

**UNIVERSITATEA TEHNICĂ "GHEORGHE ASACHI"
DIN IAȘI**



**PLANIFICAREA DEZVOLTĂRII REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A
ENERGIEI ELECTRICE FOLOSIND SISTEME SUPT DE
ASISTARE A DECIZIILOR BAZATE PE TEHNICI DE INTELIGENȚĂ
ARTIFICIALĂ**

- REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT -

Drd. Ing. Ecaterina Chelaru

Conducător de doctorat: Prof. dr. ing. habil. Gheorghe Grigoraș

IAȘI, 2025

PLANIFICAREA DEZVOLTĂRII REȚELELOR DE DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE FOLOSIND SISTEME SUPORT DE ASISTARE A DECIZIILOR BAZATE PE TEHNICI DE INTELIGENȚĂ ARTIFICIALĂ

Drd. ing. Ecaterina Chelaru
Domeniul Inginerie Energetică

Președinte comisie doctorat: Prof. univ. dr. ing. Alexandru Sălceanu
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Conducător de doctorat: Prof. univ. dr. ing. Gheorghe Grigoraș
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Referenți oficiali: Prof. univ. dr. ing. Radu-Florin Porumb
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Prof. univ. dr. ing. Ion Triștiu
Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
POLITEHNICA București
Prof. univ. dr. ing. Mihai Gavrița
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

Comisia de îndrumare/ Comisia de îndrumare
și integritate academică:

Conf. dr. ing. Bogdan Neagu
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Conf. dr. ing. Florina Scarlatache
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Conf. dr. ing. Oana Beniugă
Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași
Conf. dr. ing. Crenguța Bobric
Universitatea “Ștefan cel Mare” din Suceava

CUPRINS

1. Introducere	1
2. Contextul actual privind problema planificării rețelelor de distribuție a energiei electrice.....	2
2.1. Aspecte generale.....	2
2.2. Restricții și provocări actuale în planificarea rețelelor de distribuție a energiei electrice.....	2
2.2.1. Politicile din România și Uniunea Europeană privind eficiența energetică și impactul asupra mediului.....	2
2.2.2. Transformarea digitală și tranziția către rețele inteligente.....	4
2.3. Planificarea strategică în contextul rețelelor inteligente.....	5
3. Sisteme suport de asistare a deciziilor pentru planificarea dezvoltării rețelelor de distribuție a energiei electrice.....	6
3.1. Rolul Sistemelor suport de asistare a deciziilor în planificarea dezvoltării rețelelor de distribuție a energiei electrice.....	6
3.2. Impactul tehnicilor de inteligență artificială (IA) în optimizarea deciziilor.....	6
3.3. Arhitecturi și caracteristici ale Sisteme Suport de Asistare a Deciziilor.....	7
3.3.1. Definiție și caracteristici principale ale SSAD.....	7
3.3.2. Evoluția și clasificarea SSAD.....	7
3.3.3. Tipuri de decizii asistate în planificarea rețelelor electrice de distribuție.....	8
3.3.4. Arhitectura generală a unui SSAD.....	8
3.3.5. Modele conceptuale ale SSAD.....	9
3.3.5.1. Modele deterministe vs. modele incerte.....	9
3.3.5.2. Modele bazate pe cunoaștere vs. modele bazate pe date.....	9
3.4. Integrarea tehnicilor de IA în SSAD.....	10
3.4.1. Clasificarea ierarhică a principalelor tehnici de Inteligență Artificială.....	10
3.4.2. Tehnici de Inteligență Artificială utilizate în SSAD pentru planificarea rețelele electrice de distribuție.....	11
3.4.2.1. Logica fuzzy.....	11
3.4.2.2. Tehnici de clustering.....	12
3.4.2.3. Rețele neuronale artificiale (ANN) și învățarea automată.....	13
4. Sistem suport de asistare a deciziilor în procesul de integrare optimală a prosumatorilor în rețelele de distribuție a energiei electrice.....	14
4.1. Aspecte generale asociate conceptului de “prosumator”.....	14
4.2. Rolul și provocările prosumatorilor.....	14
4.3. Prosumatorii – actori importanți în tranziția către rețelele active.....	14
4.4. Sistem suport de asistare a deciziilor privind stabilirea priorității de conectare a prosumatorilor în A-REDEE.....	15
4.4.1. Abordări privind strategiile de integrare a prosumatorilor în A-REDEE.....	15
4.4.2. SSAD pentru integrarea optimă a prosumatorii în A-REDEE.....	15
4.4.3. Testarea SSAD.....	16
5. Sisteme suport de asistare a deciziilor în procesul de modernizare a infrastructurii rețelelor de distribuție a energiei electrice.....	22
5.1. Contextul actual și provocări în planificarea rețelelor de distribuție a energiei electrice din România.....	22
5.2. Strategii de management a parcului de transformatoare de putere MT/JT.....	23
5.3. Simularea procesului de modernizare a parcului de transformatoare al operatorilor de distribuție din România, în perioada 2020-2030.....	24
5.3.1. Starea parcului de transformatoare a operatorilor de distribuție din România....	24

5.3.2.	Simularea procesului de modernizare a parcurilor de transformatoare.....	24
5.4.	Sisteme suport de asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor în rețelele de distribuție a energiei electrice.....	26
5.4.1.	Stadiul actual al studiilor privind impactul înlocuirii transformatoarelor.....	26
5.4.2.	Sistem suport de asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată.....	26
5.4.2.1.	Ipoteze de cercetare.....	26
5.4.2.2.	Strategie de luare a deciziilor bazată pe analiză multicriterială.....	27
5.4.3.	Testarea SSAD destinat înlocuirii transformatoarelor, bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată.....	28
5.5.	Sistem de suport asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată și sisteme expert.....	30
5.5.1.	Arhitectura SSAD.....	31
5.5.2.	Testarea SSAD.....	32
5.6.	Sistem suport de asistare a deciziilor privind procesul de înlocuire a transformatoarelor în rețelele electrice de distribuție integrând prosumatori.....	33
5.6.1.	Aspecte generale.....	33
5.6.2.	Metodologia de înlocuire a transformatoarelor integrată în SSAD.....	34
5.6.3.	Testarea SSAD utilizat în procesul de înlocuire a transformatoarelor în rețelele electrice de distribuție, în contextul integrării prosumatorilor.....	34
6.	Sistem suport de asistare a deciziilor în procesul de integrare optimă a stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice.....	37
6.1.	Aspecte generale privind sectorul transportului electric.....	37
6.2.	Vehicule electrice și infrastructura de încărcare.....	37
6.3.	Sistem suport de identificare a modelelor comportamentale asociate gradului de ocupare și profilurilor caracteristice ale stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice.....	38
6.3.1.	Aspecte generale.....	38
6.3.2.	Sistem suport de identificare a modelelor comportamentale și profilurilor caracteristice ale stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice	38
6.3.3.	Testarea SSAD.....	40
6.4.	Sistem suport de asistare a deciziilor privind amplasarea optimă a stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice în rețelele de distribuție a energiei electrice	44
6.4.1.	Aspecte generale.....	44
6.4.2.	Cadrul de extragere a datelor bazat pe clustering.....	44
6.4.3.	Testarea SSAD.....	46
7.	Concluzii și direcții viitoare de cercetare.....	50
7.1.	Concluzii generale.....	50
7.2.	Contribuții originale.....	51
	BIBLIOGRAFIE	52

CAPITOLUL 1

Introducere

Planificarea dezvoltării rețelelor de distribuție a energiei electrice reprezintă o provocare majoră în contextul tranziției energetice și al creșterii cererii, precum și al integrării surselor de energie regenerabilă, a sistemelor de stocare a energiei și a stațiilor de încărcare pentru vehicule electrice.

Lucrarea propune utilizarea sistemelor suport de asistare a deciziilor, bazate pe tehnici de inteligență artificială, pentru a îmbunătăți procesul de planificare a rețelelor de distribuție a energiei electrice. Printre metodele abordate se regăsesc învățarea nesupravegheată (pentru identificarea zonelor critice ale rețelei), logica fuzzy (pentru tratarea incertitudinii) și sistemele expert (pentru luarea deciziilor bazate pe reguli euristice).

Lucrarea este organizată în **șapte capitole**, fiecare abordând un aspect esențial al utilizării SSAD în planificarea dezvoltării REDEE:

Capitolul 1 reprezintă partea de introducere a tezei în care se subliniază importanța tematicii abordate și impactul utilizării SSAD bazate pe IA în planificarea REDEE. De asemenea, se oferă o imagine de ansamblu asupra conținutului lucrării.

În al doilea capitol se prezintă o analiză detaliată a contextului actual cu accent pe integrarea surselor de energie regenerabilă, modernizarea infrastructurii de distribuție și amplasarea stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice..

Capitolul 3 tratează conceptele fundamentale, arhitectura și clasificarea sistemelor suport de asistare a deciziilor, precum și integrarea tehnicilor de inteligență artificială în procesul decizional.

Capitolul al patrulea se concentrează asupra integrării prosumatorilor în rețelele de distribuție, propunând un sistem suport de asistare a deciziilor original pentru racordarea optimă a acestora.

Capitolul 5 abordează procesul de modernizare a infrastructurii rețelelor electrice de distribuție, cu accent pe strategiile de înlocuire a transformatoarelor.

Capitolul 6 tratează integrarea stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice, cu accent pe comportamentul acestora și pe amplasarea optimă în rețelele de joasă tensiune.

Capitolul al șaptelea prezintă concluziile lucrării, sintetizând contribuțiile originale, limitările cercetării și direcțiile viitoare. Lucrarea prezintă contribuții științifice originale care oferă soluții inovatoare pentru digitalizarea și optimizarea procesului de luare a deciziilor în planificarea dezvoltării infrastructurii de distribuție a OD din România.

CAPITOLUL 2

Contextul actual privind problema planificării rețelelor de distribuție a energiei electrice

Planificarea rețelelor de distribuție a energiei electrice este profund influențată de tranziția energetică, de creșterea cererii de energie și de obiectivele ambițioase de decarbonizare stabilite prin politicile europene și naționale [1]–[5]. Necesitatea de modernizare a infrastructurii și de adaptare la integrarea surselor de energie regenerabilă (SER), a stațiilor de încărcare pentru vehicule electrice și a prosumatorilor transformă semnificativ procesul tradițional de planificare.

2.1. Aspecte generale

În contextul creșterii cerințelor de flexibilitate, fiabilitate și eficiență energetică, rețelele electrice de distribuție trebuie să răspundă unor noi cerințe tehnice și reglementări tot mai stricte [6], [7]. Introducerea unor metode de planificare bazate pe date și scenarii predictive devine esențială.

2.2. Restricții și provocări actuale în planificarea rețelelor de distribuție a energiei electrice

2.2.1 Politicile din România și Uniunea Europeană privind eficiența energetică și impactul asupra mediului

Legislația UE, prin Pachetul „Fit for 55”, Planul REPowerEU și Pactul Verde European, impune decarbonizarea sectorului energetic și eficientizarea sistemului electroenergetic [8]–[11]. România transpune aceste politici prin PNIESC și Strategia Energetică Națională [12], [13]. Pentru rețelele de distribuție, acest lucru înseamnă integrarea de noi tehnologii, precum contoarele inteligente, posturile de transformare automatizate și platformele digitale de monitorizare a rețelei.

Conform Figurii 2.1, până în 2030 industriile (industria energo-intensivă, agricultura și servicii) și utilizatorii finali rezidențiali vor înregistra o reducere a cererii de energie finală, însă sectorul transportului va înregistra o creștere de 2% față de 2017, ca urmare a creșterii gradului de integrare a vehiculelor electrice.

În România, producția din surse poluante cum este cărbunele ar trebui să urmeze o evoluție descendentă, de la aproximativ 20 TWh pe an în prezent, la 15 TWh în 2050, în timp ce producția din

surse regenerabile ar trebui să crească de la 25 TWh (2017) la 33 TWh (2050), pentru a alinia sectorul energetic la obiectivele privind reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră.

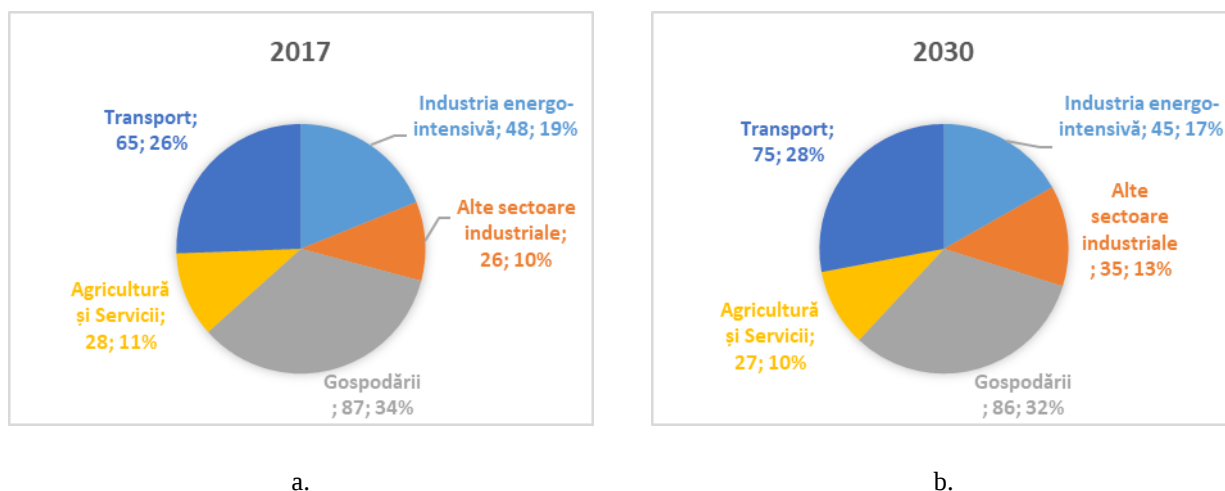


Figura 2.1. Cererea finală de energie, pe sectoare de activitate: (a) în 2017 și (b) în 2030. Adaptat după [4]

Pe fondul intensificării efectelor schimbărilor climatice, Grupul Interguvernamental privind Schimbările Climatice (IPCC) recomandă reducerea GES cu aproximativ 50% până în 2030 comparativ cu nivelurile din 1990, ca etapă intermediară pentru atingerea neutralității climatice până în 2050. În acest sens, Uniunea Europeană și-a stabilit un obiectiv de reducere a emisiilor nete cu cel puțin 55% până în 2030, urmărind atingerea neutralității climatice până la mijlocul secolului.

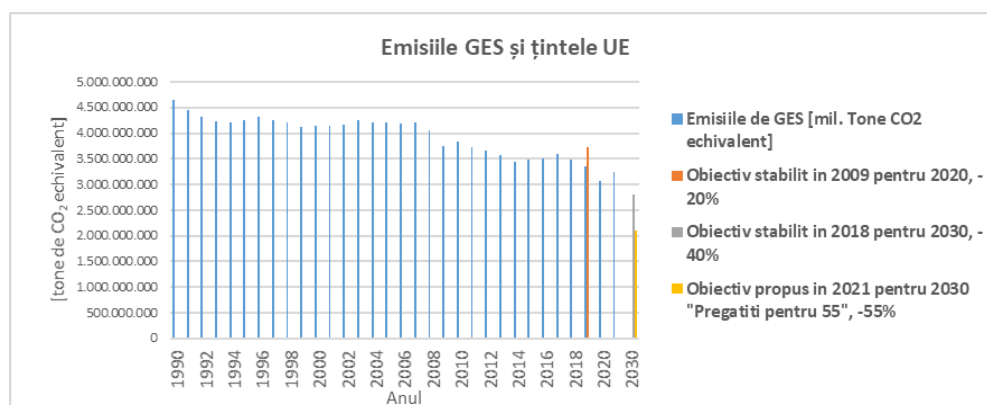


Figura 2.2. Evoluția emisiilor de gaze cu efect de seră în UE și obiectivele de reducere pentru 2020 și 2030. Adaptat după [11]

Figura 2.2 prezintă evoluția GES în UE în perioada 1990–2020, evidențiind obiectivele etapizate de reducere stabilite pentru orizontul anului 2030 și direcția clară a tranziției către un sistem energetic cu emisii scăzute de carbon [11]. Această tendință descrescătoare accentuează necesitatea electrificării extinse în toate sectoarele economiei și a integrării accelerate a surselor regenerabile, ceea ce implică modernizarea și adaptarea REDEE pentru a garanta flexibilitate, stabilitate și securitate în alimentarea cu energie.

Pe lângă influența contextului economic din 2020, măsurile aplicate de statele membre au contribuit semnificativ la depășirea țintei climatice stabilite pentru acel an, reducând emisiile cu 31,9% față de 1990.

2.2.2 Transformarea digitală și tranziția către rețele inteligente

Digitalizarea reprezintă o componentă fundamentală în modernizarea rețelelor electrice. Rețelele inteligente (smart grids) permit fluxuri bidirecționale de energie și control în timp real [14], [15]. Transformarea presupune automatizarea proceselor, integrarea prosumatorilor și utilizarea de sisteme avansate de monitorizare a calității energiei și a pierderilor. În același timp, sunt necesare investiții consistente pentru adaptarea infrastructurii existente la cerințele noilor consumatori activi și ale mobilității electrice [16].

Avantajele rețelelor inteligente sunt descrise în Figura 2.3, care sintetizează principalele beneficii ale integrării conceptului “Smart Grid”, incluzând monitorizarea în timp real a circulațiilor de putere, reducerea pierderilor, integrarea SER, creșterea flexibilității sistemului și implicarea activă a utilizatorilor finali.

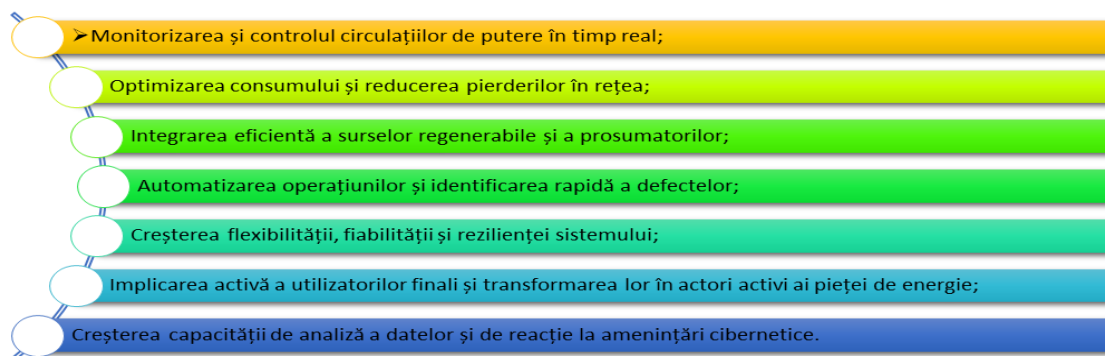


Figura 2.3. Avantajele implementării rețelelor inteligente (*Smart Grids*) în REDEE

Un pilon central în cursul tranziției către zero emisii îl reprezintă stabilitatea REDEE. O infrastructură rezilientă și flexibilă, cu un grad ridicat de automatizare, capacitate adecvată și o topologie optimă este capabilă să integreze sursele GD [16]. Cele mai importante investiții urmează să fie direcționate către infrastructura primară [17], în paralel cu adoptarea de tehnologii nepoluante, reglementări noi și cerințe de *Eco-Design* stabilite la nivelul UE.

În acest context, A-REDEE oferă o alternativă modernă și scalabilă, prin capacități avansate de monitorizare, control în timp real și integrare flexibilă a producției descentralizate. Aceste sisteme permit optimizarea circulațiilor de puteri, reducerea pierderilor de energie și implicarea activă a utilizatorilor finali, sprijinind astfel tranziția către un sistem de distribuție digital, decarbonizat și rezilient [17].

Planificarea REDEE se află într-un proces de transformare profundă, confruntându-se simultan cu restricții tehnice stringente și cu necesitatea adoptării inovațiilor tehnologice, pentru a asigura tranziția către un A-REDEE sustenabile și inteligente.

2.3. Planificarea strategică în contextul rețelelor inteligente

Planificarea strategică se bazează tot mai mult pe abordări multi-criteriale, care includ criterii tehnice (pierderi, capacitate de încărcare), economice (costuri de investiție și operare) și de sustenabilitate (amprentă de carbon, impact asupra mediului) [17]. Se conturează conceptul de planificare adaptivă, în care datele dinamice din rețea (fluxuri, tensiuni, stări de încărcare) sunt folosite pentru scenarii evolutive pe termen scurt și mediu.

Această planificare presupune instrumente analitice moderne și sisteme suport de asistare a deciziilor, care pot analiza multiple variante și identifica soluțiile optime în funcție de criteriile setate [18]. Integrarea acestor abordări în procesul decizional al operatorilor de distribuție este esențială pentru atingerea obiectivelor energetice la nivel național și european.

Avantajele unei planificări eficiente a dezvoltării REDEE: Reducerea costurilor operaționale ca urmare a consolidării REDEE; Îmbunătățirea calității energiei electrice, asigurarea stabilității tensiunii și reducerea fluctuațiilor frecvenței; Adaptare la noile tehnologii și la cerințele viitoare și creșterea flexibilității REDEE; Reducerea impactului asupra mediului prin reducerea emisiilor de carbon și utilizarea unor tehnologii în acord cu standardele actuale.

O provocare majoră în planificarea REDEE o reprezintă infrastructura tehnică învechită. În România, o mare parte din echipamentele rețelei de distribuție – precum transformatoarele, cablurile electrice și echipamentele de comutație – au depășit durata de viață estimată de proiectare și necesită înlocuire sau reabilitare [18].

În aceste condiții, transformarea REDEE pentru a face față noilor provocări presupune un efort coordonat și susținut de înlocuire a infrastructurii îmbătrânite cu soluții moderne, adaptate noilor realități energetice. Acest proces este esențial pentru creșterea fiabilității sistemului, reducerea pierderilor, integrarea surselor regenerabile și respectarea angajamentelor climatice asumate la nivel european și național.

CAPITOLUL 3

Sisteme suport de asistare a deciziilor pentru planificarea dezvoltării rețelelor de distribuție a energiei electrice

3.1. Rolul Sistemelor suport de asistare a deciziilor în planificarea dezvoltării rețelelor de distribuție a energiei electrice

Sistemele Suport de Asistare a Deciziilor (SSAD) sunt instrumente informatice avansate utilizate de operatorii de distribuție (OD) pentru analiza datelor, optimizarea investițiilor și luarea deciziilor strategice în contextul rețelelor electrice de distribuție (REDEE) [13], [19]–[22].

Acestea permit integrarea surselor de energie regenerabilă, vehiculelor electrice și a prosumatorilor, facilitând totodată reducerea pierderilor, creșterea flexibilității și evitarea riscurilor tehnice și economice. Integrarea tehnologiilor GIS și IA contribuie la adaptarea dinamică a planificării în medii incerte.

SSAD automatizează procesul decizional folosind modele predictive, analize multicriteriale și simulări de rețea. Totodată, acestea reduc costurile operaționale cu până la 20% și sprijină investițiile corelate cu nevoile reale ale rețelei [13], [22].

Provocările identificate: volumul mare de date, integrarea în infrastructura veche și lipsa standardizării pentru IA [22]–[23].

3.2. Impactul tehnicilor de inteligență artificială (IA) în optimizarea deciziilor

Integrarea tehnicilor de inteligență artificială (IA) în structura SSAD aduce un aport major în gestionarea volumelor mari de date, în învățarea automată a comportamentului sistemului și în creșterea capacității de previziune. Metodele moderne includ logica fuzzy, rețelele neuronale artificiale, clusteringul, algoritmi genetici, precum și tehnici din domeniul inteligenței artificiale explicabile (xAI) [24]–[33].

Prin aceste tehnici, SSAD pot modela fenomene complexe, precum variația sarcinii, distribuția fluxurilor de putere, integrarea surselor regenerabile intermitente sau localizarea optimă a stațiilor de încărcare pentru vehicule electrice. În plus, IA permite adaptarea în timp real a deciziilor în funcție de condițiile dinamice din rețea, sprijinind astfel o planificare inteligentă și reactivă.

3.3. Arhitecturi și caracteristici ale Sisteme Suport de Asistare a Deciziilor

3.3.1. Definiție și caracteristici principale ale SSAD

SSAD pot fi clasificate în funcție de nivelul decizional asistat, de gradul de interactivitate și de tipurile de date procesate. La nivelul operatorilor de distribuție, acestea sunt integrate în structuri ierarhizate, ilustrate în Figura 3.1, care detaliază arhitectura piramidală de suport decizional.

