



Universitatea POLITEHNICA din București  
Școala Doctorală din cadrul Facultății de Energetică  
Splaiul Independenței 313, București 060042



Titlul Tezei de Doctorat:

## **DEZVOLTAREA UNUI SISTEM AVANSAT DE MANAGEMENT ENERGETIC**

---

Student Doctorand:  
As. Drd. Ing. Cristian GHEORGHIU

Cadru Didactic Îndrumător:  
Prof. Dr. Ing. Stefan GHEORGHE

Iunie 2022

## **REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

### **CUPRINS:**

|  |    |
|--|----|
| Cuvinte Cheie: .....   | 2  |
| 1. Introducere .....   | 3  |
| 1.1. Cadrul legislativ și de reglementare.....   | 3  |
| 1.2. Obiectivele Generale și Specifice ale Tezei de Doctorat .....                         | 5  |
| 2. Aspecte teoretice relevante .....   | 6  |
| 2.1. Sisteme de Management Energetic .....   | 6  |
| 2.2. Evaluarea Performanței Energetice.....  | 8  |
| 2.3. Evaluarea Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice .....                | 10 |
| 2.4. Digitalizarea în contextul Managementului Energetic.....                              | 12 |
| 3. Dezvoltarea Sistemului Avansat de Management Energetic .....                            | 12 |
| 3.1. Dezvoltarea, implementarea și testarea sistemului de monitorizare .....               | 14 |
| 3.2. Dezvoltarea, implementarea și testarea modulelor de analiză .....                     | 17 |
| 3.3. Integrarea modulelor de analiză în SAME.....  | 29 |
| 3.4. Dezvoltarea interfeței grafice – Interfața om-mașină (HMI) .....                      | 32 |
| 4. Implementarea sistemului. Rezultate obținute și studii de caz.....                      | 33 |
| 4.1. S.C. – Identificarea unor AIICTEE – Limitare regim deformant de curent electric ..... | 33 |
| 4.2. S.C. – Prognoza cererii de putere activă .....  | 35 |
| 5. Concluzii. Contribuții personale. Direcții viitoare de Cercetare .....                  | 38 |
| 5.1. Concluzii .....   | 38 |
| 5.2. Contribuții personale.....  | 41 |
| 5.3. Direcții viitoare de cercetare .....  | 42 |
| Bibliografie Selectivă.....  | 43 |

### **Cuvinte Cheie:**

*Eficiență Energetică, Calitatea Tehnică a Energiei Electrice, Servicii Energetice, Digitalizare*

## 1. Introducere

În contextul geo-politic și de piață actual în care trilema energetică, securitate energetică, accesibilitate energetică, sustenabilitate, devine o problemă esențială la nivel mondial și european, Teza de Doctorat intitulată "Dezvoltarea unui Sistem Avansat de Management Energetic" propune o structură logică și un model tehnico-economic prin intermediul cărora utilizatorii finali de energie pot identifica, cuantifica din punct de vedere tehnic și financiar și susține implementarea de Acțiuni de Îmbunătățire a Performanțelor Energetice (AIPE) și de Acțiuni de Îmbunătățire a Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice (AICTEE).

Prin implementarea Sistemului Avansat de Management Energetic (SAME) propus în cadrul Tezei de Doctorat, utilizatorii finali pot identifica, în timp real, potențiale măsuri de creștere a performanțelor energetice, deficiențe privind performanța indicatorilor de calitate tehnică a energiei electrice și pot evalua potențialul tehnic, energetic și financiar de implementare de proiecte de generare distribuită a energiei electrice.

Identificarea în timp real permite utilizatorului identificarea și aplicarea rapidă de măsuri de natură organizatorică și fără costuri investiționale semnificative, în timp ce analiza pe termen mediu-lung permite acestuia identificarea de acțiuni de îmbunătățire a performanțelor energetice de tip investițional – pe care acesta le poate evalua corect și precis din punct de vedere al performanțelor financiare generate, având o bună înțelegere asupra evoluției performanțelor energetice globale.

Toate aceste aspecte pot conduce la reducerea semnificativă a necesarului de energie electrică achiziționată din Sistemul Electroenergetic Național (SEN) și pot, prin urmare, conduce la o creștere a profitabilității globale a conturului energetic la nivelul căruia SAME este implementat.

### 1.1. Cadrul legislativ și de reglementare

Legislația Europeană, aflată într-un continuu proces de schimbare în sensul creșterii ambiției obiectivelor privind tranziția către sustenabilitate, reprezintă fundamentul de bază al necesității dezvoltării SAME (Sistemul Avansat de Management Energetic), acesta putând fi o unealtă importantă prin intermediul căreia utilizatorii finali de energie să poată veni în întâmpinarea cerințelor și țintelor impuse de legislația europeană și națională, în toate domeniile relevante: **Eficiență energetică, Calitatea tehnică a energiei electrice și Generarea distribuită de energie electrică.**

Pentru a putea identifica sectoarele energetice cu un potențial ridicat de economisire a resurselor energetice la nivelul cărora SAME se poate implementa, a fost realizată atât o analiză exhaustivă a principalelor prevederi legislative și de reglementare aferente domeniului Eficienței Energetice, cât și o analiză a literaturii de specialitate.

La nivel național, cadrul de reglementare este elaborat de către Autoritatea Națională de Reglementare în domeniul Energiei (ANRE), pornind de la legile în vigoare. În acest sens, domeniul eficienței energetice se află sub incidența directă a unui număr de Legi, Hotărâri și Ordine ce reglementează eficiența energetică, performanța energetică a clădirilor, obligațiile utilizatorilor finali de energie în raport cu instituțiile statului în materie de raportări periodice, metodele de promovare a producerii energiei electrice din surse regenerabile dar și sectorul serviciilor energetice (audit și management energetic).

Aplicarea cadrului de reglementare ar trebui să conducă un utilizator la optimizarea indicatorilor de performanță energetică până la sfârșitul perioadei asumate prin planul de îmbunătățire a eficienței energetice. Acest obiectiv este însă greu de atins. Cele mai importante aspecte, cu cea mai mare influență negativă asupra eficienței diferitelor măsuri de creștere a indicatorilor de eficiență energetică includ, fără a se limita la: lipsa monitorizării / contorizării diferitelor fluxuri de energie, imposibilitatea corelării consumurilor diferitelor forme de energie cu produsul finit, lipsa asigurării unei comunicări corecte între managerul energetic și factorii decizionali ai entității economice (managementul superior), lipsa educării energetice a tuturor angajaților și lipsa interesului pentru eficiența energetică a conducerii întreprinderilor în care costul energiei în costul total nu este nesemnificativ.

În scopul atingerii obiectivelor de eficiență energetică, Organizația Internațională pentru Standardizare – ISO – a definit, conceput și elaborat o serie de Standarde ce oferă îndrumare pentru orice tip de utilizator de energie (industrial, terțiar, public, rezidențial) în vederea implementării unui Sistem de Management Energetic (SME) adecvat situației existente – familia de standarde ISO:50001-50015.

Comisia Europeană a decis, la finele anului 2019, ca Eficiența Energetică să devină o prioritate la nivelul Uniunii Europene – *Energy Efficiency First!*, noua țintă fiind de creștere a eficienței energetice cu minimum 32,5% până în anul 2030 față de scenariul BAU (Business As Usual), prin implementarea practică în legislație a obligației de a obține economii de energie în perioada 01.01.2021 – 31.12.2030, revizuirea reglementărilor privind monitorizarea și facturarea energiei termice și creșterea eficienței energetice a proceselor de încălzire și răcire. Pentru atingerea acestor obiective, Uniunea Europeană propune ca primă dimensiune a Strategiei **moderarea cererii de energie**.

Suplimentar, în cea de-a doua jumătate a anului 2021, a fost lansat pachetul de propuneri legislative intitulat *Fit for 55*, prin care Uniunea Europeană propune creșterea țintei privind lupta împotriva schimbărilor climatice. Prin acest pachet, Uniunea Europeană propune crearea unui sistem nou de tranzacționare a certificatelor de CO<sub>2</sub> pentru sectoarele transport și clădiri până în 2026, crescând astfel obligativitatea reducerii emisiilor de CO<sub>2</sub> echivalent de la 40% la 61% până la finalul anului 2030, referința fiind stabilită la nivelul anului 2005.

Noua dimensiune a Uniunii Europene este aceea că *"Poluatorul Plătește!"*, așa cum a fost detaliată în Directiva 2004/35/CE modificată și actualizată în data de 17/06/2020, în sensul în care orice companie care provoacă daune mediului înconjurător este direct răspunzătoare pentru acestea și este obligată să ia toate măsurile de reparare sau de prevenire, suportând toate costurile aferente.

Devine așadar extrem de important ca utilizatorii finali să poată monitoriza, cu un grad ridicat de precizie, impactul asupra mediului generat de activitatea lor curentă, pentru a putea identifica în timp util acțiunile preventive de limitare a acestuia, minimizând astfel cheltuielile pe termen lung generate de adoptarea acestei noi dimensiuni europene.

În ceea ce privește ponderea energiei produse din surse regenerabile în mixtul total de energie, *Fit for 55* crește ținta de la 32% la 40% până în anul 2030. În ceea ce privește eficiența energetică, aceasta rămâne o prioritate absolută chiar și în noua viziune prezentată de *Fit for 55*, țintele Uniunii Europene au fost ridicate de la 32,5% până la 36-39%. Noutatea absolută este reprezentată de caracterul de obligativitate al creșterii performanțelor energetice și de scădere cu până la 9% a necesarului total de energie, raportat la scenariul de referință.

Din punct de vedere al Eficienței Energetice, SAME a fost implementat și testat la nivelul mai multor tipuri de utilizatori finali, atât din sectorul terțiar (clădiri de birouri), cât și din sectorul industrial, după cum se va prezenta în cadrul Capitolului 3 și 4.

Prin componentele de prognoză a cererii de energie și de analiză statistică a evoluției performanței energetice (utilizând Indicatori de Performanță Energetică specifici sectorului energetic analizat), SAME permite atingerea obiectivelor privind eficiența energetică și, implicit, tranziția către sustenabilitate a utilizatorilor finali.

În cadrul Tezei de Doctorat a fost propusă o metodologie de evaluare tehnică, energetică și financiară a contribuției pe care diferiți Indicatori de Calitate Tehnică a Energiei Electrice o generează asupra conturului energetic analizat, demonstrând așadar faptul că luarea în considerare a ICTEE în cadrul etapei de elaborare a Planurilor de Îmbunătățire a Performanțelor Energetice este esențială și generează un impact major asupra gradului de atingere a obiectivelor de reducere de emisii de gaze cu efect de seră. În acest sens, pentru dezvoltarea modulelor de analiză a ICTEE, a fost realizată o sinteză privind reglementările în vigoare, atât la nivel internațional, cât și la nivel național, referitoare la valorile limită ale acestora.

A fost identificat faptul că, din punct de vedere al ICTEE cu un potențial ridicat de contribuție la creșterea performanțelor energetice ale utilizatorilor finali (dezechilibrul curenților electrici, factorul total de distorsiune armonică de curent electric etc.), reglementările existente nu impun valori limită. Drept urmare, în cadrul metodologiei propuse au fost identificate (pentru contururile energetice analizate) plaje de variație a acestor ICTEE care să permită maximizarea performanțelor energetice globale.

Realizarea SAME a avut la bază principiile prezentate în cadrul acestui capitol, pornind de la ideea că monitorizarea exhaustivă a utilizării energiei reprezintă piatra de temelie a oricărui Program de Îmbunătățire a Performanțelor Energetice.

Cu toate că obiectivul principal al SAME constă în creșterea performanței energetice și a profitabilității conturului energetic la nivelul căruia este implementat, prin atingerea acestor obiective, SAME poate genera un efect de domino la nivel macroeconomic, prin reducerea cererii de energie electrică la nivel de rețea, o parte din aceasta fiind în prezent produsă din surse convenționale. De asemenea, reducerea cererii de energie electrică la nivel de utilizator final conduce și la diminuarea pierderilor de putere și energie în rețelele electrice din amonte (distribuție și transport).

## 1.2. Obiectivele Generale și Specifice ale Tezei de Doctorat

Elaborarea tezei de doctorat a plecat de la necesitatea dezvoltării unui instrument (hardware și software) care să realizeze monitorizarea parametrilor care determină creșterea performanțelor energetice a utilizatorilor finali de energie electrică, în condiții de calitate corespunzătoare a energiei electrice, dar și care să susțină implementarea de proiecte de producere distribuită a energiei electrice din surse regenerabile.

Pentru aceasta, teza de doctorat are la bază următoarele Obiective Generale:

- O.G.1.** Documentarea și identificarea principalelor concepte, indicatori, aspecte legislative și norme tehnice utilizate în dezvoltarea **SAME** – au fost avute în vedere analize de documentare privind identificarea altor soluții existente în piață (TRL>9) sau aflate la nivel de cercetare (TRL<9);
- O.G.2.** Dezvoltarea schemei logice de bază a **SAME** – prin atingerea acestui obiectiv a fost realizat algoritmul logic urmat în proiectarea soluției hardware și software;
- O.G.3.** Stabilirea contururilor energetice relevante pentru dezvoltarea experimentală a **SAME** – acest pas a permis identificarea condițiilor optime de testare și validare a rezultatelor ce vor fi obținute prin implementarea **SAME**, dar și identificarea principalelor îmbunătățiri ce pot fi aduse **SAME** în viitor;

**O.G.4.** Dezvoltarea hardware și software a **SAME** – prin atingerea acestui obiectiv, conceptul **SAME** a fost materializat într-un sistem complet funcțional, pregătit pentru etapa de testare, validare și optimizare.

**O.G.5.** Testarea, validarea și optimizarea **SAME** – testarea și validarea rezultatelor obținute prin studiile de caz prezentate în cadrul Capitolului 4, utilizând contururile energetice identificate în cadrul O.G.3, pun în evidență viabilitatea și replicabilitatea soluției cercetate și realizate. În cadrul tezei de doctorat a fost realizat și un pas de îmbunătățire și optimizare a soluției, după testarea performanțelor acesteia pe un contur energetic, în sensul implementării unor funcții suplimentare de predicție a evoluției necesarului de energie electrică, indicatorilor de performanță energetică și indicatorilor de calitate tehnică a energiei electrice, cu luarea în considerare a unui număr extins de factori variabili externi.

## 2. Aspecte teoretice relevante

În vederea dezvoltării **SAME** și atingerii O.G.1 și O.G.2, primul pas a constat în evaluarea situației existente în piața Sistemelor de Management Energetic.

Pentru a asigura o replicabilitate cât mai mare a **SAME** și o performanță ridicată, a fost realizată o analiză amănunțită a principalilor Indicatori de Performanță Energetică ce vor fi integrați în **SAME**, cu luarea în considerare a bunelor practici recomandate de grupul de standarde ISO 50001-50015 privind normalizarea IPE în funcție de factorii variabili relevanți.

De asemenea, a fost realizată o analiză a modelelor matematice de calcul a principalilor Indicatori de Calitate Tehnică a Energiei Electrice ce au fost ulterior incluși în rutinele de monitorizare și evaluare a **SAME**.

### 2.1. Sisteme de Management Energetic

În vederea identificării oportunității dezvoltării **SAME** și pentru a determina funcționalitățile și atributele cheie pe care acesta trebuie să le furnizeze, a fost realizată o analiză exhaustivă a principalelor SME-uri aflate atât la nivel TRL-9 (Technology Readiness Level) – disponibile comercial, cât și la nivel de Cercetare-Dezvoltare (TRL-1 până la TRL-6), utilizând literatura de specialitate. A fost așadar realizată o analiză State of The Art (**SOTA**).

Pentru a pune în evidență diferențele dar și punctele comune ale metodologiei propuse în cadrul prezentei Teze de Doctorat, a fost realizată o analiză **SWOT** (Strength, Weakness, Opportunity and Threat) a metodologiilor și tehnologiilor **SOTA**.

Principalele criterii de analiză utilizate la realizarea analizei **SWOT** constau în:

- **INTRĂRI:** Mărimile / Variabilele ce reprezintă intrări în SME sunt suficiente pentru o cuantificare corectă / completă a IPE / ICTEE?
- **FUNCȚII:** Cuantificarea IPE / ICTEE este realizată într-o manieră exhaustivă?
- **OBIECTIV FINAL:** Ieșirea / Ieșirile din SME sunt utile pentru eficientizarea / optimizarea IPE / ICTEE / profitabilității financiare a Organizației?

S-a observat, așadar, că niciuna dintre metodologiile ce reprezintă **SOTA** nu abordează influența ICTEE asupra profitabilității unei rețele / microrețele electrice. De asemenea, în niciunul dintre cazuri, IPE nu sunt normalizați cu luarea în considerare a factorilor variabili și statici ce îi influențează, chiar dacă în unele dintre acestea se realizează o corelare a IPE cu unii factori variabili (ca de exemplu, temperatura mediului ambiant). Nici relația de interdependență dintre IPE și ICTEE nu este abordată, cuantificată ori optimizată în niciunul dintre sistemele prezentate.

Se poate așadar concluziona că, integrarea noțiunii de normalizare și optimizarea relației de interdependență dintre IPE și ICTEE și dezvoltarea unui SAME prezintă aspecte de noutate (inovatoare) și poate contribui la îmbunătățirea profitabilității conturului energetic în care acesta ar fi implementat.

În ceea ce privește sistemele de management energetic comercial disponibile, se observă faptul că acestea sunt particularizate pentru aplicațiile specifice țintite de către furnizorii de soluții. Aplicațiile disponibile în piață sunt dificil de extins la contururi energetice diferite de cele țintite inițial de către dezvoltatori și nu iau în considerare evoluția ICTEE și impactul generat de aceștia asupra performanțelor energetice globale.

În urma analizelor SOTA și SWOT au fost identificate o serie de puncte critice pe care SAME trebuie să le atingă, pentru a conduce la maximizarea performanței energetice și financiare a conturului energetic în care acesta va fi implementat.

Așadar, **oportunitățile** SAME constau în capacitatea ca acesta să:

1. **Monitorizeze**, în toate punctele relevante, **ICTEE**;
2. **Cuantifice** impactul energetic și, implicit, financiar generat de **ICTEE**;
3. **Cuantifice IPE**, și nu doar să monitorizeze fluxurile energetice absolute, astfel încât să permită **benchmarking-ul** și să permită stabilirea unor **valori de referință a utilizării energiei**;
4. **Normalizeze IPE** în funcție de **factorii variabili critici**;
5. **Prognozeze** evoluția în timp atât a curbei de sarcină, cât și a IPE asociați, astfel încât să conducă la maximizarea performanței participării la piața de energie a utilizatorului;
6. **Identifice**, să **propună** și să **cuantifice** din punct de vedere energetic și financiar **AIPE / AICTEE**;
7. **Identifice**, să **propună** și să **cuantifice** din punct de vedere energetic și financiar proiecte de dezvoltare de producere a energiei electrice din **surse regenerabile** și implementarea de **sisteme de stocare a energiei electrice**.
8. **Asigure facilitățile de raportare și notificare** pentru personalul Utilizatorului, în funcție de poziția ocupată de acesta în organizație (tehnic / comercial / top management).

