UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de _____ _ la ora _ *, va avea loc

în_

susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

"Cercetări privind utilizarea tehnologiilor IoT în agricultura inteligentă"

elaborată de doamna/ domnul Doru Cornei în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

1. Prof. univ. dr. ing. Gheorghe GRIGORAŞ, Universitatea Tehnică "Gheorghe	președinte
Asachi" din Iași	
2. Prof. univ. dr. ing. Cristian Ioan FOŞALĂU, Universitatea Tehnică "Gheorghe	conducător de doctorat
Asachi" din Iaşi	
3. Prof. univ. dr. ing. Alexandru Mihai MOREGA, Universitatea Națională de	referent oficial
Stiință și Tehnologie POLITEHNICA București	
4. Prof. univ. dr. ing. Laurențiu Dan MILICI, Universitatea "Ștefan cel Mare" din	referent oficial
Suceava	
5. Prof. univ. dr. ing. Cristian ZET, Universitatea Tehnică "Gheorghe Asachi" din	referent oficial
Iași	

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.



Secretar universitate.

Ing. Cristina Nagit

*pentru susținerile online se va preciza link-ul și soluția de software

Formularul PO.CSUD.01 E3R0-F1



UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI



CERCETĂRI PRIVIND UTILIZAREA TEHNOLOGIILOR IOT ÎN AGRICULTURA INTELIGENTĂ

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

Ing. Doru Cornei

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. ing. Cristian Ioan Foșalău

IAȘI - 2024

Cuprins

In	trodu	cere		1
1	Gen	eralităt	i privind sistemele de monitorizare utilizate în agricultura inteligentă	4
	1.1	, Ce este	e agricultura?	4
	1.2	Ce este	e agricultura inteligentă?	4
	1.3	Ce este	• Internet of Things?	4
	1.4	Modul	de comunicare al dispozitivelor IoT	4
	1.5	Cum s	e aplică IoT în agricultura inteligentă?	5
	1.6	Senzor	i utilizati de dispozitivele IoT din agricultura inteligentă	5
	1.7	Sistem	e comerciale de monitorizare a parametrilor din agricultură bazate pe IoT	7
	1.8	Sistem	e de monitorizare a parametrilor din agricultură bazate pe IoT din literatură	7
	1.9	Structu	ura minimală a unui dispozitiv IoT utilizat în agricultura inteligentă	7
2	Proi	ectarea	si implementarea practică a unui sistem complex pentru monitorizarea unor	
	para	ametri s	pecifici agriculturii	8
	2.1	Descri	erea nodurilor sistemului de monitorizare	10
		2.1.1	Nodurile de tip N1 si N8	11
		2.1.2	Nodul de tip N2A	12
		2.1.3	Nodul de tip N2B	12
		2.1.4	Nodul de tip N3 \ldots	12
		2.1.5	Nodul de tip $N4$	13
		2.1.6	Nodul de tip N5 \ldots	13
		2.1.7	Nodul de tip N6 \ldots	14
		2.1.8	Nodul de tip $N7$	14
		2.1.9	Nodul de tip N9	15
2	T			17
3	1ra	Dringing	init de functionare el dendrometrului	10 16
	$\frac{3.1}{2.2}$	Fincip	nul de funcționare al dendrometrului	10 16
	3.2			10
		3.2.1	Correctoristicale elementativity consideri	17 17
	~ ~	S.Z.Z		1/
	3.3		Structure maganică a dan dromatrului	19
		3.3.1		19 20
		3.3.2		20 21
	3 /	3.3.3 Rezult	ranea electronica a dendrometrului	21 27
	5.4	Rezult		21
4		ultate ex	xperimentale obținute cu sistemul de monitorizare	30 30
	7.1		Date colectate de la nodurile de tin N1 si N8	30
		<u>т.1.1</u> 412	Date colectate de la nodul de tin N2A	31
		т.1.2 Д 1 2	Date colectate de la nodul de tip N2R	31 31
		т.1.3 Д 1 Л	Date colectate de la nodul de tip N2D	31 31
		т. 1. т Д 1 5	Date colectate de la nodul de tip N/	37 71
		416	Date colectate de la nodul de tip N5	∡ג גצ
		4.1.0 4.1.7	Date colectate de la nodul de tip N6	22
		ч.1. /		55

	4.1.8	Date colectate de la nodul de tip N7	34						
	4.1.9	Date colectate de la nodul de tip N9	34						
4.	2 Analiza	a consumului de energie al nodurilor IoT	35						
7 D			25						
5 Pi	relucrarea	și analiza datelor experimentale utilizand algoritmi de inteligența artificială	37						
5.	l Analıza	a exploratorie a datelor colectate	37						
	5.1.1	Preprocesarea datelor	37						
	5.1.2	Analiza univariată	38						
	5.1.3	Analiza multivariată	38						
5.	2 Identifi	icarea anomaliilor în datele colectate	40						
	5.2.1	Regula 1.5 IQR	40						
	5.2.2	Descompunerea Eroare Trend Sezonalitate (ETS)	40						
	5.2.3	Isolation Forest	41						
	5.2.4	Local Outlier Factor	42						
5.	3 Aplica	rea de algoritmi de predicție pentru serii de timp	42						
	5.3.1	Predicții cu SARIMA	42						
	5.3.2	Predicții cu Prophet	43						
	5.3.3	Predicții cu rețele neuronale recurente (LSTM, GRU, LSTM Seq2seq, GRU							
		Seq2seq	44						
	5.3.4	Predicții cu PatchTST	46						
Cone	Concluzii generale, contributii si nerencetive de degreltere								
Concluzit generale, contribuții și perspective de dezvoltare									
Bibliografie selectivă									

Dintre dezavantajele agriculturii inteligente putem enumera:

- se pierde conexiunea dintre om și activitățile agricole, observația umană putând detecta și alte fenomene sau efecte asupra culturilor sau animalelor față de metodele automate,
- fermierul devine dependent de tehnologie, nu mai dezvoltă abilitățile tradiționale necesare în agricultură,
- consumul de energie electrică crește deoarece trebuie alimentate toate dispozitivele care compun ecosistemul, de la senzori și echipamentele de comunicații, la servere de date, roboți și drone; consumul de curent crește semnificativ în cazul culturilor dezvoltate la lumină artificială,
- dispozitivele defecte sau care sunt depășite tehnologic și care nu mai sunt recuperate, cum ar fi senzorii amplasați în câmp, contribuie la poluarea mediului,
- pentru funcționarea ecosistemului sunt necesare rețele de comunicații radio, deci în zona agricolă vor fi prezente câmpuri electromagnetice care pot, pe termen lung, afecta culturile și animalele,
- sistemele de stocare a datelor și algoritmii de inteligență artificială necesită resurse de stocare și de calcul, acestea având un cost de achiziție, de operare și de mentenanță care se adaugă la costurile permanente ale fermelor agricole.

În lumina celor prezentate mai sus, lucrarea de față prezintă modul în care a fost proiectat, construit, implementat și exploatat un sistem complex de monitorizare a unor parametri esențiali din agricultură. În lucrare sunt detaliate atât partea constructivă și funcțională a sistemului cât, mai ales, modul în care sistemul a fost exploatat în condiții reale de lucru, sub agresiunea multiplilor factori de influență interni și externi, a condițiilor de lucru, cât și a numeroaselor evenimente care au apărut în decursul exploatării. Datele reale obținute în urma monitorizării pe parcursul a aproximativ doi ani sunt prezentate atât sub formă brută, cât și sub formă prelucrată cu ajutorul unor algoritmi de inteligență artificială, obținându-se o interpretare justă a corelației dintre date și evenimente.

Teza este structurată în cinci capitole, după cum urmează:

Capitolul 1 oferă o viziune de ansamblu asupra domeniului de agricultură inteligentă. Pentru conceptul Internet-of-Things (IoT) se enunță diferite definiții și abordări, se analizează modelul stratificat de comunicație al dispozitivelor IoT, iar pentru fiecare nivel se discută cele mai utilizate tehnologii.

În continuare, se descrie modul de aplicare a dispozitivelor IoT în agricultura inteligentă, fiind evidențiate aplicațiile cele mai răspândite. Pentru acestea, se prezintă cele mai reprezentative tipuri de senzori utilizați, cu caracteristici tehnice și exemple concrete de la producători. Totodată, în cadrul acestui capitol, sunt prezentate și analizate exemple de sisteme comerciale dezvoltate pentru agricultură inteligentă.

Din literatura de specialitate, s-au analizat cele mai actuale lucrări care abordează tema monitorizării și culegerii de date în agricultura inteligentă. Pentru aceste articole s-a efectuat o analiză detaliată a senzorilor utilizați, a componentelor hardware, a modurilor de comunicare, a mecanismelor de stocare a datelor, precum și a aspectelor legate de alimentare și consumul energetic. De asemenea, sunt prezentate cerințele și structura minimală a unui dispozitiv IoT destinat colectării de date.

Capitolul 2 oferă detalii privind proiectarea și implementarea unui sistem de monitorizare a parametrilor agricoli, care a fost realizat practic. Sunt expuse cerințele generale de proiectare, urmate de o trecere în revistă a tipurilor de noduri ce au fost dezvoltate și testate practic, precum și a parametrilor monitorizați. Pentru toți senzorii utilizați sunt detaliate caracteristicile specifice și modul de implementare.

În acest capitol sunt descrise nodurile din punct de vedere al structurii hardware, incluzând schema bloc și senzorii utilizați, precum și arhitectura software. De asemenea, sunt prezentate imagini cu nodurile realizate. Tipologiile nodurilor sunt diversificate, variind de la noduri pentru preluarea

UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI" DIN IAȘI RECTORATUL

Către

Vă facem cunoscut că, în ziua de ______ la ora ______ în _____*, va avea loc

susținerea publică a tezei de doctorat intitulată:

"Cercetări privind utilizarea tehnologiilor IoT în agricultura inteligentă"

elaborată de doamna/ domnul Doru Cornei în vederea conferirii titlului științific de doctor.

Comisia de doctorat este alcătuită din:

președinte
conducător de doctorat
referent oficial
referent oficial
referent oficial

Cu această ocazie vă invităm să participați la susținerea publică a tezei de doctorat.



Secretar universitate, Wr. Ing. Cristina Nagit

*pentru susținerile online se va preciza link-ul și soluția de software

imaginilor la noduri pentru monitorizarea parametrilor meteorologici. Structura hardware a nodurilor a fost ajustată pe parcurs, fiind testată în mod repetat. Pe măsură ce au apărut defecte, acestea au fost corectate, fie prin intervenții asupra componentelor hardware, fie prin actualizări ale software-ului. În acest capitol sunt ilustrate mai multe contribuții personale ale autorului, aduse atât la partea hardware, cât și software a dispozitivelor realizate.

Capitolul 3 detaliază o altă contribuție practică și personală a autorului, ce constă în realizarea unui dispozitiv pentru măsurarea diametrului trunchiurilor de arbori. Sunt prezentate: conceptele inițiale care au stat la baza construcției, fundamentele teoretice, precum și etapele de realizare a părții mecanice, alături de testele efectuate și rezultatele obținute. În continuare, sunt descrise teoria și partea de implementare asociată componentei electronice, testele realizate pentru această componentă, precum și rezultatele obținute. Menționăm că acest dispozitiv a fost adus până în stadiul de model funcțional, și testat în laborator, dar nu a fost utilizat încă pentru monitorizare în teren.

Capitolul 4 prezintă rezultatele experimentale obținute cu sistemul de monitorizare dezvoltat în capitolul 2. Toate nodurile IoT utilizate au fost operaționale pentru o perioadă de cel puțin un an, iar majoritatea dintre acestea au funcționat cel puțin doi ani în condiții reale, în exterior.

În cadrul acestui capitol se prezintă modurile de colectare a datelor, tipurile de date achiziționate pentru fiecare nod, precum și graficele ce ilustrează întreaga perioadă de activitate a nodurilor. De asemenea, este inclusă o analiză detaliată a unei părți din datele colectate, împreună cu problemele întâmpinate, cauzele posibile și, dacă este cazul, soluțiile pentru remedierea sau corectarea acestora.

Totodată, pentru fiecare nod se realizează o evaluare a consumului energetic și a factorilor care influențează acest consum. În final, sunt prezentate grafice care ilustrează puterea sau curentul absorbit de fiecare tip reprezentativ de nod, evidențiindu-se fazele principale din modul de funcționare al nodurilor.

Capitolul 5 este dedicat analizei rezultatelor obținute și prelucrării datelor, având ca obiectiv extragerea de informații relevante. Analiza include aspecte precum: evaluarea statistică a datelor, identificarea anomaliilor utilizându-se metode precum regula 1.5IQR, ETS, Isolation Forest și Local Outlier Factor, determinarea corelațiilor și a influențelor reciproce dintre parametri și realizarea de predicții pentru anumiți parametri pe baza unui set de date disponibil. Aceste analize au fost efectuate cu ajutorul algoritmilor de inteligență artificială, incluzând modele de predicție precum Sarima, Prophet, rețele neuronale (LSTM, GRU, LSTM Seq2Seq) și transformerul PatchTST.

În acest context, consider că tema tezei de doctorat este de extremă actualitate, contribuind, prin rezultatele obținute, la dezvoltarea domeniului agriculturii inteligente. În mod particular, teza are prin excelență un caracter practic întrucât oferă numeroase soluții constructive pentru sistemul creat dar, mai ales, scoate în evidență o serie de piedici, probleme și neajunsuri care pot apărea în decursul exploatării pe termen lung a unui astfel de sistem de monitorizare, oferind soluții de rezolvare a problemelor și de optimizare a funcționării în vederea obținerii de date valide și de încredere. Teza poate fi utilă, așadar, prin conținutul ei, atât din punct de vedere practic, inginerilor și tehnicienilor care se ocupă cu proiectarea și construcția de sisteme de monitorizare a parametrilor în agricultură, cât și cercetătorilor în domeniu, care pot utiliza algoritmii de prelucrare propuși în scopul prelucrării informației și eficientizării procesului de producție.

Capitolul 1

Generalități privind sistemele de monitorizare utilizate în agricultura inteligentă

1.1 Ce este agricultura?

Agricultura reprezintă activitatea umană care se ocupă cu creșterea plantelor și a animalelor. În vederea satisfacerii necesităților de hrană ale populației umane, metodele de lucru aplicate în agricultură sunt în continuă evoluție. Soiurile de plante și rasele de animale sunt supuse aclimatizării și ameliorării, fiind create în același timp noi soiuri și rase.

1.2 Ce este agricultura inteligentă?

Agricultura inteligentă (Singh et al., 2022) presupune realizarea de procese automate și semiautomate precum: măsurarea, monitorizarea, stocarea, analiza și optimizarea proceselor din agricultură, prelucrarea datelor și prezentarea lor într-un format lizibil și accesibil fermierilor și celorlalți utilizatori. Datele culese sunt diverse, făcând referire la: climatul zonei, starea vremii, umiditatea și nutrienții din sol, starea de sănătate a plantelor și a animalelor, cantitatea și calitatea forței de muncă, starea utilajelor agricole, datele financiare, cerințele pieței de desfacere a produselor.

În cadrul agriculturii inteligente, se încearcă realizarea unui tablou complet pentru a facilita luarea deciziilor. Accentul se pune mai ales pe valorificarea datelor preluate, interpretarea acestora și prezentarea prognozelor într-o manieră accesibilă. Necesitatea diminuării efectelor schimbărilor climatice, cerința de economisire a resurselor și de utilizare eficientă a acestora au impulsionat dezvoltarea agriculturii inteligente și au creat un concept nou numit "Climate-smart agriculture" (Chandra et al., 2018).

Dezvoltarea agriculturii inteligente nu se poate realiza fără ajutorul senzorilor, rețelelor de comunicații, dispozitivelor de tip Internet-of-Things (IoT), soluțiilor de stocare a datelor, softurilor de inteligență artificială (algoritmi de predicție și învățare automată).

1.3 Ce este Internet of Things?

Internet-of-Things (IoT) sau "Internetul lucrurilor' (Zorzi et al., 2010) este un sistem independent de "lucruri" care conțin senzori sau elemente de acționare, componente hardware și software pentru comunicația cu alte "lucruri" și transmit/recepționează date în/din internet. IoT permite preluarea automată a datelor și/sau realizarea acțiunilor fără intervenție umană, urmărind reglarea sau optimizarea proceselor.

Conceptul de IoT a evoluat odată cu dezvoltarea tehnologică a senzorilor, microcontrolerelor, comunicațiilor și a internetului (Atzori et al., 2016).

1.4 Modul de comunicare al dispozitivelor IoT

O structură în cinci straturi a dispozitivelor IoT este prezentată în articolul (Kassab et al., 2020). Această structură este orientată pe fluxul de date. Ea detaliază comunicațiile dispozitivelor. Denumirea și semnificația acestor straturi este următoarea:

- "Perception Layer" Este stratul de interfață cu mediul exterior, realizat cu ajutorul senzorilor și al acționărilor.
- "Data Link Layer" Realizează transmiterea datelor către stratul următor, cu ajutorul protocoalelor de comunicare.
- "Network Layer" Stratul de rețea stabilește conexiuni logice, livrează raportarea erorilor, gestionează și selectează calea de rutare pentru transmisia datelor.
- "**Transport Layer**" Acest strat realizează fragmentarea și asamblarea mesajelor transmise. El asigură totodată ordinea de livrare a pachetelor, evitarea congestionării, multiplexarea, integritatea și fiabilitatea datelor transmise.
- "Application Layer" Este stratul care oferă interfețe, platforme și instrumente necesare pentru implementarea aplicațiilor.

1.5 Cum se aplică IoT în agricultura inteligentă?

Pentru implementarea agriculturii inteligente, preluarea datelor nu se mai poate realiza de către operatorul uman, din cauza volumului foarte mare de date și a necesității de colectare periodică a datelor. Un alt impediment este reprezentat de faptul că senzorii de măsurare a parametrilor pot fi amplasați în zone îndepărtate sau inaccesibile. Din aceste motive, preluarea datelor este efectuată cu ajutorul dispozitivelor IoT, acestea transmit automat informațiile către bazele de date. Astfel sunt eliminate întârzierile și erorile asociate prelucrării manuale (notare, centralizare, transmitere) a datelor. În cazul utilizării IoT, extinderea numărului de date achiziționate, modificarea locației și a perioadei de achiziție se realizează cu ușurință și cu costuri reduse.

Beneficiile principale ale utilizării IoT în agricultură sunt date de mai buna înțelegere a ecosistemului și de folosirea mai eficientă a resurselor. Datorită monitorizării continue a datelor solului, aerului, radiației solare, stării și evoluției condițiilor meteorologice se poate estima dezvoltarea culturilor și starea de sănătate a acestora. Necesarul de apă și nutrienți este asigurat numai la nevoie, astfel evitându-se risipa și contaminarea mediului. Prin detectarea timpurie a bolilor și dăunătorilor se reduc pierderile de calitate și cantitate. Determinarea perioadei optime de recoltare asigură o calitate optimă a produselor agricole. Astfel se asigură mărirea randamentului și reducerea pierderilor, crescându-se profitul agricultorului.

Agricultura inteligentă necesită module IoT diversificate privind puterea de calcul și modul de comunicație, alimentarea cu energie diferind foarte mult în funcție de aplicație. Dispozitivele sunt adaptate și optimizate pentru cerințele exacte ale măsurătorii, acțiunii și analizelor care trebuie realizate. Gama modulelor IoT este de la senzori simpli care măsoară o singură valoare la module complexe care rulează algoritmi de inteligență artificială.

