



**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA
BUCUREȘTI**

Școala Doctorală de INGINERIE ENERGETICĂ

TEZĂ DE DOCTORAT

**Analiza aspectelor de calitate a energiei electrice ale
sistemelor electroenergetice avansate**

**Conducător de doctorat
Prof.dr.ing. Radu PORUMB**

**Autor
Ing. Mădălina Călin-Arhip**

**București
Septembrie 2024**

CUPRINSUL TEZEI

Mulțumiri.....	5
Listă de abrevieri	6
Rezumat	7
Introducere	8
Contextul studiului.....	8
Obiective principale.....	9
Structura tezei	9
1. Aspecte teoretice relevante	10
1.1. Eficiență Energetică	10
1.2. Calitatea Energiei Electrice.....	11
1.3. Generarea de energie din surse regenerabile	13
1.4. Utilizatori activi (Prosumatori)	13
1.5. Rețele inteligente și blockchain	15
2. Impactul surselor distribuite asupra rețelelor electrice	16
2.1. Aspecte generale	16
2.2. Influența surselor distribuite asupra nivelului de tensiune	17
2.3. Impactul surselor distribuite asupra circulației de puteri	17
2.4. Influența surselor distribuite asupra funcționării protecțiilor	19
3. Analiza GRAFICELOR de sarcină.....	20
3.1. Aspecte matematice ale graficelor de sarcină	20
3.2. Clasarea curbelor de sarcină	21
3.3. Metode de prognoză.....	22
3.4. Corelații statistice.....	23
3.4.1. Coeficientul corelației liniare Pearson	24
3.5. Valori anormale	25
3.5.1. Definiția termenului de outlier	25
3.5.2. Metode de detectare a valorilor anormale.....	26
3.5.3. Algoritmul LOF	26
3.5.4. Metoda Z-score	28

4.	Studii de caz și rezultate	29
4.1.	Obținerea și normalizarea datelor	29
4.1.1.	Sistemul de măsurare utilizat	29
4.1.2.	Modelarea sistemului UPB	33
4.1.3.	Analiza datelor de intrare	37
4.1.4.	Analiza consumului de putere pe durata unei săptămâni	38
4.1.5.	Analiza consumului de putere pe durata unui an	43
4.2.	OFAT- One Factor at a Time	44
4.2.1.	Analiza comparativă a valorilor puterii și temperaturii	46
4.2.2.	Reprezentarea grafică a datelor pe partea de producere a energiei electrice	47
4.2.3.	Reprezentarea grafică a datelor pe partea de utilizare a energiei electrice	49
4.2.4.	Evoluția zilnică a mediei orare de producție.....	50
4.2.5.	Evoluția zilnică a mediei orare de utilizare.....	53
4.2.6.	Reprezentarea comparațiilor distribuțiilor valorilor puterii orare produse și utilizate	55
4.2.7.	Analiza OFAT parametrică a sistemului.....	62
4.2.8.	Analiza rezultatelor	64
4.3.	Analiza clustere din perioada 2020 – 2021	66
4.3.1.	Reprezentarea grafică a datelor pe partea de producere a energiei electrice	66
4.3.2.	Reprezentarea grafică a datelor pe partea de utilizare a energiei electrice	69
4.3.3.	Reprezentarea grafică date comune	72
4.3.4.	Distanțele dintre centroizi	76
4.4.	Analiza clusterelor din 2022-2023	79
4.4.1.	Reprezentarea grafică a datelor în clustere	79
4.4.2.	Distanțele dintre centroizi	82
4.5.	Analiza valorilor anormale (outliere).....	83
4.5.1.	Reprezentarea grafică –program outliere	83
4.5.2.	Reprezentarea grafică – program outlier correlation	85
4.6.	Analiza corelației Pearson.....	86
4.6.1.	Perioada de analiză de o săptămână	86
4.6.2.	Perioada de analiză 2020-2021	87
4.6.3.	Perioada de analiză 2022 - 2023	90
4.7.	Rezultate - recomandari	91
5.	Concluzii	92
5.1.	Concluzii generale	92
5.2.	Contribuții originale.....	94
5.3.	Perspective de continuare a cercetării	94

Bibliografie	95
Anexa 1 – Rezultatele procesului de normalizare a datelor pentru analiza consumului de putere pe durata unui an [64]	100
Anexa 2 – Programe MATLAB	127

CUVINTE CHEIE

Utilizatori activi (*prosumatori*), panouri fotovoltaice, curbe de sarcină, valori anormale (*outliere*) de putere, de tensiune și de curent electric, OFAT, *cluster*e, corelație, analiza distanțelor euclidiene

REZUMATUL EXTINS

În ultimele două decenii, evoluția societății omenеști a influențat în mod direct creșterea necesarului de energie. Din cauza faptului că sistemul electroenergetic are o structură construită de-a lungul câtorva zeci de ani, el prezintă un spectru tehnologic larg. Acest lucru reprezintă o vulnerabilitate, deoarece implementarea noilor tehnologii nu se poate face fără adaptare.