**Barierile** principale în dezvoltarea SAME, identificate în urma analizelor anterior amintite, constau în:

1. Potențiale dificultăți în integrarea în SAME a sistemelor de monitorizare existente la nivelul unui contur energetic (*probabilitatea de apariție este minimă, întrucât SAME utilizează date brute preluate de sistemele de monitorizare, ce pot fi transmise prin orice protocol de comunicații agreat de către acestea la Serverul pe care SAME este instalat*);
2. Potențiale dificultăți în identificarea corectă a factorilor variabili critici pentru diverse utilizări ale energiei (*impactul poate fi minimizat prin configurarea sistemului de normalizare ulterior instalării efective a SAME, după analiza preliminară a datelor măsurate și prin instalarea de sisteme de monitorizare a factorilor variabili la nivel local, atunci când este posibil*);
3. Potențiale dificultăți în integrarea SAME în sistemele expert existente la nivelul conturului energetic al utilizatorului (*impactul poate fi minimizat prin introducerea datelor relevante de către operatorul SAME, la instalarea / configurarea sistemului*).

**Riscurile** ce trebuie minimizate după dezvoltarea SAME constau în:

1. Asigurarea securității cibernetice a SAME (*poate fi realizată prin implementarea on-site a SAME, în primă etapă și prin utilizarea de protocoale standardizate de comunicații, securizate prin chei criptografice unice*);

2. Asigurarea continuității în funcționare a SAME, indiferent de statusul utilizatorului (*se va realiza prin prevederea unor surse de alimentare de rezervă – UPS-uri*), prin dezvoltarea unei scheme de alimentare cu energie în funcție de importanța receptoarelor;
3. Alegerea unei frecvențe de eșantionare care să conducă la performanțe maxime cu o utilizare minimă de resurse, din punct de vedere al puterii de calcul și al resurselor energetice asociate.

## 2.2. Evaluarea Performanței Energetice

Implementarea Acțiunilor de Performanță Energetică la nivelul utilizatorilor finali reprezintă una dintre cele mai la îndemână metode de a crește Performanțele Energetice cu o rată suficientă pentru atingerea obiectivelor prezentate în cadrul Capitolului 1. În cadrul lucrării au fost analizate preponderent contururi energetice aparținând sectorului terțiar (clădiri de birouri, instituții publice, centre comerciale etc.).

Ținând seama de obiectivul principal avut în vedere – Dezvoltarea unui Sistem Avansat de Management Energetic la nivel de Organizație – au fost analizați cei mai reprezentanți IPE aplicabili.

Pornind de la Indicatorii de Performanță Energetică generali, au fost propuși o serie de IPE particulari pentru contururile energetice la nivelul cărora SAME a fost dezvoltat, testat și îmbunătățit.

Pentru a asigura o calitate cât mai mare a analizei energetice realizate de SAME și, implicit, a recomandărilor și AIPE-urilor propuse prin intermediul acestuia, este necesară particularizarea, de la caz la caz, a IPE considerați.

Alegerea acestora trebuie să țină seama de următoarele aspecte, minimale:

- Potențialul de monitorizare a fluxurilor energetice ce definesc IPE ales;
  - Existența unei variabilități funcție de factori externi;
  - Potențialul de monitorizare a factorilor externi, variabili;
  - Existența unui potențial de îmbunătățire;
- Au fost așadar selectați următorii IPE:
- Indicatorul **Consumul specific de energie electrică raportat la suprafața utilă** – ajută utilizatorul final să cuantifice consumul de energie electrică raportat la fiecare metru pătrat util necesar pentru desfășurarea activității sale curente;
  - Indicatorul **Consumul specific de energie electrică raportat la numărul de persoane deservite** – ajută utilizatorul final să cuantifice consumul de energie electrică raportat la fiecare client deservit prin desfășurarea activității sale curente;
  - Indicatorul **Consumul specific de energie electrică raportat la veniturile realizate** – ajută utilizatorul final să cuantifice consumul de energie electrică aferent fiecărei mii de EUR realizată prin desfășurarea activității sale curente;
  - **Amprenta specifică de CO<sub>2</sub> echivalent raportată la numărul de persoane deservite** – oferă o imagine de ansamblu asupra sustenabilității conturului energetic analizat prin raportare la numărul de clienți deserviți;
  - **Amprenta specifică de CO<sub>2</sub> echivalent raportată la veniturile realizate** – este un indicator ce oferă o imagine de ansamblu asupra impactului asupra mediului generat de conturul energetic analizat prin raportare la o mie de EUR produși anual, propus în cadrul lucrării. În acest sens, acest IPE poate fi asimilat unui indicator global de sustenabilitate de mediu, permițând așadar compararea atât a conturilor energetice similare din punct de vedere al obiectului de activitate, cât și a sectoarelor diferite;



- **Intensitatea Energetică** – IPE global ce permite evaluarea eficienței utilizării resurselor energetice în vederea derulării activității unei companii și cuantifică consumul total de energie prin raportare la valoarea producției din activitatea de bază. Acest indicator ține așadar seama de *toate* formele de energie utilizate în interiorul conturului energetic: energie electrică, gaz natural, combustibili fosili etc.

Au fost selectați drept factori variabili: temperatura medie exterioară, viteza vântului, umiditatea relativă, cantitatea de precipitații și gradul de înnoare.

Odată definiți și cuantificați factorii variabili, se continuă cu definirea și cuantificarea celor statici. Un factor static este un parametru ce nu variază pe parcursul duratei de evaluare dar care ar putea deveni o variabilă relevantă în viitor, în cazul în care condițiile inițiale suferă schimbări.

Durata de evaluare este practic perioada de timp pe care se compară valoarea inițială a unui IPE cu valoarea obținută ca urmare a implementării unei AIPE.

Importanța normalizării IPE derivă din dorința de a obține o cât mai clară imagine asupra motivelor aflate la baza variației acestora în timp. Atunci când IPE înregistrează variații de la o perioadă de raportare la alta, în cazul în care nu au apărut schimbări fundamentale ale factorilor statici, cu certitudine factorii variabili sunt răspunzători.

Trebuie menționat însă că o parte dintre factorii variabili (ca de exemplu temperatura medie exterioară) nu sunt influențabili de către conturul energetic analizat ori de către deciziile luate de managementul al organizației căreia acesta îi aparține. În acest caz, trebuie ținut cont de variația factorilor variabili independenți de conturul energetic și trebuie ajustate valorile așteptate / țintă ale IPE.

Indicatorii de performanță energetică normalizați și Nivelul de Referință al Energiei (NRE) vor fi utilizați pentru a **cuantifica** eficiența eforturilor de îmbunătățire a performanțelor energetice ale Organizației.

O organizație poate decide să reseteze periodic valorile celor două seturi de informații fie ca urmare a apariției unor schimbări majore a condițiilor inițiale (schimbarea fundamentală a domeniului de activitate, schimbarea tehnologiei de producție, schimbarea amplasamentului analizat etc.), fie din considerente subiective.

Pentru normalizarea IPE se pot utiliza trei metode de calcul distincte: Regresia, Interpolarea polinomială Lagrange și Algoritmul lui Neville.

Pentru alegerea metodei de normalizare a IPE implementată în cadrul SAME au fost testate, comparativ, toate cele trei metode menționate anterior. Rezultatele simulărilor pe un eșantion de 121.232 de seturi de date (o variabilă dependentă – puterea electrică absorbită și cinci variabile predictor – factorii variabili selectați) vor fi prezentate în **Tabelul 2.2.1**.

**Tabelul 2.2.1** – Rezultatele analizei metodei de normalizare

| METODA DE INTERPOLARE     | TIMPUL DE CALCUL | ABATEREA STANDARD |
|---------------------------|------------------|-------------------|
| REGRESIE LINIARĂ SIMPLĂ   | 00:00:05         | 13,341            |
| REGRESIE LINIARĂ MULTIPLĂ | 00:01:21         | 5,492             |
| INTERPOLARE LAGRANGE      | 00:03:15         | 1,421             |
| ALGORITMUL LUI NEVILLE    | 00:06:03         | 1,291             |

Se poate așadar observa că Interpolarea Lagrange și Algoritmul lui Neville au condus la obținerea celor mai mici abateri standard. Cu toate că Algoritmul lui Neville a obținut, pe setul de date considerat, o abatere standard cu 3,80% mai mică decât Interpolarea Lagrange, timpul de calcul a fost mai mare cu 91,4%. Drept urmare, pentru normalizarea IPE se va alege Interpolarea Lagrange, aceasta conducând la optimul dintre timpul de calcul și abaterea standard a rezultatelor.

Pentru creșterea flexibilității soluției propuse, la momentul configurării SAME dar și pe parcursul exploatării acestuia, metoda matematică de normalizare a IPE se poate schimba, dintr-o grilă de funcții, ce poate fi completată ulterior cu noi metode de normalizare adecvate, astfel încât să fie asigurat un raport optim între timpul de calcul și exactitatea rezultatelor furnizate.

Pentru dezvoltarea modelului de analiză tehnică, energetică și financiară a performanțelor energetice, SAME va avea nevoie de o serie de date atât de natură tehnico-energetică (precum tranzitul de putere electrică), cât și de natură operațională (starea unor receptoare electrice) și organizațională (productivitate, venituri realizate etc.).

În același timp, pentru maximizarea eficienței procesului de normalizare a IPE, frecvența de eșantionare a datelor și calitatea acestora trebuie să fie ridicate, astfel încât să se asigure o durată de calcul și o abatere standard minime. În caz contrar, dacă durata de calcul depășește pragul de cincisprezece minute, rezultatele furnizate de SAME vor avea un efect drastic diminuat, mai ales în condițiile în care, începând cu data de 01.02.2021 perioada intervalelor bază de decontare a scăzut de la o oră la cincisprezece minute – deci SAME nu va mai putea contribui la creșterea performanțelor participării la piața de energie a utilizatorului final.

În vederea integrării capabilității de determinare a IPE în timp real și de normalizare a IPE și a nivelului de referință al energiei astfel obținut, cu o precizie ridicată, SAME trebuie să fie capabil:

- Să monitorizeze, în timp real, evoluția cererii de putere electrică pe contururile energetice la nivelul cărora se definesc IPE propuși;
- Să achiziționeze din sistemele existente informații non-energetice, precum rezultatele exercițiilor financiare anterioare (Venitul realizat);
- Să monitorizeze, în timp real, factorii variabili ce influențează IPE propuși;
- Să prognozeze (intern sau prin utilizarea unor soluții software ori baze de date externe), utilizând algoritmi de învățare automată, evoluția factorilor variabili externi – precum factorii meteorologici;
- Să prognozeze, utilizând algoritmi de învățare automată, evoluția în timp a IPE utilizând previziunile factorilor externi, cu o eroare medie pătratică de cel mult 2%;
- Să transmită notificări și alarme atunci când valorile IPE depășesc limitele stabilite de utilizator sau limitele prognozate de către SAME;
- Să poată stoca un volum mare de date brute, necesar pentru învățarea și testarea algoritmului de învățare automată.

### 2.3. Evaluarea Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice

Unul dintre obiectivele specifice ale studiului efectuat constă în cuantificarea impactului generat de ICTEE asupra IPE și, implicit, asupra performanțelor energetice și financiare globale ale conturului energetic la nivelul căruia se va dezvolta și implementa SAME.

Clasificarea ICTEE se poate face după entitatea ce are responsabilitatea de a asigura menținerea într-o plajă admisibilă a valorilor acestora sau, atunci când este cazul, de a lua acțiuni de îmbunătățire a ICTEE (AICTEE).

Se definesc, așadar *indicatori primari de calitate tehnică a energiei electrice* – răspunderea privind menținerea și corectarea acestora fiind asumată în special de către OD și *indicatori secundari de calitate tehnică a energiei electrice* – răspunderea privind menținerea și corectarea acestora fiind asumată principal de către Utilizator.

Indicatorii primari (IP) de calitate tehnică a energiei electrice sunt acei ICTEE ce se referă la *calitatea produsului* (frecvența și amplitudinea tensiunii de alimentare, goluri de tensiune și

creșteri de tensiune temporare și tranzitorii) și la *calitatea serviciului de distribuție a energiei electrice* (întreruperile de scurtă și de lungă durată).

Indicatorii secundari (IS) de calitate tehnică a energiei electrice sunt acei ICTEE a căror valoare este influențată / determinată de către Utilizator, precum distorsiuni armonice, nesimetrii și fluctuații de tensiune.

În acest sens, au fost selectați următorii ICTEE (ce au un impact sensibil și cuantificabil asupra IPE), pentru care au fost create modulele de calcul și analiză continuă și statistică:

- a) Factorul de vârf al curbei de tensiune (IP) – ( $k_v$ ) se definește ca fiind raportul dintre valoarea de vârf a curbei și valoarea efectivă a acesteia;
- b) Factorul de formă al curbei de tensiune (IP) - ( $k_f$ );
- c) Goluri de tensiune și întreruperi de scurtă durată (IP);
- d) Creșteri de tensiune (IP);
- e) Nesimetrii de tensiune (IP) – a fost utilizată o metodă de evaluare simplificată – eficientizează procesul de calcul;
- f) Nesimetrii de curent electric (IS);
- g) Factorul de putere la nivelul punctului comun de cuplare (IS);
- h) Factorul total de distorsiune armonică de tensiune (IS);
- i) Factorul total de distorsiune armonică de curent electric (IS).

În vederea integrării capabilității de determinare și evaluare a ICTEE în timp real și de cuantificare a impactului generat de ICTEE asupra IPE și a nivelului de referință al energiei astfel obținut cu o precizie ridicată, SAME trebuie să fie capabil:

- Să monitorizeze, în timp real, evoluția mărimilor electrice de bază, cu o frecvență de eșantionare de minimum 128 eșantioane pe secundă;
- Să monitorizeze / determine, minimal următoarele mărimi:
  - Valorile pe jumătate de perioadă ale tensiunilor de linie / fază;
  - Valorile efective ale tensiunilor de linie și de fază și ale intensității curentului electric;
  - Valorile armonicilor de curent electric și de tensiune, până la cel puțin cel de-al 40-lea rang armonic (2 kHz);
  - Valorile factorului de putere total, pe fiecare fază;
  - Valoarea intensității curentului electric pe conductorul neutru al rețelei, atunci când aceasta are o configurație TN-S.
- Să fie instalat în orice punct de conexiune relevant din rețeaua de Joasă Tensiune a utilizatorului final, indiferent de intensitățile curenților electrici nominali în acel punct de conexiune (deci să fie compatibil cu sisteme diverse de măsurare a intensității curentului electric – Transformatoare de măsurare de Curent (TC), Cordoane Rogowski, rezistoare șunt).

O grijă deosebită trebuie acordată efectelor pe care regimurile distorsionate le generează asupra sistemelor de măsurare a curentului electric. Dacă acestea nu sunt corect dimensionate sau alese, pot introduce erori netolerabile în măsurările realizate și, implicit, pot afecta negativ performanța SAME.

Din acest motiv, pentru sistemele de măsurare folosite în dezvoltarea experimentală a SAME au fost utilizate exclusiv Cordoane Rogowski (IFA + analizoare trifazate de clasa A) și Senzori Hall (SENSIX).

## 2.4. Digitalizarea în contextul Managementului Energetic

SAME trebuie să ofere potențialul de a evalua, pe perioade lungi de timp, evoluția performanței energetice, în mărimi relative, pentru a putea cuantifica și minimiza efectele de creștere a cererii de energie datorate creșterii economice a conturului energetic analizat.

Cea de-a patra revoluție industrială (*Industry 4.0*), numită și revoluția digitală în producție, implică transformarea unităților convenționale de producție în *fabrici inteligente*, prin utilizarea de soluții software care permit integrarea și interconectarea fluxului tehnologic și a sistemelor diverse utilizate în acestea, prin utilizarea de tehnologii de tip IoT (Internet of Things) și Big Data & Analytics. Aplicarea conceptelor și principiilor celei de-a patra revoluții industriale în sensul dezvoltării SAME, prin unificarea tehnologiilor digitale cu industria convențională, conduce la crearea unui sistem integrat de echipamente, utilaje, personal angajat, dispozitive mobile și sisteme IT&C (Information Technology and Communications) ce generează **patru avantaje semnificative**:

- Optimizarea resursei  *timp*: prin automatizare și digitalizare, preluarea, analiza și interpretarea datelor se realizează automat, degrevând personalul de aceste sarcini, acesta putând alocă timpul către alte activități care generează plus valoare;
- Optimizarea *costurilor*: creșterea acurateței datelor, creșterea calității analizelor diverse și prezentarea rezultatelor în formatul potrivit pentru personalul potrivit, conducând la o planificare superioară a costurilor și veniturilor;
- Creșterea *flexibilității*: posibilitatea de a optimiza procesele pe baza analizei datelor preluate din diferitele fluxuri energetice / operaționale / financiar crește sensibil flexibilitatea globală a companiei.
- Apariția potențialului de *integrare deplină*: procesul fiind complet automatizat și digitalizat se derulează cu un număr minim de întreruperi, ca urmare a integrării sistemelor utilizate cu resursele din teren (personal, sisteme de monitorizare ș.a.).

## 3. Dezvoltarea Sistemului Avansat de Management Energetic

În cadrul studiului efectuat s-a urmărit, pe de o parte, realizarea unei analize detaliate a diferitelor soluții tehnice de îmbunătățire a IPE și impactul pe care aceștia îl au asupra ICTEE, iar pe de alta, analiza impactului pe care creșterea ponderii de surse distribuite de generare a energiei electrice din surse regenerabile îl are asupra celor două categorii de indicatori. Scopul final constă în determinarea și dezvoltarea unui model de analiză în timp real, integrat, care să permită maximizarea performanțelor tehnice, energetice și financiare ale conturilor energetice pe care acesta este aplicat.

În acest sens, au fost dezvoltate o serie de module de analiză independente, care acoperă domenii diverse, precum determinarea potențialului de aplatizare a graficului de sarcină (AGS), creșterea performanțelor energetice și economice prin reducerea  $THD_I$  și utilizarea procedurilor de Machine Learning pentru prognoza consumului de energie electrică și, implicit, pentru prognoza evoluției Indicatorilor de Performanță Energetică. Integrarea modulelor de analiză în SAME a fost realizată pornind de la schema logică a SAME, propusă în cadrul lucrării (a se vedea **Figura 3.1**).

Algoritmul SAME are la bază o serie de intrări, catalogate drept "Criterii de Performanță stabilite de Organizație", dintre care cele mai importante sunt: Perioada de realizare a analizelor tehnice, energetice și economice și Ierarhizarea țintelor pentru managementul superior: producția,

consumul specific de energie, amprenta de dioxid de carbon echivalent, calitatea tehnică a energiei electrice, cheltuielile de exploatare, cheltuielile de mentenanță etc.