1.6 Senzori utilizați de dispozitivele IoT din agricultura inteligentă

Pentru colectarea datelor este nevoie de senzori care să convertească mărimile de măsurat în semnale electrice, care pot fi prelucrate și convertite în semnal digital, semnal care este ulterior transmis și analizat.

Forma constructivă și modul de realizare a senzorului (Xu et al., 2022) depind de mediul de măsurat, de modul de amplasare și manipulare. Stabilitatea în timp și intervalul de timp la care se efectuează verificarea metrologică sunt proprietăți importante pentru asigurarea certitudinii măsurătorilor (Mustapää et al., 2020).

Capitolul 1. Generalități privind sistemele de monitorizare utilizate în agricultura inteligentă

Enumerăm unii din cei mai utilizați senzori în agricultură.

Senzori pentru măsurarea temperaturii se clasifică în funcție de mediul măsurat: aer, sol, cereale, apă, alte lichide, frunze, rădăcină, trunchi etc.

Elementele sensibile cele mai întâlnite sunt: termorezistența, termistorul și semiconductorul. Precizia de măsurare și repetabilitatea depind de senzor și de partea electronică de preluare și prelucrare a datelor. Ieșirea senzorului poate fi analogică sau digitală.

- Senzori pentru măsurarea umidității aerului se clasifică după mediul măsurat: aer, sol, cereale etc. Metoda de măsură și forma constructivă sunt adaptate mediului măsurat și probabilității de expunere la agenții chimici și biologici. Vaporii de alcool, gazele, ciupercile sau mucegaiurile pot distruge elementele sensibile sau le pot deteriora. Acești factori pot afecta de asemenea stabilitatea în timp. Tipul de senzor trebuie să ofere informații relevante.
- Senzori pentru măsurarea umidității solului măsoară cantitatea de apă volumetric în m³/m³ sau potențialul matricial al solului în kPa. Senzorii volumetrici măsoară raportul dintre volumul apei și volumul total al solului. În cazul plantelor, umiditatea volumetrică a solului nu reprezintă o informație relevantă, deoarece cantitatea de apă care poate fi preluată de rădăcinile plantei depinde de compoziția solului (procentul de argilă, nămol, nisip).

Potențialul matricial al solului reprezintă cantitatea de energie necesară pentru a extrage apa din unitatea de volum de sol. Această mărime este importantă deoarece ne oferă informații despre energia pe care o plantă trebuie să o consume pentru a extrage apa din sol (Metergroup, 2021a).

- Senzori pentru parametrii solului măsoară temperatura, umiditatea volumetrică, conductivitatea electrică, aciditatea (pH-ul), salinitatea și concentrațiile de azot, fosfor și potasiu din sol.
- Senzori pentru măsurarea temperaturii frunzelor măsoară temperatura frunzelor. Fiind atașați de frunză, dimensiunea și greutatea lor sunt parametri determinanți.
- Senzori pentru măsurarea umidității frunzelor efectuează măsurători ale cantității de apă prezentă pe suprafața frunzelor.
- Măsurarea presiunii hidrostatice (turgor) în frunză Presiunea turgor este un parametru important pentru urmărirea stării de sănătate a plantei, fiind unul dintre indicatorii dinamici ai creșterii plantelor și ai producției de fructe. Aceasta este determinată de fluxul osmotic de apă, care asigură transportul nutrienților în întreaga plantă. Dacă plantele nu au acces la suficientă apă, presiunea turgor va scădea.
- **Măsurarea conductanței stomatale în frunze** Stomatele sunt mici pori situați pe fața și pe spatele unei frunze, fiind responsabile de preluarea și eliminarea dioxidului de carbon și a apei. Conductanța stomatală este rata de trecere a dioxidului de carbon sau a vaporilor de apă prin stomate și este o funcție a densității, dimensiunii și gradului de deschidere a stomatelor.
- Senzori de măsurare a dimensiunilor trunchiului sau fructelor Dendrometrele sunt senzori pentru măsurarea continuă a creșterii plantelor, înregistrând astfel modificarea dimensiunii plantelor sau a fructelor. Semnalul de ieșire poate fi analogic sau digital.
- Senzori pentru măsurarea debitului sevei sunt instrumente pentru măsurarea continuă a absorbției de apă de către plante.
- Senzori pentru măsurarea fluxul luminos Plantele sunt adaptate condițiilor de lumină solară, acestea folosind lungimea de undă de la 400 nm la 1000 nm din spectrul luminii solare (Stearns et al., 2015). Plantele terestre absorb lumina albastră și roșie și resping lumina verde și infraroșu. Pigmenții clorofilieni absorb energia luminii și realizează fotosinteza. Starea de sănătate a plantelor se poate determina prin măsurarea luminii reflectate.

1.7 Sisteme comerciale de monitorizare a parametrilor din agricultură bazate pe IoT

Sistemele comerciale nu au o descriere amănunțită a modului de funcționare, ci doar o descriere generică. În anumite situații aceste sisteme nu au asociat un manual detaliat de utilizare. Producătorii oferă clienților soluții integrate, de la senzori la aplicații în "cloud", care realizează vizualizarea și analiza datelor, precum și generarea de rapoarte și prognoze. În general, în cataloage și prezentări nu se oferă informații specifice privind modul de comunicare al senzorilor, tipurile de protocoale și comunicații utilizate, soluțiile de stocare în "cloud" folosite.

1.8 Sisteme de monitorizare a parametrilor din agricultură bazate pe IoT din literatură

Agricultura inteligentă presupune utilizarea dispozitivelor IoT pentru preluarea datelor și analizarea acestora. În literatura de specialitate, accentul s-a mutat de la implementarea și testarea soluțiilor de realizare a nodurilor IoT la integrarea acestora cu serviciile "cloud". Aceste servicii permit realizarea de analize complexe utilizând algoritmi de inteligență artificială.

Am analizat 20 de lucrări științifice actuale care tratează problema monitorizări parametrilor agricoli. Am evaluat:

- tipurile de microcontrolere utilizate,
- modalitățile de comunicație,
- modelele de senzori folosiți,
- tipul și consumul energetic al surselor de alimentare,
- serviciile de stocare a datelor.

Soluțiile din literatură nu au fost optimizate din punct de vedere al intensității curentului electric necesar funcționării și de obicei nu au fost testate în condiții reale de funcționare. Totodată, costurile de implementare și mentenanță ale acestor sisteme nu au fost adesea luate în considerare.

1.9 Structura minimală a unui dispozitiv IoT utilizat în agricultura inteligentă

În agricultura inteligentă marea majoritate a dispozitivelor IoT sunt dispozitive simple care achiziționează informații prin intermediu senzorilor sau execută acțiuni. Avantajul dispozitivului IoT simplu este dat de prețul mic, punerea facilă în funcțiune, poziționarea în teren se face în zona de interes, poziția și numărul de senzori se pot modifica fără afectarea funcționării, intervențiile de mentenanța sunt minime și rare.

Consumul de energie a unui nod este compus din consumul de energie în starea activă și consumul din starea inactiva ("sleep") a dispozitivului. Consum de energie în starea inactivă este prezent în mod constant atâta timp cât dispozitivul este funcțional. Pentru a crește durata de viață a dispozitivului atunci când este alimentat de la baterii, trebuie să reducem cât mai mult acest consum de energie.

Capitolul 2

Proiectarea și implementarea practică a unui sistem complex pentru monitorizarea unor parametri specifici agriculturii

Acest capitol este destinat descrierii structurii hardware și software a unui sistem de tip IoT destinat monitorizării unor parametri specific agriculturii, precum și a modului de exploatare a acestuia în condiții practice în teren. În figura 2.1 este prezentată schema bloc a sistemului dezvoltat, care a fost format din:

- Nodurile de măsură, notate:
 - N1, N2A, N3, N4, N8 care utilizează comunicația Wi-Fi,
 - N2B, N5, N6, N7, N9 care utilizează comunicația LoRa.
- Rețeaua de comunicație.
- Sistemul de colectare și stocare a datelor.



Figura 2.1. Schema bloc a sistemului de achiziție și stocare a măsurătorilor.

Sistemul a fost format din 10 tipuri de noduri de măsură destinate monitorizării unor parametri ca: temperatura aerului și solului, umiditatea aerului și solului, intensitatea radiației luminoase, presiunea atmosferică, cantitatea de precipitații, imagini ale culturilor. Aceste noduri comunică cu unitățile de colectare a datelor prin diferite suporturi de comunicație și protocoale și sunt amplasate în diverse locuri dintr-o zonă agricolă, care conține culturi agricole variate.

În figura 2.1 sunt prezentate cele patru tipuri de comunicație utilizate, fiecare marcat în imagine cu un număr unic de la 1 la 4.

Ideea avută în vedere în dezvoltarea acestui sistem a fost de a-i studia funcționarea în condiții practice pe teren prin utilizarea a cât mai multor posibile variante de proiectare cu scopul de a evidenția principalele impedimente care pot apărea în funcționare și de a oferi posibilități de evitare a unor greșeli și de apariție a erorilor în datele colectate. În acest fel, lucrarea capătă o utilitate practică deosebită, venind în întâmpinarea atât a proiectanților de astfel de sisteme, cât și a celor care le exploatează, în particular a fermierilor. Astfel, la proiectarea sistemului, s-a avut în vedere utilizarea mai multor tipuri de senzori (unii utilizați pentru măsurarea chiar a aceleiași mărimi, pentru efectuarea de comparații privind calitatea lor), mai multor tipuri de microcontrolere, mai multor tipuri de suporturi și protocoale de comunicație și a trei tipuri de stocare a datelor colectate. Monitorizarea cu ajutorul sistemului dezvoltat a fost realizată pe parcursul a aproximativ doi ani, datele achiziționate fiind prelucrate așa cum este prezentat în capitolul 5 al prezentei lucrări. În tabelul 2.1. este prezentat un sumar al structurii celor 10 noduri realizate, iar în figura 2.2 este prezentată amplasarea acestor

noduri în arealul monitorizat.

Tabelul 2.1. Tabel care sintetizează informațiile referitoare la nodurile realizate

CodificareTipul detip nodmicrocontrolerIoTutilizat		Tipul de comunicație utilizată	Tipul de protocol utilizat	Metoda de stocare a datelor	Senzori utilizați
N1	ESP32	Wi-Fi	HTTP Post	Google Drive	Cameră video cu rezoluția de 3 Mpx
N2A	ESP32	Wi-Fi	HTTP Post	Google Sheets	AS7262, DPS310, HDC2080, PIM520, TMP116
N2B	ASR605x	LoRa	LoRaWan (Webhooks)	Google Sheets	AS7341, HDC2080
N3	ESP32	Wi-Fi	HTTP Post	Google Sheets	HDC2080, 200SS, TMP116, WH-SP-RG
N4	ESP32	Wi-Fi	HTTP Post	Google Sheets	200SS, TMP116, RG15
N5	STM32WLE5JC	LoRa	LoRaWan (Webhooks)	Google Sheets	PIM520, TMP116
N6	STM32WLE5JC	LoRa	LoRaWan (Webhooks)	Google Sheets	TMP116
N7	ASR605x	LoRa	LoRaWan (Webhooks)	Google Sheets	PIM520, TMP116
N8	ESP32	Wi-Fi	MQTT	stocare pe server local	Cameră video cu rezoluția de 3 Mpx
N9	ASR605x	LoRa	LoRaWan (MQTT)	Influxdb	SHT31, TSL2591, TMP116, 200SS



Figura 2.2. Amplasarea în teren a nodurilor IoT

2.1 Descrierea nodurilor sistemului de monitorizare

Structura tuturor celor 10 tipuri de noduri dezvoltate în cadrul sistemului de monitorizare respectă arhitectura prezentată în figura 2.3.

Senzorii achiziționează parametrii fizici și transmit semnalele către microcontroler. Acesta gestionează întreaga activitate a senzorilor, înregistrează și prelucrează local semnalele și transmite mai departe informațiile către unitatea de colectare. Întregul nod este alimentat de la o sursă de energie, care poate fi o baterie sau acumulator.



Cerințele generale pentru nodurile IoT realizate sunt:

- să preia periodic informațiile de la senzori,
- Figura 2.3. Schema bloc a nodului IoT.
- să transmită datele către serverul de stocare la interval de maximum o oră,
- nodul să fie independent, să se alimenteze din baterie sau acumulator și dacă este posibil să preia energie din panoul solar,
- să nu necesite mentenanță periodică.

Realizarea nodurilor a fost un proces iterativ, prin care s-a ajuns la configurația hardware și software finală. S-a testat utilizarea mai multor tipuri de microcontrolere, platforme de dezvoltare, senzori și moduri de comunicație. Pentru fiecare senzor s-au realizat experimente și verificări ale modului de funcționare și preluare a datelor, analize ale stabilității datelor în timp, ținând cont de condițiile de mediu și de măsurare. După realizarea unui model de nod acesta a fost testat în laborator și apoi în teren. Problemele apărute au fost corectate, prin modificarea construcției hardware sau prin adaptarea softului, o parte din aceste aspecte au fost prezentate în lucrarea (D. Cornei et al., 2022).

Nodurile au fost realizate pe rând, astfel încât după amplasarea unui nod în teren, s-a început construcția unui alt tip de nod. Unele noduri conțin tipuri de senzori diferiți deși au fost amplasați în aceeași zonă, pentru a se putea realiza o comparație între aceste tipuri de senzori.

Stocarea datelor a fost realizată în "Google Drive" și "Google Sheets", acestea reprezentând maniere ieftine de stocare. Depășirea limitei de noduri cu comunicație LoRaWan permisă în varianta gratuită a serverului "The Things Network, a condus la utilizarea aplicației open-source "ChirpStack". Această aplicație rulează pe un calculator local care a fost utilizat și pentru stocarea datelor achiziționa-te. Puterea de calcul a calculatorului permite de asemenea rularea aplicațiilor de vizualizare, analiză și prelucrare a datelor. Soluția cu calculator local elimină dependența sistemului de conexiunea la internet, deci se poate aplica pentru zone izolate, eventuala sincronizarea a datelor în "cloud" putându-se realiza periodic, prin conectarea la internet cu ajutorul unui modem GPRS sau LTE.

Nodurile care realizează preluarea de imagini (N1, N8) sunt amplasate în toate zonele de culturi și sunt în aria de acoperire a rețelei Wi-Fi. Nodul N2A este amplasat în zonă cultivată cu legume, unde nu există vegetație iarna și primăvara. Nodul N3 este amplasat în livadă în apropierea unui copac (măr), N4 este amplasat într-o zonă fără copaci la marginea livezii la distanță de 9 m de nodul N3. Nodul N2B este amplasat lângă solar. Nodul N5 este amplasat în aceeași zonă de măsurare cu nodul N3. Nodul N6 este amplasat în livadă și citește cu ajutorul celor patru senzori de temperatură distribuția temperaturii de-a lungul unei ramuri de copac. Nodul N7 este montat îngropat la adâncime de 30 cm în sol la rădăcina unui copac (cireș). Nodurile N9 sunt în număr de cinci și sunt amplasate astfel: în livadă, în zona arbuștilor de zmeur, lângă solar, în capătul și în mijlocul solarului. Aceste noduri au fost realizate pentru a valida soluția hardware și modalitatea de stocare locală a datelor. Rezultatele au fost prezentate în lucrarea (D. Cornei et al., 2024). Stocarea locală a datelor permite dezvoltarea unor aplicații de analizare și predicție a evoluției culturilor, o astfel de abordare fiind prezentată în lucrarea (L. Cornei et al., 2024).

Senzorii utilizați pentru realizarea măsurătorilor sunt:

• Cameră video cu rezoluția de 3 Mpx, modelul OV3660, produsă de OmniVision.

- AS7262 este un senzor de lumină cu 6 canale de măsurare.
- DSP310 este un senzor digital care măsoară presiunea și temperatura atmosferică.
- HDC2080 este un senzor digital care măsoară temperatura și umiditatea aerului.
- PIM520 este un senzor capacitiv de măsurare a umidității relative a solului.
- TMP116 este un senzor digital care măsoară temperatura.
- AS7341 este un senzor pentru măsurarea cantității de lumină, cu canale 11 de măsurare.
- 200SS WATERMARK este un senzor care măsoară potențialul matricial al solului.
- WH-SP-RG este un senzor mecanic de măsurare a cantității de precipitații.
- RG15 este un senzor electronic de măsurare a cantității de precipitații.
- SHT31 este un senzor digital care măsoară temperatura și umiditatea aerului.
- TSL2591 este un senzor de lumină.

2.1.1 Nodurile de tip N1 și N8

Nodurile IoT N1 și N8 sunt identice din punct de vedere hardware, diferind logica implementată în soft, deoarece acestea utilizează servere diferite de stocare a datelor. Ambele variante sunt eficiente din punct de vedere energetic, rezistente, ieftine și ușor de întreținut, îndeplinind următoarele cerințe:

- Achiziționează o imagine color cu rezoluția de 1280 x 1024 px.
- Transmite periodic imaginile către serverul de stocare.
- A fost construit folosind componente ieftine și accesibile.
- Funcționează în aer liber, fără alte protecții.
- Energia necesară funcționării este preluată de la un panou solar și stocată într-un acumulator.

În figura 2.4 este prezentată structura hardware a nodurilor N1 și N8.

În figura 2.5 sunt prezentate două din variantele realizate pentru nodurile N1 și N8.



Figura 2.4. Structura hardware a nodului IoT model N1 și N8



(a) Nod care utilizează circuitul de încărcare DFR0579.



(b) Nod care utilizează circuitul de încărcare liniar extern.

Figura 2.5. Imagini cu variantele realizate pentru nodurile IoT model N1 și N8.

Nodul N1 utiliza metoda POST a protocolului HTTP către un script "Google Apps Script" stocat în "Google Drive". Nodul N8 transmitea datele cu ajutorul protocolul MQTT, către un server MQTT (MQTT Broker) care rula pe un calculator local.

2.1.2 Nodul de tip N2A

Nodul de tip N2A a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

- temperatura, umiditatea și presiunea aerului,
- iluminarea solară,
- temperatura și umiditatea în sol la o adâncime de 20 cm,
- temperatura la suprafața solului.

În figura 2.6a este prezentată structura hardware a nodului și în figura 2.6b este ilustrată o imagine cu nodul realizat.





(a) Structura hardware a nodului IoT model N2A

(b) Imaginea nodului N2A amplasat în teren.

Figura 2.6. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N2A.

2.1.3 Nodul de tip N2B

Nodul de tip N2B a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

- iluminarea solară,
- temperatura și umiditatea aerului.

În figura 2.7a este prezentată structura hardware a nodului și în figura 2.7b este ilustrată o imagine cu nodul realizat.





(b) Imaginea nodului N2B amplasat în teren

Figura 2.7. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N2B

2.1.4 Nodul de tip N3

Nodul de tip N3 a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

- temperatura și umiditatea aerului,
- temperatura și umiditatea solului,
- cantitatea de precipitații.

În figura 2.8a este prezentată structura hardware a nodului, în figura 2.8b este ilustrată o imagine cu nodul realizat.

Structura hardware este similară cu cea a nodului N2A.





(b) Imaginea nodului N3 amplasat în teren.

Figura 2.8. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N3.

