512	1024	256	512	1024	256	512	1024
TT	3637	1123	401	3400	919	350	10749	4587	2090
TAFP	426	220	126	1187	341	288	1835	268	475
BST	3210	903	273	2211	578	62	8915	4321	1615

Figură 2-10 Timpii medii de transmisie a pachetelor

Un subcapitol distinct îl reprezintă definirea *sistemului de achiziție a datelor* și care implementează componentele de tip *scanner*. Sunt descrise *diagramele de stări* utilizate în procesarea datelor prin metoda de tip *pooling* și prin cea de tip *event*. Un aspect esențial îl constituie componenta de actualizare a datelor din memorie de tip cache cât și ce persistentă, iar algoritmul utilizat este descris utilizând diagrame UML.

Componenta de interconectare a sistemului de achiziție a datelor este formată din modulul de interfațare de tip REST care utilizează un mod standardizat de definire a metodelor de acces la componentele sistemului și utilizează librăria Swagger pentru a integra cu ușurință sistemul propus în cadrul altor sisteme IoT.

Sistemul dispune de o *componentă de interconectare prin mesaje* de tip *websocket*, care duce la o *comunicație bidirecțională pe bază de evenimente*. De asemenea, s-au explicat metodele tradiționale de actualizare a datelor folosind apeluri de funcții de tip AJAX prin metodele de tip *setInterval* și *setTimeout*. Implementarea *componentei de securitate* a fost descrisă prin exemple practice utilizând, atât comunicațiile nesecurizate cât și cele securizate.

În dezvoltarea unei aplicații sau a unei arhitecturi IoT, pe lângă componenta de performanță, cel mai important aspect îl constituie capacitatea sistemului de a putea fi adaptat, reconfigurat și scalat pe parcurs ce platforma se dezvoltă și capătă maturitate. Tehnologiile software evoluează și capătă maturitate, iar unele sunt abandonate din lipsa de suport sau nu sunt open-source, ceea ce limitează capacitatea de implicare a diverselor instituții și a persoanelor în dezvoltarea și îmbunătățirea acestora.

Dintre *tehnologiile de accesare a bazelor de date* bazate pe maparea obiectelor (ORM-object-relational mapping), de un real succes se bucură .NET Entity Framework (EF). În comparație cu ADO.NET, platforma Entity Framework oferă posibilitatea scrierii codului sursă ce va *produce automat obiecte mapate pe baza de date*, va menține o *trasabilitate a modificărilor* și va *simplifica procesul de actualizare a bazei de date cu ajutorul migrațiilor automate*. Deoarece maparea obiectelor pe baza de date este efectuată în cod, *se realizează o izolare a aplicației de baza de date*. Spre diferență de ADO.NET, interogările în Entity Framework nu sunt specifice unei anumite baze de date. Interogările sunt scrise în LINQ sau Entity SQL și sunt translate la rulare de către providerii de baze de date în sintaxă SQL, specifică fiecărei baze de date.

Diferența dintre EF și alte ORM-uri, cum ar fi nHibernate, este faptul că avem o izolare între procesul de definire a obiectelor și cel de mapare a bazei de date. De asemenea, EF oferă o flexibilitate mărită în maparea bazei de date utilizând FluenAPI.

În dezvoltarea oricăror aplicații și platforme, un factor esențial îl constituie timpul de dezvoltare și portarea a aplicațiilor pe diferite sisteme de operare. Prin utilizarea platformei *.NET Core se asigură dezvoltarea unei singure aplicații pentru toate sistemele de operare*. Această platformă oferă suport pentru dispozitive și servere ce rulează sistemele de operare moderne Windows/Linux/Mac, dar și pe dispozitive specifice mediului IoT cum ar fi Raspberry PI.

Conceptul IoT a adus o nouă viziune și o nouă perspectivă a utilizării tehnologiei în varii domenii precum sănătate, alimentație, transport sau energie. Acest concept impune achiziționarea datelor de la diverse echipamente electronice și integrarea lor în cadrul fluxurilor informaționale. *Extragerea informațiilor esențiale din cadrul fluxurilor de date precum și procesarea acestor date este esențială pentru îmbunătățirea calității serviciilor oferite de produsele și serviciile IoT*. În vederea realizării unui concept IoT care să funcționeze eficient, atât la nivel de comunicație, cât și la nivel de interpretare a rezultatelor, este necesară *definirea și implementarea unor sisteme eficiente de achiziționare a datelor, transportul acestora la destinație și interpretarea rezultatelor*. Dispozitivele IoT sunt dispozitive cu unele constrângeri legate de memorie, putere de procesare și resursele energetice. În aceste condiții

se impune utilizarea unor norme și standarde folosite în dezvoltarea și implementarea dispozitivelor IoT, astfel încât managementul dispozitivelor să fie unul eficient.