După setarea acestor date de intrare inițiale, ce țin seama de concepția și de optica managementului superior al companiei, se definește protocolul de măsurare și verificare, care funcționează în cadrul unei bucle logice. Intervalul de realizare a măsurărilor predefinit, în punctele în care sunt instalate sisteme de contorizare / măsurare, este de o secundă, cu o perioadă de agregare de cincisprezece minute, conform prevederilor IPMVP (Protocolul Internațional de Măsurare și Verificare). Acest interval ține și de metodologia calculului Sarcinii maxime de durată ( $S_M$ ).

La prima inițializare a algoritmului, Utilizatorul trebuie să definească Indicatorii Economici (IEC) – preluarea acestora se poate face din ERP (Enterprise Resource Planning), din software-ul de gestiune contabilă sau se pot introduce manual – dintre care cei mai importanți sunt: Cheltuielile lunare / anuale cu energia, Costurile de achiziție ale diferitelor echipamente utilizate în producție / receptoare electrice, Cheltuielile lunare / anuale de exploatare, Cheltuielile lunare / anuale de mentenanță. Utilizatorul trebuie, de asemenea, să definească și să introducă Indicatorii Tehnici (IT) – caracteristicile tehnice ale echipamentelor ce fac obiectul monitorizării / contorizării, ce pot fi preluate automat din ERP sau introduse manual de către operatorul sistemului. IT pot fi: Puterea nominală a receptorului, Durata zilnică de utilizare a receptorului, Sarcina medie zilnică a receptorului etc.

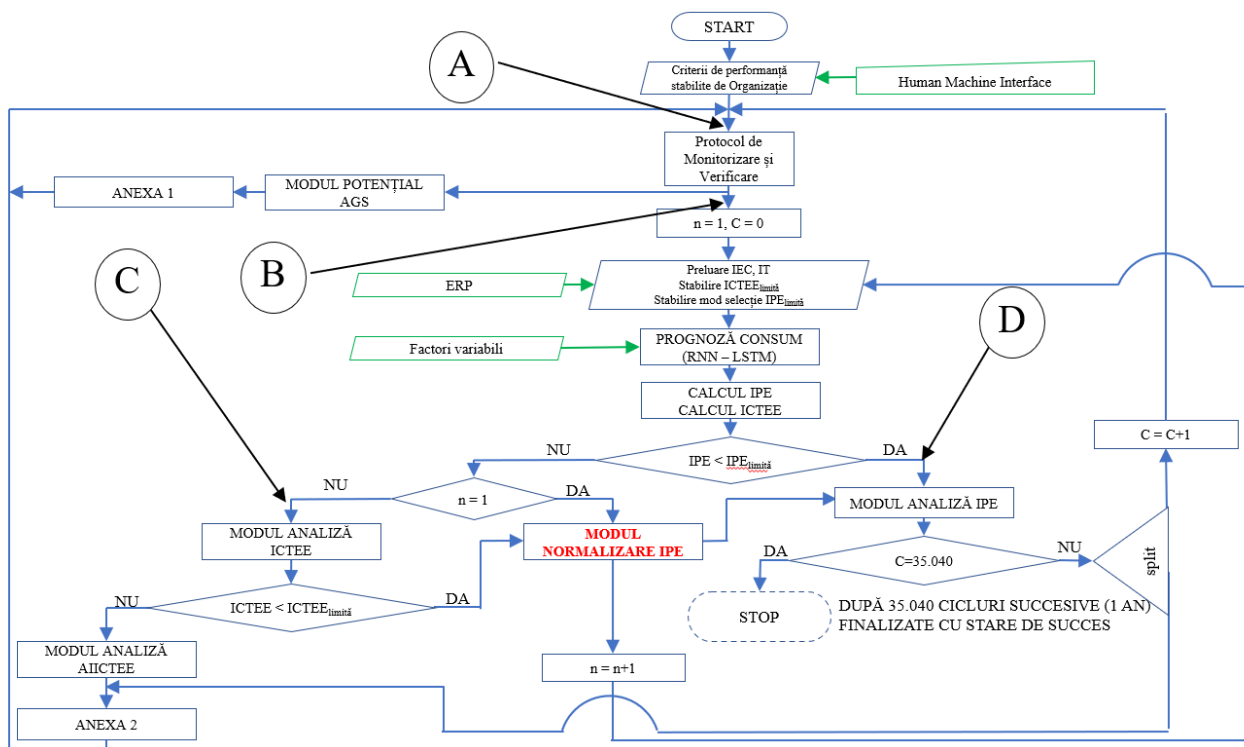


Figura 3.1 – Schema logică a SAME

Odată începută bucla de monitorizare, algoritmul va prelua în cadrul etapei "Monitorizare" valorile înregistrate de toate sistemele de contorizare / monitorizare, respectând principiul simultaneității. Utilizatorul va putea selecta metoda de evaluare a IPE, alegând modalitatea prin

care valorile limită ale IPE vor fi determinate sau stabilite. Pentru a acoperi toate scenariile posibile, Utilizatorul va putea alege între:

- Stabilirea valorii limită a IPE ca medie aritmetică ( $IPE_{lim}=IPE_{av}$ ) pe o perioadă de raportare aleasă de acesta;
- Stabilirea valorii limită a IPE ca valoare absolută ( $IPE_{lim}=val$ ), în cazul în care există informația necesară pentru a stabili această valoare – metodă aplicabilă în cazul în care există mai multe contururi energetice similare, ale căror IPE maximi sunt cunoscuți și se urmărește încadrarea tuturor valorilor înregistrate în diversele contururi energetice sub o valoare globală, stabilită la nivel de Companie;
- Stabilirea valorii de raportare a IPE pe baza unui algoritm specificat în normativele aflate în vigoare și agreeate de către Beneficiar.

Valorile astfel calculate sunt comparate apoi cu valorile de referință: IPE ales de Utilizator în etapa anterioară și ICTEE predefinite, conform legislației, normativelor și standardelor tehnice în vigoare. În cazul în care valorile se încadrează în limitele de admisibilitate stabilite, este generat un ”Raport” și bucla logică se reia cu următorul set de valori măsurate.

În cazul în care valorile IPE nu se încadrează în limitele de admisibilitate stabilite, se continuă cu o etapă de normalizare a IPE în funcție de Factorii Variabili Externi (FE) ori Statici. Dacă IPE normalizat se situează în continuare peste valoarea limită a IPE de referință, se continuă cu verificarea încadrării ICTEE în limitele admisibile stabilite de legislația, standardele și normele tehnice în vigoare. Dacă valorile unuia sau mai multor ICTEE nu se încadrează în limitele de admisibilitate stabilite, se evaluează impactul pe care depășirea acestor limite îl generează asupra IPE analizați.

Fiecare ICTEE care a înregistrat valori situate în afara limitelor de admisibilitate stabilite este cuantificat și un raport parțial este generat. În cadrul acestui raport se prezintă cuantificarea economică a impactului nerespectării valorii limită de către ICTEE în cauză și modul în care acesta influențează valorile IPE. Toate aceste rapoarte parțiale sunt apoi înglobate în cadrul unui ”Raport final” ce se încheie cu o serie de ”Recomandări” în sensul remedierii problemelor înregistrate, pentru Utilizator.

Dacă însă valorile ICTEE satisfac limitele stabilite și dacă atunci când valorile actuale ( $FE_{act}$ ) se compară cu valorile înregistrate în perioada anterioară de raportare ( $FE_{trecut}$ ) și valorile  $FE_{act}$  nu diferă cu un procent relevant pentru fiecare dintre factorii analizați, cauza nerespectării limitelor IPE este una organizațională. În acest sens, se generează un raport ce este transmis către factorii decizionali pe parte de exploatare, pentru care se elaborează și se transmite un raport săptămânal prin care pierderile economice sunt cuantificate și cumulate.

### 3.1. Dezvoltarea, implementarea și testarea sistemului de monitorizare

Ținând seama de aspectele evidențiate în cadrul Analizei SWOT realizată în cadrul Capitolului 2, dar și de aspectele legislative relevante, prima etapă a cercetării și dezvoltării experimentale a SAME a constat în alegerea conturilor energetice relevante.

În vederea preluării informațiilor privind fluxurile energetice au fost utilizate mai multe tipuri de sisteme de monitorizare, ce vor fi prezentate în continuare.

În primul rând, a fost instalat și testat un sistem avansat de monitorizare dezvoltat de către Institutul de Fizică Atomică, în parteneriat cu NET ENERGY S.R.L. – instalat în 3 puncte distincte.

Sistemul funcționează ca un modul IoT, capabil să conecteze la internet o clasă extinsă de module locale utilizate pentru achiziția de date. Unitatea Centrală (UC), este configurată pentru a

asigura comunicația prin Magistrală Phoenix încadrată în șina DIN (între UC și module auxiliare), două canale seriale configurabile (RS232 / RS485 sau I2C) și GSM (emițător semnal + antenă amplificare).

UC preia cele trei tensiuni alternative (corespunzătoare celor trei faze).

Modulele locale asigură achiziția a patru semnale analogice (max. 500 mA) ce preiau, prin intermediul unor transductoare inductive (cordoane Rogowski) valorile curenților electrici pe cele trei faze și pe conductorul neutru al rețelei cu o rezoluție de sub 0,2%. De asemenea, se măsoară și defazajul dintre curbele de curent electric și de tensiune dar și gradul de deformare armonică.

În procesul de achiziție a datelor sunt preluate 4 tensiuni (L1, L2, L3, N) și 4 curenți electrici (L1, L2, L3, N), cu un nr. de 64 de eșantioane la fiecare 312,5 microsecunde.

Modulele locale sunt dotate cu două intrări suplimentare, configurabile ca intrări Switch (SW) sau canal serial, dar și cu un optotriac ce are bornele conectabile în exterior și permite transmiterea unor eventuale comenzi pentru comandarea de la distanță a echipamentelor de comutație.

Etape de instalare a sistemelor a fost demarată în luna iunie 2020. Unitățile Centrale au fost îmbunătățite constant, prin update-uri ale software-ului proprietar dezvoltat în parteneriat cu NET ENERGY S.R.L., ajungând la o variantă stabilă în luna septembrie 2020. Înregistrările ce au stat la baza elaborării prezentei lucrări au fost realizate în intervalul 06.09.2020 – 25.01.2021, **cu o frecvență de măsurare de 1 înregistrare / secundă și o agregare a datelor măsurate în UC la 1 minut**. Baza de date a fost ulterior completată cu înregistrări realizate în perioada 25.01.2021 – 28.02.2021.

UC a realizat transmiterea datelor prin GSM cu agregare la minut pe întreaga durată de realizare a măsurărilor către serverul fizic dedicat, prin utilizarea unui serviciu de tip Cloud Storage.

Suplimentar, a fost instalat și testat un sistem avansat de monitorizare dezvoltat de către compania SENSIX S.R.L. (<https://sensix.io/>) – instalat într-un amplasament din sectorul terțiar. Unitatea Centrală (UC) este configurată pentru a asigura comunicația prin două canale seriale configurabile RS232, RS485 sau I2C pentru comunicarea cu periferice proprii sau de orice alt tip, existente în structura monitorizată și prin Wi-Fi prin intermediul unui emițător de semnal și a unei antene de amplificare.

UC preia cele patru tensiuni alternative (corespunzătoare celor trei faze și conductorului neutru) și intensitățile curenților electrici pe cele trei faze și pe conductorul neutru, utilizând fie un set de senzori Hall, fie rezistoare șunt. Modulele asigură achiziția a patru semnale analogice (max. 32 A) ce preiau, prin intermediul unor transductoare inductive (senzori Hall) sau prin intermediul unor rezistoare șunt valorile curenților electrici pe cele trei faze și pe conductorul neutru al rețelei, cu o rezoluție de sub 0,3% dar și a Defazajului dintre curbele de curent electric și de tensiune și a Gradului de deformare armonică.

În procesul de achiziție a datelor sunt preluate 4 tensiuni (L1, L2, L3, N) și 4 curenți electrici (L1, L2, L3, N), cu un nr. de 64 de eșantioane la fiecare 312,5 microsecunde.

Pentru a valida datele înregistrate de cele două sisteme, independent dezvoltate, au fost utilizate și șase analizoare trifazate de calitate tehnică a energiei electrice, de clasă A, conform prevederilor legislative în vigoare.

Au fost utilizate două analizoare trifazate mobile, Fluke 1770, cu ajutorul cărora au fost realizate măsurări electroenergetice în paralel cu sistemele independent dezvoltate, pentru validarea exactității datelor măsurate de către acestea. Transmiterea datelor măsurate s-a realizat prin ethernet, către serverul SAME. De asemenea, pentru un alt contur energetic au fost utilizate

patru analizoare trifazate în montaj fix, Janitza UMG 512, ce permit eșantionarea la o rată de 25,6 kHz (512 eșantioane pe o perioadă). Pentru acestea, preluarea și centralizarea datelor în Serverul SAME s-a realizat prin utilizarea protocolului Modbus – TCP/IP.

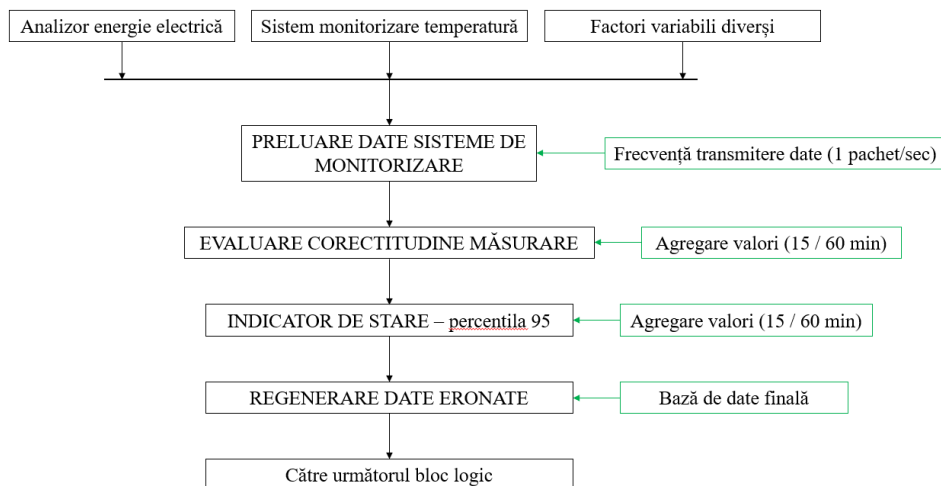
Pentru a surprinde cu un grad ridicat de exactitate atât evoluția IPE, cât și evoluția ICTEE, schema de principiu de monitorizare propusă are la bază Diagrama FENCE prezentată în cadrul Capitolului 2 al Tezei de Doctorat și ține seama de principiul de bază al analizei ICTEE (clasificarea utilizatorilor în funcție de ICTEE).

Prima etapă în dezvoltarea soluției software a constat în agregarea și analiza statistică a datelor măsurate, în vederea identificării eventualelor erori de măsurare, erori de transmitere a informației sau situații excepționale, ca de exemplu întreruperile în alimentarea cu energie electrică a conturului energetic analizat. În acest sens, fișierele ce conțin datele înregistrate în format Comma Separated Values (CSV) – UC IFA / SENSIX sau Excel – Fluke 1770, Janitza UMG 512 au fost prelucrate și aduse la forma și formatul dorite, prin construirea unui algoritm de conversie.

În situațiile în care au fost înregistrate erori de măsurare (cel mai adesea datorate erorilor de comunicație / conversie a datelor), pentru a putea utiliza datele înregistrate în scopul antrenării rețelei neuronale ce va sta la baza prognozei consumului de energie electrică în funcție de factorii variabili, a fost utilizată metoda de regresie ce constă în înlocuirea valorilor eronate cu valoarea indicatorului determinat prin calcularea percentilei 95.

Pentru a crește eficiența procesului de regenerare a datelor, acesta a fost aplicat direct pe valorile brute furnizate de sistemele de monitorizare.

În vederea evaluării corectitudinii valorilor măsurate, a fost stabilit următorul proces logic de verificare a datelor (v. **Figura 3.1.1**), ca parte integrantă a BLOCULUI LOGIC denumit PROTOCOL DE MONITORIZARE ȘI VERIFICARE.



**Figura 3.1.1** – Algoritm verificare corectitudine date măsurate

După preluarea datelor măsurate din sistemele existente/disponibile, cu o frecvență de transmitere de la analizoare/sisteme de monitorizare către server de 1 pachet de date/secundă, aceste date sunt introduse în blocul logic de evaluare a corectitudinii valorilor înregistrate.

În acest sens, se realizează o agregare a valorilor măsurate în sub-seturi de câte 900 (900 secunde – 15 minute) sau 3.600 de valori (3.600 secunde – 1 oră), în funcție de tipul datelor măsurate. Analiza statistică se aplică pentru fiecare astfel de sub-set de înregistrări.



S-a propus agregarea la o oră a datelor înregistrate pentru a menține corelația cu factorii variabili – la perioade de agregare mai mici de o oră variația acestora este mult prea mică pentru a putea antrena algoritmul de Machine Learning cu un grad ridicat de încredere. La perioade de agregare mai mari de o oră, variația acestora devine prea mare și, implicit, precizia prognozei consumului de energie electrică va fi puternic influențată într-un sens negativ.

Pentru a optimiza spațiul de stocare aferent, blocul logic de monitorizare și verificare memorează pe termen lung (mai mult de un an) doar acele date statistice relevante pentru utilizatorul final – cu precădere rezultatele analizelor tehnice, energetice și financiare. Datele energetice cuantificabile în unități monetare (precum consumurile de energie electrică) sunt memorate pe termen nelimitat, acest proces având un necesar de memorie redus datorită dimensiunii mici a datelor dar și a frecvenței acestora (o înregistrare la 15 minute în PCC).

Pentru toate valorile tensiunii, se semnalează în log orice abatere de la intervalul de admisibilitate  $U_C \pm 10\%$ , unde  $U_C$  este tensiunea de alimentare contractată (declarată). În mod normal, aceasta este tensiunea nominală ( $U_N$ ) a rețelei, însă în urma unui acord între Operatorul de Distribuție și utilizatorul final, aceasta poate fi diferită. În studiul de caz prezentat,  $U_C = U_N = 400$  V.

Prin integrarea în partea experimentală a lucrării a celor două sisteme de monitorizare dezvoltate de către IFA și SENSIX, aflate la stadiul de prototip, au fost aduse îmbunătățiri semnificative acestora, prin testarea și validarea funcționalității acestora. De asemenea, SENSIX a preluat și integrat în platforma proprie pe care urmează să o lanseze comercial o serie de elemente de raportare energetică dezvoltate în prezenta lucrare (precum analiza statistică a evoluției cererii de energie electrică, calculul ampretei de CO<sub>2</sub> echivalent ș.a.).

### 3.2. Dezvoltarea, implementarea și testarea modulelor de analiză

Al doilea pas în dezvoltarea SAME, după punerea în funcțiune a sistemului de monitorizare în mai multe contururi energetice, utilizând mai multe tipuri de sisteme fizice – analizoare trifazate de calitate a energiei electrice de clasa A, analizoare IFA și analizoare SENSIX (demonstrând astfel capabilitatea de interconectare și integrabilitate a SAME), a constat în dezvoltarea, implementarea și testarea modulelor de analiză.