2.1.5 Nodul de tip N4

Nodul de tip N4 a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

- temperatura la suprafața solului,
- temperatura și umiditatea solului,
- cantitatea de precipitații.

În figura 2.9a este prezentată structura hardware a nodului, o imagine cu nodul realizat fiind ilustrată în figura 2.9b. Structura hardware este similară cu cea a nodului N3.





(b) Imaginea nodului N4 amplasat în teren

Figura 2.9. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N4

2.1.6 Nodul de tip N5

Nodul de tip N5 a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

• temperatura și umiditatea solului.

În figura 2.10a este prezentată structura hardware a nodului, o imagine cu nodul realizat fiind ilustrată în figura 2.10b.

Capitolul 2. Proiectarea și implementarea practică a unui sistem complex pentru monitorizarea unor parametri specifici agriculturii





(b) Imaginea nodului N5 amplasat în teren.

Figura 2.10. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N5.

2.1.7 Nodul de tip N6

Nodul este identic cu nodul N5, datele fiind achiziționate de la patru senzori de temperatură model TMP116. Senzorii sunt amplasați pe lungimea unei ramuri de măr, de la trunchi spre vârf.

În figura 2.11a este prezentată structura hardware a nodului, o imagine cu nodul realizat fiind ilustrată în figura 2.11b.





(a) Structura hardware a nodului IoT model N6.
(b) Imaginea nodului N6 amplasat în teren.
Figura 2.11. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N6.

2.1.8 Nodul de tip N7

Nodul este din punct de vedere constructiv similar cu nodul N2B. Diferența majoră este dată de faptul că senzorul este îngropat în sol, iar energia funcționării acestuia este asigurată de o baterie.

În figura 2.12a este prezentată structura hardware a nodului, o imagine cu nodul realizat fiind ilustrată în figura 2.12b.





(a) Structura hardware a nodului IoT model N7.

(b) Imaginea nodului N7 amplasat în teren.

Figura 2.12. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N7.

2.1.9 Nodul de tip N9

Nodul de tip N9 a fost realizat pentru a prelua următoarele informații:

- iluminarea solară,
- temperatura și umiditatea aerului,
- temperatura și umiditatea solului,

Nodul utilizează aceeași structură hardware ca și nodul N2B, diferențele constând doar în tipul de senzori utilizați și fluxul de informații (modul de transmisie, stocarea și prezentarea datelor).

În figura 2.13a este prezentată structura hardware a nodului, o imagine cu nodul realizat fiind ilustrată în figura 2.13b.



teren nr. 2. Figura 2.13. Structura hardware și o imagine cu nodul IoT model N9.

În figura 2.14 este prezentat fluxul de date.



Figura 2.14. Diagrama fluxului de informații pentru nodul IoT model N9.

Nodurile IoT de tip N9 transmit informațiile prin comunicație LoRa cu protocol LoRaWan către gateway. Acesta recepționează datele și le transmite către serverul ChirpStack, care rulează pe calculatorul local. Utilizăm un calculator local care utilizează sistemul de operare linux, varianta UBUNTU. Utilizăm aplicația InfluxDB pentru stocarea datelor. Această aplicație permite integrarea cu alte aplicații de analiză și vizualizare.

Pentru vizualizarea informațiilor colectate, se utilizează aplicația Grafana. Aceasta preia datele din InfluxDB, iar pe baza acestora se creează vizualizări ("dashboards") prin combinarea elementelor predefinite de afișare a datelor. Vizualizările permit prezentarea datelor sub formă numerică, sub formă de grafice de variație în timp sau ca o afișare tabelară. Acestea sunt disponibile pentru alte dispozitive sub forma unor pagini web "responsive". Valorile și graficele afișate sunt dinamice, în sensul că se pot selecta mărimile care se afișează, domeniul de timp și scala.

Datele din InfluxDB se pot prelua pentru analize ulterioare, de exemplu cu o aplicație scrisă în limbajul Python care realizează analiza datelor sau realizează prognoze.

Capitolul 3

Traductor pentru măsurarea variațiilor mici ale diametrului trunchiului arborilor

În acest capitol este prezentat principiul de funcționare, construcția și performanțele unui dispozitiv destinat măsurării variațiilor mici ale diametrului trunchiului copacilor, care apar în succesiunea anotimpurilor, a ciclului zi-noapte, ca urmare a variațiilor condițiilor de mediu sau a stării de sănătate a arborelui (Foșalău et al., 2023).

Dispozitivul descris în acest capitol este denumit în literatura horticolă *dendrometru*. Funcționarea dispozitivului se bazează pe proprietățile unor materiale speciale denumite *fir magnetic amorf* (FMA). În acest capitol este descris principiul de funcționare care se bazează pe fenomenul de *stressimpedanță gigant* (SIG) care apare în FMA în anumite condiții, modul de construcție a componentelor mecanică și electrică a traductorului și câteva caracteristici ce descriu legătura dintre variațiile mici ale diametrului arborilor și mărimea de ieșire din traductor.

3.1 Principiul de funcționare al dendrometrului

În figura 3.1 este prezentat principiul de măsurare a variațiilor diametrului trunchiului cu ajutorul dendrometrului. Acesta constă în transformarea variației diametrului trunchiului într-o mișcare liniară care va fi tradusă în semnal electric de elementele sensibile prin efectul de stressimpedanță, descris în secțiunea 3.2.

Banda 2, de lungime constantă, realizată din oțel inoxidabil, este înfășurată în jurul trunchiului 1 conform figurii 3.1. Întrucât temperatura este unul din factorii de mediu cei mai importanți care afectează precizia măsurării cu acest traductor, s-a ales confecționarea benzii din oțel inoxidabil, deoarece acest material prezintă un coeficient de dilatare foarte scăzut, fiind de asemenea protejat împotriva coroziunii. Variația razei trunchiului cu cantitatea d, produsă de creșterea acesteia de la valoarea R_1 la R_2 , banda 2 având lungime constantă, conduce la deplasarea punctului mobil 3 din poziția M_1 în poziția M_2 , pe distanța dx.

În principiu, între d și dx există o relație liniară, ai cărei coeficienți depind de raza trunchiului R_1 și distanța punctului mobil până la trunchi X_1 .



Figura 3.1. Ilustrarea principiului de funcționare al dendrometrului: 1 – trunchiul arborelui, 2 – bandă flexibilă din oțel inoxidabil, 3 – punct mobil.

3.2 Elementul sensibil

Elementul sensibil al dendrometrului este un fir cu structură și compoziție specială, care își modifică impedanța electrică în urma aplicării unor forțe mecanice de tracțiune. Acest fir este utilizat în aplicația de față ca senzor de forță, care variază în funcție de deplasarea componentei mobile dx, permițând astfel măsurarea acestei deplasări, așa cum va fi descris în continuare.

3.2.1 Despre firele magnetice amorfe

Firele magnetice amorfe (FMA) (Zhukov et al., 2015) sunt materiale cu structura $M_x Si_y B_z$ unde M este un metal sau o asociație de metale cum ar fi: Fe, Co, Ni, Cr, Mn, Cu și Nb în diferite proporții, fabricate sub formă de fire, având o structură amorfă. Ele sunt produse printr-un procedeu denumit, "solidificare în strat de apă rotitor".

Structura internă de domenii a unui astfel de fir este formată dintr-un miez longitudinal ce ocupă cam 70% din volumul firului, care este ocupat dintr-un singur domeniu magnetic cu magnetizație axială cu firul și dintr-o teacă în care domeniile magnetice sunt dispuse radial sau circular față de axa firului. În funcție de structura de domenii, de compoziția și tipul firului, în acesta apar o serie de efecte și fenomene speciale, care pot fi exploatate în construcția de senzori. Unul din aceste efecte este efectul de *magnetoimpedanță gigant* (MIG), din care derivă efectul de *stressimpedanță gigant* (SIG).

MIG este o consecință a structurii interne de domenii circulare din teacă și a tensiunilor mecanice interne care apar în procesul de solidificare rapidă a firului și apare la FMA cu magnetostricțiune redusă. În esență, efectul MIG constă în modificarea accentuată a impedanței unui FMA atunci când este parcurs de un curent electric alternativ de o anumită frecvență și este supus unui câmp magnetic axial (Zhukov et al., 2015). Impedanța firului, Z, depinde de frecvența f a curentului electric ce străbate firul, de intensitatea câmpului magnetic axial H, dar și de tensiunile mecanice axiale și radiale la care este supus firul. În condițiile în care frecvența și câmpul magnetic sunt menținute constante într-o anumită configurație, impedanța firului depinde de eforturile mecanice aplicate firului, caz în care efectul MIG ia denumirea de efect SIG.

3.2.2 Caracteristicile elementului sensibil

După cum afirmam mai sus, pentru construcția dendrometrului s-a folosit efectul SIG care apare în FMA, adică modificarea impedanței unui FMA atunci când acesta este supus unui efort axial σ . În această secțiune se va da un exemplu concret de caracteristici trasate pentru materialul utilizat în construcția dendrometrului, fir amorf cu compoziția $(Co_{94}Fe_6)_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$ de diametru 120 µm ±4 µm, produs de Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Fizică Tehnică Iași.

S-au trasat caracteristicile $Z(\sigma)$ și variația relativă a impedanței, ΔZ_r , calculată cu formula:

$$\Delta Z_r(\sigma) = \left| \frac{|Z(\sigma)| - |Z_0|}{|Z_0|} \right| 100 \quad [\%]$$

unde

 $Z(\sigma)$ este impedanța firului supus la efortul axial σ

 Z_0 este impedanța firului în absența efortului.

Experimentul a fost realizat pentru 3 lungimi diferite ale firului: 1 = 10 mm, 20 mm și 30 mm și la diverse valori ale frecventei curentului alternativ f = 0,1 MHz , 1,0 MHz , 2,0 MHz , 3,0 MHz și 4,0 MHz.

O schiță a dispozitivului cu care s-a făcut trasarea caracteristicilor este dată în figura 3.2

Acest dispozitiv permite reglarea efortului axial prin intermediul unui șurub cu pas fin și a unui resort calibrat, căruia i-a fost determinată constanta elastică (k = 300 N/m). Măsurarea impedanței s-a realizat cu ajutorul unei punți automate AGILENT 4285A sub forma modulului impedanței |Z| și a defazajului ϕ . Toate măsurătorile au fost realizate automat de către un instrument virtual construit în mediul de programare LabVIEW, singura acțiune manuală fiind acționarea șurubului de reglaj al tensionării resortului, pentru a obține tensiunea mecanică în FMA, conform punctelor de măsurare. Intervalul de variație a efortului mecanic a fost cuprins între 0 MPa și 450 MPa.

Măsurătorilor au fost realizate pentru diverse valori ale intensității curentului, cuprinse între 0,5 mA și 4 mA. S-a constatat că intensitatea curentului nu influențează decisiv caracteristicile firului. De aceea, toate experimentele, au fost realizate pentru un curent având intensitatea de 2 mA, un



Figura 3.2. Dispozitivul de trasare a caracteristicilor.

compromis între raportul semnal-zgomot și încălzirea firului.

Din inspecția acestor caracteristici se constată că impedanța crește cu creșterea lungimii firului, dar și cu frecvența. Firele mai scurte au caracteristici mai liniare, dar sunt mai puțin sensibile la efectul SIG decât firele mai lungi.

În figura 3.3a este dată variația relativă a impedanței cu efortul axial, pentru un fir cu lungimea de 20 mm și diverse frecvențe, care reflectă, de fapt, sensibilitatea firului la efectul SIG. Se constată că creșterea frecventei îmbunătățește liniaritatea acestei caracteristici, dar pentru un interval aproximativ cuprins între 0 și 300 MPa, frecventa nu influențează semnificativ această caracteristică.

În urma compararării caracteristicilor FMA pentru cele 3 lungimi, 10, 20 și 30 mm la frecvența semnalului f = 1 MHz s-a observat faptul că firul cu lungimea de 20 mm se comportă cel mai liniar. Acesta având o sensibilitate de peste 30%, fapt pentru care s-a ales ca un compromis între gabarit și performante pentru construirea prototipului dendrometrului propus.

S-au ales parametrii finali ai firului cu care a fost construit elementul sensibil al dendrometrului:

- compoziție $(Co_{94}Fe_6)_{72.5}Si_{12.5}B_{15}$,
- diametru $\phi = 120 \,\mu\text{m}$,
- lungime 1 = 20 mm,
- intensitatea curentului de măsură I = 2 mA,
- frecvența de măsurare f = 1 MHz.

Pentru acești parametri s-a trasat caracteristica din figura 3.3b





(a) Variația modulului impedanței firului cu l = 20 mm în funcție de efortul de întindere axial σ , pentru diferite frecvențe, I = 2 mA.





Caracteristica din figura 3.3b este neliniară, însă prin restrângerea domeniului de variație a efortului axial, se poate obține un domeniu de lucru cu centrare pe un punct de referință (pr) $M(\sigma_{pr}, Z_{pr})$

cu o liniaritate sub 1 %. În acest punct sensibilitatea elementului sensibil, firul amorf cu lungimea de 20 cm, este de $S_{pr} = 0.35 \Omega$ /MPa. Punctul M se obține prin pretensionarea firului cu efortul constant σ_{pr} . Pe această zonă liniară, ecuația caracteristicii se scrie:

$$Z_l(\sigma) = Z_{pr} + S(\sigma - \sigma_{pr}) \quad \text{unde S este sensibilitatea FMA} \quad S = \frac{dZ}{d\sigma}|_{\sigma = \sigma_{pr}}$$

3.3 Construcția dendrometrului

Dendrometrul este constituit din:

- o structură mecanică, ale cărei componente au fost tipărite la o imprimantă 3D, în care sunt montate elementele sensibile într-o structură de punte electrică,
- componenta electronică dedicată prelucrării semnalului furnizat de elementele sensibile și transformării acestuia într-o tensiune electrică proporțională cu variațiile de diametru ale trunchiului pe care este atașat dispozitivul.

3.3.1 Structura mecanică a dendrometrului

O schemă simplificată a construcției fizice a dendrometrului este dată în figura 3.4a, iar o fotografie a acestuia, amplasat pe trunchiul unui copac, este în figura 3.4b.





chița părții mecanice a dendrometrului. (b) O fotografie a dispozitivului atașat de copac. Figura 3.4. Schița părții mecanice și o fotografie a dendrometrului.

Conform figurii 3.4a, dispozitivul este atașat trunchiului copacului 1, cu ajutorul benzii flexibile 2, care acționează asupra umărului 4, care culisează în raport cu carcasa fixă 3. Mișcarea umărului 4, după direcția radială a trunchiului se datorează modificării diametrului trunchiului, așa cum este descris în secțiunea 3.1, figura 3.1. De umărul 4 este prinsă piesa mobilă 5, iar de carcasa fixă este prinsă piesa fixă 7. Apare astfel o mișcare relativă între piesele 5 și 7, între care se găsesc resoartele 6, care convertesc această mișcare într-o forță F după relația:

$$F = k \cdot dx$$

unde dx este deplasarea din figura 3.1, iar k este constanta resoartelor. De piesele 5 și 7 sunt prinse piesele 9 și respectiv 10, care acționează asupra elementelor sensibile 11, reprezentate printr-un FMA înfășurat în jurul punctelor fixe A, B, C și D conform figurii 3.5a. Firul este prins în cele 4 puncte cu ajutorul unor șuruburi, astfel încât secțiunile BC și AD sunt supuse unui efort axial de întindere produs de forțele F și se vor denumi în continuare elemente active (EA), în timp ce secțiunile AB și CD nu suferă astfel de eforturi axiale sub acțiunea forțelor F, se vor denumi elemente pasive (EP).

Ideea utilizării a patru elemente legate în punte, două active și două pasive are două avantaje: crește sensibilitatea dispozitivului și permite compensarea efectului temperaturii asupra elementelor sensibile. Șurubul 8 este prevăzut pentru pretensionarea FMA, pentru a-l aduce în zona liniară de lucru, adică în punctul M de pe caracteristică.

Se obține astfel o configurație de punte Wheatstone, detaliată în figura 3.5a, a cărei schemă electrică este prezentată în figura 3.5b.



 $V_{s} \bigcirc D \bigoplus V_{diff} \bigoplus B$ PE_{2} $(Z_{a2}) \bigoplus V_{diff} \bigoplus B$ AE_{1} (Z_{a1}) C

(*a*) Legarea FMA în configurație de punte Wheatstone.

(b) Schema electrică a legării elementelor sensibile în circuit.

Figura 3.5. Modul de conectarea a elementelor sensibile: conectarea FMA în configurație de punte Wheatstone, schema electrică a legării elementelor sensibile în circuit.

3.3.2 Abordarea matematică

Puntea prezentată în figura 3.5b este compusă din elementele pasive EP_1 și EP_2 de impedanțe Z_{p1} și Z_{p2} și din elementele active EA_1 și EA_2 de impedanțe Z_{a1} și Z_{a2} . Puntea este alimentată la tensiunea alternativă V_s între punctele A și C, iar tensiunea diferențială de dezechilibru a punții, V_{diff} , culeasă între punctele B și D, este o măsură a tensiunii axiale F și deci a deplasării dx prin relația:

$$V_{\text{diff}} = \xi(dx)$$

Funcția ξ nu depinde în mod direct proporțional de variabila dx. Ea poate fi dedusă după cum urmează.

În poziția inițială, ajustabilă prin șurubul 8 (figura 3.4a), EA sunt pretensionate astfel încât punctul de lucru este adus în punctul M, în zona liniară a caracteristicii prezentate în figura 3.3b. Odată cu modificarea diametrului trunchiului cu valoarea d și implicit mișcarea piesei 4 cu distanța dx, punctul de lucru al EA se deplasează pe caracteristică producând o variație ΔZ_{σ} a impedanței EA, în timp ce EP rămân netensionate având o valoare constantă Z_p .

Un factor perturbator important este temperatura, care modifică impedanța cu valori semnificative, comparabile cu variațiile datorate modificării diametrului. Compensarea efectului temperaturii se face prin montarea în punte a celor patru elemente identice, două active și două pasive.