Dezvoltarea sistemelor IoT impune și dezvoltarea unor protocoale de comunicație eficiente, la nivel de comunicație M2M (Machine to Machine). Dezvoltarea unor **protocoale standardizate** implică, de asemenea, opțiuni „plug-and-play” pentru dispozitivele IoT. Aceste dispozitive trebuie să aibă **capacitatea de a se interoga unele pe altele**, de a **înțelege conținutul datelor transmise**, de a putea **interpreta aceste date** și în același timp să ofere o **eficientizare maximă a resurselor** (putere de procesare, memorie ocupată, consum redus de energie). De asemenea, dispozitivele IoT trebuie să fie **capabile să funcționeze în cadrul rețelelor existente** și să permită dezvoltarea unor rețele de senzori și dispozitive moderne, utilizând ultimele realizări tehnologice.

Adoptarea noilor tehnologii și implementarea acestora de către producătorii de dispozitive electronice au un trend ascendent, însă gradul de adoptare nu este unul foarte ridicat. De cele mai multe ori se așteaptă atingerea unui grad de maturitate a acestor protocoale iar producătorii de echipamente electronice folosesc standarde și interfețe de comunicare simplificate și cu o maturitate în dezvoltare cum ar fi ModBUS, KNX sau CAN. Managementul acestor tipuri de dispozitive este anevoios iar configurarea acestora în cadrul unei aplicații de achiziție de date implica configurarea a unor parametri specifici respectivului protocol în cadrul aplicației de achiziție a datelor (în cazul ModBUS, configurarea *inputRegister*, *holdingRegisters*,...).

3. Contribuții

a. Contribuții teoretice

- În prezenta lucrare s-a realizat descrierea conceptului IoT, de la inventarea aparatelor radar, dezvoltarea dispozitivelor RFID, până la prezentarea viziunii actuale asupra acestui domeniu, precum și direcțiile viitoare de cercetare și inovare.
- Identificarea tipurilor de platforme cloud și particularitățile acestora
- Sinteza principalelor sisteme de operare de timp real (RTOS) utilizate de către dispozitivele IoT.
- Organizarea ierarhică a componentelor algoritmului de achiziție și predicție sub formă de *Programe, Evenimente și Acțiuni*.
- Definierea unui sistem de acțiuni pe bază de stimuli externi (intrări/ ieșiri analogice sau digitale)
- Definierea unui algoritm de analiză și predicție a acțiunilor pe baza valorilor achiziționate de la componenta de actualizare a datelor și a înregistrărilor de istorice.
- Cercetarea modului de funcționare a sistemelor de baze de date și sugerarea unui mod de funcționare hibrid, cu setările de sistem stocate în cadrul bazelor de date relaționale(SQL) și înregistrările de istorice stocate în cadrul bazelor de date de tip NoSQL.
- Definierea unui mod de utilizare uniform a bazelor de date, utilizând ORM (Object-Relational Mapping).
- Definierea unui algoritm adaptiv de selecție a datelor din baza de date de istorice utilizând scripturi de selecție adaptive, în funcție de data de start și cea de stop.
- Cercetări referitoare la definirea unui sistem de transmitere a datelor eficient, atât în cadrul comunicațiilor dintre dispozitivele IoT, cât și dintre diferitele servere de automatizare și platformele cloud. Diseminarea rezultatelor acestei lucrări a fost efectuată în cadrul articolului [9].
- Definierea unui algoritm de actualizare a datelor sub forma unei componente denumite *Scanner* și posibilitatea utilizării acestuia pentru protocoalele de tip *pooling* sau de tip *event*.
- Definierea unei componente generice de stocare a diverselor tipuri de module hardware, precum și cercetarea posibilității utilizării protocolului IEEE 1451 pentru definirea fișelor de date electronice (TEDS) [51].
- Cercetarea modului de utilizare a arhitecturii IoT propuse în cazul automatizării de interfațare dintre instalațiile industriale și cele casnice, rezultate diseminate în cadrul articolului [4].
- Cercetarea posibilității utilizării platformelor Cloud pentru a oferi soluții medicale de tip eHealth [7].

b. Contribuții practice

- Implementarea acțiunilor cu stimuli de declanșare pe baza mărimilor fizice (intrări digitale, ieșiri digitale, intrări analogice sau ieșiri analogice), precum și declanșarea acțiunilor pe baza variabilelor interne din cadrul sistemului, definite *GlobalVariables*.
- Studiul comparativ legat de timpii de execuție a interogărilor din cadrul serverului de istorice pentru diferite perioade de timp (1 ora, 6 ore, 24 ore, 30 zile sau mai mult de 30 zile).