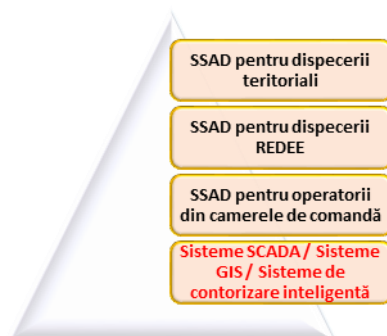


Figura 3.1. Reprezentarea piramidală a SSAD integrate la OD

3.3.2. Evoluția și clasificarea SSAD

În funcție de abordarea predominantă, SSAD pot fi sisteme bazate pe modele, pe baze de cunoștințe, pe baze de date sau hibride. Figura 3.2 și Figura 3.3 ilustrează clasificarea acestora după natura resurselor utilizate și tipul de analiză suportată [22].

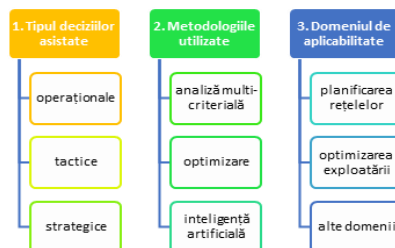


Figura 3.2. Clasificarea de bază a SSAD [13]

Tip SSAD	1. SSAD bazate pe modele	2. SSAD bazate pe baze de date	3. SSAD bazate pe cunoștințe	4. SSAD bazate pe documente	5. SSAD bazate pe comunicare
Principiu de funcționare	Utilizează modele matematice, analitice sau de simulare pentru planificarea și optimizarea rețelelor electrice	Acces și interogare a bazelor de date operaționale pentru monitorizarea și analiza REDEE	Încorporează baze de cunoștințe și reguli de decizie pentru diagnosticarea și prevenirea defectelor în rețea	Facilitează gestionarea documentației tehnice, reglementărilor și arhivelor de proiecte în domeniul energetic	Sprânză colaborarea între operatorii de rețea, autorități și alte părți interesate în procesul decizional
Scop principal	Simularea și optimizarea circulațiilor de putere, planificarea dezvoltării rețelei și reducerea pierderilor	Analiza datelor istorice despre consum și incidente pentru prognoza sarcinii și gestionarea eficientă a REDEE	Furnizarea de recomandări bazate pe expertiză tehnică pentru mentenanță predictivă și decizii operative	Organizarea și căutarea rapidă a informațiilor relevante despre REDEE, inclusiv standarde și reglementări	Îmbunătățirea comunicării între echipele de planificare, managementul crizelor și luarea deciziilor strategice
Utilizatori	Ingineri energeticieni, specialiști în planificarea și exploatarea REDEE	Manageri de rețea, dispeceri și analiști de date din sectorul energetic	Personal tehnic, consultanți și experți în diagnosticarea și întreținerea echipamentelor REDEE	Reglementatori, manageri de proiect și operatori ai sistemelor de distribuție	Echipe interdisciplinare de operatori de rețea, autorități și investitori în infrastructură
Exemple de utilizare	Modelarea circulațiilor de putere, optimizarea extinderii rețelei, reducerea pierderilor tehnice	Monitorizarea consumului, analiza incidentelor din rețea, identificarea zonelor cu riscuri ridicate	Detectarea automată a defectelor, recomandări pentru mentenanță preventivă și intervenții eficiente	Arhivarea și consultarea reglementărilor privind REDEE, acces rapid la documentația tehnică	Platforme pentru colaborarea între operatori, autorități și furnizori în procesul de luare a deciziilor

Figura 3.3. Tipuri de SSAD după natura resurselor utilizate [34]

3.3.3. Tipuri de decizii asistate în planificarea rețelelor electrice de distribuție

Pentru o mai bună planificare a dezvoltării REDEE, SSAD trebuie să sprijine multiplele decizii strategice și operative ale FD. Principalele tipuri de decizii asistate sunt [35]-[39]:

1. **Extinderea și întărirea infrastructurii REDEE:** Deciziile sunt asistate de SSAD prin scenarii de investiții pe termen lung, care fundamentează locul, momentul și capacitatea optimă a noilor instalații.
2. **Optimizarea circulațiilor de putere:** Deciziile sunt asistate de SSAD prin scenarii de investiții pe termen lung, care fundamentează locul, momentul și capacitatea optimă a noilor instalații.
3. **Integrarea SER:** Sistemele analizează capacitatea de găzduire și impactul asupra tensiunilor și fluxurilor, facilitând decizii privind modernizarea rețelei.
4. **Analiza cererii și prognoza de consum:** Modulele din SSAD estimează cererea viitoare folosind metode statistice și de inteligență artificială, sprijinind dimensionarea corectă a rețelei.
5. **Planificarea strategică pe termen lung:** SSAD generează și evaluează scenarii de dezvoltare, optimizând investițiile în funcție de cererea prognozată și politicile energetice.
6. **Integrarea surselor de energie distribuită:** Sistemele calculează câte surse pot fi integrate fără întăriri și pot recomanda soluții flexibile ca alternativă la investițiile clasice.
7. **Optimizarea exploatarei rețelei și creșterea fiabilității:** SSAD contribuie la selectarea configurațiilor optime și propun investiții în automatizare pentru îmbunătățirea continuității în alimentare.
8. **Analize complexe și asigurarea conformării cu reglementările actuale:** SSAD ajută la modelarea scenariilor cerute de autorități și la respectarea obiectivelor de decarbonizare și eficiență energetică.

3.3.4. Arhitectura generală a unui SSAD

Un SSAD dedicat planificării REDEE poate avea o structură modulară care să preia datele din diversele baze, să le proceseze cu modelele de analiză integrate și să interacționeze cu FD. O arhitectură generală a unui SSAD cuprinde [40], [41]:

1. **Bază de date:** conține informații despre elementele REDEE și date operaționale, fiind conectată frecvent cu sisteme GIS, SCADA sau EMS pentru actualizare automată [42], [40].
2. **Modele de analiză (biblioteca de modele):** prelucrează datele din baza de date și aplică algoritmi matematici, modele de rețea sau simulări electrice
3. **Bază de cunoștințe:** integrează reguli de decizie, bune practici și expertiză operațională, fiind utilă în decizii euristice sau sub incertitudine

4. **Motorul de decizie (motor de inferență):** interpretează rezultatele analizelor și generează alternative sau soluții optime pe baza obiectivelor stabilite
5. **Interfața cu utilizatorul:** permite interacțiunea cu sistemul, afișarea rezultatelor și personalizarea deciziilor, susținând transparența și controlul uman

În contextul REDEE, această arhitectură generală este adesea personalizată cu module specifice domeniului (de exemplu, modul de calcul al indicatorilor de fiabilitate, modul de dimensionare a SER etc.), însă structura de bază rămâne similară.

3.3.5. Modele conceptuale ale SSAD

3.3.5.1. Modele deterministe vs. modele incerte

SSAD pot fi clasificate și în funcție de modelele integrate în [35]:

- **SSAD bazat pe modele deterministe**, care utilizează date de intrare precise și reguli fixe. Pentru aceleași condiții inițiale vor produce întotdeauna același rezultat. Aceste modele nu includ factori aleatori sau variații.
- **SSAD bazat pe modele bazate pe incertitudine** (stocastice sau probabilistice), care integrează tehnici de IA pentru a gestiona variabilitatea și scenariile imprevizibile [43], [44]. Acestea generează un interval de rezultate posibile în loc de un rezultat fix, unic, fiind utile mai ales în situații când planificarea trebuie să țină cont de factori greu predictibili.

3.3.5.2. Modele bazate pe cunoaștere vs. modele bazate pe date

În funcție de modul de obținere a informațiilor pentru decizie, SSAD pot folosi modele bazate pe cunoaștere (expertiză umană formalizată) sau modele bazate pe date (învățare automată) [26], [34].

1. **Modelele bazate pe cunoaștere** utilizează regulile și experiența experților din domeniu, adesea codificate sub formă de reguli *IF-THEN* sau logică fuzzy, pentru a lua decizii.

Sistemul Expert imită raționamentul unui expert uman: culege informații despre REDEE și pe baza unui set de reguli euristice recomandă soluții [45].

Logica fuzzy este adesea integrată în astfel de modele pentru a gestiona incertitudinea lingvistică sau raționamentul nuanțat al experților.

2. **Modelele bazate pe date** valorifică volumele considerabile de informații istorice și utilizează algoritmi de *învățare automată* pentru a extrage automat tipare și pentru a optimiza deciziile. În loc să se bazeze explicit pe reguli construite de experți, aceste modele *învăță* din datele existente ale sistemului.

3.4. Integrarea tehnicilor de IA în SSAD

3.4.1. Clasificarea ierarhică a principalelor tehnici de Inteligență Artificială

Tehnicile de inteligență artificială utilizate în cadrul SSAD pot fi clasificate în mai multe categorii, în funcție de modul de învățare, natura datelor și obiectivele urmărite. Cele mai utilizate metode sunt învățarea supravegheată (ex. regresie, rețele neuronale), învățarea nesupravegheată (ex. clustering) și învățarea prin întărire. O clasificare vizuală a acestora este prezentată în Figura 3.4 [24], [28].

În contextul planificării rețelelor de distribuție, metodele nesupravegheate sunt utile pentru identificarea zonelor critice, în timp ce metodele supravegheate sunt aplicate pentru prognoză și optimizare. Tot mai des sunt integrate și metode de tip xAI (eXplainable AI), care permit interpretarea transparentă a deciziilor luate de algoritmi [28].



Figura 3.4 Clasificarea tehnicilor de Inteligență Artificială integrate în SSAD

3.4.2. Tehnici de Inteligență Artificială utilizate în SSAD pentru planificarea rețelele electrice de distribuție

3.4.2.1 Logica fuzzy

Logica fuzzy este utilizată pentru modelarea incertitudinii și tratarea variabilelor lingvistice, fiind aplicată în evaluarea stării rețelei, clasificarea echipamentelor sau prioritizarea investițiilor [46]–[50]. Aceasta permite formularea unor reguli de tip „if–then” care pot gestiona variabile calitative, cum ar fi gradul de încărcare sau nivelul de uzură.

Funcțiile de apartenență utilizate în logica fuzzy (triunghiulare, trapezoidale, gaussiene etc.) sunt reprezentate în relațiile 3.1 – 3.3, iar fluxul decizional fuzzy este ilustrat în Figura 3.5. Avantajul principal al acestei metode constă în capacitatea de a lua decizii chiar și în lipsa unor date numerice exacte, lucru frecvent întâlnit în rețelele reale [47]–[49].

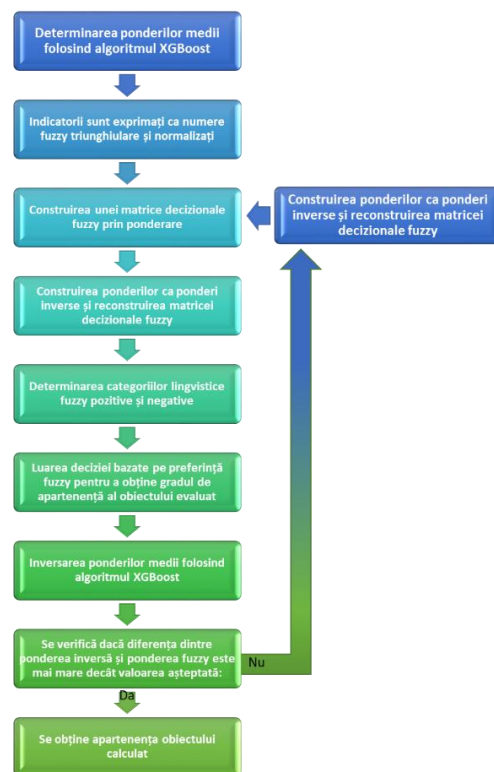


Figura 3.5 Diagramă de flux a modelului hibrid de luare a deciziilor bazat pe logica fuzzy

Într-o mulțime clasică, un element x aparține sau nu mulțimii:

$$(\mu_A(x) = 1) \quad (3.1)$$

$$(\mu_A(x) = 0) \quad (3.2)$$

Într-o mulțime fuzzy, apartenența este graduală:

$$A = \{(x, (\mu_A(x))) | x \in U\} \quad (3.3)$$

unde $\mu_A(x)$ este funcția de apartenență.

3.4.2.2. Tehnici de clustering

Clusteringul este o tehnică de învățare nesupravegheată aplicată în segmentarea consumatorilor, detectarea zonelor critice și prioritizarea acțiunilor de modernizare. Algoritmii frecvent utilizați sunt k-means și fuzzy c-means, aceștia grupând elementele rețelei în funcție de similitudini între parametri [27], [51].

Figura 3.6 prezintă pașii algoritmului de clustering. Relațiile matematice 3.4–3.7 exprimă distanțele Euclidiene și funcțiile obiectiv asociate algoritmilor de grupare. Prin aceste metode, operatorii pot identifica automat zonele cu risc operațional crescut sau nevoi de investiții urgente.

Astfel, o mulțime de date cu N elemente poate fi reprezentată astfel:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\} \quad (3.4)$$

unde fiecare x_i este un vector format din m caracteristici.

Obiectivul procesului de clustering este de a împărți datele în K clustere, fiecare caracterizat de un centru de greutate C_k .

Distanța între puncte este asociată distanței Euclidiană, definită ca:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3.5)$$

unde x și y sunt două elemente din mulțimea de date, iar x_i și y_i sunt atributele lor.

Etapele procesului de clustering:



Figura 3.6. Etapele procesului de clustering

Metode de clustering se pot clasifica în două categorii principale:

1. **Clustering ierarhic:** grupează elementele succesiv, fie printr-o metodă aglomerativă (de jos în sus), fie printr-o metodă divizivă (de sus în jos). Algoritmul va prezenta în final o dendrogramă reprezentând structura ierarhică a elementelor grupate în clustere.

Există mai multe metode de măsurare a distanței între clustere, a se vedea Figura 3.7:

2. **Metoda K-medii.** Algoritmul metodei partiționează datele în K clustere pe baza distanței Euclidiană față de centrul de greutate al fiecărui cluster [96]. K-medii este eficientă și simplă de implementat, însă necesită specificarea prealabilă a numărului K de clustere și tinde să formeze clustere de formă sferică (dificultate în a detecta forme complexe).

Pașii algoritmului K-medii sunt următorii:

1. Alegerea aleatorie a K centre de greutate, $C_i, i=1, \dots, K$;
2. Atribuirea fiecărui element celui mai apropiat centru;

3. Recalcularea poziției centrelor de greutate ca media caracteristicilor elementelor asociate fiecărui cluster;
4. Repetarea pașilor 2 și 3 până la convergență.

Funcția obiectiv asociată algoritmului K-medii are expresia:

$$J = \sum_{i=1}^K \sum_{x_j \in C_i} d(x_j, C_i)^2 \quad (3.6)$$

unde $d(x_j, C_i)$ este distanța dintre un punct x_j și centrul clusterului, C_i , $i=1, \dots, K$.

Pentru a evalua calitatea procesului de clustering se pot utiliza mai mulți indicatori de performanță:

1. Factorul de formă – măsoară cât de bine este plasat un element în clusterul în care a fost asociat.
2. Indicele Davies-Bouldin – compară densitatea și separarea clusterelor.
3. Metoda "cotului" (Elbow method) – determină numărul optim de clustere.

Metoda cea mai folosită în verificarea calității rezultatelor este reprezentată de factorul de formă:

$$SC = \frac{1}{K} \cdot \sum_{c=1}^K \left(\frac{1}{N_c^c} \cdot \sum_{e=1}^{N_c^c} \left(\frac{D_m(t_e^c) - h(t_e^c)}{\max\{D_e - h_e\}} \right) \right) \quad (3.7)$$

unde : $D_m(t_e^c)$ – valoarea medie a distanței între elementele t_e^c , $e = 1, \dots, N_e^c$, și elementele aceluiași cluster c , $c = 1, \dots, K$; $h(t_e^c)$ - reprezintă minimul valorii medii asociate cu distanța între elementele t_e^c și elementele celui mai apropiat cluster c .

3.4.2.3. Rețele neuronale artificiale (ANN) și învățarea automată

Rețelele neuronale artificiale (ANN), rețelele recurente (RNN, LSTM) și cele convoluționale (CNN) sunt utilizate pentru prognoza consumului, identificarea anomaliilor și optimizarea topologiei rețelei. Acestea pot învăța relații complexe din seturi istorice de date și oferă o acuratețe ridicată în contextul sarcinilor variabile [31], [52].

Rețelele LSTM, de exemplu, pot realiza prognoze de sarcină cu erori sub 1.25%, fiind utile în planificarea investițiilor pe termen scurt și mediu. Rețelele CNN sunt aplicate în identificarea tiparelor spațiale sau temporale, iar RNN în sarcini secvențiale, precum prognoza zilnică sau orară a consumului. Aceste modele sunt tot mai des integrate în modulele SSAD pentru a crește robustețea și precizia procesului decizional [52], [53].

CAPITOLUL 4

Sistem suport de asistare a deciziilor în procesul de integrare optimală a prosumatorilor în rețelele de distribuție a energiei electrice

4.1. Aspecte generale asociate conceptului de “prosumator”

Prosumatorii joacă un rol central în tranziția către un sistem energetic distribuit și inteligent, fiind consumatori care produc și livrează energie în rețea. Aceștia contribuie la decarbonizare, reduc pierderile în rețea și cresc flexibilitatea sistemului [54]. Evoluția cadrului legislativ și progresul tehnologic au determinat creșterea numărului de prosumatori racordați în rețelele de joasă tensiune, generând noi provocări pentru operatorii de distribuție în ceea ce privește stabilitatea tensiunii, echilibrul fluxurilor și capacitatea de găzduire [55].

Integrarea prosumatorilor necesită o planificare coordonată, bazată pe date reale de consum, producție și condiții tehnice ale rețelei. Sistemele suport de asistare a deciziilor oferă sprijin în evaluarea capacității de integrare, în stabilirea priorităților și în alegerea strategiilor de investiții [56].

4.2. Rolul și provocările prosumatorilor

Apariția prosumatorilor este văzută ca o soluție care să completeze planul împotriva încălzirii globale. Obiectivul este limitarea încălzirii globale la o valoare mult sub 2° Celsius, raportată la un nivel de referință asociat anului 1990 [57].

Costul unui kWh injectat în rețea de către prosumatori poate fi, în majoritatea situațiilor, mai mic decât cele oferite de furnizorii de pe piața de energie. O reducere semnificativă (aproximativ 80%) a costurilor panourilor fotovoltaice a fost înregistrată între 2008 și 2015.

4.3. Prosumatorii – actori importanți în tranziția către rețelele active

Provocările A-REDEE au generat, de asemenea, modificări legislative la nivel european integrate pe mai multe dimensiuni [58]: digitalizarea în sectorul energetic, înlocuirea componentelor învechite din infrastructura electrică cu unele adaptate noilor concepte, bazate pe un proces decizional asociat exploataării optime și planificării dezvoltării a A-REDEE, Dezvoltarea conceptelor de smart-grid, micro-rețea, clustere de micro-rețele; Integrarea surselor GD la scară mică (nivel de prosumatori).

apariția și utilizarea capacităților de stocare a energiei electrice; dezvoltarea electromobilității prin integrarea stațiilor de încărcare a vehiculelor.

4.4. Sistem suport de asistare a deciziilor privind stabilirea priorității de conectare a prosumatorilor în A-REDEE

4.4.1. Abordări privind strategiile de integrare a prosumatorilor în A-REDEE

Pentru creșterea flexibilității REDEE, se impun măsuri de înlocuire a transformatorului din postul de transformare și introducerea reglajului sub sarcină, creșterea capacității rețelelor și modernizarea acestora. Cu alte cuvinte este necesară planificarea dezvoltării REDEE, astfel încât să facă față cu succes integrării accelerate a surselor regenerabile.

Printre soluțiile viabile care cresc eficiența utilizării energiei regenerabile se află și implementarea unor algoritmi de control coordonat, propus în [59], care identifică soluția optimă referitoare la distribuția sarcinilor între faze, prin identificarea fazei și stâlpului de conectare pentru fiecare prosumer, având ca scop reducerea pierderile de energie pe perioada de studiu.

4.4.2. SSAD pentru integrarea optimă a prosumatorii în A-REDEE

În cele ce urmează, s-a dezvoltat un SSAD care integrează două strategii conținând două etape de implementare pentru racordarea optimă a prosumatorilor în A-REDEE din zonele urbane periferice și rurale [44]. Figura 4.1 prezintă organigrama SSAD propus.

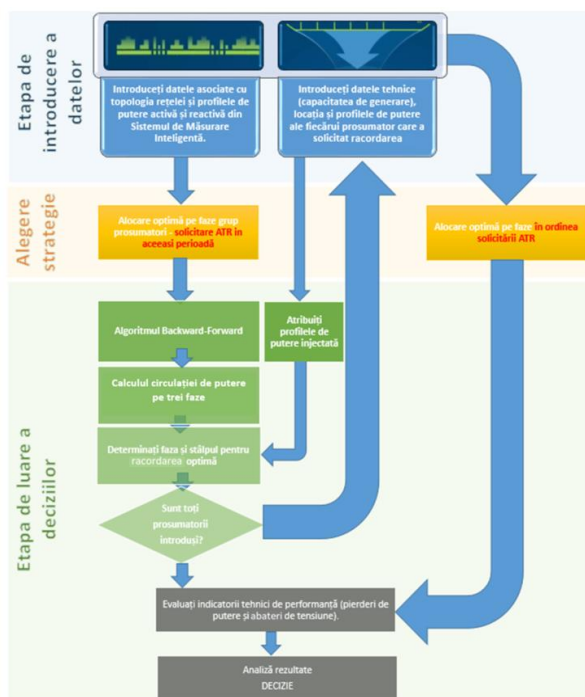


Figura 4.1. Organigrama SSAD propus pentru integrarea optimă a prosumatorilor

4.4.3. Testarea SSAD

Sistemul suport propus a fost verificat într-o A-REDEE de joasă tensiune aparținând unui OD din România, pentru o zi aparținând sezonului de vară. Figura 4.2 prezintă topologia A-REDEE analizată care conține 88 de stâlpi la care sunt conectați 114 utilizatori finali. Caracteristicile rețelei pot fi regăsite în [16]. În baza de date a DNO, au existat 11 cereri ale utilizatorilor finali pentru instalații de producere a energiei electrice bazate pe panouri fotovoltaice cu o capacitate nominală de 3 kW și 5 kW, fără a include și sistemul de stocare.

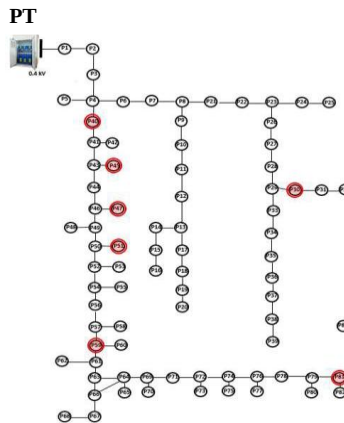


Figura 4.2. Topologia A-REDEE analizată

Valorile pierderilor de putere de sunt cu mult mai mari în cazul Strategiei 1 în intervalul de timp în care injecția de putere a prosumatorilor este maximă. Dacă se aplică Strategia 2, creșterile bruște înregistrate în cazul Strategiei 1 vor putea fi atenuate, fiind reduse cu mai mult de 50%. Reducerea pierderilor totale este semnificativă în cazul Strategiei 2, în cazul unui grad de penetrare de 30%.

Figurile 4.3 și 4.4 prezintă variația pierderilor orare de putere în conductoarele de fază (ΔP_a , ΔP_b și ΔP_c), conductorul neutru (ΔP_N), în cazul Strategiei 1, pentru grade de penetrare a prosumatorilor 30%. Analiza rezultatelor evidențiază faptul că pierderile de putere în conductorul neutru sunt mult mai mari decât în conductoarele de fază a și c , fiind foarte apropiate de cele din fază conductor al fazei b , datorate dezechilibrului încărcărilor pe cele trei faze.