Deducerea relației de dependență a tensiunii diferențiale de dezechilibru a punții, V_{diff} , de variația de impedanță ΔZ_{σ} se face considerând elementele sensibile identice ca dimensiuni și structură. Astfel, impedanțele acestora pot fi considerate, în ipoteză, egale, în poziția netensionată, pentru o temperatură de referință θ_0 . Pentru o tensiune mecanică σ și o temperatură θ , putem scrie:

$$Z_{a_{\sigma\theta}} = Z_{pr_{\theta_0}} + \Delta Z_{\sigma_{\theta_0}} + \Delta Z_{\theta}$$
$$Z_{p_{\theta}} = Z_{p_{\theta_0}} + \Delta Z_{\theta}$$

unde:

 $\begin{array}{ll} Z_{a_{\sigma\theta}} &= \mathrm{este\ impedanța\ EA\ la\ efortul\ \sigma\ si\ temperatura\ \theta;}\\ Z_{pr_{\theta_0}} &= \mathrm{este\ impedanța\ EA\ în\ punctul\ de\ referință\ M\ si\ la\ temperatura\ \theta_0;}\\ \Delta Z_{\theta} &= \mathrm{este\ variația\ de\ impedanță\ a\ EA\ si\ a\ EP\ datorată\ temperaturi\ \theta;}\\ \Delta Z_{\sigma_{\theta_0}} &= \mathrm{este\ variația\ de\ impedanță\ a\ EA\ datorată\ efortului\ axial\ \sigma\ la\ temperatura\ \theta;}\\ Z_{p_{\theta}} &= \mathrm{este\ impedanța\ EP\ la\ temperatura\ \theta,\ în\ absența\ vreunui\ efort\ axial\ \sigma;}\\ Z_{p_{\theta_0}} &= \mathrm{este\ impedanța\ EP\ la\ temperatura\ \theta_0;} \end{array}$

La o anumită temperatură θ și la un anumit efort axial σ va fi:

$$V_{\text{diff}} = V_s \frac{Z_{a_{\sigma\theta}} - Z_{p_{\theta}}}{Z_{a_{\sigma\theta}} + Z_{p_{\theta}}} = V_s \frac{Z_{pr_{\theta_0}} - Z_{p_{\theta_0}} + \Delta Z_{\sigma\theta_0}}{Z_{bp_{\theta_0}} + \Delta Z_{\sigma_{\theta_0}} + Z_{p_{\theta_0}} + 2\Delta Z_{\theta}}$$
(3.1)

deci

$$V_{\text{diff}} = \zeta(\Delta Z_{\sigma})$$

Diferența $Z_{pr_{\theta_0}} - Z_{p_{\theta_0}}$ este dată de pretensionarea elementelor sensibile pentru a ajunge în punctul M de pe caracteristică și este constantă.

Se observă în relația 3.1 eliminarea termenului ΔZ_{θ} datorat temperaturii de la numărătorul fracției prin montarea în punte a celor patru senzori, acest termen având influență doar la numitor, influență mult redusă.

S-a obținut deci o relație de dependență a tensiunii diferențiale V_{diff} de mărimea dx:

$$V_{\text{diff}} = \xi(dx)$$

3.3.3 Partea electronică a dendrometrului

În această secțiune este descrisă partea electronică de prelucrare și condiționare a semnalelor electrice în cadrul dendrometrului, care furnizează tensiunea continuă dependentă de variația diametrului trunchiului. Puntea de senzori realizată din FMA are un decalaj determinat de diametrul arborelui măsurat. Principiul de măsurare este prezentat în figura 3.6.



Din construcția mecanică a senzorului avem:

$$Z_{a2} = Z_{a1} = Z_a$$
 și $Z_{p1} = Z_{p2} = Z_p$

Impedanțele se pot scrie separând efectul temperaturii și a tensionării:

$$Z_a = Z_0 + Z_\theta + Z_\sigma \qquad Z_p = Z_0 + Z_\theta$$

înlocuind obținem:

$$u_{AC} = i_1(Z_a + Z_p) = i_2(Z_p + Z_a)$$
$$i = i_1 + i_2, i_1 = i_2 = \frac{i}{2}$$

Calculăm valoarea potențialelor Vp si Vn

$$V_{p} = i_{1}Z_{p} + V_{m} \qquad V_{n} = i_{2}Z_{a} + V_{m}$$
$$V_{p} - V_{n} = \frac{i}{2}(Z_{p} - Z_{a}) \qquad (3.2)$$

$$V_p - V_n = \frac{i}{2} Z_\sigma \tag{3.3}$$

Figura 3.6. Schema generică de alimentare a punții de senzori.

În ecuațiile de mai sus s-a notat:



- Z_{S1} = impedanța sursei de curent;
- Z_0 = impedanța firului în condițiile de referință (temperatură, tensionare);
- Z_{σ} = modificarea impedanței firului datorită modificării tensionării față de tensionarea de referință (include modificarea impedanței datorate pretensionării și a modificării diametrului arborelui);
- Z_{θ} = modificarea impedanței firului datorită modificării temperaturii față de temperatura de referință;
- u_{AC} = tensiunea dintre punctul A și punctul C al punții, este tensiunea cu care este alimentată puntea;
- i = curentul de alimentarea a punții, i_1 , i_2 curenții prin brațele punții;
- V_m = tensiunea de curent continuu față de care se alimentează puntea, este de obicei jumătatea tensiunii de alimentare, pentru a permite o amplitudine cât mai mare a tensiunii de alimentare a punții.

Pentru compensarea variațiilor parametrilor blocurilor care compun partea electronică s-a adoptat o schemă de măsurare cu două punți. O punte este cea a senzorilor, a doua punte a fost realizată din rezistențe și a fost utilizată pentru calibrarea măsurătorilor.

Calculele realizate mai sus pentru puntea de senzori sunt valabile și pentru puntea realizată din rezistențe (valorile acestora sunt fixe). În ecuația 3.2 s-a înlocuit impedanța Z cu rezistența R, forma ecuației este aceeași.

$$V_p - V_n = \frac{i}{2}(R_p - R_a) = \frac{i}{2}R_c, \text{ unde } R_p = R_a + R_c$$
 (3.4)

Valoarea rezistențelor R_a a fost aleasă astfel încât să fie apropiate de valoarea medie a impedanței Z_p . Valoarea rezistenței R_c a fost aleasă astfel încât să fie apropiată de maximul modulului diferenței dintre impedanțele Z_a și Z_p .

Schema bloc a părții electronice a dendrometrului este prezentată în figura 3.7. Aceasta asigură alimentarea punții de senzori (realizată cu FMA) și a punții de referință cu curent alternativ, culegerea semnalului diferențial, condiționarea analogică a acestuia, transformarea în tensiune continuă, conversia acestei tensiuni în semnal digital și transmiterea informației într-un server de stocare prin intermediul comunicației Wi-Fi.



Figura 3.7. Schema bloc a părții electronice a dendrometrului.

Valoarea citită de microcontroler este dată de valoarea tensiunii de decalaj a punții și de amplificarea lanțului de prelucrare, amplificare pe care o notăm cu A.

$$N_z = A \frac{i}{2} Z_\sigma, \ N_r = A \frac{i}{2} R_c \Rightarrow Z_\sigma = R_c \frac{N_z}{N_r}$$
(3.5)

Cu N_z și N_r au fost notate valorile numerice citite de microcontroler după conversia analogdigital a tensiunii la ieșirea blocului de filtrare, în cazul măsurării decalajului punții de senzori, res-

pectiv al punții de referință.

Amplificarea, A, nu este o constantă, ea variază în timp și în funcție de temperatura montajului. Din acest motiv, logica de preluare a datelor începe cu citirea punții de referință și continuă cu citirea punții de senzori. Datorită faptului că citirea celor două punți se desfășoară într-un interval de timp de maximum 60 s, se poate considera că valoarea amplificării, A, și valoarea curentului de excitație rămân constante în acest interval de timp.

În ecuația 3.5 se observă faptul că valoarea decalajul impedanțelor punții de senzori depinde de valorile citite de microcontroler pentru cele două punți și de valoarea decalajului dintre rezistențele punții de referință, R_c .

Deoarece traductorul pentru măsurarea diametrului trunchiului arborilor este amplasat în mediul exterior, direct pe trunchiul arborelui, intervalul de temperaturi în care acesta trebuie să opereze variază între -25 °C și 60 °C. Această gamă de variație a temperaturilor generează variații ale amplificării sistemului chiar și în cazul utilizării unor componente stabile și precise.

Explicăm schema bloc prezentată în figura 3.7. Blocul "Oscilator" generează oscilații cvasisinusoidale sau triunghiulare cu frecvență de $1 \div 2$ MHz și amplitudine de $0.5 \div 1$ V. Această tensiune este preluată de "Convertorul tensiune-curent" și transformată în curent. Se utilizează comutatoare electronice, care sunt acționate sincron, pentru alimentarea pe rând a punților în curent alternativ și preluarea tensiunii de decalaj. "Punte senzori" este puntea realizată din firele amorfe care compun senzorul. "Punte referintă" este puntea construită din rezistente de valori aproximativ egale cu impedanțele firelor amorfe din puntea de senzori la frecvența de lucru. A fost adoptată această soluție pentru eliminarea erorilor introduse de variatia tensiunii oscilatorului și de variatia amplificării lanțului de prelucrare a semnalului. Tensiunea de decalaj a punții este amplificată cu ajutorul blocului "Amplificator diferențial" și aplicată blocului "Detector de vârf". Acesta generează un semnal de curent continuu proportional cu valoarea amplitudinii (valoarea vârf la vârf) semnalului alternativ de la intrare. Semnalul este filtrat de blocul "Filtru" pentru eliminarea zgomotelor și este transformat în semnal digital de către blocul "ADC". "Microcontroler" este blocul care comandă comutatoarele electronice, citește convertorului ADC și realizează calculele pentru determinarea decalajului punții de senzori. Acesta măsoară alternativ semnalul generat de cele două punți, prin calcul compensează variația parametrilor lanțului de măsurare și transmite către serverul de stocare valoarea decalajului impedanțelor punții realizată cu fire amorfe.

S-au testat mai multe variante de scheme electronice și diferite modele de *Amplificator operațional* (AO) pentru a obține rezultate optime. Schemele au fost testate prin utilizarea programelor de simulare ("TINA-Ti", "LTspice") și a modelelor SPICE puse la dispoziție de producători. După optimizarea realizată prin simulare schemele electronice au fost realizate fizic.

3.3.3.1 Blocul oscilator

În figura 3.8 este prezentată schema oscilatorului. Acesta este compus dintr-un generator de semnal triunghiular și un bloc de integrare.



Figura 3.8. Schema electronică a blocului oscilator.

Formele de undă obținute sunt prezentate în figura 3.9, frecvența circuitului realizat fizic este

de aproximativ 1,7 MHz. Pentru componentele din schemă frecvența teoretică este de 1,6 MHz, dar trebuie luată în considerație împrăștierea valorilor componentelor utilizate ($\pm 20\%$ pentru condensator și de $\pm 5\%$ pentru rezistențe).



Figura 3.9. Formele de undă pentru blocului oscilator, cu albastru este semnalul VT, cu galben este semnalul TP1.

3.3.3.2 Convertorul tensiune-curent

În figura 3.10 este prezentată schema convertorului tensiune curent.



Figura 3.10. Schema electronică a blocului convertor tensiune - curent.

Acest bloc este realizat cu ajutorul unui AO model OPA863¹ conectat în configurație de amplificator inversor. Scopul acestui bloc este de a alimenta cu curent puntea de senzori, valoarea amplitudinii curentului este stabilită în funcție de tipul de FMA utilizat. Amplitudinea semnalului generat de oscilator a fost de aproximativ 1 V, rezistența notată cu RS, stabilește valoarea curentului de excitație a punților.

3.3.3.3 Comutatorul de măsurare

În figura 3.11 este prezentată schema comutatorului de măsurare, cu bornele punții de senzori notate ca în figura 3.5.

Bornele de alimentare a punților sunt notate cu B1 și B2. Comutatorul S1 selectează puntea care va fi alimentată, cea de senzori sau cea de referință. Comutatoarele S2 si S3 realizează preluarea tensiunii de decalaj de pe puntea alimentată, respectiv semnalele DF1 și DF2. Comutatoarele sunt acționate simultan, semnalul de comandă pentru cele trei comutatoare este notat în schemă cu SEL.

3.3.3.4 Amplificatorul diferențial

În figura 3.12 este prezentată schema amplificatorului diferențial.

```
<sup>1</sup>https://www.ti.com/lit/ds/symlink/opa863.pdf
```







Figura 3.12. Schema electronică a blocului amplificator diferențial.

În figura 3.13a este prezentat semnalul de intrare în amplificator, în figura 3.13b sunt prezentate semnalele de ieșire a amplificatoarelor, notate în schemă cu TP3 și TAMP.



ferențial, sen de culoare a



Figura 3.13. Formele de undă pentru blocului amplificator diferențial.

Amplificarea se stabilește cu ajutorul rezistenței notate Ra în schemă, pentru formele de undă prezentate, valoare rezistenței a fost de 147 Ω . Amplificarea scade pe măsură ce frecvența crește, astfel încât forma semnalului de ieșire nu va reproduce fidel forma semnalului de intrare, deoarece componentele de frecvență înaltă ale semnalului de intrare vor fi amplificate într-o măsură mai mică. În cazul nostru la intrare s-a utilizat un semnal cu formă aproximativ triunghiulară, la ieșire s-a obținut

un semnal sinusoidal, așa cum se poate observa în figura 3.13b.

3.3.3.5 Detectorul de valori de vârf

În figura 3.10 este prezentată schema circuitului detector de vârf.



Figura 3.14. Schema electronică a blocului de detecție de vârf.

Schema a fost alcătuită din două detectoare de vârf: cel amplasat în partea superioară a fost utilizat pentru detectarea valorii maxime a semnalului, iar cel amplasat în partea inferioară a fost destinat detectării valorii minime a semnalului. Formele de undă care au fost obținute la ieșire și semnalul de intrare sunt prezentate în figura 3.15.



(a) Formele de undă pentru blocului de detecție a vârfului superior.

(b) Formele de undă pentru blocului de detecție a vârfului inferior.

Figura 3.15. Formele de undă pentru blocului de detecție a vârfurilor, cu galben este semnalul de intrare, cu albastru este semnalul de ieșire, semnalele măsurate în punctul PDP și PDM.

3.3.3.6 Filtrul

În figura 3.16 este prezentată schema circuitului de filtrare. S-au utilizat două circuite identice pentru filtrarea semnalului de la detectoarele de vârf ale valorii superioare și inferioare a semnalului.

Utilizând valorile componentelor prezentate în figura 3.16 s-a obținut un filtru trece jos, cu amplificare unitară în banda de trecere. La frecvența de 10 Hz amplificarea filtrului a fost de -3 dB, la frecvența de 100 Hz amplificarea filtrului a fost de -40 dB.

Blocul de filtrare a introdus o întârziere a variației amplitudinii semnalului de ieșire față de semnalul de intrare de aproximativ 150 ms.



Figura 3.16. Schema electronică a blocului de filtrare.

3.3.3.7 Convertorul analog-digital ADC

S-au utilizat două modele de convertor ADC pentru testare, MCP3424² și ADS1110³. În varianta finală s-a utilizat modelul ADS1110 deoarece oferă o mai bună a stabilitate a referinței și dimensiunea capsulei este mai mică. Caracteristicile acestora sunt similare, schema electronică a blocului ADC este prezentată în figura 3.17.



Figura 3.17. Schema electronică a blocului ADC.

3.3.3.8 Microcontrolerul

S-a utilizat un microcontroler din familia ESP32 produs de Espressif pentru:

- implementarea logicii de comutare a punților,
- setarea parametrilor de conversie analog în digital și preluarea datelor din convertorul ADC,
- analiza și prelucrarea datelor achiziționate,
- transmiterea informațiilor către serverul de stocare.

Logica programului a fost modificată pentru testarea diferitelor aspecte, de la modul de lucru a blocurilor analogice la verificarea stabilității în timp a datelor preluate din convertoarele ADC. Inițial datele au fost transmise la intervale de 10 secunde, microcontrolerul a fost tot timpul în starea activă și conectat la router, modulul analogic a fost alimentat permanent.

În varianta finală datele au fost preluate la un interval de 20 min, modulul analogic a fost alimentat numai pe durata preluării datelor. Pentru a asigura stabilitatea semnalelor analogice, se utilizează temporizări care permit stabilizarea completă a modulelor analogice înainte de colectarea datelor. După preluarea datelor modulul analogic nu a mai fost alimentat și s-a activat comunicația Wi-Fi. Acest mod de lucru a asigurat un consum redus al modulului și a eliminat posibilele interferențe asupra semnalelor analogice generate de comunicația Wi-Fi.

3.4 Rezultate experimentale

Dendrometrul a fost construit ca model experimental și testat în laborator în condiții standard de mediu (temperatură, presiune și umiditate constantă) pentru evaluarea performantelor. S-a trasat

²https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22088c.pdf

³https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1110.pdf?ts=1730466374836

astfel caracteristica traductorului, adică dependența tensiunii Vout din figura 3.17 de deplasarea piesei mobile 4 din figura 3.4a. S-au trasat caracteristicile $V_{out} = \zeta(dx)$ pentru trei temperaturi diferite, $\theta = 5 \,^{\circ}$ C, $\theta = 25 \,^{\circ}$ C și $\theta = 45 \,^{\circ}$ C. Caracteristica a fost trasată pentru diferite poziții ale punctului de zero, poziții fixate prin acționarea șurubului de pretensionare 8 din figura 3.4a. Tensiunea Vout este tensiunea diferențială care se obține între bornele P și N prezentate în figura 3.16, această tensiune este egală cu amplitudinea semnalului generat de dezechilibrul punții de senzori. Deoarece se mențin constante condițiile de mediu, parametrii modului electronic nu variază și nu este necesară compensarea caracteristicilor acestuia. Caracteristicile au fost trasate pe un stand experimental a cărui construcție este redată în figura 3.18.

Standul conține un șurub micrometric cu rezoluție de 0,05 mm de a cărui capăt este prinsă partea mobilă a traductorului, astfel încât deplasarea acesteia este măsurată cu precizie, cu ajutorul micrometrului. Trasarea caracteristicilor s-a făcut pe un interval cuprins între 0 și 5 mm, deplasarea fiind măsurată cu o precizie de 0,5 %, cât este precizia micrometrului. Pasul de deplasare a fost de 0,5 mm.

Pentru evaluarea liniarității și a gamei de măsură a dendrometrului, s-au trasat mai multe caracteristici cu punctul de referința (zero) în diverse poziții ale punctului M pe caracteristica firului amorf din figura 3.3b, reglabile cu ajutorul șurubului de pretensionare 8 din figura 3.4a.



Figura 3.18. Stand experimental pentru trasarea caracteristicilor dendrometrului.

Pentru evaluarea influenței temperaturii asupra

dispozitivului, caracteristicile au fost trasate pentru trei temperaturi diferite: 5 °C, 25 °C și 45 °C. Pentru aceasta, traductorul a fost introdus într-o incintă termostatată de tip incubator de laborator, model Steinberg SBS-LI-18, partea electronică rămânând în afara incintei. Tensiunea culeasă de la senzor a fost adusă la circuit printr-un cablu torsadat de maximum 0,5 m lungime. Fiecare set de măsurători a fost efectuat după stabilizarea temperaturii, cu o variație maximă de ± 1 °C față de temperatura setată. Întrucât alimentarea punții traductorului s-a făcut în curent, așa cum este descris în secțiunea 3.3.3, nu au fost necesare măsuri de ecranare a cablului de alimentare.

Pentru evaluarea repetabilității și a preciziei instrumentului, s-au efectuat pentru fiecare temperatură câte 6 cicluri de deplasare a părții mobile în intervalul 0-5-0 mm, iar valorile obținute pentru aceeași poziție au fost mediate, calculându-se deviația standard. Calculul intervalului de încredere și evaluarea incertitudinii s-a făcut cu probabilitatea de 95,5%.

În figura 3.19a este reprezentată caracteristica traductorului $V_{out} = \zeta(dx)$ trasată pentru temperatura de 25 °C și poziția zeroului corespunzătoare unei pretensionări a firului cu un efort axial de aproximativ 120 MPa, iar în figurile 3.19b) și 3.19c sunt date caracteristicile trasate pentru pretensionări de 250 MPa și fără pretensionare. Valorile numerice sunt date în tabelul 3.1. Se observă neliniaritatea caracteristicilor pentru cazurile b) și c) care este cauzată atât de neliniaritatea elementelor sensibile, cât și de configurația în puntea Wheatstone în care acestea sunt montate. Pentru varianta a) s-a obținut cea mai bună liniaritate a dispozitivului, de 1,4 %.