În vederea dezvoltării algoritmului de evaluare a Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice, evaluările au fost realizate utilizând analizoare de rețea trifazate, de clasă A (conform standardului IEC 61000-4-30), ce au asigurat un flux de date cu o frecvență de 1 pachet de măsurători per secundă, pentru o perioadă de timp de 12 luni calendaristice, într-un număr de șase puncte de consum relevante racordate la JT:

#### **A. 1 Punct de măsurare - Utilizator Industrial:**

1. În Punctul Comun de Cuplare – în secundarul transformatorului de putere de 20/0,4 kV ce alimentează cu energie electrică 25% dintr-o platforma industrială;
2. La nivelul alimentării cu energie electrică a unei secții de producție echipată cu receptoare puternic distorsionate;

#### **B. 1 Punct de măsurare - Utilizator Terțiar 1 (clădire de birouri):**

1. În Punctul Comun de Cuplare – în secundarul transformatorului de putere de 20/0,4 kV ce alimentează cu energie electrică clădirea de birouri;
2. La nivelul alimentării cu energie electrică a sistemului centralizat de încălzire, răcire și climatizare aer (HVAC);

#### **C. 4 Puncte de măsurare - Utilizator Terțiar 2 (patru clădiri de birouri):**

1. În Punctul Comun de Cuplare – în secundarul transformatoarelor de putere de 20/0,4 kV ce alimentează cu energie electrică clădirile de birouri;
2. La nivelul alimentării cu energie electrică a sistemului centralizat de încălzire, răcire și climatizare aer (HVAC).

Au fost concepute și dezvoltate module de analiză pentru ICTEE prezentați în cadrul Capitolului 2.

Algoritmul de evaluare a IPE a fost dezvoltat într-o manieră stratificată, practic implementând metodologiile de calcul pentru fiecare IPE în parte, astfel încât la nivelul SAME să poată fi selectați de către utilizator IPE relevanți, în funcție de specificul activității sale. Se asigură astfel o modularitate cât mai mare a SAME și o replicabilitate ridicată în orice alte contururi energetice.

Au fost implementați toți IPE prezentați în cadrul Capitolului 2 al Tezei de Doctorat. Pentru etapa de testare și îmbunătățire a SAME au fost utilizați IPE selectați și prezentați în cadrul Capitolului 2.

În întregul său, SAME a fost dezvoltat utilizând limbajul de programare Py (Python) și constructorul de cod Jupyter Notebook, ce permite utilizarea unui limbaj agnostic (Py, C++, Java etc.) asigurând astfel o cât mai mare compatibilitate cu alte soluții software dezvoltate în continuare și permițând astfel unificarea acestora într-o soluție unitară, finală.

În vederea analizei relației de interdependență dintre  $FE_i$  (Factori Variabili Externi) și  $IPE_n$  și a determinării prognozei variației  $IPE_n=f(FE_i)$  se va aplica un set complex de sisteme de tip Machine Learning bazate pe RNN-uri de tip LSTM (Long Short Term Memory), introduse de Hochreiter și Schmidhuber în anul 1997.

RNN LSTM a fost inițial dezvoltată pentru prognoza cererii de putere activă în funcție de un singur factor variabil extern (temperatura medie exterioară). Parametrizarea RNN LSTM astfel dezvoltată a fost realizată prin iterații succesive, urmărind identificarea valorilor optime ale hiperparametrilor care să conducă la cea mai bună formă a prognozei cererii de putere activă.

Aceasta a utilizat următoarele valori cheie:

- Lungimea secvenței de învățare (*time\_steps*): 24;
- Număr neuroni per celulă (*LSTM\_units*): 192;
- Epoci (*epochs*): 20;
- Număr de exemple dintr-un pas de învățare (*batch\_size*): 24;
- Ponderea antrenare/învățare (*train\_test\_split*): 0,15.

După identificarea hiperparametrilor ce au condus la gradul maxim de precizie al RNN LSTM, a fost realizată extinderea LSTM de la o **variabilă cunoscută** la **cinci variabile prognozate** (temperatura medie exterioară, nivelul de insolație, gradul de înnorare, umiditatea relativă și viteza vântului), a fost utilizată platforma open-source <https://openweathermap.org/>.

Prin această extindere s-a analizat gradul de acuratețe al modelului software dezvoltat și calitatea hiperparametrilor selectați la apariția unor noi factori variabili. De asemenea, pentru transpunerea în context real, prognoza consumului de energie electrică se realizează utilizând **prognoze meteorologice** – în acest fel cuantificându-se și evaluându-se și incertitudinile introduse de erorile de prognoză meteorologică. Pentru aceasta, în baza unui abonament lunar, a fost dezvoltată o funcție de apelare a unui API (Application Programming Interface) ce furnizează o prognoză orară pentru o perioadă de două (2) zile, la fiecare apelare. Acest API permite transmiterea unui număr maxim de 2.000 de cereri per zi, ceea ce practic înseamnă că, printr-un abonament se pot asigura datele meteorologice zilnice, necesare pentru 2.000 de amplasamente distincte în care SAME este implementat. Rezultatele returnate se prelucrează apoi pentru

integrarea în baza de date, prin transformarea lor din formatul JSON furnizat de API, într-un format compatibil cu algoritmul de Machine Learning.

Spre deosebire de rezultatele obținute în etapa preliminară de dezvoltare a RNN LSTM, utilizarea unor date meteorologice prognozate crește incertitudinea algoritmului de predicție a puterii active absorbite, de la o valoare inițială de 0,5 – 2% la o valoare de 1 – 12%, în funcție de acuratețea datelor meteorologice (real vs. prognozat).

Se constată așadar existența unei relații directe de dependență între precizia prognozei cererii de putere activă și precizia prognozei datelor meteorologice pentru intervalele orare pe care se realizează predicția.

De asemenea, un factor extrem de important de influență este comportamentul energetic al consumatorului (*consumer behavior*<sup>1</sup>).

În vederea normalizării IPE, se va parcurge următoarea subrutină de calcul:

- ✓ Se verifică dacă  $IPE_n=y$  este o funcție de  $FE_t=x$  prin aplicarea metodei dreptei verticale;
- ✓ Dacă este respectată condiția, se verifică dacă  $y=f(x)$  este o funcție unu-la-unu, prin aplicarea metodei dreptei orizontale;
- ✓ Prin aplicarea metodologiei de interpolare Lagrange, se determină valorile așteptate ale lui  $y$  pentru diverse valori ale lui  $x$ ;
- ✓ Prin implementarea unui sistem de tip Machine Learning se va ajusta forma determinată anterior a funcției  $y=f(x)$  pe baza datelor înregistrate de sistemul de Monitorizare.

În cadrul lucrării a fost utilizată drept metodă de normalizare **Interpolarea Lagrange**, fiind observat faptul că aceasta oferă o alură a funcției similară (cu peste 0,80% mai puțin precisă) cu cea furnizată de Algoritmul Neville, cu un timp de calcul semnificativ mai scăzut (cu peste 90% mai rapid).

Regresia liniară conduce la obținerea unei erori medii pătratice ridicate, cu o valoare medie de peste 13%, datorită numărului mare de variabile dependente considerate, fiind așadar nerecomandată pentru normalizarea IPE.

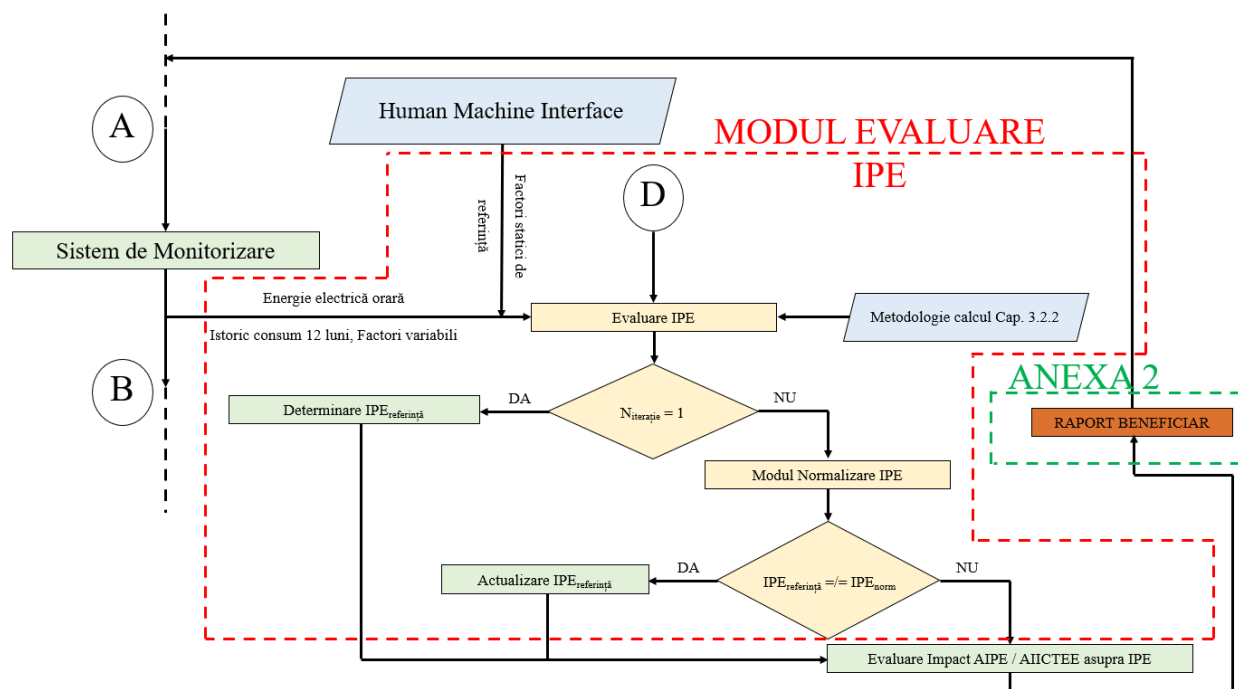
Astfel, Indicatorii de Performanță Energetică (determinați pentru conturul energetic din sectorul terțiar – clădire de birouri) sunt normalizați în raport cu cinci factori variabili considerați relevanți (istorici): temperatura medie exterioară, umiditatea relativă, gradul de înnoare, gradul de iluminare și viteza vântului.

Determinarea IPE pe perioade relevante de timp (săptămână / lună / an) de către SAME permite și normalizarea acestora prin raportare la evoluția factorilor variabili, ceea ce reprezintă un avantaj semnificativ pentru Utilizator, întrucât acesta poate utiliza rezultatele SAME pentru raportările atât la nivelul companiei (stabilirea țintelor interne privind performanța energetică / impactul asupra mediului), cât și la nivelul Ministerului Energiei – Direcția pentru Eficiență Energetică (raportările anuale privind performanța energetică – chestionarul energetic depus de către Managerul Energetic al Utilizatorului).

Schema logică propusă a modului de analiză a IPE este prezentată în **Figura 3.2.1**.

---

<sup>1</sup> *Consumer Behaviour* – Noțiune ce ține seama de variabilitatea generată de comportamentul diferit al utilizatorilor, în funcție de criterii subiective ori obiective, clasificabile în categorii precum: comportamentul utilizatorilor în zile lucrătoare / zile de weekend / zile de sărbătoare, comportamentul utilizatorilor încadrați într-o anumită grupă de vârstă: 18 – 25 ani, 26 – 40 ani, 40 – 65 ani, 65+ ani etc.



**Figura 3.2.1** – Schema logică propusă pentru modulul de analiză, normalizare și predicție IPE

Cea mai eficientă, din punct de vedere financiar, soluție de producere descentralizată a energiei electrice în momentul de față, la nivelul utilizatorilor finali din România, este tehnologia fotoelectrică, mai ales dacă aceasta poate fi corelată cu potențialul de aplatizare a graficului de sarcină și dacă s-ar lua în considerare contribuția acesteia la creșterea continuității în alimentare.

Vârful curbei zilnice de sarcină, deși are o durată în timp restrânsă, generează un impact major asupra eficienței energetice și operaționale a rețelelor electrice. Abordarea convențională pentru minimizarea impactului acestui fenomen constă în creșterea capacității de producție a energiei electrice în perioada de vârf. Această variantă nu este însă întotdeauna economic fezabilă, poate fi ineficientă din punctul de vedere al utilizării grupurilor generatoare (întrucât implică existența unor generatoare care trebuie achiziționate, cărora trebuie să li asigure mentenanța și care vor fi utilizate doar câteva ore pe zi) și poate crește sensibil impactul specific asupra mediului când sursele de vârf utilizează combustibili convenționali.

Cele patru strategii relevante pentru Aplatizarea Graficului de Sarcină (AGS) și optimizarea funcționării rețelei electrice de distribuție sunt:

- 1) Creșterea capacității elementelor de rețea, prin înlocuirea transformatoarelor de putere și a liniilor electrice cu unități cu puteri nominale adecvate (mai bine optimizate pentru curba de sarcină), în urma unor calcule tehnico-economice;
- 2) Integrarea Sistemelor de Stocare a Energiei Electrice (SSEE);
- 3) Integrarea inteligentă a Vehiculelor Electrice în rețelele electrice (V2G – Vehicle to Grid);
- 4) Managementul Cererii de Putere – Demand Response (DR).

Una dintre cele mai mari dificultăți ale OTS constă în asigurarea echilibrului dintre producerea energiei electrice și cererea de energie electrică, apariția unui dezechilibru între aceste două componente putând conduce la instabilitate, variații de tensiune și chiar blackout.

Dezechilibrele dintre producerea de energie electrică și cererea de energie electrică se materializează în solicitări suplimentare la nivelul grupurilor generatoare și în ICTEE cu valori reduse (scăderi ale frecvenței în afara limitelor de calitate admisibile). Cea mai eficientă soluție de

minimizare a acestor dezechilibre constă în obținerea unei curbe de sarcină care să fie caracterizată de o diferență redusă între vârf și gol.

Înlocuirea transformatoarelor de putere și a liniilor electrice este o operație foarte costisitoare și se caută alte soluții de creștere a capacității de transfer de energie. De asemenea, obținerea avizelor și acordurilor pentru noi trasee de linii electrice și terenuri pentru stațiile de transformare, este un proces dificil și de lungă durată.

Factorul de aplatizare al graficului de sarcină este cea mai utilă tehnică de a cuantifica variabilitatea cererii de energie, determinând astfel cât de eficient este utilizat activul considerat. Un factor de aplatizare scăzut implică existența unei sarcini puternic variabile și o utilizare ineficientă a activului.

Un factor de aplatizare optim este esențial pentru fezabilitatea financiară a centralelor electrice / rețelelor electrice, conducând la minimizarea costurilor cu energia. Îmbunătățirea factorului de aplatizare este așadar obligatorie pentru a reduce costurile de exploatare a centralelor electrice și a rețelelor electrice, crescându-le astfel fezabilitatea economică și financiară. Reducerea puterii absorbite la vârful de sarcină reprezintă cea mai simplă soluție de îmbunătățire a Factorului de Aplatizare.

De asemenea, tranzitul unei puteri la vârf ridicate conduce la creșterea, neliniară a pierderilor de putere și energie în rețelele electrice de transport și distribuție, conform legii Joule-Lenz

În general, OT / OD și producătorii de energie electrică nu dețin în proprietate sisteme moderne de stocare a energiei, motiv pentru care energia electrică produsă nu trebuie să depășească cererea de energie electrică, în caz contrar costurile de producere unitare crescând semnificativ (pentru aceeași unitate de energie – MW produsă, vândută și utilizată costurile cresc, întrucât au fost produse mai multe unități de energie).

Reducerea vârfurilor de sarcină va conduce, la scăderea costurilor de transport și distribuție prin minimizarea pierderilor Joule-Lenz, creșterea duratei de viață a echipamentelor – prin evitarea funcționării acestora la sarcini maxime / supra încărcate și minimizarea costurilor de mentenanță, asigurând astfel o maximizare a beneficiilor financiare pentru OD.

Datorită caracterului intermitent al surselor regenerabile de energie, menținerea stabilității și disponibilității rețelelor electrice devine o problemă din ce în ce mai importantă, odată cu creșterea puterii electrice instalate în acest tip de centrale electrice.

Creșterea numărului și puterii centralelor electrice bazate pe surse regenerabile de energie, instalate la nivelul utilizatorilor finali (regim de autoconsum), generează o serie de beneficii semnificative atât la nivelul acestora (prin evitarea unei ponderi din cheltuielile aferente energiei electrice achiziționate din SEN, degrevarea elementelor de rețea aflate în proprietatea acestora – transformatoare de putere și linii electrice), cât și la nivelul OD, prin asigurarea unui nivel de tensiune mai bun în lungul rețelei electrice de distribuție și degrevarea elementelor de rețea (transformatoare de putere și linii electrice) de sarcină, peste limitele de funcționare economică.

În același timp, amplificarea procesului de implementare de proiecte de generare distribuită va conduce, în timp, la reducerea veniturilor OD / OTS prin reducerea nivelului de energie tranzitată prin rețelele deținute / concesionate și exploatate de aceștia, efectul economic fiind unul cu un caracter dual.

Creșterea numărului și a puterii centralelor bazate pe surse regenerabile, combinată cu utilizarea SSEE, pot rezolva marea majoritate a problemelor uzuale generate de alura graficului de sarcină, prin AGS. De asemenea, prin cuplarea inteligentă a SSEE cu SRE se pot elimina sau minimiza problemele generate de variabilitatea producției energiei electrice de către SRE, în sensul

minimizării cheltuielilor aferente Pieței de Echilibrare la care utilizatorul final participă, prin creșterea preciziei prognozei cantității de energie electrică absorbită din / injectată în SEN.

Satisfacerea unui vârf de sarcină variabil în timp este uneori un proces cu o eficiență financiară extrem de redusă și cu un impact ridicat asupra mediului. Astfel, prețul energiei electrice la producere crește în timpul vârfului de sarcină, acesta fiind suportat de către utilizatorii finali.

AGS este așadar o metodă importantă și pentru această categorie de participanți la piață întrucât, prin abordarea unei scheme tarifare diferențiate, pot obține economii semnificative ale facturii de energie prin mutarea vârfului de sarcină propriu în perioade de gol ale curbei de sarcină la nivelul SEN.

Beneficiile secundare generate din AGS pot consta în creșterea fiabilității elementelor de rețea pe care utilizatorii finali le dețin, dar și în îmbunătățirea ICTEE. Funcționarea cu sarcină sub cea normată/optimă nu este economică, nefiind utilizată rațional capacitatea de transfer pentru care a fost dimensionat elementul de rețea.

Prin utilizarea elementelor de rețea (transformatoare de putere și linii electrice) la sarcini optime tehnico-economic se asigură o durată de viață care să nu scadă sub durata normală de utilizare, ca urmare a evitării supraîncălzirii acestora și deteriorării izolației. De asemenea, prin introducerea unei surse distribuite de energie se pot asigura mai ușor valorile dorite ale unor ICTEE, dintre care cel mai relevant este variația tensiunii.