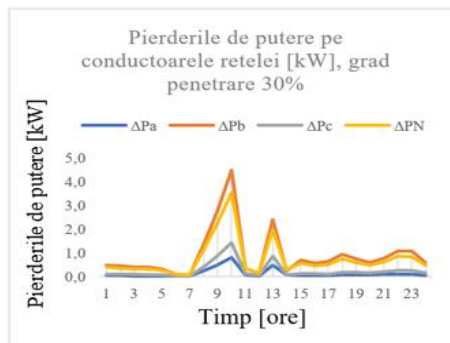


Figura 4.3. Variația pierderilor de putere în conductoarele rețelei, în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 1, grad penetrare 30%

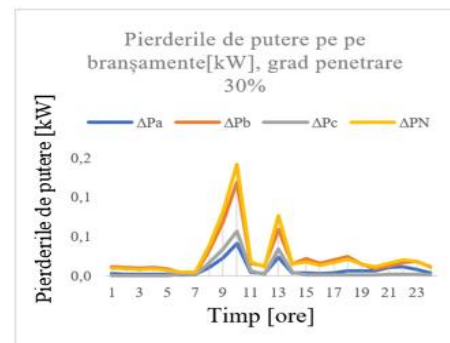


Figura 4.4. Variația pierderilor de putere în bransamente, în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 1, grad penetrare 30%

Strategia 2 conduce la o echilibrare a sarcinii pe faze, obținută printr-o conectare optimă a prosumatorilor pe faze, ceea ce indică o scădere a pierderilor de putere în conductorul de fază *b* și conductorul neutru, așa cum se poate observa în Figurile 4.5 și 4.6.

Pe măsură ce gradul de penetrare crește (de la 10% la 30%), se observă o creștere a pierderilor de putere în conductoarele de fază și neutru.

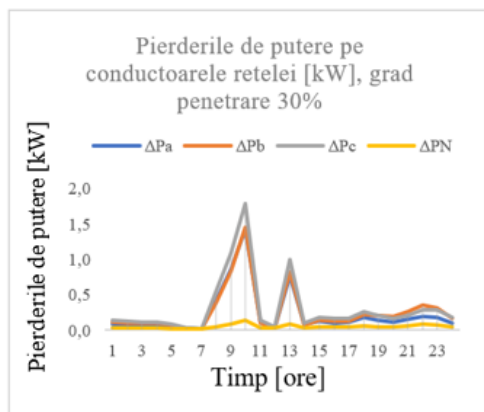


Figura 4.5. Variația pierderilor de putere în conductoarele rețelei, în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 2, Cazul 3, grad penetrare 30%

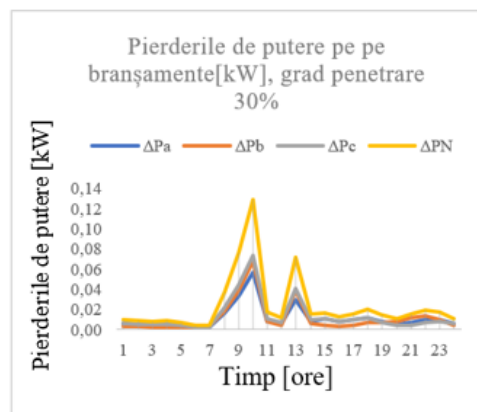


Figura 4.6. Variația pierderilor de putere în brașamente, în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 2, Cazul 3, grad penetrare 30%

Față de Strategia 1, Cazul 2 analizat în cadrul Strategiei 2 indică o scădere a nivelului pierderilor de putere și un dezechilibru redus între încărcările de pe cele trei faze. De asemenea, se observă faptul că injecțiile de energie de la prosumatori conduc la pierderi mai reduse. Cazul 3 al Strategiei 2 conduce la cele mai mici pierderi pe conductorul neutru, ceea ce indică un grad de dezechilibru redus.

Faza de racordare a fost modificată pentru șapte prosumatori în urma procesului de optimizare integrat în Strategia 2, ceea ce a condus la o reducere a pierderilor de energie. Față de Strategia 1, în Cazul 1 analizat în cadrul Strategiei 2 s-a obținut o reducere a pierderilor de energie cu 4,1%, reprezentând 12,26 kWh, de la 8,4% la 4,3%, în A-REDEE, conform Figurii 4.7. Pierderile procentuale de energie au fost raportate la suma dintre energia injectată în rețea din nodul de echilibru și energia injectată de prosumatori. Pe măsură ce crește numărul de prosumatori în rețea, reducerea pierderilor față de Strategia 1 crește, ajungând la 5,9% pentru un grad de penetrare de 20% și la 9% pentru un grad de penetrare de 30%.

Pe de altă parte, pierderile de energie obținute în Cazul 1 al Strategiei 2 reprezintă 49% din pierderile de energie asociate Strategiei 1, pentru 10% grad de penetrare. Pentru un grad de 20%, acest procent crește la 53%, iar la 30% ajunge la 55%, Figura 4.8. Astfel, din perspectiva pierderilor de energie, Strategia 2 este net superioară Strategiei 1, iar utilizarea Strategiei 2, Cazul 3 conduce la cele mai mari beneficii din punct de vedere al nivelului pierderilor de energie pentru OD.

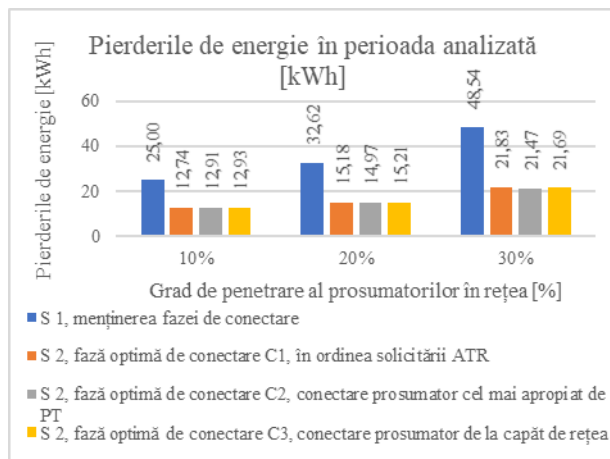


Figura 4.7. Comparație între strategiile abordate din punct de vedere al pierderilor de energie, în perioada de timp analizată (24 de ore), pentru cele 3 grade de penetrare ale prosumatorilor

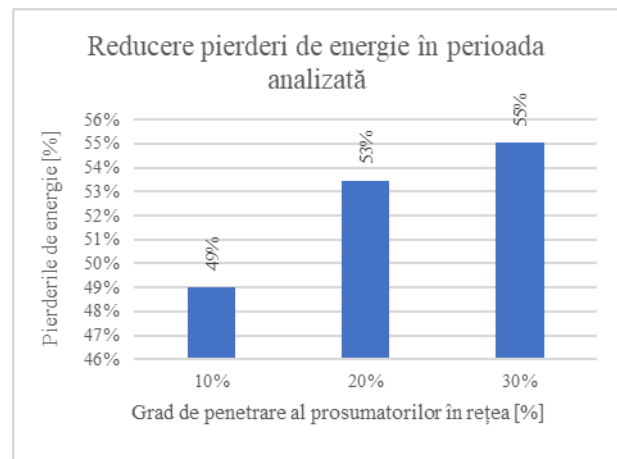


Figura 4.8. Comparație între strategiile abordate din punct de vedere al economiei de energie, în perioada de timp analizată (24 de ore), pentru cele 3 grade de penetrare ale prosumatorilor

Figurile 4.9 și 4.10 prezintă comparația dintre profilurile pierderilor totale de putere între cele două strategii pentru gradul de penetrare de 10% și 30%.



Figura 4.9. Pierderile de putere – comparație între strategii pentru gradul de penetrare de 10%

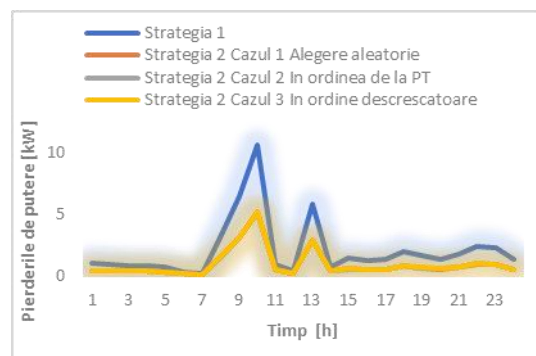


Figura 4.10. Pierderile de putere - comparație între strategii, pentru gradul de penetrare de 30%

Compararea profilurilor asociate celor 3 cazuri analizate în cadrul Strategiei 2 a evidențiat valori ale pierderilor aproximativ egale cu variații similare. De asemenea s-a observat o reducere substanțială reprezentând aproximativ 50% din pierderile obținute în cadrul Strategiei 1. Astfel, nu este important cum va fi conectat prosumatorul (aleatoriu, la capăt de rețea sau în apropierea postului de transformare), deoarece pierderile de putere sunt aproximativ la același nivel.

Referitor la injecțiile de putere în rețea din nodul de echilibru (asociat cu bara de joasă tensiune a postului de transformare), se pot face următoarele observații:

Pentru gradul de penetrare de 10%, se observă un dezechilibru între încărcările pe faze, cea mai încărcată fiind faza *b* înregistrată pentru Strategia 1. La vârful de sarcină se observă o diferență de aproximativ 7 kW între faze. Injecția inversă din joasă tensiune spre medie tensiune este doar pe fazele *a* și *b* (20 kW faza *b* și 3 kW faza *a*). De asemenea, există o circulație de putere inversă în perioada de

timp în care consumul este redus iar prosumatorii injectează surplusul de putere în rețea (8:00 ÷ 10:00, respectiv 12:00 ÷ 13:00). Cea mai mare valoare a circulației inverse de putere s-a înregistrat în Cazul 2 al Strategiei 2, 15 kW. Injecția a fost de 6 kW în cazul 1, iar în Cazul 3, 5kW. Există astfel o circulație inversă de putere prin transformator, datorită unui consum relativ redus în REDEE.

Referitor la grad de penetrare de 20%, implementarea Strategiei 1 conduce la încărcări diferite ale fazelor ce conduc la un factor de dezechilibru mare. Conform aplicării Strategiei 2, cele mai reduse dezechilibre sunt pentru Cazurile 1 și 3, iar injecțiile de putere în orele în care consumul este mai redus este aproximativ egal în toate cele 3 cazuri analizate.

În ceea ce privește gradul de penetrare de 30%, dezechilibrul este în continuare accentuat pentru Strategia 1. Pentru Cazul 1 al Strategiei 2 se observă o valoare a circulației de putere de 23 kW, 25 kW în Cazul 2 și 21 kW în Cazul 3.

Creșterea gradului de penetrare conduce la creșteri ale circulațiilor inverse cu impact asupra eficienței procesului de distribuție. Pentru un grad mic de penetrare (10%), injecțiile de putere sunt relativ stabile, cu fluctuații mai reduse. Pentru un grad mare de penetrare (30%), există variații mai mari cu dezechilibre ale încărcării pe cele trei faze.

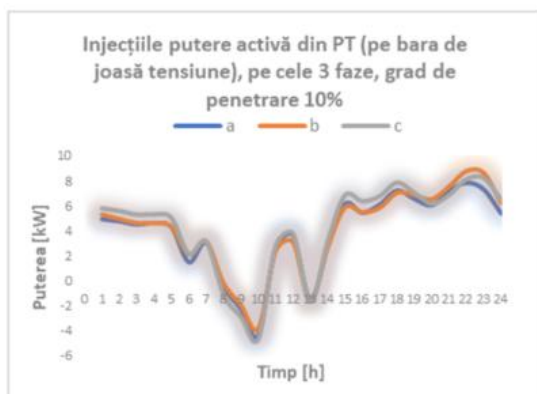


Figura 4.11. Injecțiile de putere activă din PT (pe bara de joasă tensiune), [kW], pe cele 3 faze, grad de penetrare 10%, Strategia 2, Cazul

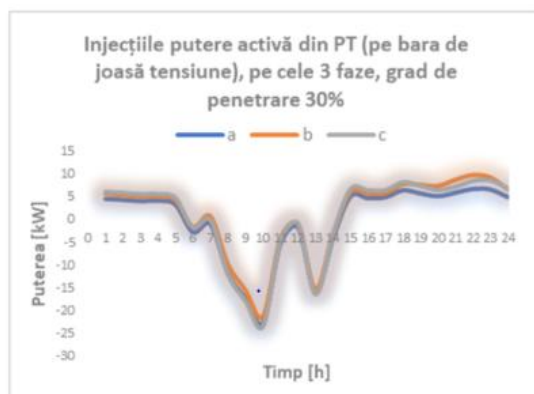


Figura 4.12. Injecțiile de putere activă din PT (pe bara de joasă tensiune), [kW], pe cele 3 faze, grad de penetrare 30%, Strategia 2, Cazul 3

Strategia 2 conduce la o distribuție mai uniformă a puterii în comparație cu Strategia 1, având și momente de scădere semnificativă.

În continuare sunt prezentate rezultatele obținute pentru tensiunile de fază. Pentru a putea avea aceeași referință, observațiile vor fi făcute cu referire la stâlpul final P81 la care sunt racordați și prosumatori, Figurile 4.13 și 4.14.

În cazul unui grad de penetrare de 10% se observă că tensiunea pe faza *b* are valori mai scăzute decât celelalte două faze *a* și *c*, datorită dezechilibrului încărcărilor celor trei faze, în cazul Strategiei 1, Figura 4.51. Cele mai multe valori înregistrate în afara limitelor admisibile (-10%, +10%) față de tensiunea nominală (230 V) s-au observat în cazul fazei *b* pentru un grad de penetrare de 30%, Figura 4.53. Aceste valori indică impactul uriaș al puterilor injectate de prosumatori asupra nivelului de

tensiune din REDEE. În cazul acestei prime strategii analizate, tensiunile la stâlpul P81 sunt în plaja minim – maxim permisă, cu excepția gradului de penetrare de 30% pentru orele în care sarcina este minimă și injecția maximă. Tensiunea atinge un nivel scăzut de aprox. 195 V. Există un dezechilibru al încărcării pe cele trei faze mult mai mare față de celelalte grade de penetrare (10% și 20%).

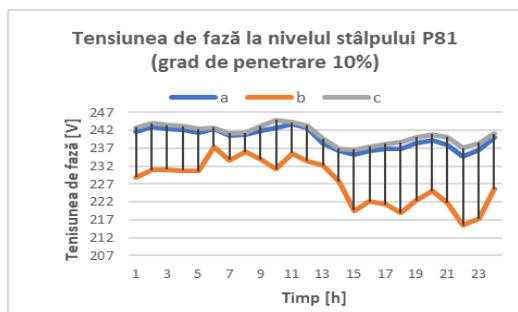


Figura 4.13. Tensiunea de fază [V] la nivelul stâlpului P81 pentru gradul de penetrare 10%, Strategia 1

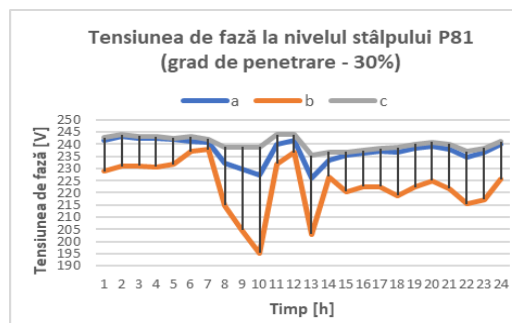


Figura 4.14. Tensiunea de fază [V] la nivelul stâlpului P81 pentru gradul de penetrare 30%, Strategia 1

Tensiunea la capătul rețelei, în toate cazurile analizate, este mai ridicată decât valoarea minimă indicată în Standardul de performanță, încadrându-se în intervalul [207V, 241,5V]. În tabelele 4.1 și 4.2 sunt prezentați indicatorii statistici asociați tensiunilor pe fiecare fază: valorile minime, maxime și medii ale tensiunii, dispersia, mediana și gradul de încredere în medie. Aceștia evidențiază diferențele dintre strategiile de alocare a prosumatorilor și impactul acestora asupra nivelului tensiunii din rețea.

Tabel 4.1. Indicatorii statistici asociați tensiunilor pe fiecare fază Strategia 1

Grad de penetrare	10%			20%			30%		
Faza	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Min [V]	234,8	215,4	228,1	231,4	212,6	228,1	226,2	195,2	216,8
Max [V]	245,6	245,0	245,6	245,5	245,2	245,6	245,5	245,0	245,4
Media [V]	240,5	233,9	239,8	239,7	232,7	239,7	239,0	231,3	238,7
Dispersia [V]	2,7	6,4	3,3	3,0	7,2	3,2	3,8	9,3	4,3
Mediana [V]	240,9	234,7	240,1	240,0	234,2	240,1	239,3	233,3	238,9
Grad de încredere [%]	1,1	2,8	1,4	1,3	3,1	1,4	1,6	4,0	1,8

Tabel 4.2. Indicatorii statistici asociați tensiunilor pe fiecare fază Strategia 2, Cazul 3

Grad de penetrare	10%			20%			30%		
Faza	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Min [V]	230,8	224,4	228,4	231,6	225,3	227,6	223,4	218,1	218,0
Max [V]	245,4	245,4	245,3	245,5	245,4	245,4	245,3	245,3	245,2
Media [V]	238,8	237,5	238,0	238,4	237,1	237,0	237,1	236,4	236,1
Dispersia [V]	3,4	4,3	3,2	3,4	4,4	3,7	4,6	5,1	5,1
Mediana [V]	239,5	238,1	238,4	238,4	237,5	237,2	237,4	236,9	236,8
Grad de încredere [%]	1,4	1,8	1,3	1,4	1,8	1,6	1,9	2,2	2,2

Tensiunile minime sunt mai scăzute în Strategia 1 decât în cele trei cazuri asociate Strategiei 2, în special pentru faza b, ceea ce indică o distribuție dezechilibrată a încărcării fazelor. Tensiunile

maxime rămân identice indiferent de strategie (aproape de 245V), ceea ce arată că nivelul superior al tensiunii nu este afectat semnificativ de alocarea prosumatorilor.

Media tensiunii este aproximativ constantă în Strategia 2, ceea ce sugerează că metodele de racordare asociate celor 3 cazuri îmbunătățesc nivelul tensiunii. Media scade ușor pe măsură ce gradul de penetrare crește, sugerând o distribuție relativ controlată a puterii injectate. Mediana tensiunilor este mai stabilă decât media, ceea ce sugerează că variațiile extreme nu afectează semnificativ distribuția generală.

Dispersia tensiunii crește pe măsură ce gradul de penetrare tinde către 30%, ceea ce indică o variabilitate mai mare a tensiunii la un procent ridicat de prosumatori conectați.

Pentru Strategia 2, alocarea optimă pe faze a prosumatorilor, indiferent de cazurile analizate, a condus la valori ale tensiunii minime mai ridicate decât în Strategia 1.

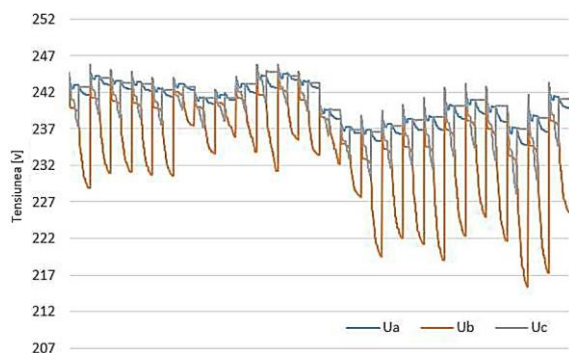


Figura 4.15. Variația tensiunii de fază la nivelul fiecărui stâlp în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 1

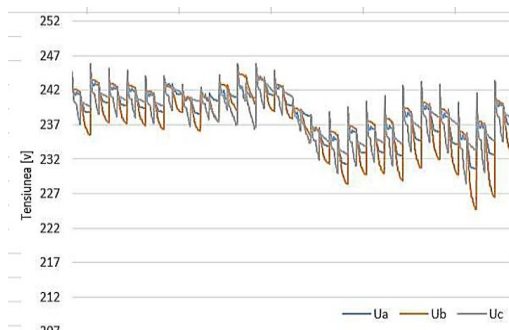


Figura 4.16. Variația tensiunii de fază la nivelul fiecărui stâlp în perioada de timp analizată (24 de ore), Strategia 2, Cazul 3

Dispersia tensiunii este mai mică decât în cazul Strategiei 1, indicând o distribuție echilibrată a sarcinii între faze. Valorile medii ale tensiunii sunt similare între cele trei cazuri ale Strategiei 2, menținându-se între 236.3 V și 238.9 V pentru toate fazele și gradele de penetrare analizate. Gradul de încredere în medie este mai mic comparativ cu Strategia 1, ceea ce indică o încredere mare în valorile obținute.

Figurile 4.15 și 4.16 prezintă variația tensiunilor de fază la nivelul fiecărui stâlp în perioada de timp analizată (o zi). Un dezechilibru de tensiune ridicat poate fi observat în cazul Strategiei 1, unde tensiunea pe faza *b* are valori mai mici decât pe celelalte două faze *a* și *c*. Prin aplicarea Strategiei 2, acest grad de dezechilibru a fost redus considerabil.

CAPITOLUL 5

Sisteme suport de asistare a deciziilor în procesul de modernizare a infrastructurii rețelelor de distribuție a energiei electrice

5.1. Contextul actual și provocări în planificarea rețelelor de distribuție a energiei electrice din România

OD se confruntă cu tranziția de la circulații de putere unidirecționale, de la postul de transformare către consumatori, la o rețea inteligentă, cu circulații de putere bidirecționale, flexibilă, activă, capabilă să asigure un management al comunicațiilor de date.

Deciziile privind etapele de planificare/ modernizare a infrastructurii REDEE trebuie să se bazeze pe instrumente matematice care să identifice soluțiile optime. Elaborarea strategiilor de planificare trebuie făcută în așa fel încât exploatarea REDEE pe termen mediu și lung să aducă beneficii maxime din punct de vedere tehnic și economic, atât pentru OD, cât și celorlalți "actori" cum ar fi: consumatorii, prosumatorii sau sursele de producere a energiei electrice.

Conform [47], necesitatea investițiilor pe care OD din România trebuie să le facă în modernizarea și re tehnologizarea REDEE este stringentă. O mare parte a infrastructurii REDEE este în funcție de peste 45 ani, afectând fiabilitatea sistemului și eficiența energetică.

În Figurile 5.1 ÷ 5.3 se observă că LEA, LES, ST/PT/PA din REDEE exploatate de către OD din România au durată de viață depășită, procentul instalațiilor cu o durată de viață de peste 45 ani este de 57%, raportat la lungimea totală.

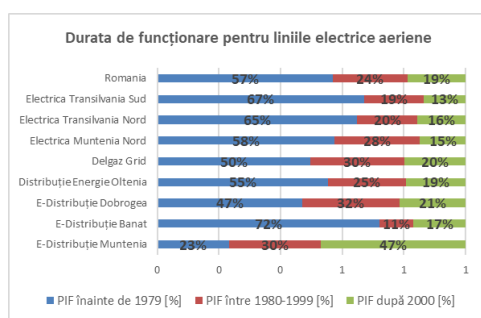


Figura 5.1. Starea liniilor electrice aeriene din România, împărțire pe OD și pe perioade de funcționare [47]

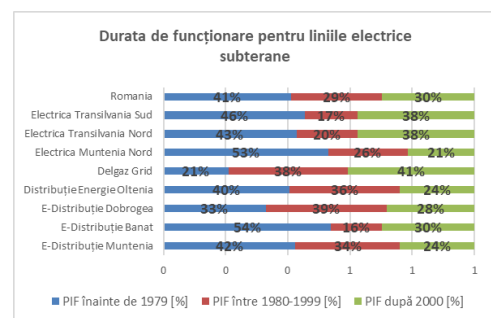


Figura 5.2. Starea liniilor electrice subterane din România, împărțire pe OD și pe perioade de funcționare [47]

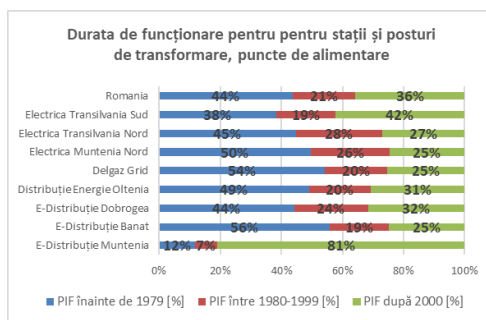


Figura 5.3. Starea stațiilor, posturilor de transformare și punctelor de alimentare în rețelele electrice de distribuție din România, împărțire pe OD și pe perioade de funcționare [47]

5.2. Strategii de management al parcului de transformatoare de putere MT/JT

În contextual actual al tranziției energetice, strategiile de management al parcului de transformatoare din REDEE va trebui să se adapteze la două paradigme: *rețelele pasive* caracterizate prin circulații de putere unidirecționale și *rețelele active*, unde integrarea prosumatorilor și a surselor regenerabile modifică radical modul de exploatare, conducând la circulații bidirecționale.