Tabelul 3.1. Variația tensiunii de ieșire Vout corespunzătoare deplasării dx și deviațiile standard corespunzătoare (d.s.) pentru trei valori ale punctului de zero.

σ [MPa]	dx [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
0	Vout [mV]	365	402	455	520	578	640	730	799	860	955	1054
U	d.s. [mV]	35	34	39	35	31	32	29	28	24	32	34
120	Vout [mV]	554	640	730	799	860	955	1054	1130	1190	1289	1340
	d.s. [mV]	25	24	29	28	31	27	35	34	45	37	28
250	Vout [mV]	854	946	1056	1138	1198	1289	1330	1406	1470	1520	1540
	d.s. [mV]	25	24	29	35	36	27	35	34	35	42	45



Figura 3.19. Caracteristica dendrometrului pentru temperatura de 25 °C și pretensionare de a) σ = 120 MPa, b) σ = 250 MPa, c) σ = 0 MPa.

Pentru caracteristica cea mai liniară, corespunzătoare punctului de zero pentru $\sigma = 120$ MPa, incertitudinea calculată ca valoare maximă a incertitudinilor fiecărui punct de măsură este de 7,5 % pentru un interval de încredere de 95,5 % și domeniul de măsură 0 – 5 mm. De asemenea, repetabilitatea calculată este de 2,8 %.

In tabelul 3.2 sunt date valorile corespunzătoare tuturor celor trei temperaturi. S-a calculat coeficientul de temperatură K_{θ} ca:

$$K_{\theta} = max_{i}\left(\frac{\epsilon_{\mu_{i}}(\theta)}{\Delta\theta}\right) = max_{i}\left(\frac{\left(\frac{\Delta\mu_{i}}{\mu_{i}}\right)_{\theta} * 100}{\Delta\theta}\right)$$

unde $\epsilon_{\mu_i}(\theta)$ este variația relativă a valorii medii datorată variației temperaturii pentru punctul i.

Valoarea calculată a coeficientului de temperatură este $K_{\theta} = 0,13 \%$ °C. Această valoare este mult mai mică decât coeficientul de variație cu temperatura a firelor amorfe, care este de 0,32 %°C pentru firele cu care s-a lucrat. Această reducere se datorează compensării cu temperatura realizată prin montajul în punte a elementelor sensibile.

Tabelul 3.2. Variația tensiunii de ieșire Vout în funcție de deplasarea dx pentru trei temperaturi.

θ [°C]	dx [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
5	Vout [mV]	541	621	708	774	840	932	1027	1098	1155	1251	1319
25	Vout [mV]	554	640	730	799	860	955	1054	1130	1190	1289	1350
45	Vout [mV]	572	657	749	819	888	985	1086	1161	1221	1323	1395

În tabelul 3.3 este dată o sinteză a principalelor performanțe ale dendrometrului în varianta modelului experimental descris mai sus și testat.

Tabelul 3.3. Sumarizarea principalelor performanțe ale dendrometrului în varianta modelului experimental.

Parametru	Valoare
Gama de măsură	$0-5 \mathrm{mm}$
Liniaritate	1,4 %
Eroare maximă	7,5 %
Repetabilitate	2,8 %
Coeficient de temperatură	0,13 %/°C
Consum în stare activă	17 mA
Timp de răspuns	<1 s

Capitolul 4

Rezultate experimentale obținute cu sistemul de monitorizare

4.1 Date colectate de la nodurile IoT

Datele transmise de la noduri, cu excepția nodurilor N8 și N9, sunt stocate în "Google Sheets". Imaginile transmise de nodurile N1 au fost stocate în "Google Drive". Nodurile de tip N8 au transmis datele într-un sever MQTT ("broker"), din acest server datele au fost preluate cu ajutorul unui program scris în limbajul Python. Nodurile de tip N9 au transmis datele prin intermediul comunicației LoRaWan către serverul "ChirpStack". La receptionare unei transmisii de la un nod, serverul a publicat datele în topicul aferent. Cu ajutorul aplicației "Telegraf", valorile senzorilor au fost preluate și stocate în baza de date tip InfluxDB.

In acest rezumat pentru graficele datelor preluate de noduri se prezintă numai datele brute culese pe întreaga durată în care nodurile au fost active.

Date colectate de la nodurile de tip N1 și N8 4.1.1

Fiecare nod a captat între 300 și 600 de imagini, cu mențiunea că aproximativ 15 % din imagini nu sunt utilizabile. Problemele cele mai des apărute au fost (în ordinea frecvenței apariției): iluminarea necorespunzătoare, obturarea imaginii de creșterea vegetației sau de mișcarea frunzelor, ieșirea obiectului de interes din cadru datorită dezvoltării plantei, achizitionarea incompletă a imaginii. Imagini care exemplifică o parte din aceste probleme sunt prezentate în figura 4.2.

In figura 4.1 sunt prezentate, ca exemplu, o parte din imaginile captate de un nod de tip N1.



Figura 4.1. Imagini cu rezoluția de 1280 x 1024 px captate de camera amplasată în zona cireșului





(a) Imagine obturată

(b) Imagine obturată parțial



(c) Imagine miș- (d) Imagine ne- (e) Imagine cu re- (f) Imagine întucată



clară



flexii



necată

Figura 4.2. Defecte care pot apărea (imagine obturată, obturată parțială, "mișcată", neclară, lumină puternică sau insuficientă) în preluarea imaginilor de către nodurile de tip N1 și N8

4.1.2 Date colectate de la nodul de tip N2A

Informațiile preluate de nodul N2A sunt afișate grupat în figura 4.3. Acestea sunt:

- iradianța solară pentru lungimile de undă de 450 nm, 500 nm, 550 nm, 570 nm, 600 nm și 650 nm, care este afișată pe primul grafic,
- temperatura aerului, temperatura pe sol și temperatura în sol la o adâncime de 20 cm, afișate pe al doilea grafic,
- umiditatea aerului, afișată pe al doilea grafic, scala valorilor fiind poziționată în partea dreaptă,
- presiunea aerului și umiditatea solului, afișate pe al treilea grafic,
- tensiunea acumulatorului Li-Po și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al patrulea grafic



Figura 4.3. Date culese de nodul N2A în perioada ianuarie 2022 - august 2024

Nodul N2A a transmis date din data de 11 ianuarie 2022. În data de 21 iunie 2024 ora 12:41 a avut loc oprirea transmisiei nodului datorita expirării certificatului digital al serverului Google. Pentru remedierea problemei, certificatul a fost actualizat în cod si nodul a fost reprogramat.

4.1.3 Date colectate de la nodul de tip N2B

Informațiile preluate de nodul N2B sunt afișate grupat în figura 4.4. Acestea sunt:

- temperatura și umiditatea aerului, care sunt afișate în primul grafic, temperatura cu scala valorilor în stânga, iar umiditatea cu scala valorilor în dreapta,
- intensitatea luminii solare pentru lungimile de undă de 415 nm, 445 nm, 480 nm, 515 nm, 555 nm, 590 nm, 630 nm, 680 nm, fără filtru şi infraroşu apropiat (NIR), care este afişată pe al doilea grafic,
- tensiunea acumulatorului și numărul de emisii zilnice afișate pe cel de-al treilea grafic.

Nodul N2B a transmis date din data de 16 aprilie 2022. Nodul este funcțional și transmite date în continuare. Graficul afișat conține date până în luna august 2024.

4.1.4 Date colectate de la nodul de tip N3

Informațiile preluate de nodul N3 sunt afișate grupat în figura 4.5. Acestea sunt:

Capitolul 4. Rezultate experimentale obținute cu sistemul de monitorizare



Figura 4.4. Date culese de nodul N2B în perioada 16 aprilie 2022 - 31 august 2024

- temperatura și umiditatea aerului, temperatura solului, care sunt afișate în primul grafic, temperatura cu scala valorilor în stânga, iar umiditatea cu scala valorilor în dreapta,
- umiditatea solului (preluată cu senzorul care măsoară potențialul matricial al solului) și cantitatea de precipitații (citită cu ajutorul senzorul mecanic), care sunt afișate pe cel de-al doilea grafic,
- tensiunea acumulatorului și numărul de emisii zilnice, care sunt afișate pe cel de-al treilea grafic.



Figura 4.5. Date culese de nodul N3 în perioada 11 mai 2022 - 21 iunie 2024

4.1.5 Date colectate de la nodul de tip N4

Informațiile preluate de nodul N4 sunt afișate grupat în figura 4.6. Acestea sunt:

• temperatura pe sol, temperatura la o adâncime de 25 cm în sol și frecvența oscilatorului realizat cu senzorul de umiditate a solului, toate afișate în primul grafic, temperatura cu scala valorilor în stânga, iar umiditatea cu scala valorilor în dreapta,

 umiditatea solului (preluată cu senzorul care măsoară potențialul matricial al solului) și cantitatea de precipitații (citită cu ajutorul senzorul electronic), afișate pe cel de-al doilea grafic,
tanzinare de f. V. de alimentare și numărul de aminii rilnice. afieste ne cel de al trailea grafic

• tensiunea de 5 V de alimentare și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al treilea grafic. În figura 4.6 sunt prezentate datele care au fost preluate de la 26 mai 2022 până la 21 iunie 2024.



Figura 4.6. Date culese de nodul N4 în perioada 26 mai 2022 - 21 iunie 2024

4.1.6 Date colectate de la nodul de tip N5

Informațiile preluate de nodul N5 sunt afișate grupat în figura 4.7. Acestea sunt:

- temperatura și umiditatea solului, afișate în primul grafic, temperatura cu scala valorilor în stânga, iar umiditatea cu scala valorilor în dreapta,
- tensiunea acumulatorului și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al doilea grafic.



Figura 4.7. Date culese de nodul N5 în perioada 9 mai 2022 - 9 septembrie 2024

4.1.7 Date colectate de la nodul de tip N6

Informațiile preluate de nodul N6 sunt afișate grupat în figura 4.8. Acestea sunt:

• patru măsurători de temperatură, afișate în primul grafic,



Figura 4.8. Date culese de nodul N6 în perioada 1 mai 2022 - 27 mai 2023

• tensiunea acumulatorului și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al doilea grafic.

Nodul a măsurat patru temperaturi, senzorii au fost montați în paralel pe un cablu cu patru fire, care asigură alimentarea și magistrala de comunicație. Senzorii au fost amplasați astfel încât să măsoare variațiile temperaturii de-a lungul unei ramuri de copac.

4.1.8 Date colectate de la nodul de tip N7

Informațiile preluate de nodul N7 sunt afișate grupat în figura 4.9. Acestea sunt:

- temperatura și umiditatea solului, afișate în primul grafic, temperatura cu scala valorilor în stânga, iar umiditatea cu scala valorilor în dreapta,
- tensiunea bateriei de 3,3 V și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al doilea grafic.



Figura 4.9. Date culese de nodul N7 în perioada 10 septembrie 2021 - 16 iunie 2024

4.1.9 Date colectate de la nodul de tip N9

Informațiile preluate de nodul N9 (amplasat în zona arbuștilor de zmeur) sunt afișate grupat în figura 4.10. Acestea sunt:

- cantitatea de lumină în spectrul vizibil și infraroșu, afișate în primul grafic,
- temperatura și umiditatea aerului, afișate pe al doilea grafic, cu scala umidității în dreapta,
- temperatura și umiditatea solului, afișate pe al treilea grafic,
- tensiunea acumulatorului și numărul de emisii zilnice, afișate pe cel de-al patrulea grafic.

Nodul a fost activ din data de 17 iunie 2023 până în prezent. Din cauza unor probleme cu alimentarea, datele transmise de noduri nu au fost stocate de la data de 26 septembrie 2023 până la data de 8 noiembrie 2023, cu câteva excepții în data de 4 noiembrie 2023. Această întrerupere în stocarea datelor este marcată ca zona (A) în figura 4.10.



Figura 4.10. Date culese de nodul N9 amplasat în zona arbuștilor de zmeur în perioada 17 iunie 2023 - 11 septembrie 2024

4.2 Analiza consumului de energie al nodurilor IoT

Pentru dimensionarea corectă a acumulatorului Li-Po și a panoului solar necesare funcționării nodului IoT, a fost necesar să se determine consumul de energie al nodului. Acesta nu a fost constant și a depins de mai mulți factori, precum dimensiunea datelor transmise (această dimensiune fiind variabilă în cazul transmiterii de imagini), latențele și erorile canalelor de comunicație.

Pentru determinarea valorii curentului absorbit în diferite etape de execuție a programului, a fost necesară măsurarea curentului instantaneu cu ajutorul unui osciloscop. Din măsurarea curentul absorbit s-a putut determina puterea absorbită, iar prin integrarea acesteia în timp s-a obținut în final, consumul de energie.

Măsurarea curentului absorbit s-a realizat prin deconectarea acumulatorului și alimentarea modulului dintr-o sursă de tensiune stabilizată înseriată cu o rezistență de valoare cunoscută. Schema electrică asociată este prezentată în figura 4.11.

Valoarea nominală a rezistenței a fost selectată în funcție de valoarea maximă a curentului de măsurat. Calculul puterii consumate de nod a fost influențat de tipul de sursă utilizată de nod (liniară sau în comutație). Sursa în comutație absoarbe o putere aproximativ egală cu puterea absorbită de nod. Sursa liniară absoarbe un curent aproximativ egal cu curentul absorbit de nod. În lucrarea (D. Cornei et al., 2023) s-a analizat optimizare consumurilor energetice pentru nodurile de tip N1 și N8.



Figura 4.11. Schema electrică pentru măsurarea curentului absorbit de nodurile IoT

Înregistrările au fost realizate cu ajutorul osciloscopului model "Analog2", produs de DIGI-LENT, care s-a conectat prin comunicație USB la calculator și a softului de vizualizare aferent "Wa-

Capitolul 4. Rezultate experimentale obținute cu sistemul de monitorizare

veForms". Acest soft a permis realizarea de calcule matematice cu valorile achiziționate, exportul, importul și vizualizarea datelor salvate. Pentru măsurarea curentului absorbit de noduri, s-a utilizat o frecvența de achiziție de cel puțin 100 kHz, iar timpul de achiziție a fost de ordinul zecilor de secunde. Pentru înregistrarea datelor modul de lucru a osciloscopului a fost setat pe "RECORD". Acest mod de lucru a avut anumite particularități: axa timpului a avut marcajul de 0 la mijlocul duratei timpului de achiziție. În figurile următoare sunt prezentate numai zonele de interes, din acest motiv valoarea de 0 s nu este poziționată pe mijlocul figurilor.

In figurile 4.12, 4.13, 4.14 sunt prezentate, ca exemplu, înregistrările realizate pentru nodurile de tip N1, N5 și N9.



Figura 4.12. Consumul de putere pentru nodul N1 conectat la un router cu puterea semnalului de -66 dBm



Figura 4.13. Graficul intensității curentului absorbit de nodul N5 (transmisie cu SF12)



Figura 4.14. Graficul intensității curentului absorbit de nodul N9, transmisie la cerere

Capitolul 5

Prelucrarea și analiza datelor experimentale utilizând algoritmi de inteligență artificială

În acest capitol se prezintă modul de prelucrare și analiză a datelor colectate de către nodurile IoT ce fac parte din sistemul de monitorizare, în particular de către nodul N2A, care a înregistrat cei mai mulți parametri și pe perioada cea mai îndelungată de timp. Aceste date se referă la următorii parametri monitorizați:

- Presiune atmosferică [mbar] (pres_aer)
- Temperatură nod [°C] (*temp_nod*)
- Temperatură atmosferică [°C] (temp_aer)
- Temperatură în sol [°C] (*temp_în_sol*)
- Temperatură pe sol [°C] (*temp_pe_sol*)
- Umiditate atmosferică [RH] (*umid_aer*)
- Lumină violet 450 nm $[\mu W/cm^2]$ (*V*450)
- Lumină albastră 500 nm $[\mu W/cm^2]$ (B500)
- Lumină verde 550 nm $[\mu W/cm^2]$ (G550)
- Lumină galbenă 570 nm $[\mu W/cm^2]$ (*Y570*)
- Lumină portocalie $600 \text{ nm} [\mu \text{W/cm}^2] (O600)$
- Lumină roșie 650 nm $[\mu W/cm^2]$ (*R650*)

Pe baza valorilor instantanee ale luminii, au fost introduse încă două coloane în dataset (colecția de date):

- Lumină medie totală (lumină tot), obținută prin medierea celor 6 valori ale luminii
- Lumină medie fotosinteză (*lumină_fot*), obținută prin medierea valorilor luminii utilizate de plante în procesul de fotosinteză (lumina de culoare roșie, oranj, albastră și violet)

În enumerarea de mai sus, fiecare parametru (trăsătură) are asociată în paranteză o denumire prescurtată ce va fi utilizată pentru a face referință la ace(a)sta în continuare.

Datele au fost colectate aproximativ din oră în oră pe o perioadă de 2 ani și 4 luni, începând din 11 ianuarie 2022 până pe 5 mai 2024. Fiecare înregistrare din dataset are asociat un "timestamp" (o etichetă temporală) care indică data, ora și minutul la care au fost măsurați parametrii menționați mai sus.

5.1 Analiza exploratorie a datelor colectate

5.1.1 Preprocesarea datelor

Înainte de analiza efectivă a datelor au fost aplicați următorii pași de preprocesare:

- Pentru fiecare parametru au fost determinate următoarele valori statistice, calculate atât pe lună, cât și pentru întreaga perioadă de timp:
 - valorile minime și maxime,
 - media, mediana, deviația standard,
 - valorile primei și celei de-a treia quartile (Q1 și Q3)¹.

Aceste statistici au fost utilizate pentru a identifica și elimina erorile de măsurare. Spre exem-

¹https://en.wikipedia.org/wiki/Quartile

plu, câteva înregistrări din dataset aveau asociate valori negative pentru parametrii de lumină, lucru imposibil în teorie. Totodată, în situații rare, senzorii de temperatură nu răspundeau sau transmiteau date eronate, pe termen scurt, înregistrând valori extreme precum -98 °C.

- Datele au fost reeșantionate astfel încât înregistrările asociate fiecărei ore să fie mediate pentru a forma noi instanțe.
- Valorile lipsă au fost completate prin interpolări liniare. Anterior au fost testate și interpolări folosind funcții spline, însă s-a constatat că în anumite situații rezultatele ieșeau din domeniul de valori acceptabil al parametrilor.
- Seriile de timp asociate variabilelor au fost staționarizate ², astfel încât proprietățile acestora să nu depindă de momentul la care seriile de timp au fost observate. Pentru a staționariza s-a aplicat metoda de diferențiere, care presupune înlocuirea seriei curente cu o serie a diferențielor dintre valorile consecutive ale acesteia (alternativ se pot diferenția valori aflate la o distanță fixă mai mare de 1). În contextul curent, cele mai bune rezultate au fost obținute atunci când diferențierea a fost utilizată cu un decalaj de 1 zi. Pentru a verifica dacă o singură diferențiere a fost suficientă pentru a staționariza seriile de timp, s-a aplicat testul Augmented Dickey Fuller³. Concluzia acestui test a fost că o unică diferențiere este suficientă pentru a obține staționaritatea datelor.