În prezent, domeniul sistemelor electroenergetice avansate se află în diferite stadii de dezvoltare. În acest sens, utilizatorii finali de energie electrică evoluează către statutul de *prosumatori*, care vor deține capacitatea de a produce, stoca și vinde energia prin intermediul unor piețe locale de energie, configurabile cu ajutorul noilor tehnologii.

Perspectiva eficientizării proceselor industriale, accelerată de apariția sistemelor inteligente de comandă și control, va îmbunătăți distribuția resurselor de producție prin posibilitatea inginerilor de a se adapta în timp real și continuu la nevoile sistemului. În viitor, se vor identifica și utiliza cele mai eficiente lanțuri de producție, rezultând produse finale mai ieftine, mai fiabile și cu emisii reduse de carbon.

Scopul tezei este de a stabili legătura dintre puterea produsă de *prosumatori* și comportamentul de utilizare a energiei, lucru realizabil prin intermediul următorilor pași:

- Identificarea valorilor minime, medii sau maxime ale puterilor activă, reactivă, aparentă
- Evaluarea evoluției zilnice a mediei orare de producție și utilizare
- Clusterizarea datelor și determinarea distanțelor dintre centroizii rezultați
- Detectarea *outliereilor* de putere și tensiune
- Determinarea și interpretarea coeficientul de corelație Pearson

Studiul prezentat în cadrul tezei este împărțit în cinci capitole și două anexe: una rezultată în urma procesului de normalizare a datelor pentru analiza consumului de putere pe durata unui an și una care conține programele Matlab. Teza include și capitolele specifice „Introducere”, „Concluzii” și „Bibliografie”.

Primul capitol are ca scop prezentarea succintă a aspectelor teoretice privind eficiența energetică, calitatea energiei electrice, generarea energiei din surse regenerabile, precum și explicarea noțiunilor de *prosumatori* și *blockchain*.

Prin creșterea eficienței energetice se poate crește competitivitatea economică a produselor, considerându-se că investiția în dezvoltarea infrastructurii generare – transport – distribuție presupune cheltuieli ridicate comparativ cu investiția în creșterea eficienței. Totodată, prin reducerea nivelului poluării mediului înconjurător se reduc și fondurile necesare în sistemul de sănătate [1].

Calitatea energiei electrice determină eficiența activităților din industrie sau din sectorul casnic. Poate fi afectată de interferențe cu frecvențe de până la 10 kHz. Acestea pot apărea nu numai în componentele sistemului energetic și în procesele de furnizare, cât și în procesele utilizatorului final. Abaterile permise de la indicatorii de calitate sunt stabilite pe baza daunelor

care ar putea apărea în sistemele de producție, transport și distribuție, precum și în furnizarea și utilizarea energiei electrice la abateri față de valorile ideale. Prin restrângerea spectrului de frecvență la 10 kHz, există trei categorii care definesc calitatea energiei: calitatea serviciului de alimentare (întreruperea energiei pe termen lung), calitatea tensiunii de alimentare și calitatea comercială (relația furnizor – utilizator).

Promovarea producției de energie electrică din surse regenerabile de energie a fost realizată atât prin Legea Nr. 220 din 2008, cât și prin adoptarea Strategiei Energetice până în 2030. Conform Directivei din noiembrie 2023 [2], obiectivul pentru 2030 privind sursele regenerabile de energie este de 42,5 %. De asemenea, se dorește atingerea de 1% până în 2025 și 5,5% pentru anul 2030 privind utilizarea biogazului și a hidrogenului în sectorul auto.

Cel de-al doilea capitol prezintă informații teoretice cu privire la influența surselor distribuite asupra rețelelor electrice. Valorificarea surselor regenerabile se poate face urmând două direcții, de siguranța energetică și de dezvoltare sustenabilă [3]. Obiectivele de securitate sunt atinse prin diversificarea surselor de energie și prin consolidarea securității energetice prin asigurarea cererii de resurse și reducerea resurselor energetice importate. Al doilea obiectiv vizează creșterea eficienței energetice prin utilizarea rațională a resurselor primare, promovarea producției de energie din surse regenerabile și reducerea impactului negativ al sectorului energetic asupra mediului [4].