- Studii comparative despre performanțele serverelor MQTT pentru transmisii de pachete de date de dimensiuni fixe (256, 512 sau 1024 octeți). Implementarea unei aplicații de tip server-client pentru testarea performanțelor serverelor MQTT.
- Implementarea unei componente de interconectare ce utilizează arhitecturi REST sau websocket.
- Implementarea unei aplicații server-client de achiziție de date ce utilizează arhitectura propusă pentru sisteme de automatizare de tip SCADA (grup de cogenerare a energiei termice și electrice), aplicație interconectată cu un sistem de distribuție a agentului termic către 11 cămine studențești, soluție descrisă în cadrul articolului [4].
- Implementarea unui sistem de achiziție a datelor și extinderea conceptului *Cloud-computing* către marginea cloud-ului prin achiziția datelor de la un număr de 54 de sisteme distribuite pe o arie geografică vastă, soluție descrisă în cadrul articolului [9].
- Soluția IoT de tip SmartHome a fost implementată în cadrul unui sistem rezidențial compus din 6 clădiri, a câte 11 nivele și 6 apartamente per etaj, unde s-au utilizat module de interfațare de tip ModBus și KNX. S-a realizat implementarea unei componente de achiziție a datelor ce respectă modelul descris în cadrul capitolului **Error! Reference source not found.** pentru achiziția de date de la un sistem de control acces, care are un protocol proprietar

c. Diseminarea rezultatelor

Contribuțiile proprii care au rezultat în urma cercetărilor din cadrul prezentei lucrări au fost publicate în volumele unor conferințe internaționale de specialitate, după cum urmează:

<i>Publicații în volumele unor conferințe internaționale indexate</i>	
1	<p>G. Corotinschi and V. G. Găitan, "Smart cities become possible thanks to the Internet of Things," <i>2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)</i>", Cheile Gradistei, 2015, pp. 291-296. doi: 10.1109/ICSTCC.2015.7321308 http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7321308&isnumber=7321255</p>
2	<p>G. Corotinschi and V. G. Găitan, "<i>The development of IoT applications using old hardware equipment and virtual TEDS</i>," 2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2016, pp. 264-268. doi: 10.1109/DAAS.2016.7492584 http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7492584&isnumber=7492533</p>
3	<p>G. Corotinschi and V. G. Găitan, "<i>The use of IoT technologies for providing high-quality medical services</i>," 2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), Sinaia, 2017, pp. 285-290. doi: 10.1109/ICSTCC.2017.8107048 http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8107048&isnumber=8106996</p>

4

G. Corotinschi and V. G. Găitan, "*Enabling IoT connectivity for Modbus networks by using IoT edge gateways*," 2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS), Suceava, 2018, pp. 175-179.

· doi: 10.1109/DAAS.2018.8396092

<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8396092&isnumber=83960>

56

4. Bibliografie teză de doctorat

- [1] T. Baranwal, Nitika and P. K. Pateriya, "Development of IoT based smart security and monitoring devices for agriculture.," in *2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering (Confluence)*, 2016.
- [2] G. Sushanth and S. Sujatha, "IOT Based Smart Agriculture System," in *2018 International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*, Chennai, 2018.
- [3] "Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments," 2011. [Online]. Available:
https://ses.jrc.ec.europa.eu/sites/ese/files/documents/smart_grid_projects_in_europe.pdf. [Accessed Nov 2019].
- [4] G. Corotinschi and V. G. Găitan, "Smart cities become possible thanks to the Internet of Things," in *2015 19th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Cheile Gradistei, 2015.
- [5] C. R. Service, "Internet of Things (IoT): An Introduction," 4 June 2019. [Online]. Available: <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/IF/IF11239>. [Accessed 15 Nov 2019].
- [6] S. Chen, H. Xu, D. Liu, B. Hu and H. Wang, "A Vision of IoT: Applications, Challenges, and Opportunities With China Perspective.," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 349-359, 2014.
- [7] G. Corotinschi and V. G. Găitan, "The use of IoT technologies for providing high-quality medical services," in *2017 21st International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, Sinaia, 2017.
- [8] "Gartner Says 5.8 Billion Enterprise and Automotive IoT Endpoints Will Be in Use in 2020," Aug 2019. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-08-29-gartner-says-5-8-billion-enterprise-and-automotive-iot>. [Accessed 15 Nov 2019].
- [9] G. Corotinschi and V. G. Găitan, "Enabling IoT connectivity for Modbus networks by using IoT edge gateways.," in *2018 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, 2018.
- [10] "Overview of the Internet of things," [Online]. Available: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=y.2060>. [Accessed Feb 2015].
- [11] R. Brown, "Robert Alexander Watson-Watt, the father of radar," *Engineering Science and Education Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 31-40, Feb 1994.
- [12] "The Ericsson Mobility Report," [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>. [Accessed Feb 2016].