În cadrul lucrării a fost analizată și viabilitatea tehnică și economică a aplicării procedurii de AGS prin utilizarea SSEE de tip Sistem de Stocare a Energiei Electrice utilizând baterii de acumuloare – BESS (Battery Energy Storage System), la nivelul utilizatorilor finali de energie, dar și influențele dezvoltării SRE și impactul minimizării THD<sub>1</sub> asupra performanțelor energetice și financiare ale acestora.

Principiul de funcționare constă în utilizarea BESS pentru AGS prin încărcarea sistemului în perioadele de gol de sarcină și descărcarea acestuia în perioadele de vârf de sarcină.

Utilizarea BESS pentru AGS a fost intens cercetată în ultima perioadă de comunitatea științifică internațională. Toate studiile au demonstrat că, fără existența unei scheme de preț diferențiate orar (gol-vârf), utilizarea exclusivă a BESS nu poate fi fezabilă din punct de vedere financiar în condițiile de piață actuale.

Un producător din RES echipat cu BESS poate avea însă avantaje importante la licitarea pe piață a contractelor bilaterale în care poate oferi o producție cvasiconstantă pe perioade de timp și poate evita pierderile în cazul erorilor de prognoză a producției de energie electrică.

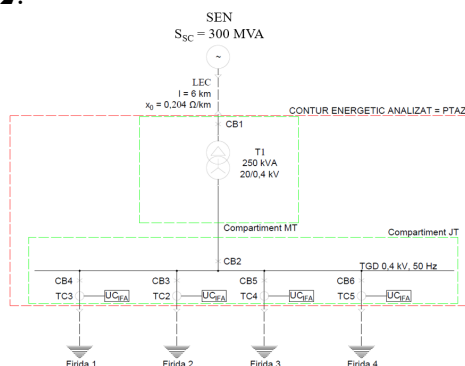
În acest sens, în cadrul lucrării se va analiza viabilitatea financiară a unui sistem hibrid destinat AGS, ce va utiliza atât o sursă de energie distribuită, sub forma unei centrale fotoelectrice de talie mică – medie, cât și un BESS de talie mică pentru stocarea energiei electrice și realizarea AGS. Scopul constă în evaluarea potențialului financiar al procedurilor de AGS în condiții actuale de piață și identificarea acelor ajustări ce odată realizate, pot să conducă la o susținere financiară a acestor tipuri de acțiuni.

Întrucât scopul SAME este de a crește eficiența energetică, operațională și financiară în primul rând la nivelul utilizatorului final, a fost dezvoltat un modul de analiză ce va funcționa în ipoteza că investiția este realizată exclusiv din fondurile proprii ale acestuia, fără contribuția, cofinanțarea sau susținerea Operatorului de Distribuție, cu toate că atât beneficiile cât și dezavantajele generate de această soluție se vor răsfrânge și asupra acestuia din urmă, după cum a fost explicitat în capitolele anterioare.

Implementarea AGS bazate exclusiv pe proceduri de tip Peak-Shaving / Peak-Shifting sunt fezabile din punct de vedere financiar fie în cazul în care plaja de variație a prețului energiei

electrice este una complexă, care să țină seama de vârfurile / golurile curbei de sarcină, fie în cazul în care participă activ la piața de energie electrică prin contractarea pe intervale de decontare a cantității de energie necesare.

În aceste condiții, pentru dezvoltarea modelului teoretic și a procedurii experimentale, a fost analizat un contur energetic alimentat prin intermediul unui transformator de putere având de 20/0,4 kV cu o putere nominală de 250 kVA, răcire ONAN, cu  $\Delta P_0 = 0,3 \text{ kW}$  și  $\Delta P_k = 3,25 \text{ kW}$ . Schema electrică de principiu a conturului energetic analizat este prezentată în **Figura 3.2.2**.



**Figura 3.2.2** – Schema electrică monofilară de principiu a Postului de Transformare analizat

A fost considerat un factor optim de încărcare a transformatorului de putere care conduce la funcționarea la randament maxim,  $\beta_{opt} = 60$  [%], conform prevederilor Regulamentului de exploatare tehnică a echipamentelor electrice din distribuția primară, acesta având izolația în ulei, cu circulație naturală și răcirea cu aer, cu circulație naturală (ONAN = Oil Natural Air Natural).

În funcție de tehnologia utilizată pentru fabricația transformatoarelor de putere, factorul optim de încărcare a transformatorului pentru funcționarea la randament maxim va fi diferit. În cadrul soluției software dezvoltate, utilizatorul va putea selecta dintr-o listă tipul transformatorului de putere analizat sau va putea introduce manual valoarea factorului optim de încărcare pentru funcționare la randament maxim.

În vederea creșterii performanțelor energetice ale procesului de distribuție a energiei electrice în conturul energetic analizat, există trei variante disponibile:

1. Adoptarea unor AIPE prin intermediul cărora să fie obținută o scădere a puterii tranzitate prin transformatorul de putere;
2. Înlocuirea transformatorului de putere existent cu unul corect dimensionat pentru asigurarea funcționării la sarcină optimă pentru o durată cât mai mare de timp (necesită un calcul tehnico-economic justificativ al economiei realizate față de investiția necesară);
3. Implementarea ambelor soluții prezentate anterior.

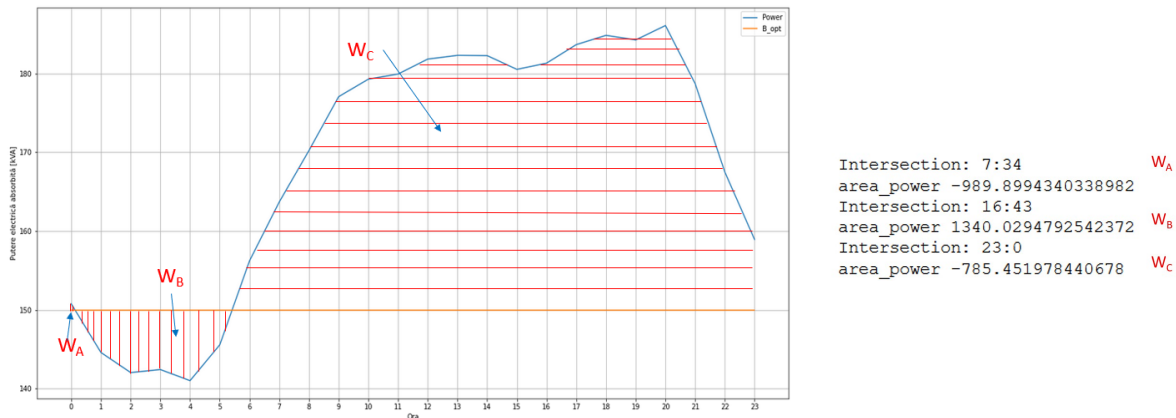
Pasul următor a constat în determinarea graficului de sarcină medie zilnică pentru cele două tipuri de zile: lucrătoare vs. nelucrătoare.

Prin calcularea valorilor medii ale puterilor electrice absorbite (*mean*) și agregarea valorilor astfel obținute, au fost construite graficele de sarcină aferente.

În vederea determinării cantităților de energie aflate deasupra, respectiv sub încărcarea optimă a transformatorului, a fost dezvoltat un sub-modul de analiză a ”trecerii prin 0 a curbei”, ce ia drept zero relativ sarcina optimă a transformatorului.

Acest modul determină cu abatere de 0,5% momentul intersecției dintre curba de sarcină și curba de încărcare optimă iar apoi, prin integrare, determină cantitățile de energie electrică din

intervalul analizat – între două intersecții succesive. Rezultatele acestui calcul sunt prezentate în **Figura 3.2.3**.



**Figura 3.2.3** – Cuantificarea cantităților de energie din regimurile de gol / vârf ale curbei de încărcare, în cazul unui transformator cu puterea nominală de 250 kVA

Se poate observa că în studiul de caz prezentat, suprafețele identificate prin  $W_A$  și  $W_C$  reprezintă intervale de funcționare în regimuri de supraîncărcare, iar suprafața identificată prin  $W_B$  reprezintă un interval de funcționare în regim de sub-încărcare.

Din punctul de vedere al distribuției regimurilor de funcționare, se constată că în studiul de caz analizat, curba de încărcare a transformatorului de putere este caracterizată de un raport de 14,5 la 1 din punct de vedere al cantității de energie absorbită în regim de supraîncărcare față de sub-încărcare.

Cuantificând după duratele de funcționare, se observă că transformatorul funcționează în regim supraîncărcat (sarcina tranzitată este mai mare decât sarcina optimă) 18,5 ore/zi și în regim de sub-încărcare numai 5,5 ore/zi.

De remarcat este faptul că alura graficului de sarcină este diferită de a graficului de sarcină uzuală, fiind identificat un regim de funcționare la vârf de sarcină ce se întinde pe mai multe ore din zi. Principalul motiv al acestui regim constă în modificările comportamentale ale utilizatorilor ca urmare a pandemiei COVID-19 – lucru în regim de telemuncă. Acest nou concept generează o modificare substanțială a alurii curbei de sarcină zilnice la nivelul transformatoarelor de putere ce alimentează utilizatori rezidențiali și comerciali.

Fiind așadar cunoscute cantitățile de energie aferente regimurilor ”supraîncărcat” și ”sub-încărcat”, a fost dezvoltat un modul software care să dimensioneze și să cuantifice tehnic o soluție optimă de Aplatizare a Graficului de Sarcină (AGS).

În acest sens, pot fi investigate trei direcții fezabile din punct de vedere tehnic:

- Implementarea unor Acțiuni de Îmbunătățire a Performanțelor Energetice(\*);
- Utilizarea energiei din surse regenerabile – sisteme fotoelectrice;
- Utilizarea soluțiilor de stocare a energiei electrice – baterii de acumuloare.

(\*). Acest punct nu poate fi analizat în cazul utilizatorilor de tip rezidențial, fiind greu de cuantificat modul în care se poate susține implementarea de AIPE-uri în locuințele populației. Se poate cuantifica doar în cazul utilizatorilor finali din sectoarele industrial, terțiar – comercial și terțiar – instituțional.

Pentru dimensionarea unei centrale fotoelectrice a fost dezvoltat un model de calcul iterativ, bazat pe platforma PV GIS SARAH.

Utilizând API-ul pus la dispoziție de către platforma anterior menționată, modelul de calcul iterativ testează viabilitatea instalării unui sistem fotoelectric utilizând relația:  $P_{1h,PV} \leq S_{nT}$ .



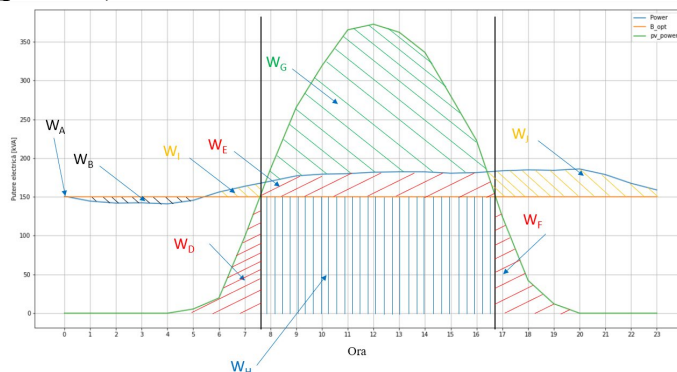
$\cos \varphi_n + PV_{LC}$  [kW], unde:  $P_{1h,PV}$  [kW] este puterea maximă produsă de întregul sistem fotoelectric,  $PV_{LC}$  [kW] este puterea maximă absorbită la vârful de sarcină,  $S_{nT}$  [kVA] este puterea nominală a transformatorului iar  $\cos \varphi_n = 0,90[-]$  este factorul de putere neutral.

Modulul de calcul iterativ apelează API-ul în iterații succesive (24 iterații pe secundă) pentru a determina producția unui sistem fotoelectric ce utilizează panouri monocristaline, cu o înclinare medie de 30 grade, fără sistem de urmărire, bazat pe coordonatele GPS ale amplasamentului analizat. Puterea instalată minimă a sistemului PV modelat este de 50 kWp (kW peak – putere la vârf de producție, în Condiții Standard de Testare – STC), iar limita superioară este de 1.000 kWp, pasul de iterație fiind de 1 kWp. Pentru exemplul analizat, Puterea instalată optimă a sistemului fotoelectric a fost determinată ca fiind 432 kWp.

Odată determinată puterea instalată optimă, modulul software simulează o zi optimă de funcționare a sistemului fotoelectric și reprezintă grafic, prin suprapunere, curba de producție a energiei electrice.

Prin aplicarea sub-modulului de analiză a ”tregerii prin 0 a curbei”, ce ia drept zero relativ sarcina optimă pentru funcționare la randament maxim a transformatorului, se determină cantitățile de energie aferente sistemului fotoelectric aflate sub optimul transformatorului (semn negativ) și peste optimul transformatorului (semn pozitiv) – a se vedea și **Figura 3.2.4**:

- Cantitățile de energie electrică produsă de sistemul fotoelectric sub optimul transformatorului (semn negativ) reprezintă un surplus ce nu poate fi utilizat ca atare pentru Aplatizarea Graficului de Sarcină;
- Cantitățile de energie electrică produsă de sistemul fotoelectric peste optimul transformatorului (semn pozitiv) reprezintă un surplus ce poate fi utilizat ca atare pentru Aplatizarea Graficului de Sarcină, dacă acestea se suprapun peste cantitățile de energie electrică (pozitive) aferente curbei de sarcină.



**Figura 3.2.4** – Determinarea cantităților de energie electrică utilizabile pentru Aplatizarea Graficului de Sarcină (verde) și disponibilă pentru aplatizarea indirectă a graficului de sarcină (roșu și albastru).

Rezultatele modulului software sunt prezentate în **Figura 3.2.5**.

Interpretare rezultate

Cantitatea de energie electrică produsă de sistemul PV: 3012.163 [kWh/zi]  
 Producția de energie electrică disponibilă pentru încărcarea sistemului de stocare: 2681.087 [kWh/zi]  
 Cantitatea de energie electrică necesară a fi acoperită de sistemul de stocare: 114.143 [kWh/zi]  
 Cantitatea de energie electrică disponibilă pentru încărcarea sistemului de stocare la încărcări sub-optimale: 32.752 [kWh/zi]

**Figura 3.2.5** – Rezultatele modulului de analiză a potențialului de aplatizare a curbei de sarcină a sistemului fotoelectric

Întrucât se poate observa că sistemul fotoelectric nu este capabil să asigure o aplatizare corectă a graficului de sarcină dacă este analizat individual, s-a dezvoltat un modul de analiză suplimentar, ce dimensionează o soluție de tip BESS care are drept rol optimizarea repartiției energiei electrice produse de sistemul fotoelectric pe durata unei zile, astfel încât Aplatizarea graficului de sarcină să fie realizată la parametri optimi. În acest sens a fost concepută o bază de date preliminară, conținând diferite tipuri de tehnologii de baterii, caracteristici tehnice și caracteristici financiare.

Modulul de analiză parcurge iterativ toate intrările din baza de date furnizată și determină care este costul asociat fiecărui tip de acumulator în regimul analizat. În baza acestor rezultate, aplică o funcție de minim și afișează utilizatorului structura optimă din punct de vedere financiar a BESS.

Odată dimensionate cele două sisteme (fotoelectric și BESS), SAME continuă cu un modul de analiză tehnico-economică. Modulul de analiză tehnico-economică utilizează indicatorii financiar prezentati în **Tabelul 3.2.1**. În vederea realizării analizei tehnico-economice, au fost considerate o serie de date de intrare, definite de utilizator, precum prețul energiei electrice, rata de creștere a prețului energiei electrice, rata de actualizare, durata de analiză, costul specific al sistemului fotoelectric și cheltuiala specifică de exploatare aferentă sistemului fotoelectric / BESS.

**Tabelul 3.2.1** – Indicatori financiar utilizați

| Indicatori financiar                                    |         |   |        |
|---|---------|---|--------|
| Indicator   | Notatie | Relație de calcul   | U.M.   |
| Venit Net Actualizat / Net Present Value                | VNA/NPV | $VNA = \sum_{t=1}^{tst} \frac{I_t - C_t}{(1+a)^t} - CAPEX$      | [EUR]  |
| Rata Internă a Rentabilității / Internal Rate of Return | RIR/IRR | $VNA = \sum_{t=1}^{tst} \frac{I_t - C_t}{(1 + RIR)^t} = 0$      | [%/an] |
| Termenul Brut de Recuperare / Simple Payback Period     | TRB/SPP | $TRB = \frac{CAPEX}{\frac{\sum_{i=1}^{tst} I_i - C_i}{t_{st}}}$ | [ani]  |

În vederea determinării Beneficiilor anuale generate de proiect, au fost determinate pierderile de putere și energie în transformator ca urmare a funcționării la sarcină diferită de cea optimă, pentru stabilirea nivelului de referință.

Ulterior, au fost determinate pierderile de putere și energie în scenariul implementării proiectului de aplatizare a curbei de sarcină ținând seama de cele două componente: Sistemul fotoelectric și Sistemul de stocare a energiei electrice.

A fost determinată, de asemenea, și cantitatea zilnică de energie necesară a fi tranzitată prin transformator pentru ca acesta să funcționeze la sarcină optimă.

Pentru creșterea preciziei metodei de analiză propuse, modulul software dezvoltat ține seama și de următoarele aspecte tehnico-economice:

- Ține seama de degradarea în timp a modulelor fotoelectrice și a capacității de stocare a bateriilor electrochimice, considerând rate de degradare / denominare medii de 0,6%/an pentru sistemul fotoelectric și de 0,01%/ciclu pentru sistemul de stocare.
- Ține seama de prognoza de evoluție a prețurilor energiei electrice, prin utilizarea unei aplicații de tip WEB-CRAWLER care evaluează (zilnic) raportările OPCOM privind prețurile pe diversele piețe de energie de interes (PZU, Intra-zilnic și echilibrare)

Rezultatul modulului de analiză financiară este prezentat în **Figura 3.2.6**.