Prin introducerea surselor distribuite se constată creșterea tensiunii după conectarea acestora sau scăderea tensiunii în cazul deconectării. De asemenea, sursa distribuită poate acoperi parțial, integral consumul întregii rețele, precum și injectarea surplusului în rețeaua electrică.

Capitolul trei urmărește stabilirea indicatorilor graficelor de sarcină [5], a metodelor de clasare și prognoză [6],[7], a corelației Pearson [8] și a metodelor de detectare a *outlielor* [9].

Capitolul patru este destinat explicării studiilor de caz, fiind structurat în mai multe subcapitole. Astfel, este prezentat modul de obținere, normalizare și analiza a datelor utilizate, a analizei OFAT, a analizei clusterelor și a *outlielor*, precum și a corelației Pearson.

În cadrul tezei s-au analizat date colectate din anii 2020 – 2023 înregistrate în cadrul Facultății de Energetică atât pe partea de utilizare, cât și pe partea de producere a energiei electrice. Lucrarea oferă o imagine de ansamblu privind comportamentul utilizatorilor din cadrul Facultății de Energetică în mod obișnuit de funcționare, dar și în cazul unor situații speciale, cum ar fi pandemia COVID-19, care a determinat trecerea învățământului în sistem online.

Prin efectuarea măsurătorilor directe efectuate la Tabloul General de Distribuție s-au putut identifica regimurile diferite de lucru și totodată realizarea unei analize statistice a valorilor importante ale puterilor activă, reactivă, aparentă (minim, mediu, maxim).

Analiza datelor prin metoda OFAT a avut ca scop identificarea criticității anumitor factori în vederea evaluării calității și eficienței proceselor analizate. În prima etapă s-au propus un număr de douăsprezece scenarii rezultate din parametrii de analiză și anume: semestru, perioada de obținere a datelor, precum și caracterul lucrător sau nelucrător al zilei.

Din analiza comparativă a valorilor normalizate din anii 2020 - 2021 ale puterii și temperaturii a rezultat următoarea concluzie, cu caracter general, că în vederea obținerii unor randamente ridicate ale panourilor fotovoltaice temperatura exterioară trebuie să fie cuprinsă între 10°C și 25°C.

De asemenea, prin intermediul reprezentărilor grafice ale evoluției zilnice a mediei orare de producție a rezultat că intervalul de funcționare ale panourilor fotovoltaice în anotimpul rece este între orele 7 și 17, cu atingerea unor maxime între orele 11 și 15, iar în restul perioadelor intervalul de funcționare este mărit, între orele 6 și 19. Analiza scenariilor de lucru ale evoluției zilnice a mediei orare utilizate a reliefat comportamentul de consum al energiei în zilele

nelucrătoare urmează aceeași formă a curbei de sarcini, lucru care va permite, în viitor, posibilitatea implementării unor stații electrice de încărcare care să furnizeze puteri ridicate în week-end comparativ cu restul săptămânii.

Suprapunerea datelor de producție cu cele de utilizare a avut ca scop implementarea datelor în programul de calcul MATLAB care să permită o analiză 2D a dispersiei valorilor comune și o reprezentare 3D a parametrilor analizați (putere produsă, utilizată și oră) din care a rezultat prezența a trei sau patru clusterare și a *outlierelor* în funcție de scenariul analizat. De asemenea, a reieșit concluzia că sistemul fotovoltaic poate susține sarcina pentru aproximativ cinci ore, lucru care permite furnizarea serviciului de *load shedding*.

O altă etapă a cercetării s-a îndreptat către analiza clusterelor. Din analiza datelor din 2020 – 2021 s-a ajuns la concluzia conform căreia numărul de scenarii poate fi înjumătățit, rezultând șase scenarii care au fost implementate în programul de calcul MATLAB în vederea determinării numărului optim de clusterare. Reprezentarea grafică a datelor pentru cele trei cazuri (de trei, patru sau cinci clusterare) a permis identificarea zonelor orare de producție, respectiv utilizare, dar și a *outlierelor*. Deși, din imaginile prezentate în cadrul tezei, s-a observat că mărirea numărului de clusterare de la trei la cinci ar permite o analiză amănunțită a datelor, în urma calculării distanțelor euclidiene dintre centroizii rezultați, s-a ajuns la concluzia potrivit căreia pentru bazele de date analizate, soluția optimă de analiza rămâne cea cu trei clusterare, minimizând astfel erorile de analiză. Totodată, am ajuns la concluzia conform căreia *outlierele* prezentate reprezintă de fapt, valori normale luând în considerare utilizatorii din cadrul facultății și anume funcționarea laboratoarelor care determină creșterea consumului pentru un interval scurt de timp.