Acest pas de staționarizare a fost necesar deoarece:

- Multe tehnici de analiză a seriilor de timp (precum modelul Prophet) pleacă de la presupunerea că seria de timp este staționară.
- Două serii de timp ar putea părea corelate într-o distribuție nestaționară, când de fapt ele doar sunt influențate amândouă de un trend sau de o sezonalitate. Așadar, staționarizarea ne ajută să eliminăm autocorelațiile artificiale dintre variabile.

5.1.2 Analiza univariată

În această secțiune sunt prezentate rezultatele analizei univariate și interpretările acestora. Pentru fiecare trăsătura din dataset au fost realizate:

- Heatmap-uri ale valorilor medii și mediane pe zi.
- Bar plot-uri ale valorilor medii și mediane pe lună.
- Density plot-uri cu variația funcției de densitate de probabilitate în timp.
- Lineplot-uri ale valorilor medii pe oră.

În figura 5.1 sunt prezentate exemple ale graficelor analizei univariate.

5.1.3 Analiza multivariată

Pentru a analiza corelațiile între parametrii utilizați, s-a utilizat matricea de corelații Pearson⁴, aceasta este prezentată în figura 5.2. Valorile apropiate de 1 din această matrice indică corelații pozitive puternice, valorile apropiate de -1 semnifică corelații negative puternice, pe când valorile din proximitatea lui 0 semnalează lipsa de corelație.

Se poate observa că trăsăturile corespunzătoare luminii (*lumină_tot, lumină_fot, V450, B500, G550, Y570, O600, R650*) sunt puternic corelate pozitiv. Umiditatea aerului (*umid_aer*) este corelată negativ cu temperatura nodului (*temp_nod*), temperatura aerului (*temp_aer*) și temperatura pe sol (*temp_pe_sol*).

În continuare s-au utilizat corelații încrucișate decalate în timp (*time-lagged cross correlations*), un exemplu este prezentat în figura 5.3, pentru a identifica situațiile când valorile unei serii de timp sunt predictive pentru valorile viitoare ale unei alte serii de timp. Acest tip de corelație prezintă un

²https://en.wikipedia.org/wiki/Stationary_process

³https://en.wikipedia.org/wiki/Dickey-Fuller_test

⁴https://en.wikipedia.org/wiki/Pearson_correlation_coefficient



Figura 5.2. Matrice de corelații Pearson

avantaj foarte mare față de corelația clasică, deoarece unele serii de timp pot fi necorelate când sunt comparate la momente identice de timp, dar corelate atunci când sunt comparate la momente diferite de timp.

Graficele ilustrate în figura 5.3 surprind perechile de parametri ale căror serii de timp asociate sunt corelate decalat în timp mai mult decât sunt corelate direct. Așadar:

• parametrul *temp_aer* este corelat pozitiv (0.533) cu *temp_în_sol* cu un decalaj de -8 ore.

Astfel, creșterea/scăderea temperaturii aerului va influența în timp și temperatura în sol.

• parametrul *temp_în_sol* este corelat pozitiv (0.634) cu *temp_pe_sol* cu un decalaj de 6 ore. Acest aspect poate fi interpretat prin prisma ideii că valorile temperaturii la sol influențează, pe termen lung, valorile temperaturii în sol.



Figura 5.3. Corelații încrucișate ale seriilor de timp asociate perechilor de câte doi parametri, pentru un decalaj de maximum 24 de ore

5.2 Identificarea anomaliilor în datele colectate

Pentru identificarea anomaliilor au fost utilizate următoarele tehnici:

- Regula 1.5 IQR,
- Descompunerea Eroare Trend Sezonalitate (ETS),
- Metoda Isolation Forest,
- Metoda Local Outlier Factor (LOF),

5.2.1 Regula 1.5 IQR

Regula 1.5 IQR consideră valorile aberante ca fiind acelea care se regăsesc în afara intervalului

$$[Q1 - 1.5 * IQR, \qquad Q3 + 1.5 * IQR]$$

În cadrul graficelor de tip boxplot. Q1 reprezintă quartila 1, Q3 quartila 3, iar IQR intervalul dintre aceste două quartile. Valorile Q1 - 1.5 * IQR și Q3 + 1.5 * IQR marchează *whiskers*-urile boxplotului, conținând 99.3% dintre valorile asociate parametrului. Cele 0.7% valori rămase sunt marcate pe grafice prin cerculețe și reprezintă outlierele (valorile atipice, anomalii).

Figura 5.4a cuprinde boxplot-urile construite pe lună pentru parametrul *umid_aer*. Se observă faptul că anomaliile au valori mai mici de 30 RH.

5.2.2 Descompunerea Eroare Trend Sezonalitate (ETS)

Descompunerea ETS este o tehnică ce presupune divizarea unei serii de timp în patru componente:

- Trend indică direcția generală a seriei de timp pe termen lung. Trend-ul poate fi crescător, descrescător sau orizontal (staționar).
- Sezonalitate indică un pattern care se repetă în fiecare săptămână, lună, semestru și/sau an. Întotdeauna repetiția se produce în cadrul aceluiași an.

- Componenta ciclică indică un pattern care se repetă o dată la câțiva ani.
- Variații neregulate se referă la variații necontrolabile și inevitabile; sunt fluctuații nepredictibile care nu sunt asociate cu un pattern. Acestea se mai numesc și erori/ reziduuri și sunt considerate outliere (valorile atipice).

Dataset-ul utilizat cuprinde două tipuri de sezonalități: pe oră și pe an. Seriile de timp utilizate urmează modelul aditiv (în care valorile individuale ale componentelor se însumează pentru a obține valoarea seriei de timp) deoarece variația de sezonalitate este constantă în timp.

În figura 5.4b este ilustrată descompunere ETS considerând sezonalitatea anuală, pentru parametrul temperatură pe sol.Se observă faptul ca cele mai multe reziduuri (outliere) sunt localizate spre finalul verii și în perioada de toamnă, probabil deoarece în acele perioade au avut loc schimbări mai bruște ale acestor parametri.



Figura 5.4. Exemple de boxploturi și decompunere ETS utilizate pentru detecția de anomalii

5.2.3 Isolation Forest

Algoritmul nesupervizat Isolation Forest utilizează o pădure de arbori de decizie generați random pentru a separa outlierele de restul instanțelor. Față de tehnicile prezentate anterior, această metodă este multivariată. Pentru fiecare înregistrare se rețin distanțele la care aceasta a ajuns în fiecare arbore de decizie până să fie izolată/ până să se atingă adâncimea maximă. Aceste distanțe se mediază per instanță, generând un scor care indică măsura în care aceasta poate fi considerată outlier; un scor mic simbolizează faptul că este mai probabil ca valoarea să fie outlier deoarece a fost mai diferită de celelalte, deci mai ușor de separat. Principalii parametri asociați metodei sunt: rata de contaminare (care determină un prag pentru scoruri de la care instanțele se consideră ca fiind outliere) și numărul de arbori de decizie utilizați.

Metoda Isolation Forest a fost utilizată realizându-se ajustarea hiperparametrilor (*hyperparameter tuning*), prin încercarea tuturor combinațiilor de valori menționate mai jos:

- numărul de arbori de decizie: 20, 30, 50, 70, 100, 130,
- rata de contaminare: 0,005, 0,03, 0,01, 0,05, 0,1.

Graficele rezultate au indicat faptul că numărul arborilor de decizie nu influențează semnificativ calitatea metodei. Vizual, cea mai potrivită valoare pentru rata de contaminare a fost 0,01.

5.2.4 Local Outlier Factor

Local Outlier Factor (LOF) este o metodă nesupervizată de determinare a outlierelor, care poate fi aplicată într-un context multivariat, asemănându-se din aceste puncte de vedere cu Isolation Forest. Pentru fiecare instanță se determină un scor local de densitate, măsurându-se distanțele de la aceasta la cei mai apropiați k vecini. Instanțele care au o densitate locală semnificativ mai redusă decât a vecinilor sunt marcate ca outliere. Fiind o metodă bazată pe distanțe, trebuie realizată înainte standardizarea datelor pentru ca varianțele trăsăturilor să nu influențeze rezultatele.

Au fost testate următorele combinații de valori pentru hiperparametri:

- numărul de vecini k: 5, 10, 20, 30, 40, 50
- rata de contaminare: 0,01 , 0,03 , 0,05, 0,1

Cea mai bună combinație de parametri a fost: 30 de vecini și o rată de contaminare de 0,01 %.

5.3 Aplicarea de algoritmi de predicție pentru serii de timp

Pentru a realiza predicții au fost utilizați următoarele tehnici de învățare automată:

- modelul statistic Seasonal Auto-Regressive Integrated Moving Average (SARIMA),
- modelul statistic Prophet,
- rețelele neuronale recurente (Long Short Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU), LSTM Seq2seq, GRU Seq2Seq),
- transformerul Patch Time Series Transformer (PatchTST).

Pentru fiecare tip de model au fost explicați pașii de preprocesare urmați, maniera de antrenare, (validare și) testare a modelului, au fost prezentate rezultatele și au fost realizate comparații cu celelalte modele. Modelele de rețele neuronale au obținut în general rezultate mai bune comparativ cu modelele statistice. Pentru majoritatea parametrilor transformerul PatchTST a obținut cele mai bune rezultate.

5.3.1 Predicții cu SARIMA

SARIMA este un model statistic ce are parametrii (p, d, q)(P, D, Q, s) și care poate fi explicat prin descrierea elementelor constitutive (Shumway et al., 2017):

- Modelu *AR* (AutoRegresiv). Acest model consideră că valoarea de la momentul curent de timp poate fi determinată ca fiind o combinație liniară a valorilor de la momentele de timp anterioare. Parametrul *p* reprezintă ordinul lui *AR*, considerându-se reprezentative pentru predicție doar cele p valori anterioare.
- Modelul MA (Moving Average). În cadrul acestui model, valoarea de la momentul curent de timp este calculată ca fiind combinația liniară a celor mai recente q erori din trecut.
- Componenta I (Integrated) a SARIMA realizează diferențierea datelor pentru a asigura staționaritatea. Parametrul d reprezintă ordinul de diferențiere.
- Componenta S (Seasonality) a fost introdusă în SARIMA pentru a captura pattern-urile de sezonalitate. Parametrul s reprezintă ordinul de sezonalitate, fiind egal cu numărul de înregistrări din dataset după care sezonalitatea se repetă. Parametrii P, D şi Q au aceeaşi semnificație ca p, d, q, fiind diferiți prin faptul că sunt definiți pentru componenta de sezonalitate.

În secțiunea 5.1.1 a fost explicat faptul ca o unică diferențiere este suficientă pentru a obține staționaritatea datelor. Așadar, parametrul d va fi fixat la valoarea 1 pentru toate seriile de timp.

Pentru a determina parametrii p și q, s-au construit graficele AutoCorrelation Function (ACF) și Partial AutoCorrelation Function (PACF).

- Pentru fiecare serie de timp a fost urmată procedura clasică de determinare a parametrilor p și q:
 - S-au identificat decalajul/decalajele (diferite de 0), având asociate pe graficul PACF cele mai mari valori. Aceste decalaje au reprezentat potențialele valori pentru parametrul *p*.

• S-au determinat decalajul/decalajele (diferite de 0) din graficul ACF, pentru care diferența dintre acest(e)a și următorul decalaj a fost maximă. Aceste decalaje au reprezentat potențialele valori pentru parametrul q.

La antrenarea modelului, în situația în care au existat mai multe valori optime pentru parametrul p sau q, a fost selectată valoarea minimă.

Pentru componenta de sezonalitate s, s-au realizat teste atât cu s = 24 (sezonalitate zilnică), cât și cu s = 365 (sezonalitate anuală). Pentru setarea parametrilor P, Q și D s-au încercat toate combinațiile posibile de valori din intervalul 1, ..., 10, selectându-se cea care minimiza criteriul Akaike Information Criterion (AIC) de calitate a modelelor statistice.

Predicțiile au fost realizate pe întreaga perioadă, în mod iterativ, oferind modelului un istoric de 100 de zile și realizând prognoza pentru următoarele 50 de zile.

Rezultatele comparative au indicat faptul că introducerea sezonalității nu are o influență pozitivă asupra rezultatelor:

- Sezonalitatea zilnică tinde să conducă la overfitting și totodată introduce mult zgomot în model.
- Sezonalitatea anuală nu este o opțiune potrivită deoarece valorile parametrilor din anul curent nu sunt de obicei predictive pentru valorile parametrilor din anul următor.

Din acest motiv, modelul final a fost de tip ARIMA, ne-considerându-se componenta de sezonalitate. Pe dataset-ul inițial a fost aplicată o tehnică clasică de "smoothing", anume reeșantionarea pe zile, pentru a scoate în evidență patternurile (modele de variație) generale, reducând totodată zgomotele ce ar putea duce în eroare modelul.

În figura 5.5a este prezent un exemplu de predicție realizat cu modelului ARIMA. Așa cum se poate observa, predicțiile realizate urmează îndeaproape traiectoria indicată de valorile reale, încercând să o generalizeze.

Tabelul 5.1 conține erorile medii pătratice (Mean Squared Error (MSE)) obținute de modelul ARIMA. Conform tabelului, cele mai bune predicții au fost obținute pentru parametrii de temperatură: *temp_în_sol, temp_pe_sol, temp_aer* și *temp_nod*.

5.3.2 Predicții cu Prophet

Prophet este un model statistic aditiv propus de Facebook⁵ (Taylor et al., 2018). Acesta permite modelarea trendului, a sezonalității pe an și pe săptămână, ținând cont totodată de o posibilă listă de zile de sărbătoare ce pot influența modelul.

La fel ca în cazul modelului precedent SARIMA, predicțiile au fost realizate pe întreaga perioadă de timp, în mod iterativ, oferind modelului un istoric de 100 de zile și realizând prognoza pentru următoarele 50 de zile. De asemenea, a fost aplicată o reeșantionare pe zile a datelor, în încercarea de a preveni overfittingul.

Figura 5.5b este prezentat un exemplu de predicții univariate (clasice) ale modelului Prophet. Se poate observa că predicțiile urmează în general traiectoria indicată de valorile reale. Tabelul 5.2 conține valorile erorii medii pătratice (MSE) obținute în cadrul predicțiilor univariate. Pentru fiecare serie de timp a fost optimizat hiperparametrul *changepoint_prior_scale*, alegându-se valoarea din intervalul [0,001, 0,5] ce micșora eroarea medie pătratică. *changepoint_prior_scale* controlează maniera în care trendul se modifică la punctele de inflexiune. O valoare prea mică a acestui hiperparametru conduce la underfitting, în timp ce o valoare prea mare duce spre overfitting.

Față de modelul SARIMA, Prophet obține valori comparative pentru toți parametrii cu excepția presiunii aerului, umidității aerului și luminii totale (*pres_aer*, *umid_aer*, *lumină_tot*). În cazul *umid_aer* și *lumină_tot*, ARIMA obține rezultate semnificativ mai bune, pe când în cazul *pres_aer* Prophet obține rezultate semnificativ mai bune.

Pe lângă predicțiile clasice univariate, Prophet permite și realizarea de predicții univariate care

⁵https://facebook.github.io/prophet/



Figura 5.5. Grafice care ilustreaza predicțiile realizate de modelul ARIMA si Prophet

să țină cont de o serie de regresori (variabile ce vor influența predicțiile). Dacă regresorii sunt puternic corelați direct cu variabila pentru care se realizează predicțiile, modelul se poate supraspecializa; dacă regresorii nu sunt suficient de corelați cu variabila pentru care se realizează predicțiile, se pot introduce zgomote care să afecteze negativ calitatea modelului.

Tabelul 5.1. Tabel sumarizând Mean Squared Error (MSE) a modelului ARIMA

Parametru	ARIMA MSE
pres_aer	110,87
umid_aer	86,29
temp_aer	36,40
temp_în_sol	16,88
temp_pe_sol	26,16
temp_nod	49,15
lumină_tot	1745,40

Tabelul 5.2. Tabel sumarizând (MSE) a modelului Prophet

Parametru	Prophet MSE	Valoarea optimă a hiperparametrului changepoint_prior_scale
pres_aer	91,62	0,001
umid_aer	97,14	0,05
temp_aer	36,34	0,1
temp_în_sol	19,20	0,1
temp_pe_sol	25,92	0,1
temp_nod	50,33	0,1
lumină_tot	2833,94	0,3

5.3.3 Predicții cu rețele neuronale recurente (LSTM, GRU, LSTM Seq2seq, GRU Seq2seq

Pentru realizarea predicțiilor cu modele de rețele neuronale recurente s-au selectat următoarele variante de rețele: Long Short Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU) și versiunile Sequence-to-Sequence (Seq2seq) ale acestora. În continuare se vor aduce câteva justificări pentru alegerea acestor modele.

În primul rând, modelele de rețele neuronale clasice nu sunt potrivite pentru a fi utilizate în taskul de predicție a seriilor de timp. Pentru a surprinde patternuri pe termen lung, dimensiunile ferestrelor de input și/sau output ar trebui să fie suficient de mari; cu toate acestea, o creștere a dimensiunii ferestrelor implică și o creștere a numărului de parametri ai rețelei, acest lucru îngreunând procesul de antrenare. Totodată, fiecare input este tratat independent față de celelalte, neținându-se cont de istoric.

Rețelele neuronale recurente (Medsker et al., 2001) vin ca soluție la problemele enunțate mai sus, deoarece numărul de parametri ai rețelei nu mai crește odată cu creșterea numărului de inputuri și de outputuri utilizate. La fel ca rețelele clasice, rețelele neuronale recurente primesc inputuri diferite la pași diferiți, însă folosesc o stare internă, denumită și "memorie", pentru a lua în calcul instanțele precedente atunci când o procesează pe cea curentă.

Long Short Term Memory (LSTM), Gated Recurrent Unit (GRU) sunt două variante de rețele neuronale recurente care rezolvă problemele de dispariție sau explozie a gradienților, cauzate de

algoritmul de retropropagare în timp, utilizat de aceste rețele.

Modelele Sequence-to-Sequence (Seq2seq) (Sutskever et al., 2014) aduc o flexibilitate mult mai mare în procesarea inputurilor și outputurilor de dimensiuni variabile față de rețelele neuronale recurente. Acest lucru se datorează faptului că modelele Seq2seq utilizează un encoder, pentru a produce o codificare a secvențelor date ca input, și un decoder, pentru a produce o decodificare a acestora rezultând astfel outputurile. S-au creat două modele de tip Seq2seq, unul care utilizează un LSTM ca encoder și un LSTM ca decoder și un altul care folosește un GRU ca encoder și un GRU ca decoder.

Toate modelele au fost antrenare pentru realizarea de predicții multivariate. Astfel, fiecare model primea simultan un istoric al informațiilor asociate celor 7 parametri: *pres_aer*, *temp_nod*, *temp_aer*, *umid_aer*, *temp_în_sol*, *temp_pe_sol*, *lumină_tot* și realiza predicții ale valorilor acestora.

În ceea ce privește preprocesarea, datele nu au mai fost reeșantionate pe zile (ca în cazul modelelor ARIMA și Prophet) pentru a reduce riscul de overfitting, ce ar putea apărea în contextul în care datele de antrenare ar fi prea puține. 80% dintre date au fost considerate de antrenare, iar celelalte 20% de testare. Dându-li-se un istoric de 120 de ore (5 zile), modelele au fost antrenate să realizeze predicții pentru următoarele 72 de ore (3 zile). Astfel, în cadrul antrenării inputurile au avut dimensiunea 120 * 7, iar outputurile dimensiunea 72 * 7 unde 120 reprezintă mărimea unei ferestre de input, 72 mărimea unei ferestre de output și 7 numărul de parametri pentru care se realizează predicții simultane.