Tehnicile AI și *machine learning* propuse în literatură permit dezvoltarea unor modele predictive care determină intervalul optim al înlocuirii transformatoarelor. Integrarea tehnicilor IA este vitală pentru îmbunătățirea evaluărilor și predicția cu privire la durata de viață. Aceste rezultate pot conduce la îmbunătățirea planificării optime a procesului de înlocuire.

În cazul transformatoarelor de distribuție MT/JT, conceptul *Eco-design* are în vedere următoarele: Reducerea pierderilor de energie prin utilizarea de materiale avansate și optimizarea proiectării miezului magnetic; utilizarea responsabilă a resurselor prin alegerea materialelor reciclabile și reducerea amprente de carbon în producție; conformitatea cu reglementările internaționale privind eficiența energetică, cum ar fi Regulamentul UE 548/2014 privind transformatoarele ecologice [60]; extinderea duratei de viață prin strategii de mentenanță inteligentă și tehnologii avansate de monitorizare.

Regulamentul 548/2014 al Comisiei Europene vizează punerea în aplicare a *Directivei 2009/125/CE* a Parlamentului și Consiliului European în ceea ce privește transformatoarele de putere mică și medie. Directiva sistematizează obiectivele pentru proiectarea ecologică a produselor eficiente din punct de vedere energetic printre care și obiectivul de impact redus asupra mediului, sprijinind dezvoltarea durabilă.

Standardul *Eco-Design* se referă la transformatoarele care au în structura componentelor lor materii prime care respectă standardele de poluare, procesul de fabricație are impact redus asupra mediului, iar celelalte etape până la utilizarea lor în REDEE respectă politica privind utilizarea eficientă a resurselor pe toată durata de viață a acestora.

5.3. Simularea procesului de modernizare a parcului de transformatoare al operatorilor de distribuție din România, în perioada 2020-2030

S-a simulat evoluția procesului de modernizare a parcului de transformatoare al fiecărui OD din România, în perioada 2020-2030, folosind diverse modele de regresie având ca date de intrare pentru baza de antrenare informațiile transmise de OD la Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei (ANRE) în perioada 2014-2019 [61].

5.3.1. Starea parcului de transformatoare a operatorilor de distribuție din România

Situația parcurilor de transformatoare aparținând OD-urilor din România este prezentată în Figura 5.4 [163]. Ponderea transformatoarelor cu PIF de anul 2000 în REDEE din România este cuprinsă între 79% și 88% din numărul total, ceea ce înseamnă că infrastructura este una îmbătrânită cu efecte negative asupra continuității alimentării cu energie electrică și asupra pierderilor de energie. Cu toate acestea, nu toate OD au un parc învechit de transformatoare.

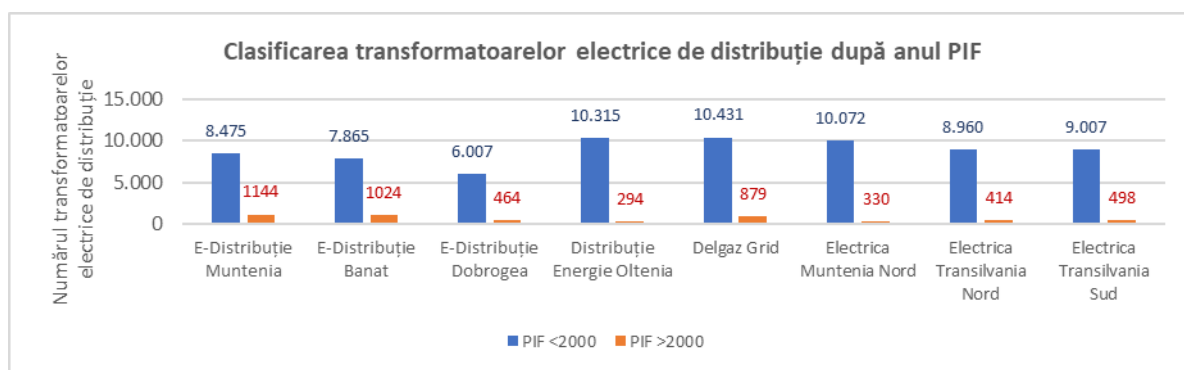


Figura 5.4 Starea parcurilor de transformatoare la nivelul fiecărui OD din România

5.3.2. Simularea procesului de modernizare a parcurilor de transformatoare

Procesul de simulare a folosit datele prezentate de ANRE în rapoartele privind starea infrastructurii de distribuție asociate parcurilor de transformatoare exploatate de OD din România, în perioada 2014-2019 [18]. Au fost determinate modele matematice de regresie care indică evoluția numărului de transformatoare vechi/ noi, cu PIF înainte de 2020 sau după 2020 ($PIF < 2020$ / $PIF \geq 2020$), respectiv puterea totală instalată în transformatoare în perioada 2020 – 2030 [61].

În Figura 5.7, culoarea albastră a fost folosită pentru vechile transformatoare, iar culoarea portocalie pentru noile transformatoare. Analiza rezultatelor a evidențiat faptul că unii OD (Electrica Transilvania N, Enel Muntenia, DelGaz Grid, Oltenia Distribuție și Electrica Muntenia) au un ritm mai rapid al procesului de modernizare a infrastructurii subliniat de schimbarea transformatoarelor noi și

vechi (evidențiate la intersecția caracteristicilor). Enel-Banat și Enel-Dobrogea au un proces de înlocuire mai lent, evidențiat de faptul că cele două caracteristici asociate transformatoarelor noi și vechi nu au un punct de întâlnire în intervalul analizat.

E- Banat

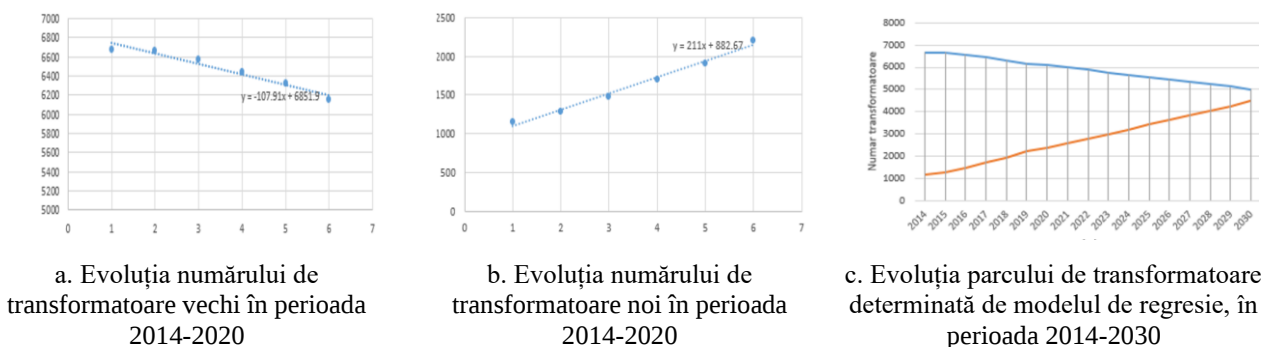


Figura 5.5. Modele de regresie liniară pentru transformatoarele vechi și noi, în perioada 2014-2030

E-Muntenia

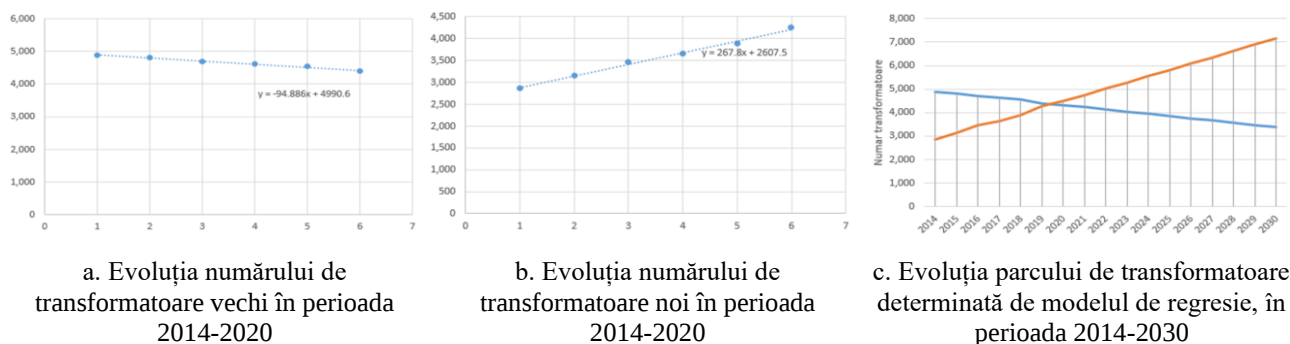


Figura 5.6. Modele de regresie liniară pentru transformatoarele vechi și noi, în perioada 2014-2030

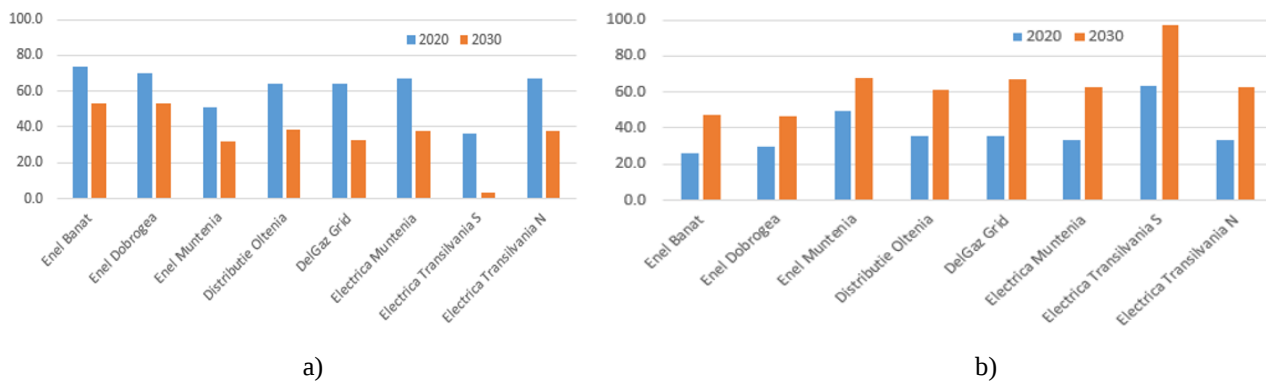


Figura 5.7. Ponderea transformatoarelor vechi / noi în: a) 2020; b) 2030

Soluțiile adoptate pentru utilizarea eficientă a transformatoarelor în rețelele de distribuție electrică pot duce la economii semnificative de energie. Pierderile reduse contribuie la o utilizare mai eficientă a energiei, generând economii semnificative și diminuând necesarul de producție energetică.

5.4. Sisteme suport de asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor în rețelele electrice de distribuție a energiei electrice

5.4.1. Stadiul actual al studiilor privind impactul înlocuirii transformatoarelor

Multe studii au evaluat impactul implementării Directivei UE asupra economiei de energie. Acestea au ipoteze diferite referitoare la tipul de analiză (teoretică sau practică).

De asemenea, studiile și rapoartele nu au prezentat o evaluare completă a performanței energetice prin identificarea soluțiilor optime, care să satisfacă mai multe obiective precum economia de energie, rezerva de putere (rezultată din încărcarea optimă) și continuitatea în alimentarea cu energie electrică [62].

5.4.2. Sistem suport de asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată

5.4.2.1. Ipoteze de cercetare

În cadrul acestui paragraf se prezintă structura unui sistem suport de asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor în REDEE care integrează o strategie fundamentată pe o analiză multicriterială cu două etape de luare a deciziilor.

Etapa 1 presupune clasificarea transformatoarelor folosind metode de clustering din categoria tehnicilor de învățare nesupravegheată. Dintre metodele de clustering, s-a ales metoda K-medii pentru clasificarea transformatoarelor în **categorii prioritare** în interiorul procesului de înlocuire caracterizate de două atribute: nivelul de încărcare și PIF. Fiecare categorie va avea un anumit grad de prioritate care influențează ordinea de înlocuire a transformatoarelor în a doua etapă.

Etapa 2 conține un algoritm de întocmire a unui clasament de înlocuire a transformatoarelor în interiorul fiecărei categorii prioritare pe baza unei analize multicriteriale având ca obiective economia de energie și rezerva de putere.

SSAD poate fi folosit în procesul de înlocuire a transformatoarelor încă în exploare, dar cu standarde de performanță reduse, din REDEE ale OD din România. Strategia de înlocuire adoptată la nivelul SSAD ține cont de următoarele obiective [63]: creșterea performanței energetice, încărcarea optimă a transformatorului, îmbunătățirea fiabilității și a indicatorilor de calitate a energiei, prioritizarea în procesul de înlocuire.

5.4.2.2. Strategie de luare a deciziilor bazată pe analiză multicriterială

Strategia de înlocuire a transformatoarelor propusă în SSAD integrează două etape caracterizate printr-un proces de luare a deciziilor, așa cum este prezentat în Figura 5.8.

Informațiile corespunzătoare nivelului de încărcare și PIF, furnizate de OD, sunt utilizate pentru clasificarea transformatoarelor în prima etapă.

Etapa 1 este caracterizată de procesul de clustering. Algoritmul de grupare K-medii [64], [65], [66] este utilizat în procesul de grupare în clustere (categorii) caracterizate printr-un grad de prioritate în procesul de înlocuire.

$$FO(t_i, K) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N_{Tr}} D(t_i, c_k) \quad (5.1)$$

unde K reprezintă numărul de categorii (clustere), ales inițial de FD, t_i este linia i din matricea T ; N_{Tr} este numărul de linii reprezentate de transformatoarele supuse procesului de grupare; c_k reprezintă poziția centrului de greutate a clusterului K , $K = 2, \dots, K_{max}$; $D(t_i, c_k)$ este distanța euclidiană dintre fiecare element t_i din matricea T și centrul de greutate c_k .

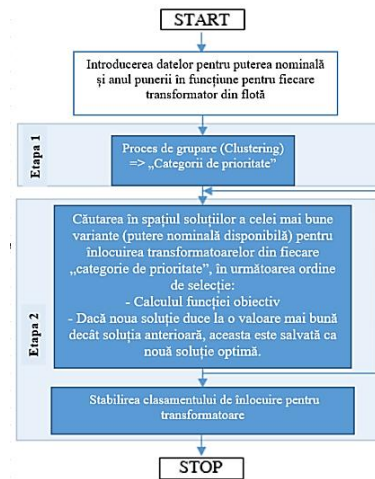


Figura 5.8. Organigrama strategiei de înlocuire a transformatoarelor

Etapa 2 stabilește clasamentul de înlocuire al transformatoarelor pe baza soluției rezultate în urma unui proces de optimizare multicriterială luând în considerare economia de energie, rezerva de putere și disponibilitatea medie a serviciului. Corelarea acestei soluții cu clasificarea transformatoarelor în categorii cu grade de prioritate diferite duce la formularea unei strategii decizionale fezabile cu beneficii economice și tehnice pentru OD.

Valoarea fiecărei strategii se obține folosind expresia matematică pentru indicatorul de decizie $D_i^j(S_{r,i}^{new})$ din expresia (5.2).

$$\max\{D_i^j(S_{r,i}^{new})\} = \max\left\{\alpha_1 \cdot \frac{D_{ES,i}^j(S_{r,i}^{new})}{\Delta W(S_{r,j}^{old})} + \alpha_2 \cdot \frac{D_{PR,i}^j(S_{r,i}^{new})}{D_{PR,j}(S_{r,j}^{old})} + \alpha_3 \cdot \frac{D_{ASA,i}^j(S_{r,i}^{new})}{D_{ASA,j}(S_{r,j}^{old})}\right\} \quad (5.2)$$

$$\sum_{j=1}^3 \alpha_j = 1 \quad (5.3)$$

unde: α_1 , α_2 și α_3 sunt coeficienții de pondere a fiecărui obiectiv atribuit de FD în strategia de înlocuire; $D_{PR,j}(S_{r,j}^{old})$ reprezintă rezerva de putere a vechiului transformator j , calculată cu puterea nominală $S_{r,j}^{old}$; k reprezintă categoria de înlocuire; $\{S\}$ este mulțimea puterilor nominale {50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA, 400 kVA, 630 kVA}; $S_{r,i}^{new}$ este valoarea puterii nominale pentru care funcția obiectiv are valoarea maximă.

Coeficienții de ponderare au valori între 0 și 1, în funcție de FD, care poate atribui o anumită importanță a fiecărui criteriu.

Luarea deciziei depinde de valoarea coeficienților de ponderare, ceea ce influențează gradul de importanță acordat fiecărui criteriu de către FD. Dacă gradul de importanță este mai mare pentru anumite criterii, strategia de înlocuire poate modifica rezultatele așteptate de FD.

Metodologia propusă presupune parcurgerea a doi pași pentru a determina strategia optimă de înlocuire, a se vedea Figura 5.9.

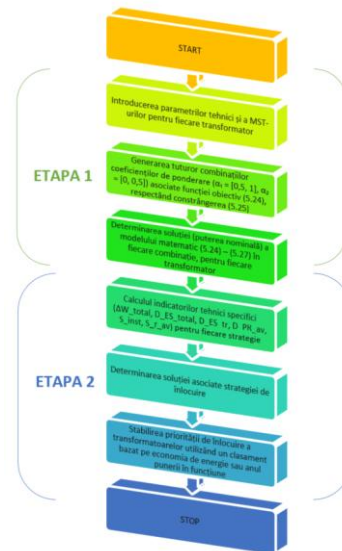


Figura 5.9. Organigrama metodologiei aplicate în determinarea priorității de înlocuire a transformatoarelor

5.4.3. Testarea SSAD destinat înlocuirii transformatoarelor, bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată

Testarea SSAD a fost efectuată considerând un parc ce conține 111 transformatoare MT/JT aparținând unui OD din România.

Datele de intrare reprezentate de puterea tranzitată la vârful de sarcină, S_{max} , au fost identificate PIF pentru fiecare transformator și înregistrate în matricea T . Algoritmul K-medii a fost aplicat pentru fiecare iterație asociată partițiilor K , $K = 2, \dots, K_{max}$, unde K_{max} are 10.

Figura 5.10 indică reprezentarea 2-D a elementelor din matricea T , identificate prin transformatoare, care au fost alocate fiecărei categorii în funcție de gradul de prioritate în procesul de înlocuire. S-a stabilit ordinea în cadrul procesului de înlocuire (de la stânga la dreapta): C5, C1, C4, C2

și C3, conform Figurii 5.23. Ordinea de înlocuire a transformatoarelor în interiorul fiecărei categorii va fi fundamentată pe baza unui procesului de optimizare multicriterială.

Etapa a doua presupune stabilirea diverselor SI de către FD prin considerarea celor trei obiective (economia de energie, rezerva de putere și disponibilitatea medie a serviciului), ținând cont de coeficienții de ponderare.

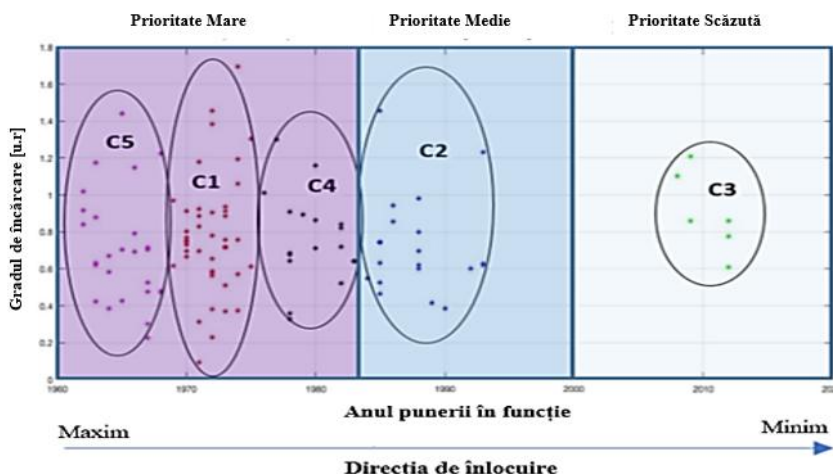


Figura 5.10. Reprezentarea 2-D a clusterelor ($K_{opt} = 5$) cu gradul de prioritate

Tabelul 5.1 prezintă indicatorii tehnici specifici calculați pentru fiecare SI privind economisirea totală a energiei ($D_{ES,total}$), economia medie de energie pe transformator ($D_{ES,tr}$), rezerva medie de putere ($D_{PR,av}$), puterea finală instalată în transformatoare (S_{inst}^{tr}) și puterea nominală medie ($S_{r,av}$).

Tabelul 5.1. Indicatori tehnici specifici asociați fiecărei strategii pentru ($\alpha_3 = 0$)

SI	$D_{ES,total}$ [MWh/an]	$D_{ES,tr}$ [MWh/tr/an]	$D_{PR,av}$ [%/tr]	S_{inst}^{tr} [kVA]	$S_{r,av}$ [kVA/tr]
Caz de bază (stare inițială)	-	-	35	3570	155
Strategia 1	73,6	3,2	35	3570	155
Strategia 2 ($\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$)	79,50	3,5	37	3450	150
Strategia 3 ($\alpha_1 = 0,9, \alpha_2 = 0,1$)	79,47	3,45	41	3630	158
Strategia 4 ($\alpha_1 = 0,8, \alpha_2 = 0,2$)	79,38	3,45	43	3780	164
Strategia 5 ($\alpha_1 = 0,7, \alpha_2 = 0,3$)	79,38	3,45	43	3780	164
Strategia 6 ($\alpha_1 = 0,6, \alpha_2 = 0,4$)	78,40	3,41	50	4170	181
Strategia 7 ($\alpha_1 = 0,5, \alpha_2 = 0,5$)	78,00	3,39	52	4470	194

Toate strategiile conduc la economiilor de energie de peste 50%, valoarea maximă fiind înregistrată, așa cum era de așteptat, pentru Strategia 2 (54,27%), conform Figurii 5.24.

De asemenea, se poate observa că puterea nominală medie a unui transformator a fost modificată de la 155 kVA (Strategia 1) la 194 kVA (Strategia 7). Soluția optimă poate fi identificată în punctul de intersecție dintre caracteristicile economiei de energie, $D_{ES,total}$, și puterea instalată, S_{inst}^{tr} , exprimată în unități relative, unde referința este cazul de bază.

În cazul de față, soluția este asociată cu Strategia 5, după cum se poate observa în Figura 5.11.

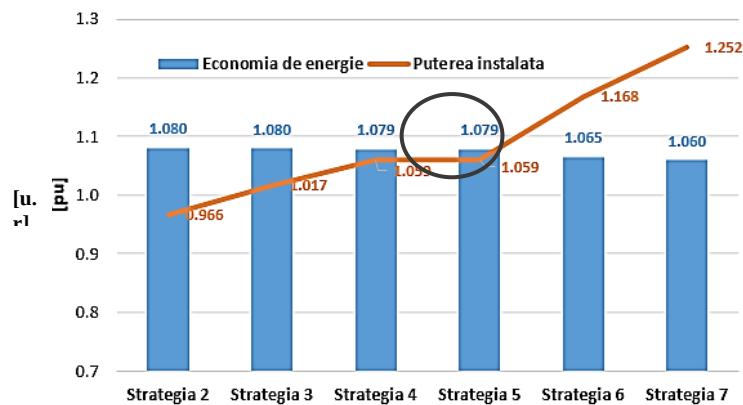


Figura 5.11. Identificarea SI (Strategia 5, $\alpha_1=0,7$; $\alpha_2=0,3$) la intersecția dintre caracteristicile asociate obiectivelor asumate de FD (economia de energie și puterea instalată)

Odată cu alegerea SI se va întocmi clasamentul de înlocuire a transformatoarelor, care trebuie să fie autorizat de către FD. Cele mai utilizate criterii de clasificare se referă la economia de energiei, *ES*, și anul punerii în funcțiune, *PIF*.

Clasamentul de înlocuire în funcție de economia de energie, din categoriile C1 ÷ C4 ordonate ținând cont de prioritatea acordată este prezentat în Figura 5.12.