În cadrul analizei clusterelor din 2022 – 2023, numărul de scenarii s-a redus semnificativ la două, în care întreaga baza de date a fost împărțită în zile lucrătoare și nelucrătoare. Și în acest caz, în urma analizei distanțelor euclidiene a rezultat soluția optimă de împărțire în trei clusterare. De asemenea, pentru acest ultim set de date am realizat cu ajutorul programului MATLAB un algoritm care să identifice valorile anormale de putere și tensiune, lucru care a permis observarea comportamentului sistemului electric de distribuție în prezența sistemului de generare locală de energie electrică.

Toate bazele de date analizate au fost supuse procesului de determinare a coeficientului de corelație Pearson. Acest lucru a permis trasarea unor concluzii cu caracter general privind existența corelațiilor dintre zilele lucrătoare și nelucrătoare, a corelațiilor dintre valorile înregistrate între semestrul I și II, precum și a corelației dintre tensiune și putere determinat pentru ultimul set de date. Astfel, aceste date pot oferi un instrument de analiză a celor care au informații doar pe partea de tensiune și care au nevoie să cunoască care este gradul de corelare cu prezența surselor distribuite, implicit a *prosumatorilor*. Acest lucru le permite să aibă posibilitatea de creștere sau scădere a nivelului de tensiune sau de refacere a gradului de conexiune al rețelei folosind alte conexiuni.

CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE

În cadrul studiului de cercetare sunt incluse contribuții personale în legătură cu asigurarea nivelului de calitate al energiei electrice

1. Documentarea articolelor de specialitate cu privire la:
 - a. Aspectele teoretice importante privind eficiența și calitatea energiei electrice
 - b. Impactul surselor distribuite asupra rețelelor electrice
 - c. Indicatorii analizei curbelor de sarcină și metodele de prognoză
 - d. Metodele de detectare a valorilor anormale
2. Analiza a mai multor seturi de date în vederea obținerii unor date relevante care să ofere informații privind caracteristicile comune dintre producerea și utilizarea energiei electrice
3. Analiza progresivă pe rând a factorilor de influență – OFAT
4. Influența panourilor fotovoltaice asupra eficienței energetice din perspectiva prosumatorilor
5. Implementarea datelor în programul de calcul MATLAB privind:
 - a. Analiza dispersiei 2D și reprezentarea 3D a parametrilor analizați
 - b. Identificarea numărului optim de clustere
 - c. Detectarea valorilor anormale ale puterii și tensiunii
6. Stabilirea coeficientului de corelație Pearson pentru toate bazele de date analizate
7. Diseminarea rezultatelor studiilor în cadrul unor conferințe internaționale precum UPEC 2019, ISFEE 2020, UPEC 2020, MPS 2021, ICATE 2021, UPEC 2022, UPEC 2024, dar și reviste EMERG, Sustainability 2021, Buletinul Științific al Universității Politehnica din București

BIBLIOGRAFIE

- [1] Nicolae Golovanov, Radu Porumb, Cornel Toader, Nicolae Mogoreanu,, Eficiența energetică. Mediul. Economia modernă, Editura Agir, 2017.
- [2] ***, [Interactiv]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/ro/sheet/70/energia-din-surse-regenerabile>. [Accesat 15 07 2024].
- [3] Alexandra Mânzat, Cristina Daniela Deac, „The opportunity of using solar energy in Romania,” în *a XII-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională “ Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești ”*, Sebeș, 2012.
- [4] ***, „Hotărârea de Guvern nr. 1069 din 5 septembrie 2007 (HG 1069/2007) privind aprobarea Strategiei energetice a României pentru perioada 2007-2020 publicat în Monitorul Oficial 781 din 19 noiembrie 2007 (M. Of. 781/2007)”.
- [5] N. Golovanov, I. Ionescu, N. Mira, P. Postolache, C. Toader, Consumatori de energie electrică, București: Editura Agir, 2009.
- [6] L., Stoyanov, Z., Zarkov, I., Draganovska, V., Lazarov, „Methods for Energy Production Estimation from Photovoltaic Plants: Review and Application,” în *International Conference on High Technology for Sustainable Development (HiTech)*, Sofia, Bulgaria, 2018.
- [7] D. R. Chandra, M. S. Kumari, M. Sydulu, „A detailed literature review on wind forecasting,” în *International Conference on Power, Energy and Control, ICPEC*, India, 2013
- [8] A. Ayadi, O. Ghorbel, A. M. Obeid, M. Abid, „Outlier detection approaches for wireless sensor networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 129, pp. 319-333, 2017.
- [9] H. Wang, M. J. Bah and M. Hammad, „Progress in Outlier Detection Techniques: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 107964-108000, 2019.