Pentru ca ordinele diferite de mărimi ale parametrilor să nu influențeze prognozele, inputurile și outputurile date rețelelor neuronale au fost normalizate per parametru folosind tehnica "z-score normalization". Această tehnică transformă datele astfel încât media valorilor să devină 0, iar deviația standard 1. În momentul construcției graficelor și la pasul de evaluare al modelului aceste valori au fost normalizate invers, pentru a obține valorile originale în cazul outputurilor reale și niște valori ajustate în cazul outputurilor prezise.

Din punct de al arhitecturii rețelelor, fiecare rețea neuronală simplă și fiecare encoder și decoder au avut un unic strat ascuns cu 30 de neuroni, iar funcția de activare utilizată pentru acest strat a fost ReLU⁶. Pentru a evita overfittingul a fost utilizată o rată de dropout de 0,2. Numărul maximum de epoci a fost fixat 1000, dar antrenarea a fost oprită înainte ca eroarea pe setul de validare să crească. Funcția de cost utilizată a fost Huber⁷, aceasta fiind o funcție specifică task-ului de regresie și robustă la zgomote. Rata de învățare pentru toate modelele a fost fixată 0,01.

Tabelul 5.3 conține valorile erorilor MSE și Mean Absolute Error (MAE) obținute pe setul de testare de către cele 4 modele utilizate.

Tabelul 5.3.	Tabel sumarizand eroard	ea medie pătratică	(MSE) și eroarea	medie absolută	(MAE) a modelelor
bazate pe rețe	ele neuronale recurente, u	ıtilizat pentru pred	icții multivariate		

Parametru	LSTM MSE	LSTM MAE	GRU MSE	GRU MAE	LSTM Seq2seq MSE	LSTM Seq2seq MAE	GRU Seq2seq MSE	GRU Seq2seq MAE
pres_aer	94,30	7,66	96,33	7,89	80,02	6,90	115,31	8,47
umid_aer	102,67	6,61	126,16	7,37	100,93	6,68	117,95	6,83
temp_aer	22,62	3,62	25,21	3,75	23,18	3,59	26,81	3,92
temp_în_sol	2,42	1,20	3,21	1,35	2,72	1,24	2,19	1,12
temp_pe_sol	7,19	2,05	9,58	2,25	7,70	2,04	7,42	2,03
temp_nod	30,31	4,08	34,79	4,38	32,29	4,15	38,02	4,51
lumină_tot	4106,82	31,45	4535,01	37,00	4615,14	33,93	5698,38	39,22

Modelele LSTM și LSTM Seq2Seq au obținut cele mai mici valori ale erorilor, cu diferența că erorile asociate parametrului *pres_aer* au fost semnificativ mai mici pentru LSTM Seq2Seq, pe când erorile asociate parametrului *lumină_tot* au fost semnificativ mai mici pentru modelul clasic de LSTM. Modelul GRU s-a comportat în general mai slab decât modelele bazate pe LSTM, dar

⁶https://en.wikipedia.org/wiki/Rectifier_(neural_networks)

⁷https://en.wikipedia.org/wiki/Huber_loss

mai bine decât versiunea Seq2Seq de GRU. Comparativ cu modelele ARIMA și Prophet, cel puțin un model de rețelele neuronale recurente a obținut rezultate mult mai bune pentru majoritatea parametrilor (*pres_aer, temp_aer, temp_în_sol, temp_pe_sol* și *temp_nod*).

Figurile 5.6a, 5.6b, 5.6c, 5.6d ilustrează predicțiile realizate de modelele de rețele neuronale recurente.



(a) Grafic care ilustreaza predicții realizate de modelul LSTM







(b) Grafic care ilustreaza predicții realizate de modelul GRU



(d) Grafic care ilustreaza predicții realizate de modelul GRU Seq2Seq

Figura 5.6. Grafice ilustrând predicțiile realizate de modelele LSTM, GRU, LSTM Seq2Seq, GRU Seq2Seq

Modelele LSTM și LSTM Seq2Seq au obținut cele mai mici valori ale erorilor, cu diferența că erorile asociate parametrului *pres_aer* au fost semnificativ mai mici pentru LSTM Seq2Seq, pe când erorile asociate parametrului *lumină_tot* au fost semnificativ mai mici pentru modelul clasic de LSTM. Modelul GRU s-a comportat în general mai slab decât modelele bazate pe LSTM, dar mai bine decât versiunea Seq2Seq de GRU. Comparativ cu modelele ARIMA și Prophet, cel puțin un model de rețelele neuronale recurente a obținut rezultate mult mai bune pentru majoritatea parametrilor (*pres_aer, temp_aer, temp_în_sol, temp_pe_sol* și *temp_nod*).

5.3.4 Predicții cu PatchTST

Această secțiune detaliază utilizarea unui model state of the art de tip transformer PatchTST (Nie et al., 2022) pentru a realiza predicții. În general, modelele de tip transformer, deși ating performanțe foarte bune în cadrul multor task-uri (de procesare a limbajului natural și vedere artificială), sunt întrecute de modele simple în cazul task-ului de realizare a predicțiilor pentru serii de timp (Nie et al.,

2022). Autorii modelului PathTST propun un transformer care, utilizând o tehnică de segmentare a datelor în subserii de timp, să permită o mai bună învățare a dependențelor pe termen lung.

La fel ca în cazul modelelor de rețele neuronale recurente, transformerul PatchTST a fost utilizat pentru a realiza predicții multivariate, utilizând cei 7 parametri: *pres_aer*, *temp_nod*, *temp_aer*, *umid_aer*, *temp_în_sol*, *temp_pe_sol*, *lumină_tot*. Din aceleași motive explicate anterior, datele nu au mai fost reeșantionate, iar inputurile și outputurile au fost normalizate prin tehnica de "z-score normalization". Din nou, dându-li-se un istoric de 120 de ore (5 zile), modelele au fost antrenate să realizeze predicții pentru următoarele 72 de ore (3 zile). 70 % dintre date au fost considerate de antrenare, 10 % de validare, iar 20 % de testare.

În ceea ce privește hiperparametrii modelului, au fost utilizate 4 straturi de encoder, lungimea unei subserii de timp fiind de 24 de ore (1 zi), iar rata de dropout de 0,3. În ceea ce privește numărul de epoci, antrenarea a fost din nou oprită după 3 epoci deoarece ulterior eroarea pe setul de validare începea să crească, acest lucru fiind un semn de overfitting. Rata de învățare a fost setată suficient de mică (0,005), pentru ca algoritmul să conveargă la valoarea optimă.

Tabelul 5.4 sumarizează valorile erorilor MSE și MAE pe setul de testare asociate modelului PatchTST. Acesta obține cele mai bune rezultate dintre toate pentru parametrii *temp_aer*, *temp_în_sol*, *temp_pe_sol*, *temp_nod*. Pentru cei trei parametri rămași (*lumină_tot*, *pres_aer*, *umid_aer*), rezultatele sunt medii comparativ cu celelalte modele. De remarcat este faptul că pentru parametrul *lumină_tot* rezultatele lui PatchTST sunt mult mai bune decât cele asociate rețelelor neuronale recurente.

Figura 5.7 conține rezultatele predicțiilor multivariate realizate de către transformerul PatchTST pe setul de testare. Se poate observa că valorile prezise sunt foarte apropiate de cele reale.

Tabelul 5.4. Tabel sumarizând eroarea medie pătratică (MSE) și eroarea medie absolută (MAE) a modelului PatchTST, utilizat pentru predicții multivariate

Parametru	PatchTST MSE	PatchTST MAE	
pres_aer	100,78	7,84	
umid_aer	98,89	6,09	
temp_aer	19,77	3,42	
temp_în_sol	1,20	0,83	
temp_pe_sol	5,01	1,69	
temp_nod	27,80	4,01	
lumină_tot	2962,55	24,71	



Figura 5.7. Grafic care ilustreaza predicții realizate de modelul PatchTST

Concluzii generale, contribuții și perspective de dezvoltare

Obiectivul principal al cercetărilor legate de tema de doctorat a fost conceperea, proiectarea, realizarea practică, punerea în exploatare, colectarea și prelucrarea datelor de la un sistem de tip Internetof-Things (IoT) destinat monitorizării unor parametri în cadrul conceptului de agricultură inteligentă. Sistemul a fost conceput astfel încât să fie cât mai convenabil din punct de vedere al costurilor de achiziție și de mentenanță, pentru a putea fi utilizat și în cadrul fermelor de dimensiuni reduse. Totodată, acesta a fost gândit pentru a putea fi ușor de pus în funcțiune, fiind accesibil inclusiv persoanelor care nu sunt familiarizate cu tehnologia IoT. În cadrul acelorași cercetări, a fost proiectat, realizat și testat un dispozitiv original pentru măsurarea variației diametrului trunchiului arborilor, a cărui funcționare se bazează pe efectul de stressimpedanță ce caracterizează materialele magnetice amorfe sub formă de fire.

Primul capitol definește conceptele legate de agricultura inteligentă și face o trecere în revistă a elementelor constructive existente, bazate pe cele mai noi materiale și tehnologii, ce fac parte dintr-un sistem de monitorizare IoT, precum și a unor sisteme dedicate existente pe piață sau în literatura de specialitate. O concluzie care poate fi trasă din acest capitol se referă la importanța și actualitatea temei abordate, dar și la faptul că nu există o abordare tipică sau standard a modului în care se poate construi un astfel de sistem, ci că fiecare aplicație trebuie analizată și concepută în funcție de condiții particulare de implementare și funcționare impuse sistemului.

În capitolul al doilea este detaliat modul de proiectare și de realizare a nodurilor IoT asociate sistemului de monitorizare. Acest capitol este alcătuit din două secțiuni: descrierea componentelor hardware ale nodurilor de măsură și descrierea componentei software implementată la nivelul microcontrolerelor care gestionează funcționarea nodurilor. În teză nu este inclus codul sursă al programului, însă acesta este stocat pe platforma "GitHub"⁸, în spațiul privat, deoarece în cod sunt incluse în mod explicit chei de autorizare și parole. Nodurile au fost realizate fizic, iar variantele prezentate în teză sunt cele finale, rezultate în urma optimizării funcționării.

Au fost realizate zece tipuri de noduri IoT destinate monitorizării culturilor prin intermediul imaginilor și a unor parametri precum: temperatura aerului și a solului, umiditatea aerului și a solului, nivelul de iluminare, presiunea atmosferică și cantitatea de precipitații. Au fost realizate mai multe variante de noduri pentru monitorizarea acelorași mărimi, cu scopul de a analiza și evidenția particularități constructive legate de tipul de microcontroler folosit, tipul de alimentare a nodului, senzorul utilizat, consumul de energie, costul și performanțele.

Prin realizarea mai multor variante de noduri și de senzori și punerea acestora în funcțiune în teren, s-a urmărit validarea soluțiilor hardware și software. Odată cu realizarea și punerea în funcțiune a acestora, au fost identificate diverse probleme și aspecte de funcționare, care au necesitat optimizare. Rezolvarea acestora a dus la obținerea unei structuri hardware și software stabile și funcționale.

De exemplu, pentru măsurarea cantității de lumină, au fost testate trei variante de senzori: în prima variantă se măsoară 6 benzi de frecvențe și calibrarea este realizată la producător, dar este mai scumpă, în a doua se măsoară 11 benzi de frecvențe și este necalibrată, dar există o procedură de calibrare dată de producător, iar în a treia se măsoară numai două benzi de frecvențe (lumina vizibilă plus cea infraroșie și lumina roșie plus cea infraroșie), măsurătorile fiind relative, dar existând o procedură de calibrare empirică. Pentru monitorizarea nivelului de iluminare este suficient ultimul tip de senzor, dar pentru a analiza efectele diferitelor lungimi de undă asupra creșterii plantelor sau pentru a evalua starea de sănătatea a acestora, avem nevoie de primele două variante de senzori care măsoară mai

⁸https://github.com/doru4

multe benzi de frecvențe și permit calcularea unor indici de sănătate a plantelor. În sistemul realizat, nodurile au măsurat lumina solară. Pentru calcularea indicilor de sănătate a plantelor, trebuie măsurată lumina reflectată de plante și, eventual, cea incidentă, acest lucru necesitând modificarea construcției mecanice a nodului.

Prin amplasarea în teren a nodurilor, acestea au fost supuse la precipitații sub formă de rouă, ploaie, ninsoare, ploaie înghețată, precum și la eforturi mecanice generate de rafale de vânt, de păsări sau de animale. Temperaturile au variat de la -16 °C la peste 50 °C pentru nodurile care au fost direct expuse la soare. O problemă întâmpinată în timpul testării a fost acumularea umidității sub formă de condens în carcasa senzorilor care au măsurat umiditatea aerului. Această problemă a fost rezolvată prin activarea periodică a elementului de încălzire înglobat în senzor și prin utilizarea unei carcase suplimentare cu pereți de tip jaluzea, care a împiedicat stropirea carcasei senzorului sau depunerea zăpezii pe aceasta.

Deoarece nodurile au fost concepute să fie accesibile, camera utilizată pentru nodurile de preluare a imaginilor, N1 și N8, a fost o cameră ieftină, cu rezoluție de maximum 3 Mpx, cu lentile de plastic și cu focalizare manuală. Chiar și în aceste condiții, nodurile au achiziționat imagini clare, care au surprins dezvoltarea plantelor. Acest lucru s-a realizat prin poziționarea corectă a nodurilor, pentru a asigura menținerea obiectului de interes (planta) în zona de claritate. Nodurile au achiziționat imagini în mod constant și nu au necesitat mentenanță sau intervenția operatorului uman, soluția hardware și software fiind astfel validată. Dacă bugetul permite, pentru sarcini ce presupun o mai mare atenție la detalii, se pot utiliza camere cu o rezoluție mai ridicată și/sau cu focalizare automată. Spre exemplu, pentru preluarea imaginilor din capcanele de insecte se pot utiliza camere cu focalizare manuală, dar de o rezoluție ridicată (10 Mpx) pentru a putea identifica și insectele de dimensiuni mici.

Pentru alimentarea nodurilor s-a utilizat acumulatorul Li-Po (cu o singură excepție: nodul N4 a fost alimentat din acumulator Plumb-Acid) și ca sursă regenerabilă de alimentare s-au utilizat panouri solare. Circuitul de încărcare al acumulatorului Li-Po a fost liniar. Această sursă de alimentare s-a dovedit a fi fiabilă, rezistând la variațiile de temperatură și în timp. Aceasta a fost utilizată în noduri ce au fost puse în funcțiune în urmă cu doi ani, funcționând continuu, fără mentenanță, și fiind active și la momentul prezent. Au fost analizate și două variante de circuite de încărcare în comutație, însă acestea nu au oferit beneficii semnificative pentru a susține costurile suplimentare asociate.

Ca unități de calcul, în construcția nodurilor IoT s-au utilizat microcontrolere produse de ST-Microelectronics, ASR Microelectronics și Espressif Systems. Pentru fiecare microcontroler au fost utilizate softurile de programare recomandate de producător. Pentru o punere în funcțiune mai rapidă, au fost utilizate kituri de dezvoltare, care au fost modificate pentru a corespunde cerințelor de funcționare a nodurilor.

Pentru transmiterea imaginilor s-a utilizat conexiunea Wi-Fi, dar și pentru a transmite pachete mici de date. Calitatea transmisiilor a scăzut odată cu creșterea numărului de dispozitive care comunică simultan, deoarece s-a aglomerat canalul de comunicație. Pentru a rezolva problema, s-a montat un router suplimentar care a preluat o parte a comunicațiilor.

Pentru nodurile care transmit pachete mici de date de maximum 222 octeți, s-a utilizat conexiunea LoRa, aceasta permițând comunicarea la distanțe mari, de ordinul km, precum și un număr mare de dispozitive, de ordinul sutelor.

Capitolul 3 prezintă principiile și modul de realizare a unui dispozitiv de tip șubler electronic (dendrometru). S-a realizat un aparat care a fost validat prin testarea separată a părții mecanice, a modulului electronic, precum și a întregului ansamblu. Partea mecanică este stabilă la modificarea parametrilor climatici și permite obținerea preciziilor necesare măsurătorilor variațiilor mici ale trunchiului de arbore, repetabilitatea măsurătorilor fiind de 2,8 % iar coeficientul de temperatură fiind de 0,13 %/°C. Datele sunt prezentate în tabelul 3.3. Partea electronică este descrisă în teză, atât ca principiu de funcționare, cât și în detaliu, ca schemă electronică. Schemele au fost testate prin simulare și apoi prin realizare practică. Modulul electronic a fost testat din punctul de vedere al stabilității în timp

și la modificarea parametrilor climatici, datele fiind prezentate în anexa **??**. Coeficientul de variație cu temperatura este de 0,1 %/°C iar stabilitatea în timp este de 0,006 %/(24 h).

În capitolul 4 s-au analizat datele colectate de la senzori și consumul energetic al acestora.

S-au utilizat două variante de stocare a datelor. În prima variantă datele au fost stocate în Google Drive și Google Sheets, acest mod de stocare fiind comod, deoarece gestiunea serverelor a fost realizată de Google. Un dezavantaj a fost faptul că transmisia datelor a fost dependentă de conexiunea la internet. Au fost întreruperi în transmisia datelor determinate atât de întreruperea cablului de date (a fibrei optice), cât și datorate congestionării traficul de internet. În anumite perioade din zi, serverele au avut un timp de răspuns mai mare și, în consecință, conexiunea nu s-a putut stabili în timp util.

A doua variantă de stocare a fost realizată prin utilizarea unui server local. În acest caz, conexiunea a fost stabilă și rapidă, dar gestionarea softurilor, mentenanța calculatorului și modul de alimentare în caz de întrerupere a alimentării cu energie electrică a fost în sarcina utilizatorului. Pe serverul local au rulat serverele necesare pentru comunicația LoRaWan, brokerul MQTT, baza de date pentru serii de timp InfluxDB, softul de vizualizare Grafana și softul de colectare Telegraf.

În cadrul capitolului, au fost prezentate datele preluate de noduri. Nodurile au fost stabile în funcționare și au achiziționat date în mod continuu. Preluarea datelor pentru realizarea graficelor utilizate în teză a fost realizată cu ajutorul unor programe scrise în Python. Pentru a doua metodă de stocare, integrarea dintre InfluxDB și Grafana a permis realizarea rapidă și simplă a unor vizualizări disponibile sub forma unor pagini web, accesibile la un link public.

Consumurile energetice ale nodurilor au depins de tipul de comunicație, de protocolul utilizat și de calitatea semnalului în zona de amplasare a nodului. Tabelul 6.1 sumarizează, pentru fiecare nod, timpul de colectare și de transmisie a informațiilor, precum și energia consumată de nod pentru acest lucru.