## Dezvoltarea unui Sistem Avansat de Management Energetic

Se propune instalarea unui sistem PV cu o putere instalată de: 432 [kWp]  
susținută de un sistem de stocare a energiei electrice bazat pe acumulatori având următoarele caracteristici:

|                            |           |
|----------------------------|-----------|
| Tip acumulator             | Li-NMC    |
| DOD [%]                    | 80.0      |
| Durata de viata [cicluri]  | 5000.0    |
| Tensiune Nominala [V]      | 1500.0    |
| Capacitate [Ah]            | 644.0     |
| C-rate [-]                 | C5        |
| Curent nominal [A]         | 800.0     |
| Incarcare [h]              | 3.0       |
| Energie disponibila [kWh]  | 1100.0    |
| Pret [EUR]                 | 385000.0  |
| Numar Acumulatori Necesari | 3.0       |
| Cost total BESS            | 1155000.0 |

-----  
CAPEX Soluție: 1479000.0 [EUR]  
OPPEX Soluție: 49837.44 [EUR/an]  
-----

-----  
Energia zilnică tranzitată prin transformator - situația actuală: 4045.22 [kWh/zi]  
Energia zilnică tranzitată prin transformator - situația optimă: 3600.0 [kWh/zi]  
Energia zilnică tranzitată prin transformator - situația propusă: 1033.06 [kWh/zi]  
Abateră procentuală de la optim în situația propusă este de: 71.3 [%]  
-----

-----  
Pierderile de energie anuale prin transformator - situația actuală 16.71 [MWh/an]  
Pierderile de energie anuale prin transformator - situația propusă 2.63 [MWh/an]  
-----

-----  
Economie de energie ca urmare a aplatizării curbei de sarcină:  
14.08 [MWh/an]  
-----

-----  
Economie medie anuală de energie ca urmare a instalării sistemului hibrid PV+BESS:  
1023.8 [MWh/an]  
-----

-----  
Rezultatele analizei tehnico-economice:  
Beneficiile medii anuale generate de instalarea sistemului hibrid sunt de: 327998.91 [EUR/an]  
Durata de analiză a proiectului este de: 25 [ani]  
Rata de actualizare considerată este de: 11 [%/an]  
Venitul Net Actualizat generat de proiect este de: 319356.53 [EUR]  
Rata Internă a Rentabilității aferentă proiectului este de: 13.22 [%/an]  
Perioada Brută de Recuperare a Investiției este de: 5.32 [ani]  
-----

### **Figura 3.2.6** – Rezultatele modulului de analiză tehnico-economică AGS

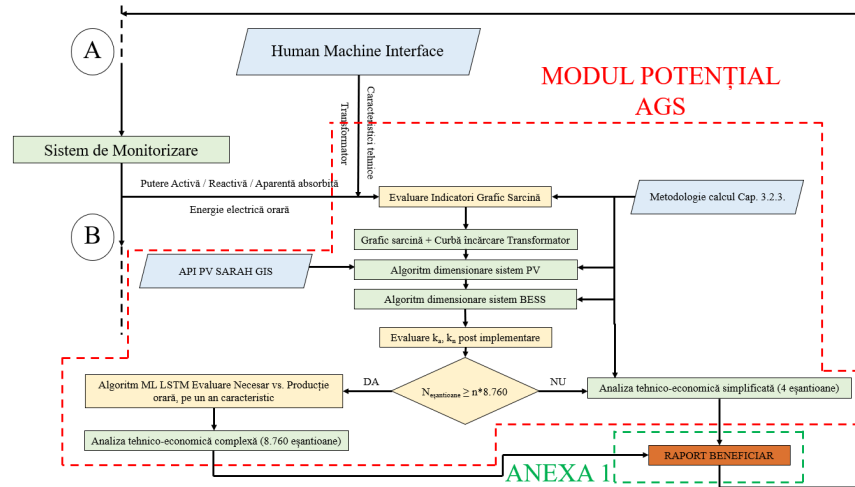
Se observă așadar că proiectul este viabil la limită în acest caz. Există o serie de justificări pentru această situație, dintre care cele mai importante sunt:

- Inexistența unui sistem tarifar avantajos pentru proiecte de tip Peak Shaving / Peak Shifting, ce ar implica diferențierea tarifului energiei electrice în funcție de intervalul orar din zi; Totuși implementarea unei soluții hibrid poate genera avantaje financiare prin optimizarea participării la piața de energie (având în vedere cvasiconstanța graficului de sarcină), valorificarea energiei în exces prin acumulare în sistemul de stocare și evitarea penalizărilor la neîndeplinirea condițiilor contractuale la lipsa radiației solare pe durata zilei (erori de prognoză de producție).
- Alura graficului de sarcină – regimurile de încărcare peste optimul transformatorului au o durată în timp de peste 4 ori mai mare decât regimurile de încărcare sub optimul pentru funcționare la randament maxim a transformatorului, astfel că proiectul nu poate fi implementat doar prin utilizarea BESS, fără producerea unei cantități suplimentare de energie electrică din surse regenerabile;
- Costurile relativ ridicate aferente operării / mentenanței / înlocuirii bateriilor de acumuloare – dat fiind progresul tehnologic susținut, este de așteptat ca acestea să înregistreze scăderi similare cu cele ale tehnologiei fotoelectrice;
- Factorul de aplatizare (pre implementare proiect) și factorul de neuniformitate (pre implementare proiect) nu se încadrau în plaja identificată ca fiind atractivă pentru astfel de proiecte (0,4-0,6).

În vederea cuantificării corecte a variabilității producției sistemului fotoelectric propus pentru analiză a fost dezvoltat un algoritm de tip ML-LSTM care, în baza datelor istorice de consum și a prognozei producției energiei electrice (date orare), determină cantitatea anuală de

energie electrică ce poate fi acoperită prin implementarea sistemului PV+BESS, crescând astfel precizia și acuratețea modulului de analiză tehnico-economică.

În **Figura 3.2.7** se prezintă schema logică propusă pentru modulul de analiză a potențialului AGS.



**Figura 3.2.7** – Schema logică propusă pentru modulul de analiză a potențialului de AGS

Conform prevederilor standardelor tehnice în vigoare ce reglementează analiza ICTEE, prima etapă constă întotdeauna în verificarea Factorului Total de Distorsiune Armonică de Tensiune. În cazul în care valorile înregistrate de  $THD_U$  se încadrează în limitele impuse, analiza poate continua cu investigarea valorilor înregistrate de Factorul Total de Distorsiune Armonică de Curent Electric –  $THD_I$ .

Funcționarea rețelelor de distribuție în regimuri cu mărimi distorsionate – armonice de curent electric – conduce la creșterea pierderilor de putere și energie și la apariția unor probleme operaționale și de exploatare a acestora. Încadrarea ICTEE în plaja de admisibilitate reprezintă o necesitate pentru optimizarea performanței energetice a rețelelor electrice, fie că vorbim despre sectorul rezidențial, terțiar sau industrial.

Funcționarea rețelelor electrice cu o performanță energetică scăzută influențează negativ potențialul de aplicare a procedurilor de tip AGS descrise anterior. De asemenea prezența regimului cu mărimi distorsionate poate conduce la apariția fenomenului de denominare / demarcare a transformatoarelor de putere.

Creșterea pierderilor de putere activă determină o temperatură mai ridicată a înfășurărilor în timpul funcționării, ceea ce poate conduce la o reducere corespunzătoare a duratei de viață a transformatorului. Pentru eliminarea acesteia, este necesară reducerea încărcării transformatorului, deci utilizarea la o putere mai mică decât cea nominală (denominarea / demarcarea transformatorului).

Pentru a oferi o funcționalitate suplimentară modulului de analiză, a fost dezvoltat, de asemenea, un algoritm de evaluare financiară a potențialului obținut prin limitarea  $THD_I$ , ce are la bază Durata Brută de Recuperare a Investiției limită considerată ca fiind acceptabilă de către utilizatorul final. În acest context, valoarea predefinită limită este de 5 ani, însă aceasta poate fi oricând înlocuită cu o valoare introdusă de către utilizator, prin interfața utilizator-mașină (HMI – Human Machine Interface).

Trebuie ținut seama de faptul că valoarea limită a TRB depinde de următorii factori:

1. Amplasarea investiției (zeci, sute de mii, milioane de EUR);
2. Puterea financiară a companiei (turnover-ul);

3. Tipul investiției (proces tehnologic, procese non-tehnologice, organizatorice);
4. Cash Flow-ul companiei;
5. Credibilitatea companiei în fața instituțiilor de finanțare (bancară);
6. Existența și calitatea business plan-ului aferent investiției.

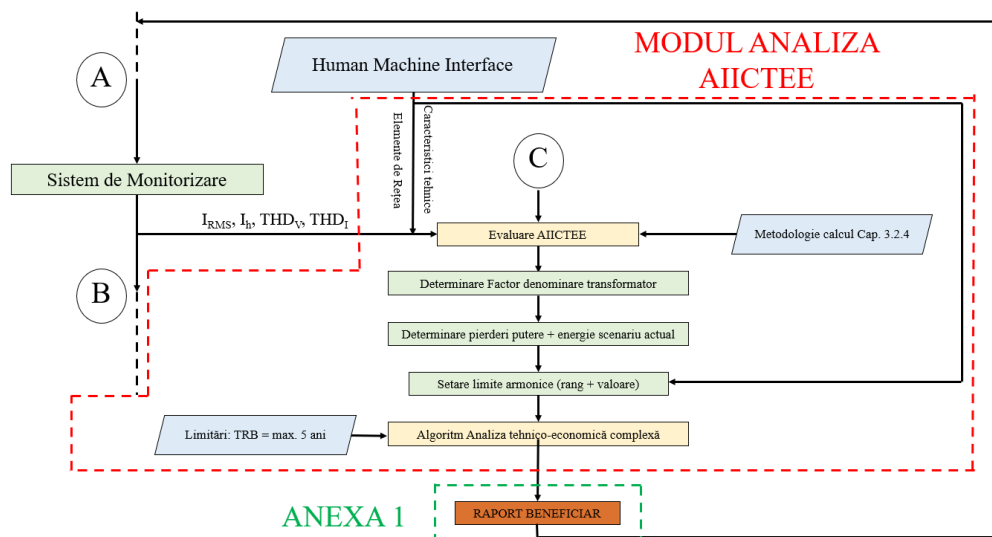
Astfel, în funcție de cei 6 factori, valorile uzuale ale TRB limită sunt 3, 5, respectiv 10 ani.

Modulul de analiză financiară determină care este valoarea maximă a CAPEX-ului (cheltuieli investiționale – Capital Expenditures) care poate să conducă, prin minimizarea rangurilor armonice identificate ca având valori sensibil peste limita recomandată de 5% din fundamentală, la recuperarea investiției în cel mult 5 ani calendaristici. Ulterior, modulul de analiză determină Venitul Net Actualizat ce poate fi obținut pe durata de studiu de 10 ani, conform reglementărilor în vigoare, încurajând astfel reprezentanții Utilizatorului să ia decizia de a realiza investiția propusă.

Schema logică propusă a modului de analiză a potențialului de implementare a AICTEE privind minimizarea regimului deformant de curent electric este prezentată în **Figura 3.2.8**.

Pentru a veni în sprijinul utilizatorilor, a fost dezvoltat și un modul prin care se urmărește în timp real evoluția factorului de putere mediu realizat la nivelul conturului energetic analizat (la nivelul PCC) și se cuantifică costurile aferente energiei electrice reactive tranzitate (decizia de monitorizare a factorului de putere la utilizator este determinată mai mult de impactul economico-financiar al acestuia și mai puțin de încadrarea în limita stabilită prin factorul de putere neutral).

De asemenea, a fost implementat un modul de notificare, prin care reprezentantul tehnic al utilizatorului este anunțat în timp real atunci când se înregistrează valori ale factorului de putere mediu realizat agregat la 60 de minute mai mici de 0,65.



**Figura 3.2.8** – Schema logică a modului AICTEE - THD<sub>1</sub>

### 3.3. Integrarea modulelor de analiză în SAME

În cadrul lucrării au fost concepute, dezvoltate și testate o serie de module de analiză energetică și financiară, pornind de la schema logică de bază a SAME:

- A. **Modulul de analiză a Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice (ICTEE)**, ce urmărește evaluarea în timp real a:
  - Golurilor de tensiune;

- Creșterilor de tensiune (Supratensiunilor);
  - Întreruperilor;
  - Factorului de vârf de tensiune;
  - Factorului de formă de tensiune;
  - Nesimetriilor tensiunilor;
  - Nesimetriei curenților electrici;
  - Factorului total de distorsiune armonică de tensiune;
  - Factorului total de distorsiune armonică de curent electric;
  - Factorului de Putere (și, implicit, a puterilor active, reactive și aparente absorbite);
  - Cuantificarea financiară a funcționării conturului energetic la factor de putere non-neutral.
- B. Modulul de Analiză a Potențialului de Aplatizare a Graficului de Sarcină (AGS), ce urmărește:**
- Evaluarea, în timp real, a Gradului de încărcare a transformatoarelor de putere;
  - Evaluarea agregată a pierderilor de putere și energie la nivelul transformatoarelor de putere;
  - Cuantificarea cantităților de energie electrică situate sub și peste optimul de funcționare al acestora;
  - Dimensionarea, prin utilizarea unui API dedicat, a unor sisteme de generare distribuită capabile să asigure un spor de putere la nivelul utilizatorului, în vederea minimizării sarcinii tranzitate prin transformatorul de putere (la nivelul Punctului Comun de Cuplare – PCC);
  - Dimensionarea unui sistem de stocare a energiei electrice, bazat pe baterii de acumuloare, capabil să asigure o distribuție optimă în timp a energiei furnizate de sistemul de generare distribuită și o încărcare optimă a transformatorului de putere;
  - Realizarea unei analize tehnico-economice detaliate privind viabilitatea implementării unei soluții de AGS la nivelul conturului energetic analizat.
- C. Modulul de Analiză a potențialului tehnico-financiar de implementare a unor Acțiuni de Îmbunătățire a Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice (AICTEE) – armonice de curent electric, care urmărește:**
- Evaluarea Factorului Total de Distorsiune Armonică de Curent Electric (THD<sub>I</sub>) la nivelul conturului / subconturului energetic monitorizat, în timp real;
  - Determinarea pierderilor de putere și energie la nivelul elementelor de rețea (linii electrice și transformatoare de putere) la funcționarea în regim distorsionat de curent electric;
  - Dimensionarea unui sistem de filtrare a armonicilor de curent electric (rangurile cu o contribuție semnificativă, precum 5, 7, și 11 dar și gama de armonice de rang  $2n+1$ );
  - Realizarea unei analize tehnico-economice detaliate prin care se indică beneficiile energetice și financiare ce ar putea fi obținute prin implementarea unui sistem de filtrare a armonicilor de curent electric și care indică valoarea maximă a CAPEX-ului care să permită proiectului să fie fezabil din punct de vedere financiar.
- D. Modulul de Analiză a Indicatorilor de Performanță Energetică (IPE), ce urmărește:**
- Evaluarea, în timp real, a evoluției IPE;
  - Evaluarea agregată (cu o periodicitate selectabilă independent), a evoluției IPE;
  - Normalizarea IPE în funcție de factorii variabili și statici relevanți, pentru creșterea gradului de încredere în procesul de evaluare.
- E. Modulul de Prognoză a Cererii de Putere Electrică Activă (PCPEA), bazat pe procedura de Machine Learning prezentată în cadrul Capitolului 3.1, ce urmărește:**

- Prognoza cererii de putere la nivelul conturului energetic, în trei trepte distincte de agregare;
- Prognoza evoluției IPE, în două trepte de agregare (orar – 60 minute și zilnic – 24 ore).

Întrucât fiecare modul conține o componentă tehnică și o componentă financiară, se impune integrarea rezultatelor furnizate de către acestea într-o funcție financiară globală, care să ofere o vedere de ansamblu asupra profitabilității financiare asociate utilizării energiei electrice și, implicit, asupra potențialului de îmbunătățire / maximizare a acesteia.

De asemenea, în cadrul acestei integrări, se va furniza și o imagine de ansamblu privind potențialul de reducere a impactului asupra mediului la nivelul conturului energetic analizat, prin aplicarea diferitelor acțiuni recomandate de către SAME.

Pornind de la descrierea modulelor de analiză, realizată în cadrul prezentului Capitol, se vor prezenta, centralizat, în **Tabelul 3.3.1**, principalele **rezultate financiare** furnizate de SAME.

**Tabelul 3.3.2** se vor prezenta funcțiile ce definesc indicatorii financiari, iar în **Anexa 5** se vor detalia / descrie variabilele acestora.

Toate rezultatele furnizate de SAME, pentru fiecare Modul descris, au fost integrate în Interfața Om-Mașină, în sensul furnizării unor rezultate / rapoarte relevante, globale, care să poată oferi o imagine de ansamblu asupra economiilor potențiale de energie electrică (și, implicit, asupra reducerilor costurilor și impactului de mediu asociate).

**Tabelul 3.3.1 – Rezultate financiare furnizate de SAME**

| MODUL | REZULTAT  | TIP                  |
|-------|---|----------------------|
| A     | Cost Energie Electrică Activă – $C_{WP}$  | COST Periodic        |
|       | Cost Energie Electrică Reactivă – $C_{WQ}$  | COST Periodic        |
| B     | Cost Pierderi anuale de energie – încărcare transformatoare de putere – $C_{\Delta WP}^{AGS}$             | COST Periodic        |
|       | Cost implementare sistem generare distribuită – $C_{SGD}$   | COST Investiție      |
|       | Cost implementare sistem stocare energie – $C_{SSEE}$   | COST Investiție      |
|       | Reduceri Cost Pierderi anuale de energie – încărcare transformatoare de putere – $E_{\Delta WP}$          | ECONOMII realizabile |
| C     | Cost Pierderi anuale de energie – regim distorsionat de curent electric – $C_{\Delta WP}^{THD1}$          | COST Periodic        |
|       | Reduceri Cost Pierderi anuale de energie – regim distorsionat de curent electric – $E_{\Delta WP}^{THD1}$ | ECONOMII realizabile |
|       | Cost implementare sistem filtrare armonice – maxim acceptabil – $C_{AHF,max}^{THD1}$                      | COST Investiție      |
| D     | -   | -                    |
| E     | -   | -                    |
| TOTAL | Economia totală realizabilă – $E_{totale}$  | ECONOMII realizabile |

**Tabelul 3.3.2 – Indicatori financiari – formule si variabile relevante**

| INDICATOR              | FUNCTIA  | U.M.                      |
|------------------------|--|---------------------------|
| $C_{WP}^{initial}$     | $C_{WP}^{initial} = P \cdot t \cdot c_w = f(C_{\Delta WP}^{AGS}, C_{\Delta WP}^{THD1}, P, PF, k_n, c_w)$   | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $C_{WQ}$               | $C_{WQ} = P \cdot \sin(\cos(PF)) \cdot t \cdot c_{qpalliere(PF)} = f(P, PF, c_{qpalliere(PF)})$  | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $C_{\Delta WP}^{AGS}$  | $C_{\Delta WP}^{AGS} = \Delta P_0 \cdot t_1 \cdot c_w + \Delta P_k \cdot \left( \frac{W(t)}{P_M} \cdot \frac{W(t)}{27.500 - \frac{W(t)}{P_M}} + 10.000 \right) \cdot \left( \frac{P_M \cdot PF_M}{S_{nT}} \right)^2 \cdot c_w = f(\Delta P_0, \Delta P_k, P_M, PF_M, c_w)$ | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $C_{SGD}$              | $C_{SGD} = P_{rated,PV} \cdot c_{sp} = f(P_{MaxPV} = P_M(t), c_{sp})$  | [EUR]                     |
| $C_{SSEE}$             | $C_{SSEE} = (W_{peste\ optim}^{fără\ PV} - W_{PV\ peste\ optim}^{cu\ PV}) \cdot c_{BESS} = \sum_{i=0}^{23} [(P_{i,med} - P_{opt}) - (P_{i,PV} - P_{opt})] \cdot t_i \cdot c_{BESS} = f(P_{măsurat}, P_{opt}, c_{BESS})$  | [EUR]                     |
| $E_{\Delta WP}$        | $E_{\Delta WP} = C_{\Delta WP}^{AGS} - C_{\Delta WP}^{AGS,cu\ PV+BESS} = f(P_{măsurat}, P_{opt})$  | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $C_{\Delta WP}^{THD1}$ | $C_{\Delta WP}^{THD1} = (\Delta P_{THD1}^h + \Delta P_{LEC}) \cdot t \cdot c_w = f(I_h, R_T, R_0, S, S_n, I, \sigma, c_w)$   | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $E_{\Delta WP}^{THD1}$ | $E_{\Delta WP}^{THD1} = C_{\Delta WP}^{THD1} - C_{\Delta WP}^{THD1,minimizat} = f(I_h)$  | EUR<br>[unitatea de timp] |
| $C_{AHF,max}^{THD1}$   | $C_{AHF,max}^{THD1} = f(I_h, TRB = 5ani)$  | [EUR]                     |
| $E_{totale}$           | $E_{totale} = C_{WP}^{final} < C_{WP}^{initial} = f(Investiții)$   | EUR<br>[unitatea de timp] |

### 3.4. Dezvoltarea interfeței grafice – Interfața om-mașină (HMI)

**Dezvoltarea Interfeței Om-Mașină (HMI)** a avut la bază crearea unui sistem online, user-friendly, de supervizare a proceselor de analiză și a rezultatelor furnizate de acestea. De asemenea, prin utilizarea unei platforme de tip open-source, au fost implementate și funcțiile automate de alarmare, bazate pe un set de reguli ce pot fi oricând modificate, astfel încât să fie asigurată conformitatea cu legislația în vigoare sau adaptarea la țintele impuse de organizație (beneficiarul efectiv al SAME).