- [13] "Cisco Visual Networking Index:Forecast and Trends 2017-2022," [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.pdf>.
- [14] "Final report - KETs: Time to Act," [Online]. Available: http://ec.europa.eu/growth/industry/key-enabling-technologies/european-strategy/high-level-group/index_en.htm.
- [15] "Moore's law," [Online]. Available: https://simple.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law.
- [16] "Intel's 10 nm Technology: Delivering the Highest Logic Transistor Density in the Industry Through the Use of Hyper Scaling," [Online]. Available: <https://newsroom.intel.com/newsroom/wp-content/uploads/sites/11/2017/09/10-nm-icf-fact-sheet.pdf>.
- [17] A. Aijaz, M. Aghvami and M. Amani, "A survey on mobile data offloading: technical and business perspectives," *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 104-112.
- [18] "Cisco global cloud index: Forecast and Methodogy,2016-2021," [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html>.
- [19] G. Liu, "Research on independent SaaS platform," in *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*, 2010.
- [20] L. Chengtong, L. Qing, L. Zhou, P. Junjie, Z. Wu and W. Tingting, "PaaS: A revolution for information technology platforms.," in *2010 International Conference on Educational and Network Technology.*, 2010.
- [21] "Key Characteristics of PaaS," [Online]. Available: <http://www.cloudbook.net/resources/stories/key-characteristics-of-paas>.
- [22] "Platform as a service," [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Platform_as_a_service.
- [23] M. Yuriyama and T. Kushida, "Sensor-Cloud Infrastructure - Physical Sensor Management with Virtualized Sensors on Cloud Computing," in *13th International Conference on Network-Based Information Systems.*, 2010.
- [24] "Fog Computing and the Internet of Things: Extend the Cloud to Where the Things Are," [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/dam/en_us/solutions/trends/iot/docs/computing-overview.pdf.
- [25] R. K. Naha, "Fog Computing: Survey of Trends, Architectures, Requirements, and Research Directions,," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 47980-48009, 2018.

- [26] B. Flavio, R. Milito, J. Zhu and S. Addepalli, "Fog Computing and Its Role in the Internet of Things," *Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing*, pp. 13-16, 2012.
- [27] I. Stojmenovic and S. Wen, "The Fog computing paradigm: Scenarios and security issues," in *2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS) pp.1,8*, 2014.
- [28] S. Kulkarni, S. Saha and R. Hockenbury, "Preserving privacy in sensor-fog networks," in *2014 9th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*, 2014.
- [29] J. Zao, T. T. Gan, C. K. You, S. Rodríguez Méndez, C. E. Chung, Y. T. Wang, T. Mullen and T. P. Jun, "Augmented Brain Computer Interaction Based on Fog Computing and Linked Data," *2014 International Conference on Intelligent Environments (IE)*, pp. 374-377, 2014.
- [30] T. A. M. Phan, J. K. Nurminen and M. D. Francesco, "Cloud Databases for Internet-of-Things Data," *2014 IEEE International Conference on Internet of Things (iThings), and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom)*, pp. 117-124, 2014.
- [31] "The Forrester Wave™: Big Data Hadoop Cloud, Q1 2016," [Online]. Available: <https://www.forrester.com/report/The+Forrester+Wave+Big+Data+Hadoop+Distributions+Q1+2016/-/E-RES121574>.
- [32] "DB Engines ranking," [Online]. Available: <https://db-engines.com>.
- [33] "Magic Quadrant for Operational Database Management Systems,Gartner Research," [Online]. Available: <https://www.gartner.com/en/documents/3891967/magic-quadrant-for-operational-database-management-syste>.
- [34] Y. Cheng, H. Zhang and Y. Huang, "Overview of Communication Protocols in Internet of Things: Architecture, Development and Future Trends," in *2018 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence (WI)*, 2018.
- [35] W. Sun, M. Choi and S. Choi, "IEEE 802.11ah: A Long Range 802.11 WLAN at Sub 1 GHz," *Journal of ICT Standardization*, vol. 1, pp. 83-108.
- [36] "ITU-R,Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)," [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2410-2017-PDF-E.pdf. [Accessed nov 2017].
- [37] S. Al-Sarawi, M. Anbar, K. Alieyan and M. Alzubaidi, "Internet of Things (IoT) communication protocols: Review," in *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, Amman, 2017.