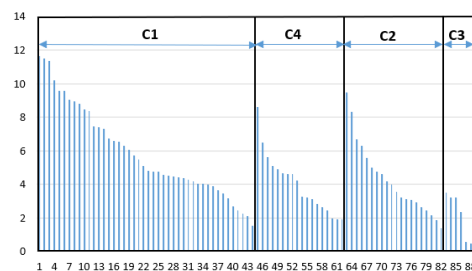


Figura 5.12. Clasamentul de înlocuire a transformatoarelor din categoriile C1 ÷ C4 ordonate în funcție de economia de energie

Cea mai bună strategie a fost identificată în cazul în care, pentru primele două obiective, coeficienții de ponderare au avut valorile $\alpha_1 = 0,7$ și $\alpha_2 = 0,3$. Al treilea obiectiv a fost neglijat, considerându-se aceeași continuitate a alimentării cu energie electrică.

5.5. Sistem de suport asistare a deciziilor pentru înlocuirea transformatoarelor bazat pe tehnici de învățare nesupravegheată și sisteme expert

SSAD este caracterizat de integrarea a două componente de IA reprezentate de tehnicile de învățare nesupravegheată (*Clustering*), care permit clasificarea transformatoarelor în categorii de prioritate în funcție de gradul de încărcare și PIF, și *sistemul expert* care determină poziția fiecărui transformator în clasamentul de înlocuire asociat planului de modernizare al OD, fără a fi nevoie de un proces de optimizare așa cum s-a subliniat în arhitectura propusă în paragraful anterior.

5.5.1 Arhitectura SSAD

Arhitectura SSAD propus este prezentată în Figura 5.13. Principalele etape ale procesului de luare a deciziilor sunt detaliate în continuare.

Etapa 1. Procesarea datelor constă în extragerea caracteristicilor specifice informațiilor preluate din bazele de măsurători de curent și tensiune (MST) efectuate de către OD sau ale sistemului SCADA (în cazul în care PT-ul este integrat în acest sistem de monitorizare), și informațiile tehnice și economice ale transformatoarelor. Tehnicile de învățare nesupravegheată reprezentate de *clustering* extrag caracteristici specifice [67]. Înlocuirea transformatoarelor cu standarde de performanță redusă se face folosind ca date de intrare factorul de încărcare (calculat pe baza informațiilor din MST-urile asociate fiecărui transformator) și standardul de performanță [68], [69], identificat prin PIF.

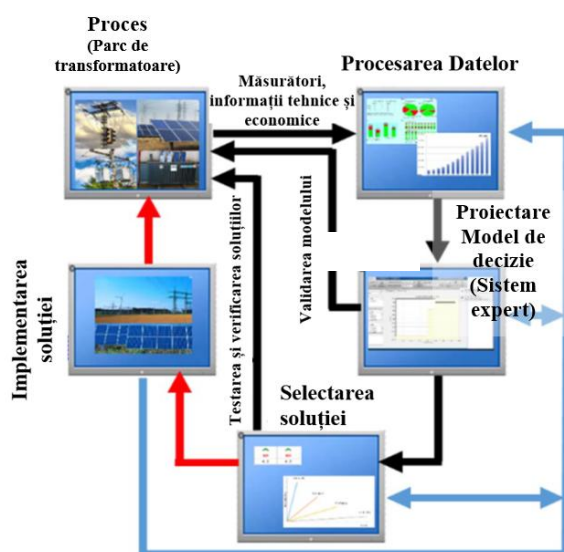


Figura 5.13. Arhitectura SSAD propus

Metoda K-medii va avea ca rezultate finale clustere indentificate prin categorii de prioritate de înlocuire a transformatoarelor asociate unei partiții optime determinate pe baza valorii maxime a factorului de formă, SC. Cuartilele sunt indicatori de poziție care împart datele din fiecare cluster în părți cu valori egale: Q0 (valoare minimă), Q1 (25%), Q2 (50%) – valoarea mediană, Q3 (75%) și Q4 (valoare maximă). În funcție de cuartile se determină ordinea de înlocuire, iar fiecare categorie de prioritate este stabilită de sistemul expert.

Etapa 2. Proiectarea modelului de decizie – este o etapă deosebit de importantă fiind corelată cu structura sistemului expert (SE). Principalele componente ale SE sunt [58], [69]: baza de cunoștințe, motorul de inferență, sistemul de explicații, interfața proiectată și editorul bazei de cunoștințe, a se vedea Figura 5.14.

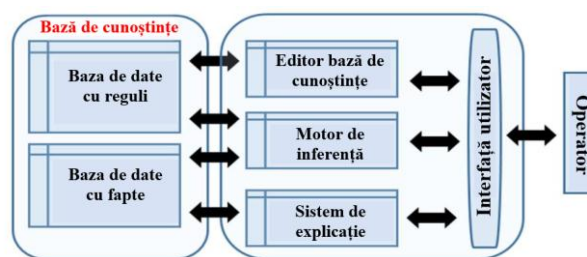


Figura 5.14. Arhitectura SE

Rezultatele obținute prin procesarea datelor bazată pe clasificarea oferită de clustering sunt înregistrate în baza de fapte. Algoritmul explorează tot parcul de transformatoare clasificat în categorii de prioritate în procesul de înlocuire, începând cu categoria VH (foarte ridicată) și terminând cu categoria VL (foarte scăzută).

Etapa 3. *Selectarea soluției* va fi realizată cu ajutorul SE dezvoltat în etapa anterioară, fiind asociată cu stabilirea ordinii transformatoarelor în strategia de înlocuire. Soluția este testată și verificată prin simulări, pentru a-i determina fezabilitatea.

Etapa 4. *Implementarea soluției* reprezintă etapa finală a procesului de luare a deciziilor, unde planul de înlocuire este aplicat unui parc de transformatoare dintr-o zonă de interes din REDEE a OD.

5.5.2. Testarea SSAD destinat înlocuirii transformatoarelor, bazat pe tehnici de învățare nesupraveheată și pe sisteme expert

SSAD a fost testat pentru un parc de transformatoare cu 120 unități pentru care s-a dispus de o bază de date cu MST-uri efectuate pe partea de joasă tensiune a PT-urilor din REDEE într-o zonă rurală aparținând OD, în luna în care s-a înregistrat sarcina maximă în sistemul analizat (luna ianuarie).

Rezultatele procesului de grupare sunt prezentate în Figura 5.15, unde pot fi identificate șapte clustere (categorii de prioritate).

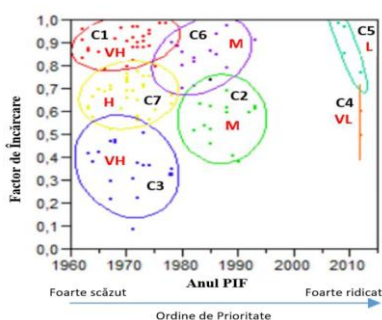


Figura 5.15. Clusterele obținute și clasificarea în categorii prioritare

Gruparea în șapte categorii a reprezentat soluția optimă, rezultată din valoarea maximă a factorului de formă ($SC = 0,756$).

Soluția finală oferită de SE integrat în SSAD referitor la clasamentul de înlocuire a transformatoarelor, este prezentată în Figurile 5.17 și 5.18.

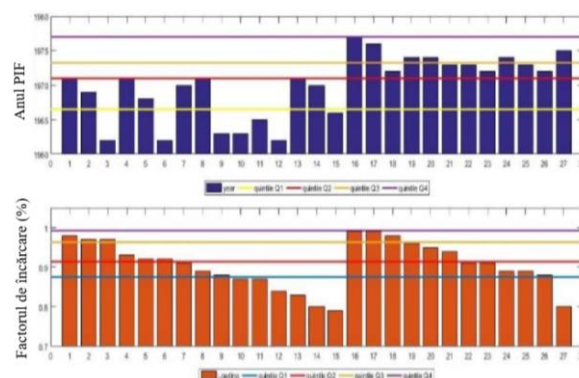


Figura 5.16. Anul punerii în funcțiune (PIF) și factorul de încărcare (LF) a transformatoarelor în clasamentul de înlocuire asociat cu categoria C1 (prioritatea VH)

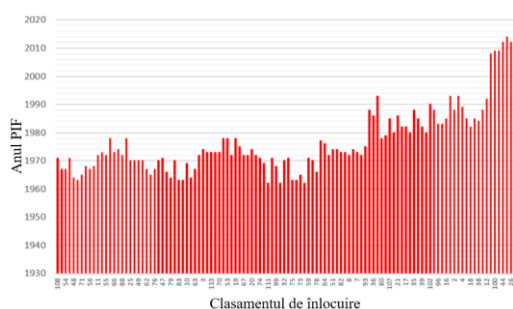


Figura 5.17. Clasamentul de înlocuire în funcție de anul punerii în funcțiune a transformatoarelor

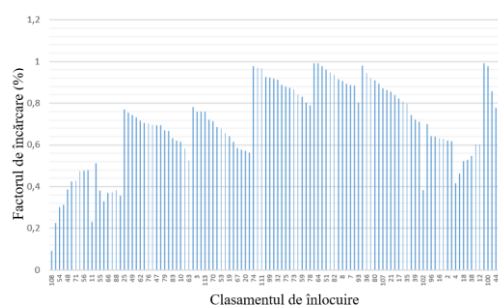


Figura 5.18. Clasamentul de înlocuire în funcție de factorul de încărcare al transformatoarelor

5.6. Sistem suport de asistare a deciziilor privind procesul de înlocuire a transformatoarelor în rețelele electrice de distribuție integrând prosumatori

5.6.1. Aspecte generale

Apariția prosumatorilor în REDEE ale OD necesită modificări ale strategiilor de planificare care să integreze și impactul prosumatorilor.

În acest context, se propune un SSAD ce integrează două etape ale procesului de luare a deciziilor în funcție de diferitele grade de penetrare a prosumatorilor:

- Clasificarea transformatoarelor în funcție de categoria de prioritate a înlocuirii, utilizând tehnici de clustering;
- Determinarea soluției optime asociată puterii nominală a fiecărui transformator din fiecare categorie determinată în prima etapă, utilizând un model de optimizare care are în vedere: maximizarea a două obiective referitoare la economia de energie și durata de viață peste perioada de amortizare.

Detalii referitoare la etapele integrate la nivelul unei metodologii în cadrul SSAD propus sunt prezentate în continuare.

5.6.2. Metodologia de înlocuire a transformatoarelor integrată în SSAD

Așa cum s-a subliniat mai sus, metodologia integrată în SSAD privind înlocuirea transformatoarelor din PT-urile care alimentează zone de rețea cu prosumatori racordați include două etape principale:

Etapa 1. Procesul de clustering și stabilirea priorităților de înlocuire

În interiorul acestei etape, se aplică un proces de clustering [179] pentru a stabili categoriile de prioritate în strategia de înlocuire a transformatoarelor. Acest proces se bazează pe două variabile: PIF și pe LF ale fiecărui transformator.

În urma procesului de clustering, transformatoarele vor fi clasificate în categorii de prioritate în procesului de înlocuire (*Foarte ridicată, Mare, Medie și Scăzută*).

Etapa 2. Determinarea ordinii de înlocuire a transformatoarelor

După clasificarea transformatoarelor în categorii de prioritate în procesul de înlocuire, se stabilește ordinea optimă de înlocuire, ținând cont de gradul estimat de penetrare a prosumatorilor calculat ca procent din energia totală tranzitată prin transformatoare, pe baza unui proces de optimizare care are obiective principale: economia de energie obținută prin înlocuirea transformatoarelor cu standarde de performanță redusă și perioada de recuperare a investiției, considerând că durata de viață a noului transformator nu depășește 30 de ani.

Principalele componente ale modelului matematic propus sunt prezentate mai jos:

Funcția obiectiv

Funcția obiectiv se referă la maximizarea a două criterii:

- *Economia de energie* obținută în procesul de înlocuire a fiecărui transformator k , $k = 1, \dots, T_r$,
- *Durata de exploatare după recuperarea investiției*

$$\bullet \quad D_{PP}^k(S_{r,i}^{new}) = T_n - \frac{I_i^{new}}{c_p \cdot \delta \Delta W^k(S_{r,i}^{new})} \quad (5.4)$$

unde: I_i^{new} - investiția inițială în noul transformator i având puterea nominală $S_{r,i}^{new}$; T_n - durata de viață a unui transformator (de regulă, 30 de ani); $\delta \Delta W^k(S_{r,i}^{new})$ - economia de energie pe an datorată procesului de înlocuire a transformatorului i ; c_p - costul pierderilor de energie, [u.m./kWh].

5.6.3. Testarea SSAD utilizat în procesul de înlocuire a transformatoarelor în rețelele electrice de distribuție, în contextul integrării prosumatorilor

Testarea SSAD propus a fost făcută având ca bază de plecare un parc de 20 transformatoare care alimentează zone de rețea în care au fost date avize de racord pentru instalații de producere a energiei electrice pe bază de panouri fotovoltaice. Datele de intrare privind puterea nominală (S_r) și anul de punere în funcțiune (PIF) sunt prezentate în Figura 5.19. [72].

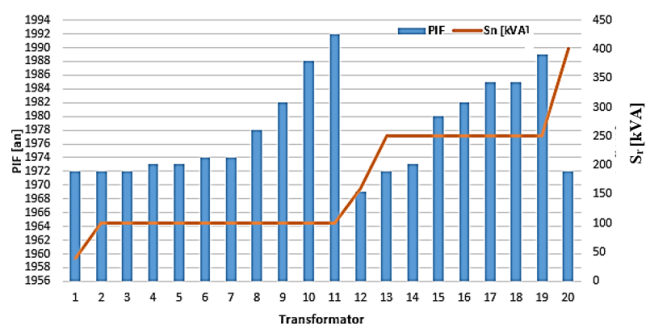


Figura 5.19. Distribuția transformatoarelor în funcție de puterea nominală (S_n) și anul de punere în funcțiune (PIF)

Încărcarea maximă identificată prin factorul de încărcare LF se determină din măsurătorile de sarcină efectuate de către OD în PT-uri pe partea de joasă tensiune (JT), în zilele cu sarcină maximă. Profilul de încărcare utilizat în procesul de înlocuire fost obținut prin agregarea profilurilor consumatorilor și prosumatorilor. Puterea injectată de prosumatori a fost considerată în funcție de gradul de penetrare estimat de OD pentru zona de alimentare a fiecărui transformator. Figura 5.20 prezintă, ca exemplu, procesul de agregare a profilului de sarcină asociat unui transformator supus procesului de înlocuire. Se poate observa că încărcarea maximă (înregistrată la ora 20:00) nu este influențată de prezența prosumatorilor în REDEE alimentate, deoarece aceștia nu dispun de sisteme de stocare.

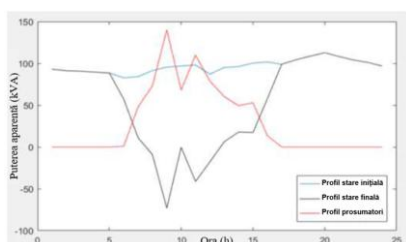


Figura 5.20. Profilurile de putere asociate stării inițiale (fără prosumatori), finale (cu prosumatori) și al prosumatorilor rezultate în urma agregării, [kVA]

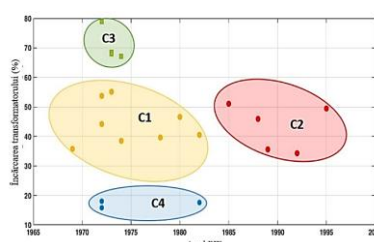


Figura 5.21. Categoriile de prioritate obținute în urma procesului de clustering

Datele de intrare utilizate în procesul de clustering au fost anul punerii în funcțiune (PIF) și încărcarea maximă (LF). Metoda Ward [71] din categoria metodelor de clustering ierarhice a fost aleasă datorită robusteții și calității partițiilor obținute pentru a identifica categoriile de prioritate în procesul de înlocuire. Figura 5.22 prezintă variația factorului de pierdere, $\Delta\tau$, asociat cu gradele de penetrare considerate. Valorile lui $\Delta\tau$ au fost calculate având ca referință cazul de bază fără prosumatori. Variația factorului de pierdere crește odată cu gradul de penetrare, având o saturație după 25%.

Figura 5.23 prezintă economia de energie obținută pentru fiecare grad de penetrare. Economia de energie crește de la 75,6 MWh/an până la un grad de penetrare cu 25% cu valoarea maximă (80,8 MWh/an), iar după acest punct are loc o scădere. Capacitatea instalată a noului transformator a scăzut până la valoarea de 15% pentru gradul de penetrare, după care a avut o valoare constantă (a se vedea

Figura 5.24). În ceea ce privește sarcina maximă identificată prin factorul de încărcare, valorile obținute din procesul de optimizare au fost situate în intervalul 35% - 70%.

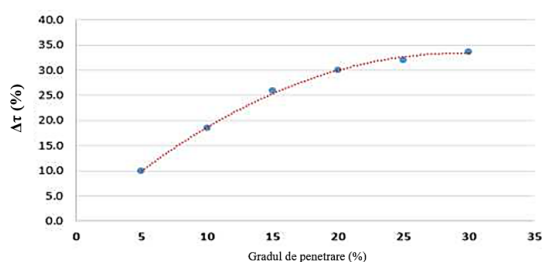


Figura 5.22. Impactul gradului de penetrare asupra factorului de pierdere

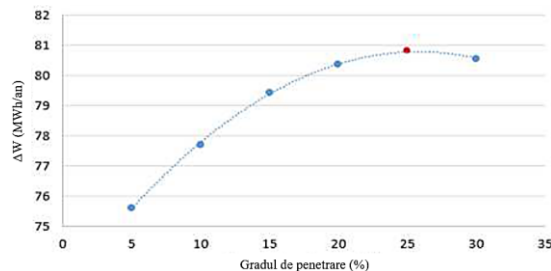


Figura 5.23. Impactul gradului de penetrare asupra economiei de energie

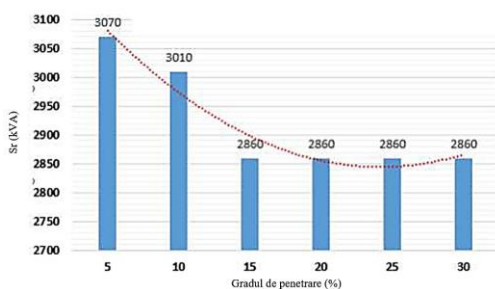


Figura 5.24. Impactul gradului de penetrare asupra capacității instalate

Rezultatele finale privind perioada specifică de economisire a energiei și post-investiție rezultată din procesul de optimizare asociat fiecărei categorii de prioritate sunt prezentate în Figurile 5.25 și 5.26.

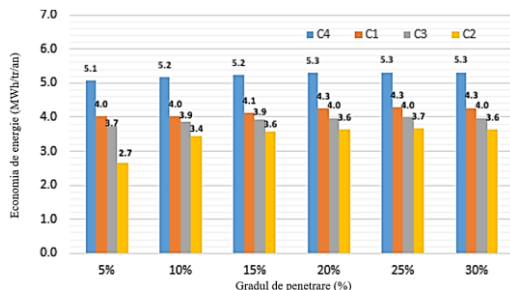


Figura 5.25. Economia de energie specifică asociată transformatoarelor ordonate în raport cu categoriile de prioritate în procesul de înlocuire

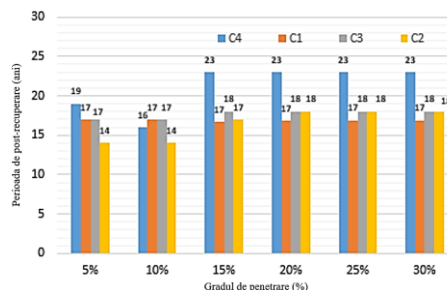


Figura 5.26. Perioada post-recuperare asociată transformatoarelor ordonate în raport cu categoriile de prioritate în procesul de înlocuire

Se poate observa că cea mai mare economie specifică de energie a fost obținută pentru clasele de înlocuire din categoria de prioritate *Foarte ridicată* (C4, C1 și C3), fiind între 5,1 și 3,7 MWh/transformator/an. Valorile sunt diferite, ceva mai mici pentru gradul de penetrare cu 5%. În ceea ce privește perioada post-recuperare, cele mai mari valori au fost înregistrate pentru clasa C4, urmată de C3, C2 și C1. S-au observat variații nesemnificative ale perioadei de economie a energiei și post-recuperare, atunci când gradul de penetrare este mai mare sau egal cu 15%, ceea ce înseamnă că, peste această valoare, cei doi indicatori nu vor mai suferi modificări care să influențeze strategiile FD.

CAPITOLUL 6

Sistem suport de asistare a deciziilor în procesul de integrare optimală a stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice

6.1. Aspecte generale privind sectorul transportului electric

Analiza evoluției emisiilor de GES din perioada 1990 – 2022 a evidențiat faptul că singurul sector care a înregistrat o creștere rămâne cel al transporturilor (+16%, fiind excluse emisiile generate de transportul aerian și cel maritim), a se vedea Figura 6.1 [72].

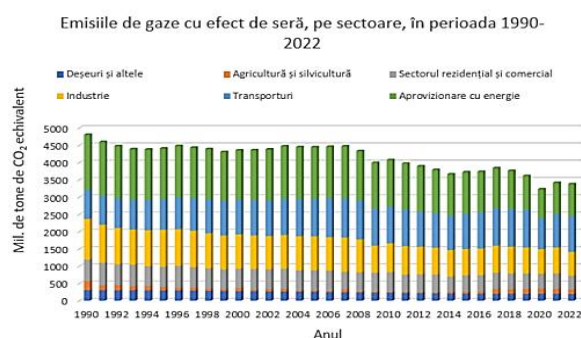


Figura 6.1. Evoluție emisii GES 1990 – 2022. Adaptat după [191]

6.2. Vehicule electrice și infrastructura de încărcare

UE a stabilit, la finalul anului 2023, Regulamentul privind infrastructura pentru combustibili alternativi (AFIR), care face parte din pachetul “Fit for 55” [73]. Acesta prevede ca până pe 31 decembrie 2025, să fie instalate SI-VE publice cu puncte de încărcare rapidă la fiecare 60 km de-a lungul principalelor coridoare de transport ale UE (rețeaua transeuropeană de transport [TEN-T]). Acest lucru va asigura disponibilitatea a 1,3 kW de puncte de încărcare accesibile publicului pentru fiecare VE înregistrat și alți 0,8 kW pentru fiecare vehicul hibrid de tipul pug-in (VHPI) [73], [74].

În contextul creșterii accelerate a numărului de vehicule electrice (VE), o gestionare inadecvată a punctelor de încărcare poate genera congestii și depășiri ale limitelor de tensiune în rețelele de distribuție. Încărcarea necontrolată poate conduce la vârfuri bruște de cerere, accentuând necesitatea dimensionării corecte a REDEE [73], [74]. Astfel, planificarea rețelilor trebuie să includă analiza impactului VE asupra consumului de energie, luând în calcul atât creșterea cererii, cât și potențialul de a aplatiza curbele de sarcină prin strategii inteligente de încărcare [75].

6.3. Sistem suport de identificare a modelelor comportamentale asociate gradului de ocupare și profilurilor caracteristice ale stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice

6.3.1 Aspecte generale

A fost propus un sistem suport de asistare a deciziilor (SSAD) pentru identificarea modelelor comportamentale asociate gradului de ocupare și a profilurilor caracteristice de consum (PCCP) ale stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice (SI-VE), utilizând tehnici de descoperire a cunoștințelor bazate pe algoritmi de clustering. Prin analiza datelor colectate din sistemele de monitorizare ale SI-VE, sistemul permite extragerea atributelor relevante – precum numărul de ore cu încărcare activă, numărul de vehicule și consumul total de energie – pe baza cărora sunt definite modele comportamentale și asociate PCCP specifice. Acest cadru flexibil facilitează înțelegerea variațiilor de utilizare a stațiilor și contribuie la planificarea inteligentă a A-REDEE. Eficiența metodologiei a fost validată pe o bază de date reală, provenită dintr-o rețea urbană de încărcare [76].