SAME asigură așadar afișarea rezultatelor modulelor de analiză într-un format intuitiv, ușor de utilizat de toți factorii de decizie ai Organizației, pornind de la responsabilii tehnici – în cazul utilizatorilor cu un consum energetic mai mare de 1.000 t.e.p./an, aceștia vor fi Manageri Energetic autorizați (rapoarte real-time detaliate) și până la Managementul Superior (rapoarte periodice, cu accent pe implicațiile economice și financiare).

În vederea transpunerii Modulelor de Analiză într-un sistem integrat, ”user-friendly”, care să poată fi utilizat eficient de către personalul de exploatare, responsabilii tehnici și Top Managementul conturului energetic, în această ultimă etapă a dezvoltării SAME, a fost concepută și construită Interfața Om-Mașină (HMI).

SAME a fost dezvoltat utilizând limbajul de programare Py (Python) și constructorul de cod Jupyter Notebook, ce permite utilizarea unui limbaj agnostic (Py, C++, Java etc.). Bazele de date construite atât pentru rularea SAME, cât și de către SAME în sine (rezultatele modulelor de analiză) sunt bazate pe o structură de tip PANDAS DATAFRAME.

După dezvoltarea SAME, componenta HMI a fost dezvoltată utilizând două module distincte. În primul rând, pentru evaluarea metricilor (rezultatelor modulelor de analiză energetică), a fost utilizat Daemon-ul de Rețea StatsD (un program care rulează ca proces în background, nefiind controlabil de către un utilizator de rând) care rulează pe platforma Node.js și care verifică transmiterea de metrici pe protocoalele UDP sau TCP și apoi transmite valori agregate ale acestora către unul sau mai multe servicii back-end.

Pentru asigurarea unei redundanțe ridicate, au fost folosite două servicii back-end înseriate. Primul strat a constat în utilizarea platformei Open Source PROMETHEUS. Aceasta platformă colectează și stochează metricile ca date de tip serii de timp (datele sunt stocate cu eticheta temporală la care au fost preluate și cu alte perechi cheie-valoare opționale, sub forma de etichete). PROMETHEUS așadar permite construcția unui model de date multidimensional.

După asigurarea primului strat de agregare a metricilor, pentru a asigura o interfață mai prietenoasă cu utilizatorul, a fost utilizată platforma Open-Source GRAFANA. Aceasta permite construcția unei interfețe grafice structurată atât pe date în timp real, cât și pe date agregate.

De asemenea, permite conceperea unor alarme / notificări / raportări, în funcție de metricile afișate și are facilitatea de a asigura transmiterea acestora atât prin intermediul e-mail-ului, cât și prin intermediul unei aplicații de mobil dedicate, minimizând așadar timpul de răspuns al responsabililor tehnici atunci când apar situații anormale în funcționarea conturilor energetice monitorizate.

În această platformă au fost introduse toate Modulele de Analiză dezvoltate în cadrul lucrării. Ținând seama de performanțele SAME (din punct de vedere al vitezei de preluare a datelor și al timpului de calcul / procesare), platforma interactivă GRAFANA a fost configurată cu o rată de auto-actualizare de 5 secunde (toate valorile afișate se actualizează automat la fiecare 5 secunde).



## 4. Implementarea sistemului. Rezultate obținute și studii de caz

SAME a fost implementat și testat pe un număr de șase contururi energetice distincte, după cum urmează:

- Un utilizator industrial din industria automotive din județul Sibiu – SAME a fost instalat la nivelul punctului comun de cuplare al conturului energetic și la nivelul unui post de transformare ce alimentează cu energie aproximativ 25% din platforma industrială – patru circuite monitorizate (PCC, secundarul transformatorului de putere 20/0,4 kV și secundarele a două transformatoare 0,4/0,12 kV ce alimentează o secție de producție);
- La nivelul a două clădiri de birouri din cadrul aceluiași proiect imobiliar din Municipiul București (la nivelul secundarelor transformatoarelor de putere ce alimentează clădirile și la nivelul alimentării cu energie electrică a sistemului HVAC) – patru circuite monitorizate (2 la fiecare clădire);
- La nivelul unui post de transformare aparținând SDEE Transilvania SUD, situat în județul Brașov (la nivelul TDRI) – patru circuite monitorizate.

### 4.1. S.C. – Identificarea unor AICTEE – Limitare regim deformant de curent electric

În cadrul cercetărilor în vederea demonstrării importanței minimizării  $THD_I$  la nivelul rețelei de distribuție a utilizatorilor finali, a fost realizat un **studiu de caz (S.C.)** privind viabilitatea tehnică și financiară a implementării unor soluții de reducere a acestuia.

Cercetarea experimentală desfășurată pentru elaborarea acestui studiu de caz și pentru dezvoltarea modului de analiză a potențialului de implementare a AICTEE referitoare la reducerea regimului deformant de curent electric, a avut la bază un utilizator industrial ce desfășoară activitatea curentă conform unui cod CAEN 2031 – Producția de piese diverse și accesorii pentru autovehicule și motoare de autovehicule.

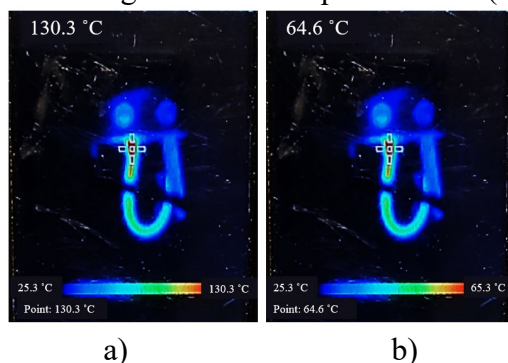
Acesta a suferit în perioada anterioară analizei o serie de evenimente de natură tehnică, concentrate în două zone de producție în care funcționează mai multe mașini CNC (Computer Numerically Controlled). Mașinile CNC sunt prevăzute cu sisteme de acționare electrică în curent continuu pe 3 axe (peste 12 motoare electrice în curent continuu).

Aceste mașini CNC sunt alimentate prin transformatoare având o putere aparentă nominală de 112,5 kVA și tensiunea nominală de 0,4/0,12 kV, având o grupă de conexiuni Yy6 – fiind proiectate și fabricate în Statele Unite ale Americii. În ultimii patru ani utilizatorul a înlocuit, ca urmare a cedării complete, peste 40 de transformatoare de acest tip, fiindu-i generate costuri totale suplimentare de peste 30.000 EUR/an, la care se adaugă pierderi de natură financiară, ca urmare a sistării temporare a producției, de peste 8.500 EUR/an.

Impactul funcționării în regim distorsionat este cu atât mai semnificativ cu cât receptoarele analizate au un regim de funcționare permanent (8.600 ore/an), cu excepția eventualelor perioade mentenanță / reparații (în medie, 160 ore/an).

În urma analizei realizate ca parte a cercetării experimentale, a fost identificat faptul că mașinile CNC de tip 1 și 2 generau perturbații armonice de curent electric semnificative, în principal datorită sistemelor de conversie a puterii (redresoare) utilizate pentru alimentarea multiplelor motoare în curent continuu.

Pasul următor a constat în realizarea unei analize termografice a transformatoarelor de putere ce alimentau aceste mașini CNC. În urma acesteia a fost identificat faptul că toate transformatoarele de putere de 0,4/0,12 kV dar și liniile electrice ce asigurau legătura dintre acestea și mașinile CNC funcționau într-un regim sever de supraîncărcare (a se vedea **Figura 4.1.1**).



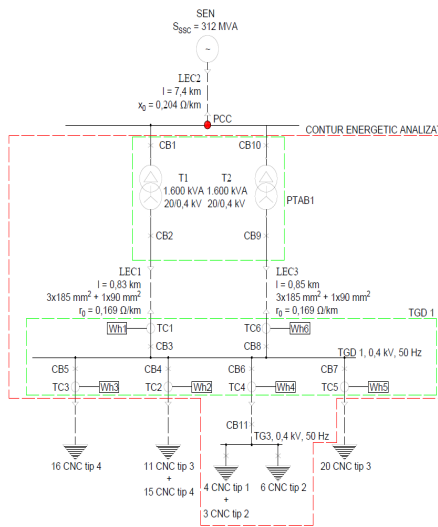
**Figura 4.1.1** – Analiza termografică a fazei L3 de alimentare a unei mașini CNC tip 1 a) înainte de implementarea proiectului, b) după implementarea proiectului de filtrare a armonicilor

Temperatura de funcționare a liniei electrice conectate la borna secundarului transformatorului de putere era de 139,6 °C, cu peste 70% mai mare decât temperatura nominală de funcționare garantată de producător (65-70 °C).

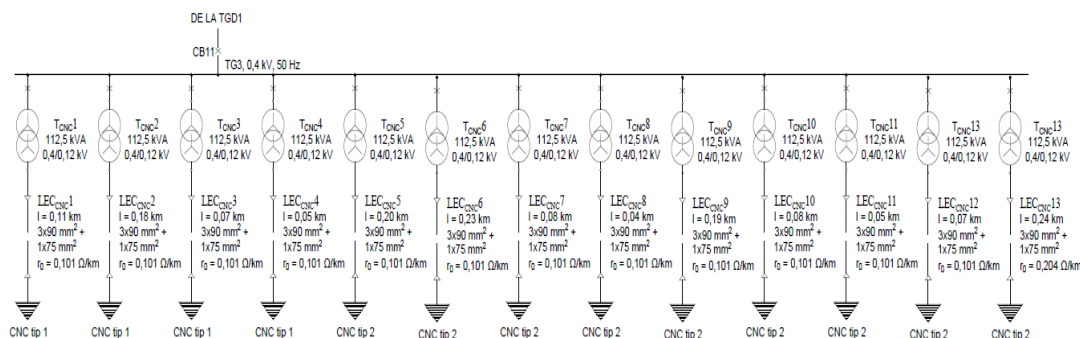
Prin reducerea nivelului armonicilor de rang 3 (influența asupra conductorului Neutru), 5, 7 și 9 ca urmare a instalării unui sistem activ de filtrare a armonicilor (AHF – Active Harmonic Filter), utilizatorul nu a mai întâmpinat situații soldate cu defectarea transformatoarelor de putere și a eliminat astfel atât pierderile suplimentare de putere și energie din rețeaua de distribuție, cât și pierderile financiare de natură non-energetică (înlocuiri de echipamente și sistarea procesului de producție).

În vederea dezvoltării experimentale a modelului de analiză, a fost realizată o campanie de măsurări la nivelul bornelor secundare ale transformatorului de putere de 0,4/0,12 kV.

În urma realizării campaniei de măsurări la nivelul secundarului transformatorului aflat în stare în funcționare (T1), campanie desfășurată pe o perioadă de 72 de ore, cu o frecvență de preluare a datelor de 1 pachet de date pe secundă, utilizând un analizor trifazat de rețea de clasa A (FLUKE 1734), a fost construită baza de date utilizată la testarea modulului de calcul.



**Figura 4.1.2** – Schema electrică de principiu a conturului energetic – AICTEE



**Figura 4.1.3** – Schema electrică de principiu a TGD3 – AICTEE

Ținând seama de structura Postului de Transformare, prezentată în **Figura 4.1.2**, au fost realizate măsurări pe fiecare plecare din TGD pentru a identifica sursa relevantă a armonicilor de curent electric. A fost astfel identificat faptul că sursa relevantă a armonicilor de curent electric este reprezentată de TG 3 (Tabloul General 3) – v. **Figura 4.1.3** – ca urmare a grupării în acest punct din rețea a mașinilor CNC cu cele mai semnificative contribuții la distorsiunea armonică de curent electric. De asemenea, a fost identificată o nesimetrie importantă a curenților electrici, ceea ce pune în evidență o preocupare redusă pentru echilibrarea încărcării fazelor. În acest sens, a fost determinat impactul armonicilor de curent electric asupra performanțelor energetice asociate LEC1.

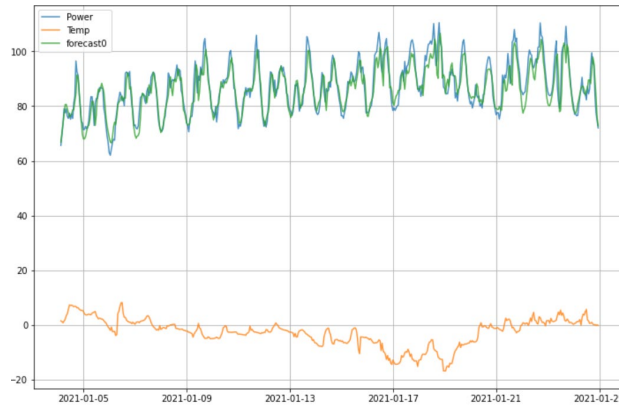
Prin aplicarea metodologiei prezentate în cadrul Capitolului 3, Analiza Cost-Beneficiu realizată arată că proiectul poate genera, pe durata de studiu (10 ani), un Venit Net Actualizat (VNA) de peste 1,4 mil. EUR, cu un Cost Total Actualizat (TOTEX) de 650.000 EUR. Perioada brută de recuperare a investiției este de numai 3 ani, față de durata de viață garantată de producător a AHF de 10 ani. S-a demonstrat așadar că acest modul poate contribui semnificativ la creșterea performanțelor energetice și financiare a rețelelor de distribuție ce aparțin utilizatorilor finali.

## 4.2. S.C. – Prognoza cererii de putere activă

Conturul energetic pe care a fost dezvoltat, testat și extins algoritmul de Machine Learning este unul din sectorul energetic terțiar – clădire de birouri. La nivelul acesteia, sistemul de climatizare este responsabil pentru peste 70% din cererea de energie electrică anuală, atât încălzirea, cât și răcirea și apa caldă menajeră fiind asigurate prin sisteme electrice.

În prima etapă de dezvoltare a algoritmului de învățare automată și predicție, a fost considerată doar dependența dintre puterea activă absorbită și temperatura medie exterioară. Parametrizarea rețelei neuronale a fost realizată prin iterații succesive, urmărind identificarea valorilor optime ale hiperparametrilor care să conducă la cea mai bună formă a prognozei cererii de putere activă. La finalizarea procesului de învățare / testare, după cele 20 de epoci (parcurgeri succesive a datelor disponibile), a fost obținută o eroare medie pătratică de 15,96 kW (<0,02%).

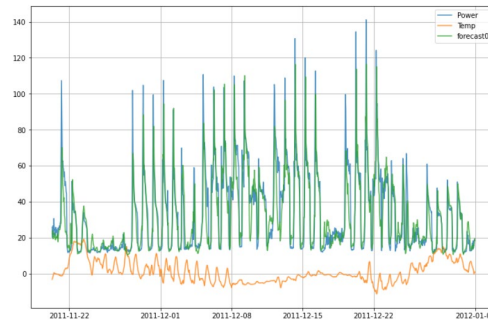
În **Figura 4.2.1** este prezentată evoluția puterii înregistrate, a temperaturii înregistrate și a puterii prognozate pe durata ciclurilor de învățare/testare.



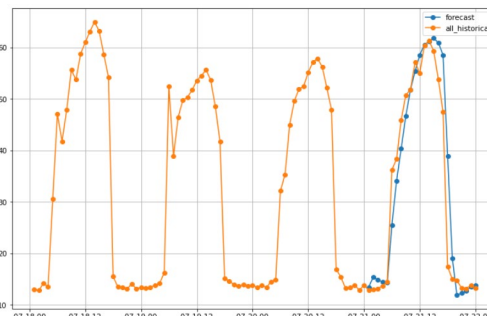
**Figura 4.2.1** – Evoluția puterii înregistrate, în kW (albastru) și a puterii obținute de LSTM pe parcursul ciclului de învățare-testare, în kW (verde), în funcție de temperatura înregistrată (portocaliu), în °C

Pentru testarea suplimentară a algoritmului genetic dezvoltat, au fost utilizate o serie de date furnizate de Department of Energy (DOE), provenind de la o clădire din sectorul terțiar, de tip Clădire de Birouri, amplasată în Municipiul Richland, comitatul Benton, statul Washington, Statele Unite ale Americii.

Datele furnizate au inclus puterea absorbită de clădire și temperatura medie exterioară, agregate orar, pe durata a trei ani calendaristici (2018-2019-2020). Rezultatele obținute prin aplicarea algoritmului de ML descris anterior sunt prezentate în **Figura 4.2.2** și **Figura 4.2.3**.