Nod	Protocol	Durata de timp [s]	Energie consumată [Ws]	Dimensiune date transmise [octeți]	Curent absorbit în modul "sleep"[µA]	Observații
N1	HTTP	17,2	9,58	307 200	0,65	Cu sincronizare NTP
N1	HTTP	14,0	7,15	307 200	0,65	Fără sincronizare NTP
N8	MQTT	8,7	2,8	307 200	0,65	Server local MQTT
N2A	HTTPS	19,15	3,2	280	9,0	
N2B, N7	LoRaWan	7,391	0,1	38	11,0	SF7
N3, N4	HTTPS	10,65	2,33	100	8,6	N4 consumă cu 110 μA mai mult
N5, N6	LoRaWan	10,1	0,122	16	3,0	SF7
N5, N6	LoRaWan	11,8	0,703	16	3,0	SF12
N9	LoRaWan	3,9	0,08	16	27,0	SF7
N9	LoRaWan	6,86	0,363	16	27,0	SF7, se afișează datele pe display timp de 3 s

Tabelul 6.1. Tabel care sintetizează duratele și consumurile energetice aferente procesului de colectare și de transmitere a informațiilor de către nodurile IoT realizate.

Nodurile N1 și N8, care au transmis imagini, au avut dimensiunea datelor transmise aproximativ egală cu cea menționată în tabel, diferența de dimensiune fiind dată de o mică deplasare a camerei (chiar dacă scena captată a fost statică).

Analizând tabelul 6.1, se pot observa diferențe de consum între nodurile realizate, în funcție de protocolul de comunicație utilizat și de dimensiunea datelor transmise, acestea fiind detaliate în continuare.

Pentru nodurile care transmit imagini, N1 și N8, descriem mai jos observațiile. Se constată faptul că obținerea datei și orei curente de la serverele NTP a crescut consumul nodului N1 cu 2,4 W s. Nodul N8, care utilizează protocolul MQTT, a avut un consum mai mic de aproximativ 2,5 ori față de consumul nodului N1, care utilizează protocolul HTTP.

Nodurile N2A, N3 și N4 au utilizat tot protocolul HTTP, însă dimensiunea datelor și, implicit, timpii de transmitere a informațiilor, au fost mai mici decât în cazul nodului N1. De exemplu, pentru nodul N2A, transmiterea datelor se realizează în aproximativ 0,45 s fata de 2,2 s cât durează transmisia datelor pentru nodul N1. Nodul N2A are un timp mare de colectare a datelor, de aproximativ 10 s.

Pentru transmisia LoRaWan cu "Spreading Factor" 7 se observă consumuri foarte mici, de aproximativ 0,1 W s. Prin comparație, transmisia LoRaWan cu "Spreading Factor" 12 conduce la obținerea unui timp de emisie de aproximativ 25 de ori mai mare (duratele de timp fiind prezentate în tabelul ??) și, implicit, la creșterea consumului energetic de aproximativ 7 ori.

Pentru nodul N9, afișarea informațiilor pe afișorul OLED timp de 3 s a crescut consumul cu 0,283 W s. Deci, prin prezentarea datelor pe afișorul OLED, s-a înregistrat o creștere a consumului de energie de 4,5 ori.

În concluzie, pentru transmiterea pachetelor mici de date, de sub 222 octeți, cea mai economică transmisie este LoRa cu protocol LoRaWan. Dacă pachetul de date este mai mare, cel mai mic consum de energie s-a obținut prin utilizarea transmisiei Wi-Fi cu protocol MQTT.

Pentru toate nodurile, curentul absorbit în modul de lucru inactiv ("sleep") a fost optimizat, încercându-se minimizarea acestui curent. Nodul N9 are un curent absorbit mai mare datorită modului de conectare a senzorului de potențial matricial al solului (direct la porturile microcontrolerului).

În timpul funcționării sistemului de monitorizare pe parcursul celor 2 ani, ne-am confruntat cu o serie de evenimente, probleme și disfuncționalități, care au fost evidențiate în lucrare cu scopul prevenirii posibililor dezvoltatori și utilizatori de sisteme IoT. Câteva din aceste probleme au fost:

- formarea condensului sau infiltrarea apei în interiorul carcasei nodului a condus la funcționarea anormală a microcontrolerului și, în unele cazuri, chiar la defectarea acestuia,
- formarea condensului în carcasa senzorului de măsurare a umidității aerului a condus la funcționarea anormală a acestuia, la perturbarea comunicațiilor cu ceilalți senzori conectați la aceeași magistrală și, în unele cazuri, la resetarea microcontrolerului,
- evenimente mecanice cum ar fi: diverse obiecte căzute în cuva pluviometrului au blocat funcționare acestuia, căderea fructelor a determinat modificarea poziției senzorilor și a panoului solar,
- afectarea calității imaginilor determinate de: creșterea vegetației din jurul obiectului de interes, înfrunzirea, apariția condensului pe lentilă sau depunerea de praf pe aceasta, mișcarea plantelor, reflectarea luminii de pe suprafețele umede,
- temperatura excesivă care a condus la reducerea capacității utile a acumulatorului,
- depunerea de praf pe suprafața panoului solar a determinat micșorarea energiei preluate din acesta,
- depunerea de praf pe suprafața ferestrei senzorilor de măsură a fluxului luminos a condus la alterarea valorilor măsurate,
- intemperii, cum ar fi zăpada sau bruma, au determinat obturarea ferestrei senzorilor de măsură a fluxului luminos și scăderea la zero a energiei preluate din panoul solar,
- crăparea solului cauzată de deshidratarea rapidă a condus la izolarea senzorului de zona de măsură (zona rădăcinilor plantelor),
- latențelor servelor din "cloud" și a rețelei de internet au determinat abandonarea procesului de transmitere a datelor,
- perioadele de vânt puternic, eventual însoțite de precipitații abundente, au dus la modificarea poziției senzorilor și, de asemenea, au adus importante modificări asupra zonei monitorizate (au scuturat floarea sau au dus la căderea fructele pomilor),
- cablurile furnizate împreună cu senzorii nu sunt întotdeauna rezistente la razele UV și la îngheț, ceea ce a condus la crăparea izolației acestora și la pătrunderea apei în carcasa nodului.

În cadrul capitolului 5 a fost realizată analiza exploratorie a datelor colectate, urmată de pașii de identificare a anomaliilor și de realizare de predicții utilizând tehnici de învățare automată.

Analiza exploratorie a datelor a fost efectuată atât univariat, prin crearea și interpretarea unor diverse tipuri de grafice (heatmap-uri, line plot-uri, density plot-uri și barplot-uri), cât și multivariat prin determinarea corelațiilor între variabile. În cadrul analizei multivariate, au fost utilizate atât corelații clasice Pearson, cât și corelații încrucișate decalate în timp, care au permis realizarea de asocieri între serii de timp prin compararea lor la momente diferite de timp.

Pentru detecția de anomalii au fost utilizate două tehnici univariate (regula 1.5 IQR, descompunerea ETS) și două tehnici multivariate (Isolation Forest, Local Outlier Factor). Metodele univariate au produs rezultate mai ușor de interpretat, pe când metodele multivariate au luat în calcul mai multe trăsături simultan. Regula 1.5 IQR, care marchează drept outliere valorile extreme asociate distribuției corespunzătoare fiecărui parametru, a fost utilizată pentru identificarea anomaliilor lunare. Descompunerea ETS a utilizat conceptul de sezonalitate pentru a identifica anomaliile anuale. Referitor la metodele multivariate, metoda Local Outlier Factor a reușit mai bine să găsească outlierele care nu se aflau la marginea distribuției față de Isolation Forest.

Pentru realizarea de predicții au fost utilizate șapte modele de învățare automată, anume două modele statistice (ARIMA și Prophet), patru modele bazate pe rețele neuronale recurente (LSTM, GRU, LSTM Seq2Seq, GRU Seq2Seq) și un model de tip transformer specific seriilor de timp (PatchTST). Rezultatele celor două modele statistice ARIMA și Prophet au fost comparative. Predicțiile realizate de rețelele neuronale recurente au fost în general mult mai bune decât rezultatele modelelor statistice, cele mai bune rezultate fiind obținute de modelele LSTM și LSTM Seq2Seq. Modelul PatchTST bazat pe un transformer a obținut rezultate semnificativ mai bune față de toate celelalte modele pentru cei 4 parametri de temperatură și rezultate comparative pentru restul parametrilor.

Contribuții personale ale autorului

- Realizarea unei sinteze asupra sistemelor IoT actuale de monitorizare a unor parametri din domeniul agriculturii și, în particular, a senzorilor care pot fi utilizați în construcția acestor sisteme, senzori bazați pe cele mai noi materiale și tehnologii, ce oferă performanțe metrologice și funcționale superioare.
- Realizarea unei prezentări succinte a paradigmei IoT și a celor mai utilizate protocoale de comunicație.
- Proiectarea și construcția unui număr de zece tipuri de noduri IoT, pentru testarea acestora realizânduse cel puțin 40 de noduri fizice. Unele noduri au mai multe variante care sunt în funcțiune, pe când altele sunt duplicate ale aceleași configurații, acestea din urmă fiind realizate cu scopul testării comportamentului nodului în diverse condiții de funcționare.
- Realizarea a nouă tipuri de măsurători diferite utilizându-se diverși senzori pentru a compara performanțele și a identifica soluțiile optime din punctul de vedere al relevanței măsurătorilor pentru agricultură și al prețului. Factorii care influențează calitatea măsurătorilor au fost considerați ca fiind zona de măsură, precizia, repetabilitatea și stabilitatea în timp.
- Punerea în exploatare a nodurilor, urmărirea funcționării acestora și colectarea datelor pe o perioadă de cel puțin doi ani.
- Evidențierea principalelor evenimente, probleme și impedimente apărute în timpul funcționării sistemului pe termen lung și oferirea de soluții pentru diminuarea sau anihilarea efectelor negative ale acestor evenimente.
- Testarea a două modalități de stocare a datelor cu cost redus, în cloud și pe un server local.
- Construirea unui dendrometru pentru măsurarea variațiilor de diametru ale trunchiurilor arborilor, variații ce pot da informații legate de starea de sănătate și de necesitățile plantei, soluția propusă fiind prezentată de la nivel de concept, la realizarea practică a părților mecanice și electronice și testarea acestora din punct de vedere funcțional și al performanțelor. Dispozitivul a fost propus ca brevet de invenție (Foșalău et al., 2023).
- Aplicarea unor algoritmi de inteligență artificială pentru prelucrarea datelor culese în scopul realizării analizei exploratorii, detecției de anomalii și predicțiilor pentru seriile de timp.

• Colaborarea la realizarea unui sistem care să integreze algoritmii de predicție realizați în scopul prognozei evoluției unei culturi de tomate și detectarea timpurie a posibilității de apariție a bolilor pentru aceasta.

Perspective de dezvoltare viitoare

Experiența acumulată în dezvoltarea și menținerea în funcțiune a nodurilor, precum și în prelucrarea datelor experimentale poate să fie de folos dezvoltatorilor de astfel de sisteme la realizarea unor noduri IoT fiabile și versatile, ce pot fi utilizate cu succes în agricultura inteligentă.

Prin măsurarea aceluiași parametru în același loc cu mai multe tipuri de senzori, se poate realiza o comparație între datele obținute, care să permită extragerea unei formule de corespondență între valorile acestora, această formulă putând fi utilizată ulterior pentru a realiza calibrarea măsurătorilor senzorilor impreciși (dar care sunt mult mai ieffini).

O idee de dezvoltare viitoare este integrarea unui număr mai mare de senzori într-o rețea colaborativă, cu scopul extinderii ariei de monitorizare pe suprafețe mari și foarte mari, precum și utilizarea unor noi moduri de comunicație pentru eficientizarea compromisului dintre viteza de transfer și cantitatea de date transferată.

În perspectivă, se mai poate aborda dezvoltarea de noi algoritmi de identificare a anomaliilor, aplicabili în special în cazul decalibrării unor noduri, și de creștere a securității datelor transmise, precum și crearea unor protocoale de funcționare optimă a nodurilor IoT în scopul reducerii consumurilor și creșterii duratei de funcționare cu minimum de mentenanță.

Lucrări publicate de autor

D. Cornei et al., 2022

Cornei, D. & Foşalău, C. (2022). Using IoT in smart agriculture: study about practical realizations and testing in a real environment. În *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iaşi, 20-22 octombrie 2022*, IEEE, 5th International Conference of the Doctoral School, Iaşi, May 18 - 20, pp. 013–018, (indexat IEEE).

D. Cornei et al., 2023

Cornei, D., Foşalău, C. & Cornei, L. (2023). A Study Regarding Power Consumption of An IoT Node For Image Retrieval and its Optimization. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section*, 69(1), 61–84, (indexat Urlich, Index Copernicus).

D. Cornei et al., 2024

Cornei, D., Foșalău, C. & Cornei, L. (2024). A Cheap and Practical IoT Solution for Agricultural Data Monitoring. În 2024 IEEE International Conference And Exposition On Electric And Power Engineering (EPEi), Iași, 17-18 octombrie 2024, IEEE, pp. 047–052, (indexat IEEE).

L. Cornei et al., 2024

Cornei, L., Cornei, D. & Foşalău, C. (2024). An Ontology-Driven Solution for Capturing Spatial and Temporal Dynamics in Smart Agriculture. În *18th International Conference on Research Challenges in Information Sciences (RCIS), Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 513, Springer, pp. 49–65, (indexat Web of Science).

Foşalău et al., 2023

Foșalău, C. & Cornei, D. (2023). Dendrometru cu fire magnetice amorfe, cerere brevet de inventie nr. A00192/2023.

Foşalău et al., 2024

Foşalău, C., Cornei, D. & Zet, C. (2024). Algorithm for compensation of external influences upon metal oxide gas sensors using the datasheet characteristics. *Metrology and Measurement Systems*, 31(4), (Revistă indexată Web of Science).

Frangu et al., 1996

Frangu, L., Tudorie, C., Gregoretti, C. & Cornei, D. (1996). Simple learning pattern recognition predictor and controller, using neural networks. *Neural Network World*, 6(4), 597–607.

Bibliografie selectivă

Atzori et al., 2016

Atzori, L., Iera, A. & Morabito, G. (2016). Understanding the Internet of Things: definition, potentials, and societal role of a fast evolving paradigm. *Ad Hoc Networks*, 56.

Chandra et al., 2018

Chandra, A., McNamara, K. E. & Dargusch, P. (2018). Climate-smart agriculture: perspectives and framings. *Climate Policy*, 18(4), 526–541.

D. Cornei et al., 2022

Cornei, D. & Foşalău, C. (2022). Using IoT in smart agriculture: study about practical realizations and testing in a real environment. În *2022 International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE), Iaşi, 20-22 octombrie 2022*, IEEE, 5th International Conference of the Doctoral School, Iaşi, May 18 - 20, pp. 013–018, (indexat IEEE).

D. Cornei et al., 2023

Cornei, D., Foşalău, C. & Cornei, L. (2023). A Study Regarding Power Consumption of An IoT Node For Image Retrieval and its Optimization. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iaşi*. *Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section*, 69(1), 61–84, (indexat Urlich, Index Copernicus).

D. Cornei et al., 2024

Cornei, D., Foşalău, C. & Cornei, L. (2024). A Cheap and Practical IoT Solution for Agricultural Data Monitoring. În 2024 IEEE International Conference And Exposition On Electric And Power Engineering (EPEi), Iaşi, 17-18 octombrie 2024, IEEE, pp. 047–052, (indexat IEEE).

L. Cornei et al., 2024

Cornei, L., Cornei, D. & Foşalău, C. (2024). An Ontology-Driven Solution for Capturing Spatial and Temporal Dynamics in Smart Agriculture. În *18th International Conference on Research Challenges in Information Sciences (RCIS), Lecture Notes in Business Information Processing*, vol. 513, Springer, pp. 49–65, (indexat Web of Science).

Foșalău et al., 2023

Foșalău, C. & Cornei, D. (2023). Dendrometru cu fire magnetice amorfe, cerere brevet de inventie nr. A00192/2023.

Foșalău et al., 2024

Foșalău, C., Cornei, D. & Zet, C. (2024). Algorithm for compensation of external influences upon metal oxide gas sensors using the datasheet characteristics. *Metrology and Measurement Systems*, 31(4), (Revistă indexată Web of Science).

Frangu et al., 1996

Frangu, L., Tudorie, C., Gregoretti, C. & Cornei, D. (1996). Simple learning pattern recognition predictor and controller, using neural networks. *Neural Network World*, 6(4), 597–607.

Kassab et al., 2020

Kassab, W. & Darabkh, K. A. (2020). A–Z survey of Internet of Things: Architectures, protocols, applications, recent advances, future directions and recommendations. *Journal of Network and Computer Applications*, 163, 102663.

McElrone et al., 2013

McElrone, A. J., Choat, B., Gambetta, G. A. & Brodersen, C. R. (2013). Water uptake and transport in vascular plants. *Nature Education Knowledge*, 4(5), 6.

Medsker et al., 2001

Medsker, L. R., Jain, L. et al. (2001). Recurrent neural networks. *Design and Applications*, 5(64-67), 2.

Metergroup, 2021a

Metergroup (2021a). Metergroup - Defining water potential—What it is. How to use it. | METER

Environment, Preluat de pe https://www.metergroup.com/meter_knowledgebase/defining-wate r-potential/ (accesat în 20 Mai 2021).

Metergroup, 2021b

Metergroup (2021b). Metergroup - The researcher's complete guide to soil moisture, Preluat de pe https://www.metergroup.com/crops/articles/the-researchers-complete-guide-to-soil-moisture/ (accesat în 20 Mai 2021).

Mustapää et al., 2020

Mustapää, T., Nikander, P., Hutzschenreuter, D. & Viitala, R. (2020). Metrological challenges in collaborative sensing: Applicability of digital calibration certificates. *Sensors*, 20(17), 4730.

Nie et al., 2022

Nie, Y., Nguyen, N. H., Sinthong, P. & Kalagnanam, J. (2022). A time series is worth 64 words: Long-term forecasting with transformers. *arXiv preprint arXiv:2211.14730*.

Shumway et al., 2017

Shumway, R. H., Stoffer, D. S., Shumway, R. H. & Stoffer, D. S. (2017). ARIMA models. *Time series analysis and its applications: with R examples*, 75–163.

Singh et al., 2022

Singh, G., Kalra, N., Yadav, N., Sharma, A. & Saini, M. (2022). Smart agriculture: a review. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 14(6), 423–454.

Stearns et al., 2015

Stearns, J. C., Kaiser, J. & Surette, M. G. (2015). Microbiology for dummies. –For dummies, Hoboken: For Dummies, a Wiley brand.

Sutskever et al., 2014

Sutskever, I., Vinyals, O. & Le, Q. V. (2014). Sequence to sequence learning with neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 27.

Taylor et al., 2018

Taylor, S. J. & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. *The American Statistician*, 72(1), 37–45. Urry et al., 2016

Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P. & Reece, J. (2016). Campbell Biology. 11th edition, Pearson.

Xu et al., 2022

Xu, J., Gu, B. & Tian, G. (2022). Review of agricultural IoT technology. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 6, 10–22.

Zhukov et al., 2015

Zhukov, A., Ipatov, M. & Zhukova, V. (2015). Advances in giant magnetoimpedance of materials. În *Handbook of Magnetic Materials*, vol. 24, Elsevier, pp. 139–236.

Zorzi et al., 2010

Zorzi, M., Gluhak, A., Lange, S. & Bassi, A. (2010). From today's INTRAnet of things to a future INTERnet of things: a wireless- and mobility-related view. *IEEE Wireless Communications*, 17(6), 44–51.