6.3.2 Sistem suport de identificare a modelelor comportamentale și profilurilor caracteristice ale stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice

Tehnicile de descoperire a informațiilor (Knowledge Discovery) sunt tot mai utilizate pentru a îmbunătăți procesele decizionale în diverse domenii, inclusiv în rețelele de distribuție [77]. Procesul începe cu extragerea modelelor relevante din baze de date, urmată de aplicarea tehnicilor de inteligență artificială și analiză statistică pentru identificarea comportamentelor asociate [78]. Calitatea datelor este esențială, iar verificarea sistemului de achiziție este un pas obligatoriu pentru a asigura fiabilitatea rezultatelor. După identificarea atributelor semnificative, acestea sunt procesate într-un format simplu, ușor de interpretat și utilizat în luarea deciziilor. SSAD propus integrează acest flux de prelucrare, oferind un cadru flexibil și intuitiv pentru factorul de decizie, ilustrat în Figura 6.2 [79].

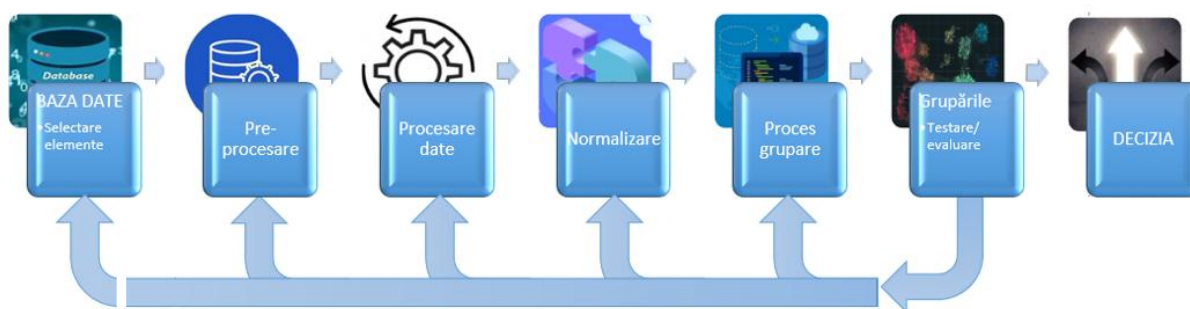


Figura 6.2. Diagrama asociată procesului de extragere a datelor [79]

Pasul 1. Formularea problemei. Aceasta implică efectuarea unui studiu cuprinzător al SI-VE și a obiectivelor asumate. Obiectivul principal al procesului de extragere se referă la identificarea modelelor comportamentale asociate gradelor de ocupare și profilurilor caracteristice ale SI-VE. Oricum, obiectivul poate fi modificat în funcție de caracteristicile problemei.

Pasul 2. Definirea structurii bazei de date. Acest pas are în vedere identificarea setului de atribute din înregistrările efectuate la nivelul fiecărei SI-VE care urmează a fi analizată. Tabelul 6.1 prezintă câteva linii din structura propusă în cadrul sistemului, conținând atributele identificate.

Tabel 6.1. Variabilele din setul de date, pentru fiecare stație de încărcare SI-VE

Stații de încărcare	Puncte de încărcare	Anul	Luna	Zi_start	Zi_stop	Ora_start	Durata [min]	Puterea nominală a conectorului [kW]	Consumul de energie [kWh]	Tip încărcător	Necesar mediu de putere [kW]
SI 1	2	2019	1	1	1	11:09	49	43	17,4	Rapid	21,3
SI 2	3	2019	1	1	1	18:27	28	44	19,1	Rapid	40,9
SI 3	1	2019	1	1	1	17:33	19	44	9,8	Rapid	30,9

Pasul 3. Pre- procesarea datelor. Acest pas presupune “curățarea” sau ștergerea înregistrărilor din baza de date a unei SI-VE care conțin valori lipsă, valori atipice (outliers), sau zile în care nu a existat nicio încărcare a VE. Astfel, bazei de date inițială poate avea un număr mai mic de înregistrări (linii).

Pasul 4. Procesul de extragere a atributelor ce caracterizează comportarea SI-VE. În interiorul acestui pas are loc identificarea atributelor care caracterizează cel mai bine obiectivul asumat. În cazul obiectivului asumat la Pasul 1, atributele selectate sunt următoarele: numărul de ore în care există cel puțin o încărcare ($H_d^{(CS)}$), unde NC reprezintă numărul modificărilor), numărul de VE ($N_{EV,d}^{(CS)}$), consumul total de energie ($W_{T,d}^{(CS)}$) pentru fiecare zi d , $d = 1, \dots, D$, unde D corespunde numărului total de zile cu cel puțin o încărcare care poate diferi de la o SI-VE la alta.

Aceste atribute sunt înregistrate în matricea $M_{(CS)}$, $CS = 1, \dots, N_{CS}$, unde N_{CS} reprezintă numărul de SI-VE analizate, având ca dimensiune $D \times N_f$, unde N_f reprezintă numărul de atribute relația (în cazul de față, $N_f = 3$) :

$$[M^{(CS)}]_{D \times N_f} = \begin{bmatrix} H_1^{(CS)} & N_{EV,1}^{(CS)} & W_{T,1}^{(CS)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ H_d^{(CS)} & N_{EV,d}^{(CS)} & W_{T,d}^{(CS)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ H_D^{(CS)} & N_{EV,D}^{(CS)} & W_{T,D}^{(CS)} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Pasul 5. Procesul de normalizare a atributelor. Pasul are rolul de a asigura transformarea în unități relative a tuturor atributelor corespunzătoare datelor. Procesul implică eliminarea diferențelor dintre unitățile de măsură.

$$F_d^{(CS)*} = \frac{F_f^{(CS)} - F_{d,max}^{(CS)}}{F_{d,max}^{(CS)} - F_{d,min}^{(CS)}}, \quad F_d^{(CS)} \in \{H_d^{(CS)}, N_{EV,d}^{(CS)}, W_{T,d}^{(CS)}\} \quad (6.2)$$

$$F_{d,max}^{(CS)*} = \max_{d=1,...,D} \{F_d^{(CS)}\}; F_{d,min}^{(CS)*} = \min_{d=1,...,D} \{F_d^{(CS)}\} \quad (6.3)$$

Pasul 6. Procesul de clustering. FD are un rol semnificativ în procesul de alegere a metodei de extragere a datelor, în funcție de obiectivul asumat. Alegerea poate fi bazată pe experiența și interesele FD. În SSAD propus, a fost utilizat algoritmul de clustering K-medii datorită ușurinței în implementare și a calității modelelor obținute [79], [80].

Algoritmul K-medii conduce la grupări ale setului de date în modele al căror elemente au atribute similare [184]. Scopul algoritmului este de a menține gruparea cât mai aproape posibil de datele originale, asigurându-se totodată că rămân distincte. Înregistrările sunt atribuite unui cluster în funcție de centrul său de greutate calculat în funcție de suma dintre distanța între diferitele înregistrări ale clusterului. Cu cât variația modelului scade, cu atât înregistrările sale au un coeficient de corelație mai mare în interiorul aceluiași model.

Funcția obiectiv este dată de următoarele relații [180], [227]:

$$\Phi = \sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K \alpha_{ek} \left\| m_e^{(CS)*} - c_k^{(CS)} \right\|^2 \quad (6.4)$$

$$\alpha_{ek} = \begin{cases} 1 & \text{if } m_e^{(CS)} \in k \\ 0 & \text{if } m_e^{(CS)} \notin k \end{cases} \quad (6.5)$$

unde elementul $m_e^{(CS)*}$ reprezintă o linie (înregistrare) din matricea normalizată $M^{(CS)*}$ și $c_k^{(CS)}$ centrul de greutate al modelului k .

Caracterizarea modelelor comportamentale asociate gradelor de ocupare ale SI-VE se face pe baza unei analize statistice caracterizate prin variabilele (media, dispersie, gradul de încredere în medie și cuartile) [81].

Pasul 7. Determinarea PCCP ale SI-VE. Profilurile cererii de energie zilnice atribuite fiecărui model comportamental asociat unui grad de ocupare sunt agregate pe baza informațiilor conținute în baza de date. După care, PCCP-urile sunt obținute prin inițializarea unui proces de mediere a tuturor profilelor conținute în fiecare model comportamental.

6.3.3 Testarea SSAD

SSAD propus a fost testat folosind o baza de date care conține informații despre SI-VE publice din zone urbane și semi-urbane disponibilă la nivelul referinței [81]. În cadrul bazei au fost identificate trei categorii de SI-VE:

- **Categoria 1** - 1 SI-VE cu două puncte de încărcare de 7 kW,
- **Categoria 2** - 11 SI-VE cu două puncte de încărcare de 3kW ;
- **Categoria 3** - 10 SI-VE cu trei puncte de încărcare având puterile nominale 43 kW, 55kW și 55 kW.

Rezultatele prezentate în continuare se referă doar la o singură SI-VE din categoria 3.

Atributele înregistrărilor se referă la numărul punctelor de încărcare ale fiecărei SI-VE, tipul de conector, timpul de încărcare, timpul de pornire a încărcării, timpul de oprire a încărcării, durata încărcării și consumul de energie. Obiectivul principal al procesului de extragere a datelor a corespuns cu extragerea modelelor comportamentale asociate cu gradele de ocupare corespunzătoare SI-VE.

Având în vedere acest obiectiv, **Pasul 2** a inclus procesul de încărcare a setului adecvat de atribute pentru fiecare SI -VE privind punctele de încărcare, anul, luna, ziua, începutul și sfârșitul zilei, începutul și finalul orelor de încărcare, durata încărcării, puterea nominală a conectorului, consumul de energie și puterea medie a încărcătorului. Aceste atribute definesc structura asociată cu baza de date a SSAD.

În **Pasul 3**, înregistrările asociate SI-VE analizate au fost extrase din baza de date și verificate pentru a identifica valorile atipice, valorile lipsă sau zilele în care nu a existat nicio încărcare. În ceea ce privește baza de date utilizată, toate înregistrările au fost eligibile fără a prezenta probleme la momentul înregistrării.

Pasul 4 a inclus extragerea atributelor pentru fiecare zi d , $d = 1, \dots, 365$, din baza de date asociată cu numărul de ore în care există cel puțin o încărcare, $H_d (N_{C \geq 1})$, numărul de vehicule electrice, $N_{EV,d}$ și consumul total de energie, $W_{T,d}$. Aceste caracteristici sunt înregistrate în matricea M , având dimensiunea (365×3) . Fiecare linie (înregistrate) d , $d = 1, \dots, 365$, din matrice reprezintă un vector $[H_d, N_{EV,d}, W_{T,d}]$, supus procesului de grupare pentru identificarea modelelor comportamentale asociate gradului de ocupare ale SI-VE analizate

Pasul 5 include procesul de normalizare a caracteristicilor bazate pe relațiile (6.2) și (6.3).

Pasul 6 integrează procesul de grupare bazat pe algoritmul K-medii. Numărul maxim de modele (clustere) a fost determinat utilizând relația (6.4), rezultând $K_{max} = 19$. Pentru fiecare partiție $K = 2 \dots 19$ a fost aplicat algoritmul K-medii, iar factorul de formă (SF) a fost calculat pentru a măsura calitatea partițiilor, conform Figura 6.3. Partiția optimă corespunzătoare lui $K_{opt} = 4$ a fost identificat pe baza valorii maxime a factorului de formă, $SF = 0,7014$.

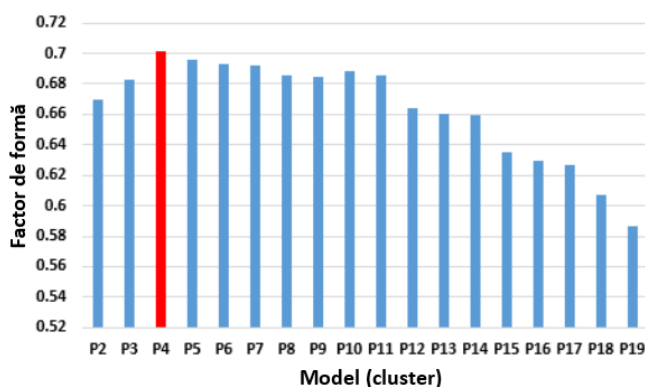


Figura 6.3. Valoarea factorului de formă corespunzător fiecărei partiții $K = P2, \dots, P19$

Valoarea factorului SF corespunde unei partiții solide, asociată cu o calitate foarte bună a procesului de grupare [185], [228]. Reprezentarea 3D a modelelor caracterizate de cele trei caracteristici ($H_d (N_{C \geq 1})$, $N_{EV,d}$, and $W_{T,d}$, $d = 1, \dots, 365$) este prezentată în Figura 6.4.

Indicatorii statistici asociați fiecărui model asociat mediei, dispersiei, gradului de încredere și cuartilelor (Q0 – minimul 0% Q1 - 25%, Q2 - 50% și Q3 - 75%, Q4 – maximul 100%) sunt redată în Tabelul 6.2. Valorile obținute confirmă calitatea modelelor identificate.

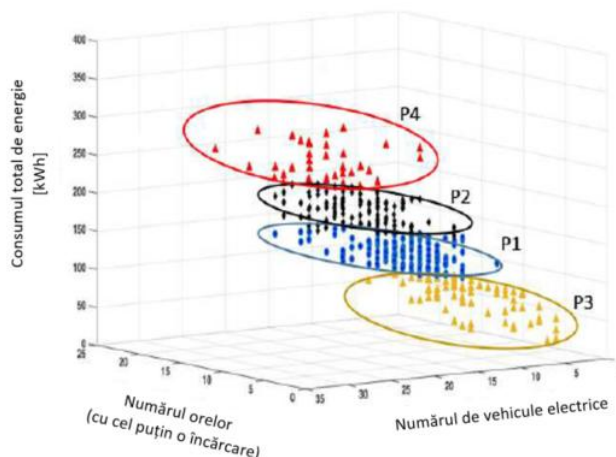


Figura 6.4. Reprezentarea 3D a modelelor de ocupare corespunzătoare partiției optime ($K_{opt} = 4$)

Tabelul 6.2. Indicatorii statistici ai modelelor comportamentale asociate gradului de ocupare de corespunzătoare SI-VE analizate

Indicatori statistici	$H_{(N_{C \geq 1})}$ [ore]				H_{EV} [vehicule]				W_T [kWh]			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P3	P4
Media	10	13	7	14	13	17	9	20	130	185	73	251
Deviația standard	2	2	2	2	3	3	3	4	15	16	22	29
Cuartila Q0	6	7	3	10	7	10	3	11	102	158	20	221
Cuartila Q1	9	11	6	12	12	15	6	17	117	169	61	230
Cuartila Q2	10	12	8	14	13	16	9	19	127	188	80	244
Cuartila Q3	11	14	9	15	15	19	11	22	142	198	91	269
Cuartila Q4	16	17	12	22	23	23	18	33	157	217	101	368

Clasificarea, luând în considerare principalele atribute utilizate în procesul de grupare, conduce la un alt clasament: P4 poate fi asociat cu un grad de ocupare “Bun”, P2 cu un grad ”Mediu” de ocupare, P1 cu un grad de ocupare ”Satisfăcător” și P3 cu un grad de ocupare “Mic”. Astfel, corelația dintre cele două clasamente conduce la concluzia că SI-VE are un grad de ocupare de “Satisfăcător” și “Mic” (pondere de aproximativ 70%).

Figura 6.5 prezintă distribuția modelelor de ocupare la nivelul fiecărei luni. Modelul P1 are o pondere majoritară pentru primele șapte luni (ianuarie - iulie). Ponderea este aproximativ egală între modelele P1 și P2 pentru ultimele luni (august - decembrie). P3 are o pondere similară în primele opt

luni (cu excepția lunii mai), cu o scădere în ultimele patru luni. P4 are o reprezentare discretă în primele șapte luni (1 - 2 zile), crescând lent în septembrie, noiembrie și decembrie.

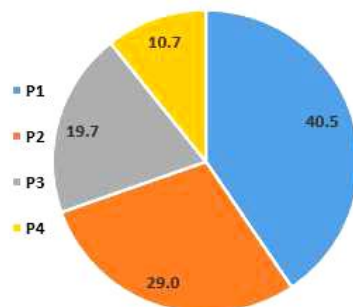


Figura 6.5. Ponderea modelelor comportamentale ale SI-VE analizate

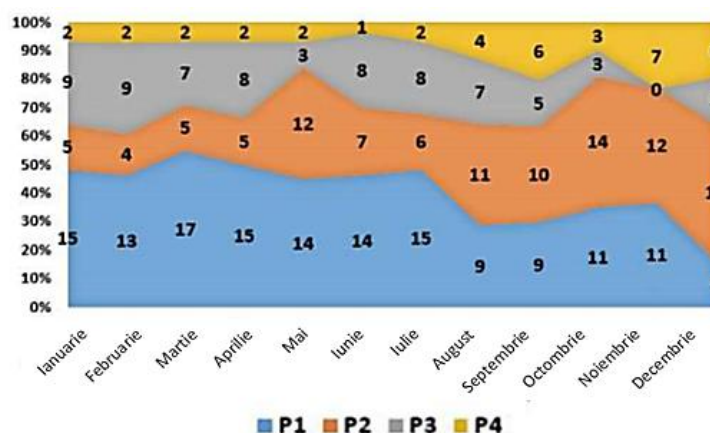


Figura 6.6. Împărțirea modelelor comportamentale asociate SI-VE la nivelul fiecărei luni

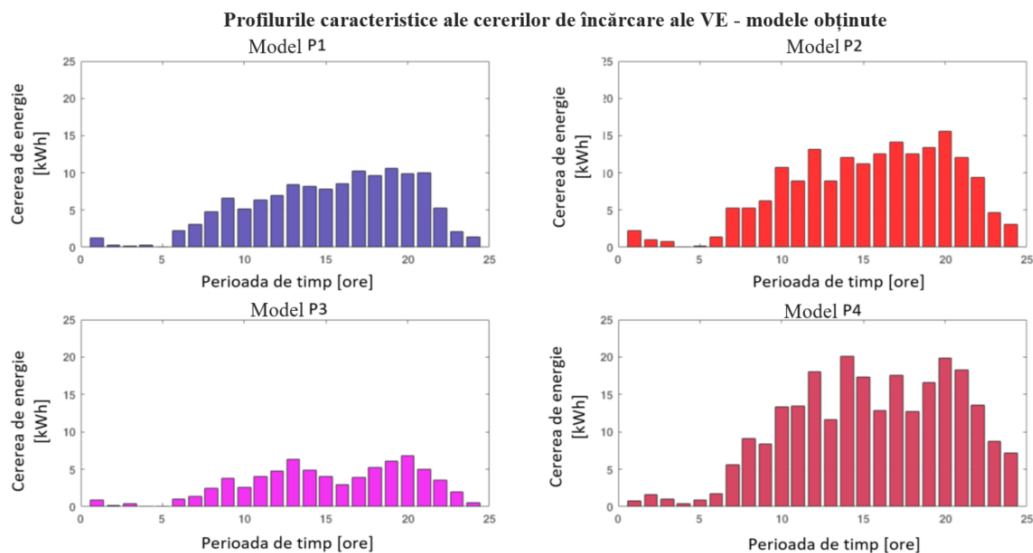


Figura 6.7. PCCP-urile modelelor comportamentale asociate gradelor de ocupare ale SI-VE analizate

Pasul 7 conține procedura de determinare a PCCP-urilor asociate SI-VE. Astfel, profilurile cererii de energie pentru zilele alocate fiecărui model comportamental au fost agregate oră de oră pe baza informațiilor conținute în baza de date. PCCP -urile au fost obținute printr-un proces de mediere

care include toate profilurile atribuite în fiecare model comportamental. Figura 6.7 prezintă PCCP-urile obținute pentru fiecare model comportamental asociat gradelor de cupare. Prin utilizarea acestor PCCP-uri pentru fiecare SI-VE identificat printr-un ID de localizare, OD pot identifica regimurile optime de funcționarea a REDEE. Planificarea optimă a infrastructurii de încărcare poate fi simplificată dacă aceste PCCP -uri sunt cunoscute.

6.4. Sistem suport de asistare a deciziilor privind amplasarea optimă a stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice în rețelele de distribuție a energiei electrice

6.4.1. Aspecte generale

A fost propus un SSAD privind amplasarea optimă a SI-VE în REDEE de joasă tensiune rurale și peri-urbane bazat pe modelele comportamentale asociate gradelor de ocupare ale SE-VE identificate cu ajutorul sistemul suport prezentat în paragraful 6.3 și strategia integrată în SSAD folosit în Capitolul 4 pentru amplasarea optimă pe faze a prosumatorilor [76]. Pentru procesul de amplasare optimă a fost folosit algoritmul de clustering K-medii care a folosit ca date de intrare circulațiile orare de putere și tensiunile medii de fază pentru fiecare nod (stâlp) determinate cu ajutorul unui program de calcul de regim permanent [82]. SSAD propus îmbunătățește accesibilitatea și integrează eficient sursele de energie regenerabilă în REDEE de joasă tensiune.

6.4.2. Cadrul de extragere a datelor bazat pe clustering

Algoritmul K-means clustering a fost utilizat pentru a determina clusterelor (zonele) "candidat" (ce integrează nodurile la care s-ar putea conecta SI-EV) având ca suport pentru luarea deciziei atributele asociate circulațiile de putere inversă și a tensiunile medii de fază cu cele mai mari valori, calculate pentru o zi de referință în care injecțiile de putere ale prosumatorilor cu sisteme de panouri fotovoltaice în REDEE au valorile maxime.

Pasul 1. Formularea problemei. Obiectivul este reprezentat de determinarea numărului optim de SI-VE și a nodurilor unde vor fi amplasate. Astfel, modelul matematic de optimizare are în vedere minimizarea unei funcții obiectiv a cărei expresie include valorile ponderate ale pierderilor de energie și abaterea medie pătratică a tensiunii din REDEE în diferite scenarii privind PCCP ale SI-VE.

Pasul 2. Definirea structurii asociate bazei de date. Baza de date conține circulațiile de putere pe tronsonurile de linie care alimentează fiecare nod n din REDEE, $n = 1, \dots, N$, și a tensiunilor medii de fază putere la nivelul fiecărui nod (stâlp) determinate în urma calculelor de regim permanent în REDEE analizată cu algoritmul propus în [82]. Aceste atribute sunt înregistrate pentru fiecare nod din REDEE în matricea de intrare ID .

Pasul 3. Pre-procesarea datelor. Înregistrările din baza de date reprezentată de structura matriceală ID sunt verificate pentru a identifica eventualele valori lipsă sau atipice. Dacă procesul identifică valori din cele două categorii, atunci FD poate aplica tehnici de date lipsă (Missing Data).

$$[ID]_{Nx(2xH)} = \begin{bmatrix} P_1^1 & \dots & P_1^h & \dots & P_1^H & V_{av,1}^1 & \dots & V_{av,1}^h & \dots & V_{av,1}^H \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_n^1 & \dots & P_n^h & \dots & P_n^H & V_{av,n}^1 & \dots & V_{av,n}^h & \dots & V_{av,n}^H \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_N^1 & \dots & P_N^h & \dots & P_N^H & V_{av,N}^1 & \dots & V_{av,N}^h & \dots & V_{av,N}^H \end{bmatrix} \quad (6.6)$$

$$P_n^h = (P_{c,n}^h - P_{g,n}^h) + P_{n,k}^h \quad (6.7)$$

$$V_{av,n}^h = \frac{(V_{a,n}^h + V_{b,n}^h + V_{c,n}^h)}{3} \quad (6.8)$$

unde: P_n^h reprezintă circulația de putere activă pe tronsonul de linie care alimentează nodul n , $n=1, \dots, N$, la ora h , $h=1, \dots, H$, în [kW]; $P_{c,n}^h$ corespunde puterii cerute de utilizatorii finali (consumatori și prosumatori) în nodul n la ora h , [kW]; $P_{g,n}^h$ se identifică cu puterea generată de sistemele de producere a energiei instalate la prosumatorii racordați în nodul n la ora h , în [kW]; $P_{n,k}^h$ corespunde circulației de putere între nodul n și nodul k (aflat în avalul REDEE), în [kW]; $V_{av,n}^h$ este valoarea medie a tensiunii pe cele trei faze la ora h , $h=1, \dots, H$, în nodul n , $n=1, \dots, N$, în [V];

Pasul 4. Procesul de normalizare a atributelor. Pasul are rolul de a asigura transformarea în unități relative a tuturor atributelor corespunzătoare datelor. Procesul implică eliminarea diferențelor dintre unitățile de măsură.

$$P_n^{h*} = \frac{P_n^h - P_{n,max}}{P_{n,max} - P_{n,min}}; V_{av,n}^{h*} = \frac{V_{av,n}^h - V_{av,max}}{V_{av,max} - V_{av,min}}; \quad (6.9)$$

$$P_{n,max} = \max_{\substack{n=1, \dots, N \\ h=1, \dots, H}} \{P_n^h\}; P_{n,min} = \min_{\substack{n=1, \dots, N \\ h=1, \dots, H}} \{P_n^h\}; \quad (6.10)$$

$$V_{av,max} = \max_{\substack{n=1, \dots, N \\ h=1, \dots, H}} \{V_{av,n}^h\}; V_{av,min} = \min_{\substack{n=1, \dots, N \\ h=1, \dots, H}} \{V_{av,n}^h\}; \quad (6.11)$$

Pasul 5. Procesul de clusterizare. În interiorul acestui pas, SSAD include algoritmul K-medii pentru determinarea numărului de zone “candidat” din care vor fi alese locațiile (nodurile) pentru SI-VE.