- [38] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols and Applications," *Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, no. 99, p. 1.
- [39] "Message Queuing Telemetry Transport(MQTT), Version 3.1.1," [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.pdf>.
- [40] " RFC 7252, The Constrained Application Protocol(CoAP) Specifications," [Online]. Available: <https://tools.ietf.org/html/rfc7252>.
- [41] "Advanced Message Queuing Protocol(AMQP)- specifications, ISO/IEC 19464," [Online]. Available: <http://docs.oasis-open.org/amqp/core/v1.0/os/amqp-core-complete-v1.0-os.pdf> .
- [42] "Data Distribution Service(DDS) specifications," [Online]. Available: <https://www.omg.org/spec/DDS/About-DDS/>.
- [43] "Protocolul XMPP și extensiile acestuia,," [Online]. Available: <https://xmpp.org/extensions/> .
- [44] "IoT Developer Surveys," [Online]. Available: <https://iot.eclipse.org/iot-developer-surveys/>.
- [45] O. Hahm, E. Baccelli, H. Petersen and N. Tsiftes, "Operating Systems for Low-End Devices in the Internet of Things: A Survey," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 720-734, 2016.
- [46] A. Dunkels, O. Schmidt, T. Voigt and M. Ali, "Protothreads: Simplifying event-driven programming of memory-constrained embedded systems," in *SenSys '06 Proceedings of the 4th international conference on Embedded networked sensor systems*, Boulder, Colorado, USA, 2006.
- [47] S. Schildt, W. Pottner and L. Wolf, "Contiki Ring File System for Real-Time Applications," in *2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, Hangzhou, 2012.
- [48] P. P. Ray, "A survey of IoT cloud platforms," *Future Computing and Informatics*, vol. 1, no. 1-2, pp. 35-46, 2016.
- [49] ".NET Core Home," [Online]. Available: <https://github.com/dotnet/core>.
- [50] ".NET Standard," [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/standard/net-standard>.
- [51] G. Corotinschi and V. G. Găitan, "The development of IoT applications using old hardware equipment and virtual TEDS," in *2016 International Conference on Development and Application Systems (DAS)*, Suceava, 2016.
- [52] "MongoDB C# driver," [Online]. Available: <https://docs.mongodb.com/ecosystem/drivers/csharp/>.

- [53] R. Deari, X. Zenuni, J. Ajdari, F. Ismaili and B. Raufi, "Analysis And Comparision of Document-Based Databases with Relational Databases: MongoDB vs MySQL," in *2018 International Conference on Information Technologies (InfoTech)*, Varna, 2018.
- [54] "MongoDB database," [Online]. Available: <https://www.mongodb.com/>.
- [55] "Brokerul MQTT Mosquitto," [Online]. Available: <https://mosquitto.org/>.
- [56] "Brokerul MQTT Apache ActiveMQ," [Online]. Available: <http://activemq.apache.org/>.
- [57] "Brokerul MQTT HiveMQ," [Online]. Available: <https://www.hivemq.com/>.
- [58] "Libraria pentru crearea serverelor websocket Supersocket," [Online]. Available: <https://github.com/kerryjiang/SuperSocket> .
- [59] "Utilitar de analiză a traficului de rețea WireShark," [Online]. Available: [51]. <https://www.wireshark.org/> .
- [60] ".NET Core Guide," [Online]. Available: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/core/about>.
- [61] B. E., P. G. V. Naranjo, M. Scarpiniti, M. Shojafar and J. H. Abawajy, "Fog of Everything: energy-efficient networked computing architectures, research challenges, and a case study," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 9882-9910, 2017.