Funcția obiectiv are următoarea expresie:

$$\min(\Phi) = \min(\sum_{e=1}^E \sum_{k=1}^K \alpha_{ek} \|m_e^* - c_k\|^2) \quad (6.12)$$

$$\alpha_{ek} = \begin{cases} 1 & \text{if } m_e \in k \\ 0 & \text{if } m_e \notin k \end{cases} \quad (6.13)$$

unde: $m_e^{(CS)*}$ reprezintă o înregistrare din matricea normalizată, ID^* ; c_k este poziția centrului de greutate al zonei (clusterului) k .

În final, se calculează factorul de formă pentru fiecare partiție în K zone (clustere), $K = K_{min}, \dots, K_{max}$ (de obicei, $K_{min}=2$) și numărul optim de zone (clustere) asociat partiției cu valoarea maximă a factorului.

Pasul 6. Determinarea zonelor "candidat". Zonele "candidat" din care vor fi identificate nodurile în care vor fi amplasate SI-VE sunt determinate pe baza celor mai mari valori medii ale atributelor asociate circulațiilor de putere pe tronsonele de linie care alimentează fiecare nod n din REDEE, $n = 1, \dots, N$, și a tensiunilor medii de fază putere la nivelul fiecărui nod (stâlp). Se realizează un clasament în care clusterelor sunt ordonate de la valorile cele mai mari la cele mai mici ale celor două caracteristici.

Pasul 7. Determinarea locațiilor SI-VE. Nodurile aparținând zonelor "candidat" vor fi supuse unui proces de optimizare a cărei funcție obiectiv în scopul indentificării locației optime:

$$\min(\varepsilon) = \min_{k \in K} \left\{ \sum_{h=1}^{2H} (RF_k^h - ID_k^h)^2 \right\} \quad (6.13)$$

$$RF_k = [P_{RFk}^1 \dots P_{RFk}^h \dots P_{RFk}^H \quad V_{RFk}^1 \dots V_{RFk}^h \dots V_{RFk}^H] \quad (6.14)$$

$$1. \quad RF_k^h = \frac{\sum_{j=1}^{N_k} RF_j^h}{N_k}, h = 1, \dots, 2H; k = 1, \dots, K_{opt} \quad (6.15)$$

$$ID_k = [P_k^1 \dots P_k^h \dots P_k^H \quad V_k^1 \dots V_k^h \dots V_k^H] \quad (6.16)$$

unde: RF_k^h reprezintă elementul (nodul) mediu caracteristic fiecărei zone "candidat" având attributele calculate ca medii ale atributelor tuturor elementelor (asociate nodurilor).

Numărul optim de SI-EV și nodurile unde vor fi amplasate vor fi determinate pe baza valorii minime a funcției obiectiv care conține valorile ponderate ale pierderilor de energie și abaterea medie pătratică a tensiunii în REDEE în diverse scenarii privind PCCP-urile asociate SI-VE.

6.4.3. Testarea SSAD

Testarea SSAD propus a fost realizată pe o REDEE de joasă tensiune aeriană ce alimentează o zonă periferic- urbană cu 36 stâlpi (a se vedea Figura 6.8), 4 conductoare (3 conductoare de fază și 1 conductor de nul) cu o secțiune transversală de 70 mm². Rețeaua conține 53 de utilizatori finali (26 – prosumatori, cu un grad de penetrare 50%) racordați la cele trei faze pentru care se cunosc profilurile de putere activă și reactivă. Prosumatorii sunt racordați la stâlpii identificați cu simbolul pătrat de culoare roșie având sistemele fotovoltaice de producere a energiei cu capacități instalate de 3 kW și 6 kW. Profilurile de putere activă și reactivă ale tuturor utilizatorilor finali, preluate din SCI, au un pas de eșantionate de 60 de minute [76].

Transformatorul din postul de transformare MT/JT (20/0,4 kV) este prevăzut cu un comutator de ploturi cu reglaj manual având următoarele caracteristici tehnice: anul punerii în funcțiune este 1979;

putere nominală: $S_n = 250 \text{ kVA}$; tensiune: 20/0,4 kV; numărul de ploturi: 5 (3 este poziția mediană); treaptă de reglaj: 2,5 %.

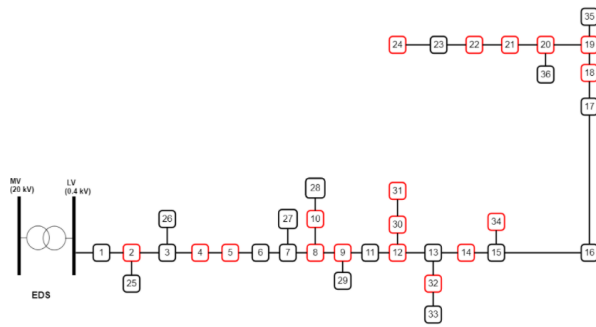


Figura. 6.8. Rețeaua electrică utilizată pentru testarea metodei

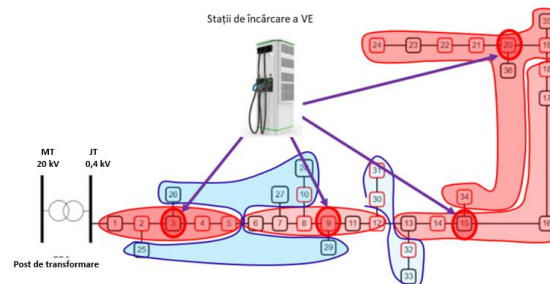


Figura 6.9. Nodurile din zonele "candidat" (cu roșu) unde pot fi localizate SI-VE

În urma aplicării metodologiei integrate în interiorul SSAD propus au rezultat 6 zone ($K_{opt}=6$), indică valorile factorului de formă obținute în cadrul partiției optime.

Tabelul 6.3 prezintă cele 6 zone în ordinea stabilită de criteriile referitoare la atributele folosite (circulațiile de putere inversă și a tensiunile medii de fază cu cele mai mari valori), în care pot fi identificate, cu culoare roșie, nodurile reprezentând soluțiile optime pentru amplasarea SI-VE în REDEE. Cele 6 zone sunt în care pot fi identificate, cu culoare roșie, zonele "candidat" și nodurile reprezentând soluții optime pentru amplasarea SI-VE.

Au fost analizate 4 scenarii:

- **Scenariul 1** – O singură SI-VE localizat în nodul 3 (clusterul C1 – primul în clasament);
- **Scenariul 2** – Două SI-VE situate în nodurile 3 și 9 (clusterelor C1 și C2, primele două în clasament);
- **Scenariul 3** – Trei SI-VE localizate în nodurile 3, 9 și 15 (clusterelor C1, C2 și C5, primele trei clasate);
- **Scenariul 4** – Patru SI-VE localizate în nodurile 3, 9, 15 și 20 (clusterelor C1, C2, C5 și C6, primele patru clasate).

Tabel 6.3. Clasamentul zonelor cu nodurile asociate acestora rezultate în urma procesului de *clustering*

Zona	Nodurile
C1	1, 2, 3 , 4 și 5
C2	6, 7, 8, 9 , 11 și 12
C5	13, 14, 15 , 16, 17 și 18
C6	19, 20 , 21, 22, 23, 24, 35 și 36
C3	10, 25, 26, 27, 28 și 29
C4	30, 31, 32 și 33

Luând în considerare PCCP-urile obținute cu ajutorul SSAD propus în paragraful anterior și, scenariile de mai sus, au fost identificate un maxim de 256 de combinații posibile.

- Scenariul 1 – 4 combinații;
- Scenariul 2 – 16 combinații;
- Scenariul 3 – 64 combinații;
- Scenariul 4 – 256 combinații;

Sinteza rezultatelor obținute pentru fiecare combinație din interiorul fiecărui scenariu reprezentate de pierderile de energie, valorile minimă și maximă ale tensiunilor de fază, calculate la nivelul nodurilor, sunt prezentate în Tabelul 6.4, sub forma indicatorilor statistici asociați cuartilelor Q0 ÷ Q4. De asemenea, rezultatele au fost reprezentate și cu ajutorul reprezentărilor boxplot-urilor.

Tabel 6.4. Parametrii statistici asociați quartilelor pentru principalele variabile staționare (pierderi de energie dWTotal, tensiune maximă de fază $V_{\max}$ [V] și tensiune minimă de fază $V_{\min}$ [V])

Variabile	dWTotal [kWh]				$V_{\max}$ [V]				$V_{\min}$ [V]			
Scenariul	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Cuartila Q0	33,11	44,85	64,79	94,2	248,7	245,4	241,5	241,5	220,9	216	208,1	196,9
Cuartila Q1	34,15	51,8	82,02	130,7	248,7	245,8	241,5	241,5	221	216,6	209,7	200,6
Cuartila Q2	37,36	58,05	95,41	148,4	248,9	246,2	242,1	241,5	221,2	217,3	211,1	202,7
Cuartila Q3	40,5	64,2	110,2	167,6	249	246,6	242,7	241,5	221,6	218,4	212,8	205
Cuartila Q4	41,4	70,9	133,5	218,5	249,1	247	243,9	241,5	221,8	219,4	215,8	210,2

Din analiza rezultatelor se pot desprinde următoarele concluzii: pierderile de energie cresc de la un Scenariul 1 la Scenariul 4, ajungând să aibă valori de câteva ori mai mari mai mari. Tensiunile maxime nu depășesc valoarea maximă admisibilă indicate în standardul de performanță. Pentru ultimul scenariu, limitele de tensiune impuse de standard sunt încălcate, depășind limita inferioară de $-10\% \cdot U_n$, pentru valorile efective ale tensiunii nominale, pe un interval de o săptămână.

Cea mai nefavorabilă combinație corespunde PCCP 4 în toate SI-VE amplasate în nodurile 3, 9, 15 și 20. Măsura tehnică care poate fi implementată de OD este de schimbare a plotului transformatorului din postul de transformare, prin creșterea cu o poziție. În acest caz, tensiunea din REDEE va crește cu o valoare specificată (de obicei câțiva volți sau procente din tensiunea nominală),

astfel asigurând un nivel optim de tensiune pentru a compensa pierderile de tensiune pe linii sau pentru a gestiona fluctuațiile de sarcină. Este important ca aceste ajustări să fie realizate cu atenție, deoarece pot afecta stabilitatea REDEE și echipamentele conectate.

Rezultatele obținute pentru această combinație din Scenariul 4 sunt prezentate în Figurile 6.10 ÷ 6.12. Figura 6.10 prezintă comparația dintre pierderile de energie înregistrate în cele două cazuri analizate (fără și cu reglajul tensiunii). Se pot observa scăderi ale pierderilor de putere la fiecare oră dintre cele 24 din intervalul analizat.

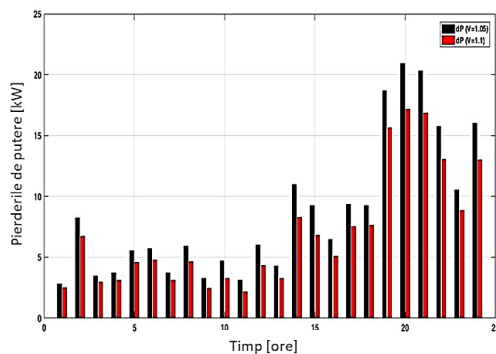


Figura 6.10. Pierderile de energie pentru combinația cea mai nefavorabilă (fără și cu reglajul tensiunii)

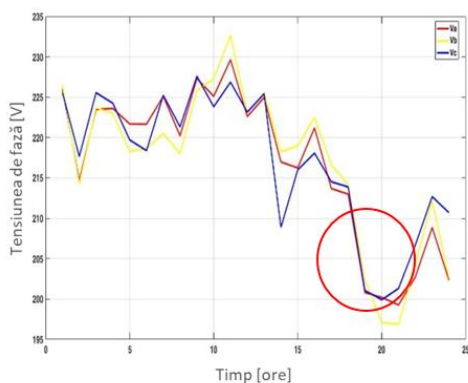


Figura 6.11. Tensiunea minimă de fază pentru combinația cea mai nefavorabilă (fără reglajul tensiunii)

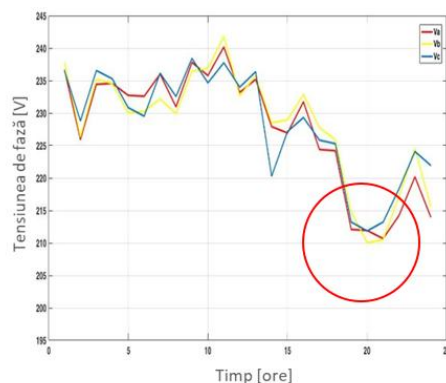


Figura 6.12. Tensiunea minimă de fază pentru combinația cea mai nefavorabilă (cu reglaj de tensiune)

Figurile 6.11 și 6.12 prezintă valorile minime înregistrate pe cele trei faze în cele două cazuri analizate (fără și cu reglaj de tensiune). Reglajul tensiunii a condus la creșterea valorii minime înregistrate pe cele trei faze peste valoarea minimă indicată în normativ (aproximativ 210 V pe fiecare fază).

CAPITOLUL 7

Concluzii și direcții viitoare de cercetare

7.1 Concluzii generale

Teza de doctorat a abordat problematica actuală a planificării REDEE prin utilizarea SSAD bazate pe tehnici IA, în special tehnici de învățare nesupravegheată și sisteme expert. Cercetarea a evidențiat provocările actuale din sectorul energetic, cum ar fi integrarea surselor regenerabile, optimizarea infrastructurii existente și necesitatea unui management eficient al prosumatorilor și stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice.

Utilizarea SSAD integrat cu tehnici de IA permite optimizarea procesului de modernizare a infrastructurii REDEE, facilitând identificarea echipamentelor critice ce necesită înlocuire și reducerea pierderilor de energie printr-o planificare strategică a etapelor de modernizare.

Capitolele 1 și 2 au prezentat importanța temei și necesitatea unei abordări strategice în planificarea dezvoltării REDEE cu accent pe provocările cărora trebuie să le facă față OD în perioada următoare. *Capitolul 3* a analizat conceptele fundamentale ale SSAD și rolul acestora în procesul decizional din REDEE. S-au evidențiat arhitectura și clasificarea SSAD, subliniind tranziția de la modelele tradiționale la cele moderne care integrează tehnici IA. Prin integrarea IA, SSAD devin instrumente flexibile, capabile să analizeze volume mari de date și să genereze scenarii predictive pentru etapele de planificare optimă integrate în A-REDEE. *Capitolul 4*, dedicat procesului de integrare a prosumatorilor, a evidențiat necesitatea unui cadru decizional avansat pentru gestionarea acestora. Utilizarea SSAD pentru prioritizarea racordării prosumatorilor și distribuirea echilibrată a producției regenerabile a demonstrat eficiența sa în menținerea stabilității operaționale a A-REDEE. *Capitolul 5* a tratat importanța utilizării SSAD în modernizarea infrastructurii de distribuție, cu accent pe gestionarea și înlocuirea transformatoarelor MT/JT. S-a demonstrat că utilizarea metodologiilor bazate pe optimizarea multicriterială și algoritmi de învățare nesupravegheată permit identificarea echipamentelor/instalațiilor ce necesită înlocuire. *Capitolul 6* a analizat problema integrării stațiilor de încărcare a vehiculelor electrice (SI-VE) în A-REDEE, subliniind impactul acestora asupra infrastructurii și necesitatea unui management eficient al cererii variabile de energie. S-a demonstrat că utilizarea SSAD pentru determinarea amplasării optime a SI-VE, bazată pe modele comportamentale, contribuie la distribuția echilibrată a punctelor de încărcare și adaptarea infrastructurii la cerințele mobilității electrice.

7.2 Contribuții originale

Teza de doctorat aduce o contribuție semnificativă în fundamentarea importanței SSAD pentru planificarea dezvoltării REDEE. Lucrarea propune o nouă viziune integrată asupra utilizării tehnologiilor avansate, evidențiind rolul IA în optimizarea procesului decizional.

O analiza comprehensivă originală a cadrului conceptual pentru integrarea SSAD în planificarea REDEE, incluzând arhitecturi, metodologii și tehnici IA, a fost realizată în Capitolul 3. Prin analiza metodelor de IA aplicabile în acest domeniu, analiza a evidențiat beneficiile utilizării algoritmilor de învățare automată în luarea deciziilor, oferind o bază solidă pentru optimizarea infrastructurii și a proceselor operaționale. Un cadru original pentru luarea deciziilor privind integrarea prosumatorilor în REDEE a fost propus în Capitolul 4. Autoarea a proiectat, dezvoltat și testat un SSAD care integrează un model dinamic bazat pe evaluarea continuă a capacității REDEE. Prin utilizarea unor tehnici avansate de clasificare și optimizare, SSAD permite racordarea optimă a prosumatorilor, permițând o distribuție eficientă a resurselor și evitarea congestiilor REDEE.

Un SSAD care integrează o metodologie de evaluare și înlocuire a transformatoarelor din REDEE, bazată pe o combinație de tehnici multicriteriale și modele de învățare automată, a fost propus în Capitolul 5. Autoarea proiectează, dezvoltă și testează un nou sistem adaptiv, care permite o prioritizarea investițiilor în modernizarea infrastructurii. De asemenea, utilizarea acestui SSAD pentru optimizarea planificării permite reducerea pierderilor de energie și îmbunătățirea fiabilității infrastructurii, oferind OD instrumente avansate pentru managementul eficient al resurselor.

O altă contribuție originală este asociată dezvoltării și testării unui SSAD care integrează două funcții: (1) identificare a modelelor comportamentale ale SI-VE, utilizând tehnici de clustering pentru a extrage tipare recurente asociate gradelor de ocupare și consumului de energie și (2) amplasarea optimă a SI-VE în A-REDEE. Acest SSAD permite o planificare eficientă a infrastructurii de încărcare și o distribuție optimizată a resurselor în A-REDEE.

Toate sistemele propuse în cadrul tezei pot sprijini OD în dezvoltarea unor strategii eficiente pentru modernizarea REDEE, facilitând o tranziție sustenabilă către A-REDEE și o mai bună integrare a noilor tehnologii în infrastructura existentă. În concluzie, în cadrul tezei s-a demonstrat că utilizarea unor SSAD bazate pe tehnici de IA oferă soluții inovative pentru planificarea și dezvoltarea A-REDEE. Rezultatele obținute contribuie la eficientizarea procesului decizional, optimizarea investițiilor și accelerarea tranziției către un sistem de distribuție sustenabil și inteligent.

Bibliografie

- [1] Comisia Europeană, *Pactul ecologic european (European Green Deal)*, COM(2019) 640 final, Bruxelles, Belgia, decembrie 2019. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>
- [2] Comisia Europeană, „Fit for 55”: realizarea obiectivului climatic al UE pentru 2030 pe calea către neutralitatea climatică, COM(2021) 550 final, Bruxelles, Belgia, iulie 2021. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX:52021DC0550>
- [3] Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei (ANRE), *Energy Efficiency Trends and Policies in Romania – National Report*, în cadrul proiectului ODYSSEE-MURE, 2020. [Online]. Disponibil: <https://www.odyssee-mure.eu/publications/national-reports/energy-efficiency-romania-nl.pdf>
- [4] Ministerul Energiei, *Strategia Energetică a României 2022–2030, cu perspectiva anului 2050*, Guvernul României, București, 2022. [Online]. Disponibil: https://energie.gov.ro/wp-content/uploads/2022/08/Strategia-2030_DGJRI_AM_12.08.2022_MU_Clean_25.08.2022-1.pdf
- [5] Comisia Europeană, *Pachetul privind clima și energia 2020*, Bruxelles, Belgia, 2008. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX%3A52008DC0030>
- [6] Națiunile Unite, *Acordul de la Paris*, UNFCCC, 2015. [Online]. Disponibil: https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf
- [7] Agenția Europeană de Mediu, *Tendințe și proiecții în Europa 2022 – Monitorizarea progreselor către obiectivele climatice și energetice ale Europei*, Raport EEA nr. 19/2022, Copenhaga, 2022. [Online]. Disponibil: <https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2022>
- [8] Agenția Internațională pentru Energie, *Capacitate netă adăugată de energie electrică din surse regenerabile pe tipuri de tehnologie, 2017–2024*, IEA, 2024. [Online]. Disponibil: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/net-renewable-electricity-capacity-additions-by-technology-2017-2024>
- [9] Curtea de Conturi Europeană, *Energia din surse regenerabile – O contribuție esențială, dar insuficientă la obiectivele UE privind clima*, Raport special nr. 18, Luxemburg, 2023. [Online]. Disponibil: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-18/SR-2023-18_RO.pdf
- [10] Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei, *Ordin nr. 15/2022 pentru aprobarea Metodologiei de stabilire a regulilor de comercializare a energiei electrice produse în centrale electrice din surse regenerabile cu putere electrică instalată de cel mult 400 kW pe loc de consum aparținând prosumatorilor*, Monitorul Oficial nr. 215, 4 martie 2022. [Online]. Disponibil: <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/252374>
- [11] Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene, *Directiva 2012/27/UE privind eficiența energetică*, Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, seria L, nr. 315, pp. 1–56, 14 nov. 2012. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027>
- [12] J. Liu, H. Gao, Z. Ma et al., “Review and prospect of active distribution system planning,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 457–467, 2015. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1007/s40565-015-0170-7>
- [13] B. Zeng, J. H. Zhang, X. Yang et al., “Integrated planning for transition to low-carbon distribution system with renewable energy generation and demand response,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 3, pp. 1153–1165, 2014. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/261719053_Integrated_Planning_for_Transition_to_Low-Carbon_Distribution_System_With_Renewable_Energy_Generation_and_Demand_Response
- [14] A. T. Y. Chong și F. C. Lim, “A review of Smart Grid Technology, Components, and Implementation,” în *Proceedings of the 2020 8th International Conference on Information Technology and Multimedia (ICIMU)*, 2020, pp. 270–275. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/346877119_A_review_of_Smart_Grid_Technology_Components_and_Implementation

- [15] P. Järventausta, S. Repo, A. Rautiainen și J. Partanen, "Smart grid power system control in distributed generation environment," *Annual Reviews in Control*, vol. 34, pp. 277–286, 2010. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.09.001>
- [16] G. Grigoraș, B.-C. Neagu, F. Scarlatache, L. Noroc și E. Chelaru, "Bi-Level Phase Load Balancing Methodology with Clustering-Based Consumers' Selection Criterion for Switching Device Placement in Low Voltage Distribution Networks," *Mathematics*, vol. 9, no. 5, art. 542, 2021. doi: 10.3390/math9050542. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/math9050542>
- [17] T. Kaipia and J. Lassila, "Smart Grid and Energy Market – Strategic Planning of Smart Grids," WP2: Future Infrastructure of Power Systems, 2012. [Online]. Disponibil: <http://sgemfinalreport.fi/files/Strategic%20planning%20of%20smart%20grids.pdf>
- [18] Autoritatea Națională de Reglementare în Domeniul Energiei (ANRE), *Rapoarte privind realizarea indicatorilor de performanță pentru serviciile de transport, de sistem și de distribuție a energiei electrice și starea tehnică a rețelelor electrice din România (2014–2023)*, ANRE, România. [Online]. Disponibil: <https://anre.ro/despre/rapoarte/>
- [19] R. S. Krishnan, J. R. F. Raj, P. Saveetha, P. E. Darney, R. Rajkumar și G. R. Sankar, "Data-Driven Decision Support System for Sustainable Energy Management: An AI-IoT Fusion Approach," în *Proc. 2024 Int. Conf. on Intelligent Computing and Intelligent Communication (ICICI)*, 2024, pp. 569–576. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/icici62254.2024.00099>
- [20] H. Wang, "Flexibility Management in Renewable Energy Source Operated Power Systems using Decision Support System," *J. Electr. Eng. Autom.*, vol. 2, no. 1, pp. 35–42, 2020. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.36548/JEEA.2020.1.004>
- [21] C. Engels, E. Mameghani și L. Jendernalik, "Dynamic DSO Network Development and Planning – Integrated Decision Support in the Face of Uncertainty," în *Proc. IET Conf. Proc.*, 2024. [Online]. Disponibil: <https://digital-library.theiet.org/doi/10.1049/icp.2024.1964>
- [22] F. Zhuang și W. Du, "Intelligent Decision Support System for Distribution Network Planning Based on Artificial Intelligence and GIS Technology," în *Proc. IEEE Adv. Inf. Manage., Commun., Electron. and Autom. Control Conf.*, vol. 5, pp. 1934–1938, 2022. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/IMCEC55388.2022.10019346>
- [23] Z. Tian și Y. Zhang, "Strategic Decision-Making Support for Distribution System Planning with Flexibility Alternatives," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 35, art. 01138, 2023. [Online]. Disponibil: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023SEGN...3501138T/abstract>
- [24] EirGrid și ESB Networks, *DSO/TSO Multi-Year Plan 2023–2027*, 2023. [Online]. Disponibil: https://cms.eirgrid.ie/sites/default/files/publications/Multi-year_DSO-TSO_WorkPlanCovering2023-2027.pdf
- [25] S. A. Pramono, E. S. Wahyuningsih, B. Basuki, *et al.*, "Applying Artificial Intelligence Algorithms for Optimizing the Electricity Distribution Network," *J. Embedded Syst. Secur. Intell. Syst.*, 1 Nov. 2024. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/386289396_Applying_Artificial_Intelligence_Algorithms_for_Optimalizing_The_Electricity_Distribution_Network
- [26] M. Zhou, L. Ma, T. Zhang, *et al.*, "Artificial intelligence empowerment in China's energy landscape: enhancing power grid investment efficiency," *Front. Energy Res.*, vol. 12, 2024. [Online]. Disponibil: <https://doaj.org/article/5fb8a28dc54d4889946b24b459f7ffe5>
- [27] P. Arévalo și F. Jurado, "Impact of Artificial Intelligence on the Planning and Operation of Distributed Energy Systems in Smart Grids," *Energies*, vol. 17, no. 17, art. 4501, 2024. [Online]. Disponibil: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/17/4501>
- [28] H. O. Buitrón-Barros, "Integración de inteligencia artificial en redes eléctricas inteligentes y su potencial transformador," *Horizon Nexus J.*, apr. 2024. [Online]. Disponibil: <https://www.semanticscholar.org/paper/Integración-de-inteligencia-artificial-en-redes-y-Buitrón-Barros/6c7be2ca1f5b87bf76fdb86436628720328644fc>
- [29] A. Oukairia, A. Karime, V. Roberge, *et al.*, "Toward Increased Energy Efficiency and Proactive Management of Electrical Grids Based on AI," în *Proc. 2024 IEEE Int. Conf. on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, 2024. [Online]. Disponibil: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10690565>

- [30] S. Castellanos, M.-C. Alvarez-Hérault și P. Lalanda, "Decision Support Tool for the Development of Power Distribution Networks Based on AI Planning," în *Proc. 2023 IEEE Int. Conf. on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 2023. [Online]. Disponibil: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10267542>
- [31] M. Barukčić, G. Kurtović, T. Benšić, *et al.*, "Optimal Allocation and Energy Management of Units in Distribution Networks with Multiple Renewable Energy Sources and Battery Storage Based on Computational Intelligence," *Energies*, vol. 16, no. 22, art. 7567, 2023. [Online]. Disponibil: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/22/7567>
- [32] S. Zhang, X. Xu, J. Yin, *et al.*, "Simulation of Power Grid Investment Decision Evaluation Model Based on Improved Genetic Algorithm," în *Proc. 2024 IEEE Int. Conf. on Artificial Intelligence and Computer Applications (ICAICA)*, 2024. [Online]. Disponibil: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10597235>
- [33] J. Xu, J. Liu, Z. Zhang, *et al.*, "Intelligent Distribution Optimization of Distribution Network Based on Multi-objective Genetic Algorithm," în *Proc. 2022 IEEE 4th Int. Conf. on Computer Science and Educational Informatization (CSEI)*, 2022. [Online]. Disponibil: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10079041>
- [34] D. J. Power, *Decision Support Systems: Concepts and Resources for Managers*, 2nd ed., New York, NY, USA: Business Expert Press, 2012. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/324690241_Decision_Support_Systems_Concepts_and_Resources_for_Managers
- [35] F. Pilo, G. L. Celli, E. Ghiani, and G. G. Soma, "New electricity distribution network planning approaches for integrating renewable," *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, vol. 2, no. 2, pp. 140–157, 2013, doi: [10.1002/wene.70](https://doi.org/10.1002/wene.70).
- [36] K. Kaliappan, S. D. Raj, R. Bhavani, N. Nagarajan, G. V. Londhe, and P. S. D. B. Raju, "Integration of RES and AI for Grid Distribution Network Energy Management," *Electric Power Components and Systems*, 2024, doi: [10.1080/15325008.2024.2338554](https://doi.org/10.1080/15325008.2024.2338554).
- [37] H. Jiang and H. Liu, "Research on Multi-Objective Optimization Strategy of Active Distribution Network Based on Network Reconfiguration and Demand Response," in *Proc. 2024 IEEE Conf. on Power and Energy Engineering (CIRED)*, pp. 1371–1382, 2024, doi: [10.1109/ciced63421.2024.10754473](https://doi.org/10.1109/ciced63421.2024.10754473).
- [38] A. Mohammad, M. Khalid, and M. M. Gulzar, "Transforming the grid: AI, ML, renewable, storage, EVs, and prosumers," in *Future Grid Integration*, Elsevier, 2024, pp. 3–30, doi: [10.1016/b978-0-443-15806-3.00001-2](https://doi.org/10.1016/b978-0-443-15806-3.00001-2).
- [39] H. Ren, W. Zhou, W. Gao, and Q. Wu, "A decision support system for economically optimal plan of distributed energy systems," *China Int. Conf. on Electricity Distribution (CICED)*, 2010, pp. 1–6. [Online]. Available: <http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.ieee-000005736188>
- [40] J. Keen, C. Mather, M. Baggu, *et al.*, *Distribution Capacity Expansion Planning: Current Practice, Opportunities, and Decision Support*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), Tech. Rep. NREL/TP-5D00-78900, Nov. 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/1898008>
- [41] D. Wang, "Research and development of intelligent decision support system for distribution network planning based on GIS," in *Proc. 2023 Int. Conf. on Data Science, Computation and Applications (ICDSCA)*, pp. 786–791, 2023. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/icdsca59871.2023.10393356>
- [42] Z. Aung, *Database Systems for the Smart Grid*, Green Energy and Technology, Springer, July 2013. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/288153001_Database_Systems_for_the_Smart_Grid
- [43] C. W. Holsapple și A. B. Whinston, *Decision Support Systems: A Knowledge-Based Approach*, Minneapolis, MN, USA: West Publishing Company, 1996. [Online]. Disponibil: <https://archive.org/details/decisionsupports0000hols>
- [44] D. J. Power, "A brief history of decision support systems," DSSResources.com. [Online]. Disponibil: <https://dssresources.com/history/dsshhistory.html>
- [45] Y.-Y. Hsu și J.-L. Chen, *Distribution planning using a knowledge-based expert system*, în *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 5, nr. 3, pp. 1514–1519, iul. 1990. DOI: 10.1109/61.57995. Disponibil online: <https://doi.org/10.1109/61.57995>

- [46] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- [47] A. Banerjee, M. Gavrilas, G. Grigoras și S. Chattopadhyay, „A fuzzy hybrid approach for reliability optimization problem in power distribution systems,” *2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iași, România, 2016, pp. 809–814. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/ICEPE.2016.7781440>
- [48] B. Neagu și G. Grigoras, „Assessment of Slow Voltage Variations from the Electric Distribution Systems with Fuzzy Techniques,” *Proceedings of the 7th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, București, România, 2015. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/ECAI.2015.7301185>
- [49] G. Grigoras, G. Cârțină, E. C. Bobric și Fl. Rotaru, „Evaluation of the performances of efficient transformers in distribution networks by fuzzy techniques,” *12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Brașov, România, 2010, pp. 1281–1284. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2010.5510449>
- [50] A. K. Jain, „Data clustering: 50 years beyond K-means,” *Pattern Recognition Letters*, vol. 31, no. 8, pp. 651–666, 2010. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2009.09.011>
- [51] G. Grigoras, B. C. Neagu, Fl. Scarlatache, C. Schreiner, and R. Ciobanu, "Identification of pilot nodes for secondary voltage control using K-means clustering algorithm," in *Proc. 2017 IEEE 26th Int. Symp. on Industrial Electronics (ISIE)*, Edinburgh, UK, pp. 106–110, 2017. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001259>
- [52] Y. Yuan, X. Yuan, H. Wang, M. Tang și M. Li, "Net load forecasting method in distribution grid planning based on LSTM network," *Science and Technology for Energy Transition*, vol. 79, p. 57, 2024. Disponibil online: <https://doi.org/10.1051/stet/2024057>
- [53] L. M. O. De Queiroz, C. Cavellucci, J. F. V. Gonzalez și V. J. Garcia, "Decision Support System to Design Distribution Networks," aprilie 2007. [Online]. Disponibil: https://www.researchgate.net/publication/228542670_Decision_support_system_to_design_distribution_networks
- [54] Națiunile Unite, *Protocolul de la Kyoto la Convenția-cadru a Națiunilor Unite asupra schimbărilor climatice*, UNFCCC, 1997. [Online]. Disponibil: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kprom.pdf>
- [55] Comisia Europeană, *Pachetul "Energie curată pentru toți europenii"*, Bruxelles, Belgia, 2016. [Online]. Disponibil: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en
- [56] Legea nr. 220/2008 privind stabilirea sistemului de promovare a producerii energiei din surse regenerabile de energie, Monitorul Oficial al României, Partea I, nr. 743, 3 noiembrie 2008. [Online]. Disponibil: <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/98742>
- [57] Centrul pentru Studii de Energie Durabilă, „Rolul prosumatorilor în viitorul sistem energetic,” nov. 2018. [Online]. Disponibil: <https://www.ntnu.edu/documents/1276062818/1283878281/>
- [58] Comisia Europeană, „O strategie privind energia solară pentru Uniunea Europeană”, COM(2022) 221 final, Bruxelles, Belgia, mai 2022. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221>
- [59] **E. Chelaru**, G. Grigoras, L. Noroc, B.-C. Neagu, and O. Ivanov, "An Efficient Integration Strategy of the Prosumers in the Active Electric Distribution Networks," in *Proc. 14th Int. Conf. Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)*, 2022, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/ECAI54874.2022.9847303>
- [60] Comisia Europeană, „Regulamentul (UE) nr. 548/2014 al Comisiei din 21 mai 2014 de punere în aplicare a Directivei 2009/125/CE a Parlamentului European și a Consiliului în ceea ce privește cerințele de proiectare ecologică aplicabile transformatoarelor de putere”, Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, seria L, nr. 152, 22 mai 2014, pp. 1–24. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/RO/TXT/?uri=CELEX%3A32014R0548>
- [61] **E. Chelaru**, G. Grigoras, L. Noroc, Ș. Galbau, B.-C. Neagu și O. Ivanov, „Assessing the Modernization Process of a Transformer Fleet in the Electric Distribution Networks. Case Study in Romania – Simulation of the modernization process of the transformer fleet from the operation area of the Distribution Network Operators in Romania in the period 2020–2030,” în *Proc. 16th Int. Conf.*

- Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG)*, Tg. Mureș, România, 6–7 oct. 2022. [Online]. Disponibil: https://doi.org/10.1007/978-3-031-31600-4_37
- [62] Agenția Națională de Reglementare în Domeniul Energiei (ANRE), *Normativ tehnic energetic privind determinarea consumului tehnologic propriu în rețelele electrice de interes public - NTE 16/013/00*, 2016. [Online]. Disponibil: <https://www.anre.ro/ro/legislatie/norme-tehnice/normative-tehnice-energetice-nte>
- [63] E. Chelaru și G. Grigoraș, "Decision Making Strategies to Establish the Replacement Priority of Transformers from Electric Distribution Substations," *Proc. 2020 Int. Conf. and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*, Iași, România, 2020, pp. 119–124. doi: [10.1109/EPE50722.2020.9305627](https://doi.org/10.1109/EPE50722.2020.9305627)
- [64] G. Grigoraș, F. Scarlatache și B. Neagu, *Clustering in Power Systems. Aplicații*, Lambert Academic Publishing, Germania, 2016. [Online]. Disponibil: <https://www.amazon.com/Clustering-Systems-Applications-Florina-Scarlatache/dp/3330015454>
- [65] M. Z. Hossain, M. N. Akhtar, R. B. Ahmad și M. Rahman, „A dynamic K-means clustering for data mining,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 13, nr. 2, pp. 521–526, 2019. [Online]. Disponibil: <https://ijeecs.iaescore.com/index.php/IJECS/article/view/16674>
- [66] F. Wang, H. H. Franco-Penya, J. D. Kelleher, J. Pugh și R. Ross, „An analysis of the application of simplified silhouette to the evaluation of k-means clustering validity,” *Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 10358, Springer, Cham, 2017, pp. 335–349. [Online]. Disponibil: https://doi.org/10.1007/978-3-319-62416-7_24
- [67] G. Grigoraș, F. Scarlatache și G. Cârțină, „Load estimation for distribution systems using clustering techniques,” *Proc. Int. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Brașov, România, 2012, pp. 301–306. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2012.6231861>
- [68] G. Grigoraș, M. Gavrilă, S. Buliga și C. Strugaru, „Solutions regarding the efficient use of transformers in electric distribution networks,” *Energetica Magazine*, vol. 63, nr. 4, pp. 145–149, 2015.
- [69] G. Grigoraș, F. Scarlatache și B. C. Neagu, „Analysis of energy saving solutions based on replacement of distribution transformers,” *Proc. 2017 Int. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conf. on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Brașov, România, pp. 66–71, 2017. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/OPTIM.2017.7975057>
- [70] E. Chelaru, G. Grigoraș, L. Noroc, B.-C. Neagu, and F. Scarlatache, "Influence of the Prosumers on the Replacement Strategies of the Aged Transformers from the Electric Distribution Networks," in *Proc. 13th Int. Conf. on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN)*, Chișinău, Rep. Moldova, Oct. 7–8, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/SIELMEN53755.2021.9600425>
- [71] S. Miyamoto, R. Abe, Y. Endo și J.-i. Takeshita, „Ward method of hierarchical clustering for non-Euclidean similarity measures,” *2015 7th International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPar)*, Fukuoka, Japonia, 2015, pp. 60–63, doi: 10.1109/SOCPAR.2015.7492784
- [72] Curtea de Conturi Europeană, *Reducerea emisiilor de dioxid de carbon generate de autoturisme*, 2024. [Online]. Disponibil: https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-01/SR-2024-01_RO.pdf
- [73] Parlamentul European și Consiliul Uniunii Europene, Regulamentul (UE) 2023/1804 privind infrastructura pentru combustibili alternativi, Jurnalul Oficial al Uniunii Europene, L 234, pp. 1–45, 22 sept. 2023. [Online]. Disponibil: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1804/oj>
- [74] International Energy Agency, *Global EV Outlook 2024 – Trends in Electric Cars*. [Online]. Disponibil: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024/trends-in-electric-cars>
- [75] J. Lassila, T. Kaipia, J. Haakana și J. Partanen, *Concept of strategic planning in electricity distribution business*, *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 5, nr. 4, 2011. Disponibil online: https://www.researchgate.net/publication/235263413_Concept_of_strategic_planning_in_electricity_distribution_business
- [76] E. Chelaru and G. Grigoraș, "K-Means Clustering-based Optimal Placement Methodology of Electric Vehicle Charging Stations in Photovoltaic Rich Distribution Networks," in *Proc. 7th Int. Conf. of the Doctoral School*, Iași, Romania, May 14–16, 2024, p. 16. [Online]. Disponibil: https://conferinta-csd.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2024/05/Book_of_Abstracts_updated_14_mai_cover.pdf

- [77] I. H. Sarker, "Data Science and Analytics: An Overview from Data-Driven Smart Computing, Decision-Making and Applications Perspective," *SN Computer Science*, vol. 2, art. 377, 2021. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1007/s42979-021-00765-8>.
- [78] S. Ali, T. Abuhmed, S. El-Sappagh, K. Muhammad, J. M. Alonso-Moral, R. Confalonieri, R. Guidotti, J. Del Ser, N. Díaz-Rodríguez și F. Herrera, „Explainable Artificial Intelligence (XAI): What we know and what is left to attain Trustworthy Artificial Intelligence,” *Information Fusion*, vol. 99, art. 101805, 2023. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101805>
- [79] V. Dandea, G. Grigoraș, B.-C. Neagu și F. Scarlatache, "K-means Clustering-based Data Mining Methodology to Discover the Prosumers' Energy Features," în *Proceedings of the 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, București, România, 2021. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.1109/ATEE52255.2021.9425237>
- [80] A. M. Ikotun, A. E. Ezugwu, L. Abualigah, B. Abuhaija, and J. Heming, "K-means clustering algorithms: A comprehensive review, variants analysis, and advances in the era of big data," *Information Sciences*, vol. 622, pp. 178–210, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2022.12.022>
- [81] Y. Liu, Y. Hong, and C. Hu, "Research on Big Data Mining Technology of Electric Vehicle Charging Behaviour," *Elektronika Ir Elektrotehnika*, vol. 25, pp. 55–61, 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.5755/j01.eie.25.2.23420>
- [82] G. Grigoraș și B.-C. Neagu, "Smart meter data-based three-stage algorithm to calculate power and energy losses in low voltage distribution networks," *Energies*, vol. 12, nr. 15, art. 3008, iul. 2019. [Online]. Disponibil: <https://doi.org/10.3390/en12153008>

ANEXA 1 – Lista de lucrări

A. Capitol carte publicat în editură internațională indexat WoS

1. Gheorghe Grigoraș, Bogdan-Constantin Neagu Livia Noroc, **Ecaterina Chelaru**, *New Smart Devices-Based Strategies for Optimal Planning and Operation of Active Electric Distribution Networks*, Capitolul 10 in cartea *Power System Strength Evaluation methods, best practice, case studies, and applications*, Editori: Hassan Haes Alhelou, Nasser Hosseinzadeh, Behrooz Bahrani, The Institution of Engineering and Technology (IET), UK, 2023, ISBN-13: 978-1-83953-807-0, WOS:001257099100012.

B. Lucrări publicate în reviste indexate WoS

2. Gheorghe Grigoraș, Livia Noroc, **Ecaterina Chelaru**, Florina Scarlatache, Bogdan-Constantin Neagu, Ovidiu Ivanov, Mihai Gavrilăș, *Coordinated Control of Single-Phase End-Users for Phase Load Balancing in Active Electric Distribution Networks*, *Mathematics*, vol. 9, nr. 21, 2662, 2021, WOS:000719474900001 (Q1) (Factor impact: 2.3)
3. Gheorghe Grigoraș, Bogdan Neagu, Florina Scarlatache, Livia Noroc, **Ecaterina Chelaru**, *Bi-Level Phase Load Balancing Methodology with Clustering-Based Consumers' Selection Criterion for Switching Device Placement in Low Voltage Distribution Networks*, *Mathematics*, vol. 9, nr. 5, 542, 2021, WOS:000628360100001 (Q1) (Factor impact: 2.3)

C. Lucrări în volume ale conferințelor indexate WoS

4. **Ecaterina Chelaru**, Livia Noroc, Gheorghe Grigoraș, Bogdan-Constantin Neagu, *Energy Losses Estimation in the Electric Distribution Networks Using Clustering-Based Selection of the Representative Feeders*, 15th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2021, Targu Mures, Romania, 7 - 8 octombrie 2021, *Lecture Notes in Networks and Systems*, vol 386. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93817-8_47 WOS:000773080200047.
5. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoras, *Decision Support System to Determine the Replacement Ranking of the Aged Transformers in Electric Distribution Networks*, 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), 25-27 Iunie, Bucuresti, 2020, WOS:000627393500000

D. Lucrări publicate în reviste indexate BDI

6. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, *An Improved Strategy Based on a Multi-Criteria Analyse to Replace Transformers in Electric Distribution Networks*, *Buletinul Institutului Politehnic din Iasi, Secția: Electrotehnică, Energetică, Electronică*, Volumul 66 (70), Nr. 3, pp. 45-62, 220, ISSN 1223-8139 (Index Copernicus, getCITED, Ulrich's), cod CNCSIS: 87.

E. Lucrări publicate în volume ale conferințelor indexate BDI

7. **Ecaterina Chelaru**, Vasilica Dandea, Livia Noroc, Gheorghe Grigoraș, *Determining the Occupancy Patterns and Typical Power Demand Profiles of the Electric Vehicle Charging Stations Using a Flexible Clustering-based Data Mining Framework*, International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), Craiova, Romania, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/SIELMEN59038.2023.10290841. (IEEE Xplore)
8. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, Livia Noroc, Bogdan-Constantin Neagu and Ovidiu Ivanov, *An Efficient Integration Strategy of the Prosumers in the Active Electric Distribution Networks*, 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI), Ploiesti, Romania, 30 iunie – 1 iulie 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/ECAI54874.2022.9847516 (IEEE Xplore)
9. Livia Noroc, Gheorghe Grigoraș, Vasilica Dandea, **Ecaterina Chelaru**, Bogdan-Constantin Neagu, *An Efficient Voltage Control Methodology in LV Networks Integrating PV Prosumers Using Distribution Transformers with OLTC*, 2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference, Brasov, Romania, 25-29 septembrie, 2022, DOI: 10.1109/PEMC51159.2022.9962862 (IEEE Xplore)
10. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, Livia Noroc, Ștefania Gălbau, Bogdan-Constantin Neagu, Ovidiu Ivanov, *Assessing The Modernization Process of A Transformer Fleet In The Electric Distribution Networks. Case Study In Romania*, 16th International Conference Interdisciplinarity in Engineering. Inter-Eng 2022, Tg. Mures, Romania, 6 -7 octombrie, Lecture Notes in Networks and Systems, vol 605. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22375-4_51 (Springer)
11. Livia Noroc, Gheorghe Grigoras, **Chelaru, Ecaterina**, Dandea, Vasilica, Neagu, Bogdan Constantin, *Voltage Control Strategy Using the Rule-Based Reasoning in LV Distribution Networks with PV Penetration Integrating OLTC-Fitted Transformer*, 2022 International Conference on Electrical and Power Engineering (EPE 2022), Iași, Romania, 20-22 octombrie 2022, DOI: 10.1109/EPE56121.2022.9959847 (IEEE Xplore)
12. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, Livia Noroc, Bogdan-Constantin Neagu, and Florina Scarlatache, *Influence of the Prosumers on the Replacement Strategies of the Aged Transformers from the Electric Distribution Networks*, 13th Interantional Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 7-8 Octombrie, 2021, Chisinau, Rep. Moldova. DOI: 10.1109/SIELMEN53755.2021.9600425 (IEEE Xplore)
13. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, *Decision Making Strategies to Establish the Replacement Priority of Transformers from Electric Distribution Substations*, 11th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE2020), Iasi, Romania, 2020. DOI: 10.1109/EPE50722.2020.9305627 (IEEE Xplore)

F. Lucrări prezentate în conferințe neindexate BDI

14. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, *K-Means Clustering-based Optimal Placement Methodology of Electric Vehicle Charging Stations in Photovoltaic Rich Distribution Networks*, 7th International Conference of the Doctoral School, Iasi, Romania, 14- 16 mai, 2024, https://conferinta-csd.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2024/05/Book_of_Abstracts_updated_14_mai_cover.pdf
15. **Ecaterina Chelaru**, Gheorghe Grigoraș, *A Decision-Making Methodology to Replace the Aging Transformers from the Electric Distribution Networks Considering the Penetration Degree of the Prosumers*, 4th International Conference of the Doctoral School, Iasi, Romania, 19 – 21 mai, 2021, https://conferinta-csd.tuiasi.ro/wp-content/uploads/2024/05/Book_of_Abstracts_updated_14_mai_cover.pdf

G. Membru în granturi de cercetare

Granturi interne – PUBLICAȚII, Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași”, contract nr. GI /P19 /2021 (membru în echipă)