**Figura 4.2.2** – Evoluția puterii înregistrate, în kW (albastru), a puterii obținute de LSTM pe parcursul ciclului de învățare-testare, în kW (verde) și a temperaturii înregistrate (portocaliu), exprimată în grade Celsius – date DOE

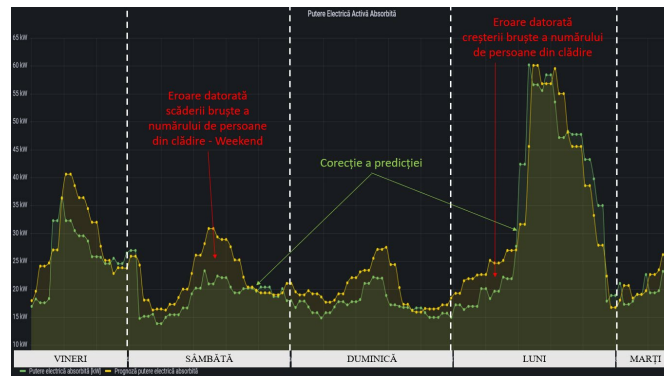


**Figura 4.2.3** – Cererea de putere prognozată, în kW (albastru), suprapusă peste puterea totală absorbită, în kW (portocaliu) – date DOE

Pentru extinderea algoritmului de învățare automată de la un factor extern variabil la cinci factori externi variabili, după cum a fost prezentat în cadrul Capitolului 3., au fost utilizate date istorice de consum pentru o perioadă de 4 ani calendaristici, pentru regenerarea modelului de

învățare al algoritmului, utilizând aceiași hiperparametri identificați anterior. Prognoza factorilor externi variabili s-a realizat prin apelarea API-ului creat.

Ținând seama de specificul conturului energetic analizat – clădire de birouri, puterea electrică absorbită depinde în mod direct de gradul de ocupare al clădirii. Întrucât la momentul elaborării prezentei lucrări tranzitul persoanelor în clădire nu este corect monitorizat / cuantificat, apar erori suplimentare datorate acestei variabile, pe care însă algoritmul de predicție le sesizează și corectează, din mers, după cum se poate observa în **Figura 4.2.4** – fiecare punct reprezentat în figură reprezintă puterea electrică agregată orar (**60 minute**). Rezultatele sunt similare pentru toate categoriile de agregare a datelor.



**Figura 4.2.4** – Prognoza cererii de putere electrică activă (galben) vs. cererea reală de putere electrică activă (verde)

Prognoza cererii de putere electrică activă se realizează în trei etape distincte:

1. Se realizează o prognoză pentru ora următoare, utilă pentru participarea la Piața de Echilibrare (PE): de exemplu, la ora 15:00 se prognozează cantitățile de energie electrică ce urmează a fi utilizate în următoarele patru (4) intervale de decontare – definite prin intervale de 15 minute. Această prognoză este esențială pentru maximizarea eficienței financiare a participării la piața de echilibrare;
2. Se realizează o prognoză pentru ora următoare: de exemplu, la ora 15:00 se prognozează cantitatea de energie electrică ce urmează a fi utilizată în următoarele 60 de minute, deci până la ora 16:00. Această prognoză este esențială pentru estimarea performanțelor energetice ale subsistemelor energetice aferente conturului analizat. În cazul prezentat, Utilizarea Semnificativă a Energiei este reprezentată de sistemul HVAC (Chillere + Centrale de Tratare Aer + Pompe de circulație + Ventil-convectoare). Prognoza consumului de energie electrică pentru ora viitoare permite evaluarea performanțelor energetice ale sistemului HVAC în avans, în funcție de performanțele anterioare;
3. Se realizează o prognoză pentru ziua următoare: de exemplu, la ora 00:00 a fiecărei zi, se prognozează cantitatea de energie electrică ce urmează a fi utilizată în următoarele 24 de ore (cu un pas de prognoză de 60 de minute). Această prognoză este esențială atât pentru participarea la Piața pentru Ziua Următoare (PZU), cât și pentru evaluarea globală a performanțelor energetice ale conturului analizat, în avans.

Rezultatele furnizate de algoritmul de Machine Learning generează următoarele beneficii:

1. Posibilitatea de a evalua, în avans, performanțele energetice ale conturului analizat, în vederea identificării unor eventuale deficiențe de exploatare / parametrizare a instalațiilor;
2. Posibilitatea de a optimiza tranzacționarea energiei în PZU, din punctul de vedere al Beneficiarului, în sensul asumării unor cantități de energie electrică absorbită cât mai apropiate de realitate;

3. În cazul utilizatorilor mari de energie electrică, permite maximizarea eficienței de participare la Piața de Echilibrare, în sensul creșterii eficienței prognozelor de consum.

De asemenea, utilizând valorile prognozate ale cererii de energie electrică se poate realiza predicția evoluției indicatorilor de performanță energetică la nivel de subsistem energetic monitorizat sau chiar la nivel de contur energetic global.

Algoritmul de învățare automată obține performanțe foarte bune, având eroare de prognoză agregată la 24 de ore de numai 1,09%, generată în principal de variabilitatea factorilor externi variabili (prognozați vs. realizați) și de lipsa cuantificării altor factori variabili relevanți pentru prognoză (precum gradul orar de ocupare al clădirii / încăperilor și obiceiurile utilizatorilor clădirii – reglajul temperaturii în încăperi). Factorii variabili considerați în studiul de caz prezentat sunt relevanți pentru conturul energetic analizat, fiecare dintre aceștia generând un impact cuantificabil asupra necesarului de energie electrică. Este necesar însă ca, în etapa de antrenare efectivă a algoritmului de învățare automată, să fie analizată și posibilitatea ca unii dintre factorii variabili luați în considerare inițial să nu genereze un impact cuantificabil sau să genereze un impact care poate fi cuantificat de un număr mai mic de factori, optimizând astfel timpul de învățare și minimizând abaterile datorate unor erori de prognoză pentru aceștia. De asemenea, pentru creșterea preciziei prognozei va fi necesară și cuantificarea unor alți factori variabili, după cum a fost prezentat în cadrul lucrării (de exemplu: numărul de persoane deservit, productivitatea specifică ș.a.).

## 5. Concluzii. Contribuții personale. Direcții viitoare de Cercetare.

### 5.1. Concluzii

În urma etapelor de dezvoltare, implementare, testare și îmbunătățire a Sistemului Avansat de Management Energetic, reies următoarele concluzii privind funcțiunile tehnice ale acestuia:

- ✓ Este necesară preluarea, în timp real, cu o periodicitate de 1 pachet de date per secundă (până la 256 de eșantioane per secundă) a datelor necesare pentru aplicarea metodologiilor de calcul propuse – *o rată de eșantionare mai mică nu permite surprinderea, cu un grad suficient de precizie, a valorilor necesare determinării Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice în timp ce o rată de eșantionare mai mare devine nefezabilă din punct de vedere financiar;*
- ✓ Pentru normalizarea Indicatorilor de Performanță Energetică, este obligatorie preluarea, în timp real, a factorilor variabili relevanți (temperatură medie ambientală, umiditate relativă, precipitații, nivel de iluminare natural), cu o periodicitate de 1 pachet de date pe oră – *o rată de eșantionare mai mare nu aduce o creștere a preciziei prognozei, variația pe perioade mai scurte de timp a factorilor variabili nefiind semnificativă;*
- ✓ Pentru aplicarea cu succes a procedeelelor de Machine Learning, este necesară preluarea, în timp real, a factorilor variabili relevanți prognozați (temperatură medie ambientală, umiditate relativă, precipitații, nivel de iluminare natural), cu o periodicitate de 1 pachet de date pe oră – *prognoză pentru următoarele 48 de ore – o rată de eșantionare mai mare nu aduce o creștere a preciziei prognozei, variația pe perioade mai scurte de timp a factorilor variabili nefiind semnificativă în timp ce utilizarea unor prognoze pe perioade mai lungi de 48 de ore introduce o eroare semnificativă, ce se va propaga în algoritmul de ML;*

- ✓ Pentru cuantificarea interdependenței dintre Indicatorii privind Calitatea Tehnică a Energiei Electrice și Indicatorii de Performanță Energetică, se impune asigurarea unui nivel și a unei profunzimi ridicate de Evaluare a Indicatorilor de Calitate Tehnică a Energiei Electrice, dintre care au fost selectați:
  - Factorul de formă al undei de tensiune;
  - Factorul de vârf al undei de tensiune;
  - Goluri de tensiune (număr, magnitudine și frecvență de apariție);
  - Supratensiuni – Creșteri de tensiune (număr, magnitudine și frecvență de apariție);
  - Nesimetrii de tensiune – factorul de nesimetrie de tensiune;
  - Nesimetrii de curent electric – factorul de nesimetrie al curenților electrici, calcularea potențialului de reducere a pierderilor prin echilibrarea corectă a fazelor rețelei;
  - Factorii totali de distorsiune armonică de curent electric și de tensiune – analiză pe ranguri armonice și analiza THD<sub>U</sub>/THD<sub>I</sub>;
- ✓ Pentru a permite normalizarea indicatorilor de performanță energetică, în timp, este necesar ca Evaluarea puterii totale active absorbite să fie realizată în raport cu factorii variabili (sau statici) relevanți pentru conturul energetic – *în cazul lucrării au fost considerați cinci factori variabili relevanți (temperatura, viteza vântului, gradul de înnorare, gradul de iluminare naturală, umiditatea relativă)*;
- ✓ Pentru predicția cererii de putere activă în raport cu factorii variabili prognozați, deci normalizarea cererii de putere prognozată, este necesară aplicarea procedeelelor de Machine-Learning. În lipsa acestor procedee, normalizarea și prognoza se pot realiza prin metode matematice simplificate (prezentate în lucrare, în Capitolul 2.2.3);
- ✓ Este necesară prognoza cererii de putere și, implicit, de energie în funcție de factorii variabili relevanți, pentru a putea evalua potențialul de implementare a unor Acțiuni de Îmbunătățire a Performanțelor Energetice, precum aplatizarea graficului de sarcină, dezvoltarea de proiecte de producere distribuită a energiei electrice, implementarea de sisteme de filtrare activă a armonicilor de curent electric sau a sistemelor de compensare a puterii reactive;
- ✓ Este obligatorie analiza continuă a indicatorilor curbei de sarcină, atât pentru identificarea potențialului de implementare a acțiunilor de aplatizare a graficului de sarcină dar și pentru a evalua performanța, în timp, a unor astfel de proiecte, post-implementare;
- ✓ Este obligatorie analiza pierderilor de putere și energie în rețeaua de distribuție monitorizată, atât pentru identificarea potențialului de implementare a acțiunilor de aplatizare a graficului de sarcină sau de îmbunătățire a ICTEE dar și pentru a evalua performanța, în timp, a unor astfel de proiecte, post-implementare;
- ✓ Pentru încurajarea implementării unor proiecte de aplatizare a graficului de sarcină, sistemul trebuie să realizeze, cu o periodicitate relevantă (lunar) o analiză tehnico-economică a potențialului de aplicare a procedeelelor de Aplatizare a Graficului de Sarcină prin utilizarea surselor regenerabile de energie și a sistemelor de stocare a energiei electrice, care trebuie să satisfacă, minimal, următoarele funcționalități:
  - Dimensionarea iterativă a taliei optime a unui sistem hibrid PV+BESS care să asigure un randament tehnico-energetic și financiar optim;

- Analiza tehnico-economică pe ciclul de viață al sistemului, cu luarea în considerare a degradării modulelor fotoelectrice, a pierderii capacității de stocare a bateriilor electrochimice și a evoluției prețului energiei electrice pe întreaga perioadă de studiu.
- ✓ Pentru încurajarea implementării unor proiecte de Îmbunătățire a ICTEE, este necesară aplicarea procedeelelor de Machine-Learning pentru predicția pierderilor anuale medii datorate funcționării în regim distorsionat de curent electric a elementelor de rețea care trebuie să realizeze o analiză tehnico-economică a potențialului de aplicare acestor acțiuni, utilizând metodologia de Analiză a Costului Oportunității propusă.

Prin analiza rezultatelor obținute în urma dezvoltării, implementării, testării și validării SAME, se poate concluziona că:

1. Aplicarea procedurilor de echilibrare corectă a fazelor sunt justificabile din punct de vedere energetic și financiar doar dacă factorul mediu de nesimetrie al curenților electrici depășește valoarea de 20%. Altfel, beneficiile obținute prin această acțiune au o pondere mică în raport cu lucrările și investițiile necesare.
2. Implementarea măsurilor de corecție a factorului de putere sunt justificabile din punct de vedere energetic dacă factorul mediu de putere total la nivelul conturului energetic este mai mic de 0,8 pentru cel puțin 50% din durata unui an și este mai mic decât limita de 0,65 pentru cel puțin 10% din durata unui an.
3. Monitorizarea factorului de nesimetrie al curbelor de tensiune prezintă un interes deosebit pentru utilizatorii ce dețin / exploatează motoare trifazate, creșterea acestuia peste valoarea limită de 2% conducând la o reducere drastică a duratei de viață a acestora.
4. În prezent, aplicarea procedurilor de Aplatizare a Graficului de Sarcină nu este viabilă din punct de vedere tehnico-economic dacă nu este susținută financiar de o soluție de reducere globală a cantității de energie electrică absorbită de utilizator, datorită inexistenței unei scheme tarifare diferențiate pe intervale orare;
5. Încurajarea aplicării unor proceduri de AGS mai simple din punct de vedere tehnic – Peak Shaving / Peak Shifting utilizând sisteme de stocare a energiei electrice poate fi realizată prin dezvoltarea unui plan tarifar care trebuie să aibă un tarif la gol de sarcină de maximum 50% din tariful la vârf de sarcină, pentru curba de sarcină analizată în cadrul Tezei de Doctorat;
6. Aplicarea procedurilor de limitare a efectelor negative generate de funcționarea rețelelor electrice de distribuție în regimuri distorsionate de curent electric este atractivă chiar și luând în considerare exclusiv pierderile suplimentare de putere și energie. Dacă aceste regimuri conduc la apariția unor defecte / avarii / pierderi financiare suplimentare în conturul energetic analizat, așa cum a fost demonstrat, AICTEE devin cu atât mai atractive și mai ușor de acceptat de către Top Managementul utilizatorului;
7. Implementarea algoritmilor de învățare automată (ML) pentru creșterea preciziei prognozei consumului de energie electrică poate genera beneficii financiare majore, mai ales pentru utilizatorii mari, care sunt obligați să participe la Piața de Echilibrare. În cadrul studiului de caz prezentat, Utilizatorul a obținut o reducere a cheltuielilor asociate participării la Piața de Echilibrare de 6.500 EUR în numai 4 luni de funcționare, prin minimizarea erorii de prognoză. Până la implementarea procedurii de ML, estimările privind consumurile de energie se realizau exclusiv pe baze istorice (intervalul de decontare viitor = intervalul de decontare anterior din ziua și luna curente ale anului trecut). Algoritmul de ML devine operațional și eficient după minimum un an de funcționare a SAME (înregistrări agregate



- orar). Eficiența maximă este atinsă după agregarea datelor pentru o perioadă de doi ani (înregistrări agregate orar).
8. Implementarea algoritmilor de învățare automată (ML) pentru obținerea datelor de intrare în analizele tehnico-economice pot crește sensibil calitatea și acuratețea acestora, așa cum a fost observat în cadrul analizei privind aplicarea AIICTEE. Sigur că da, acestea au ținut seama doar de aspectele energetice, nu și de aspectele operaționale (daunele materiale datorate funcționării în regim distorsionat de curent electric). Prin integrarea SAME la ERP / SAP, se pot lua în considerare și astfel de elemente particulare – integrându-se așadar sistemul de management energetic cu sistemele de management financiar și operațional ale utilizatorului.
  9. Dezvoltarea SAME utilizând soluții și sisteme de tip Open-Source (Python / Jupyter Notebook / Prometheus / Grafana etc.) permite, cu ușurință, în același timp, atât transferul tehnologic către platforme de tip Pay-to-Use, cât și accesul comunității la rezultatele SAME, în vederea dezvoltării continue și îmbunătățirii acestuia.
  10. Viabilitatea tehnico-economică a implementării unui Sistem Avansat de Management Energetic a fost clar demonstrată în cadrul lucrării, Acțiunile identificate și propuse de SAME având o perioadă brută de recuperare a investiției de sub 4 ani (inclusiv costul efectiv al SAME).

## 5.2. Contribuții personale

Pe parcursul stagiului de pregătire prin doctorat, începând cu anul 2018, a fost conceput și implementat sistemul de monitorizare a fluxurilor de energie și a factorilor variabili, în mai multe contururi energetice distincte, relevante pentru obiectivele Tezei de Doctorat, contribuțiile personale constând în:

1. Conceperea schemei logice a SAME;
2. Participarea în etapa de dezvoltare experimentală a părții hardware și software a două analizoare trifazate de calitate a energiei electrice ce au la bază sisteme și modelări de tip Open-Source (în parteneriat cu NET ENERGY și SENSIX) – dispozitive ce pot fi produse și comercializate la un preț competitiv în piață, ce a constat în:
  - 2.1. Dezvoltarea hardware a analizoarelor – *contribuții personale în alegerea microcipului utilizat pentru analiza Fourier și în alegerea senzorilor de curent electric utilizați;*
  - 2.2. Dezvoltarea software a analizoarelor – *contribuții personale în dezvoltarea modelelor de calcul a indicatorilor de calitate tehnică a energiei electrice la nivelul microcipurilor utilizate, pentru minimizarea dimensiunii pachetelor de date transmise de la analizor la serverul SAME;*
  - 2.3. Testarea și validarea analizoarelor – *contribuții personale în realizarea de campanii de măsurări electrice, utilizând drept etalon un set de analizoare trifazate de calitate a energiei electrice de clasă A;*
3. Conceperea și construirea bazei de date utilizate pentru preluarea, agregarea și stocarea măsurărilor electrice și neelectrice realizate;
4. Realizarea unor campanii de măsurări energetice la nivelul a șase contururi energetice distincte, în cadrul cărora au fost testate și validate analizoarele trifazate de calitate a energiei electrice anterior amintite și preluate informațiile necesare pentru testarea, validarea și îmbunătățirea SAME (atât informații de natură energetică cât și factori variabili relevanți, după cum au fost prezentați în lucrare);

5. Dezvoltarea a șapte module de analiză tehnică și economică, dintre care trei utilizează rețele neuronale recurente – proceduri de machine-learning;
6. Conceperea și construirea bazelor de date necesare pentru aplicarea modulelor de analiză tehnico-economică;
7. Dezvoltarea software a SAME, inclusiv a procedurilor de machine-learning și implementarea, modulară, a modulelor de analiză tehnico-economică;
8. Implementarea SAME la nivelul celor șase contururi energetice în vederea testării și validării metodologiei propuse și a modulelor de analiză dezvoltate;
9. Demonstrarea replicabilității SAME prin instalarea în contururi energetice similare (din punct de vedere al sectorului de utilizare a energiei electrice);
10. Realizarea a peste cinci studii de caz prin care au fost demonstrate funcționalitățile și beneficiile tehnice, energetice și financiare generate de SAME.

Au fost testate și demonstrate capabilitățile SAME și, implicit, a algoritmilor propuși, rezultatele diverselor etape de cercetare-dezvoltare fiind apoi diseminate prin publicarea unui număr de **șaisprezece (16) articole științifice indexate în baze de date ISI și BDI**, dintre care:

- Un (1) articol a fost publicat în Buletinul Științific al UPB, Seria C;
- Șase (6) articole au fost susținute în conferințe internaționale indexate ISI;
- Un (1) articol a fost publicat în reviste BDI;
- Opt (8) articole au fost susținute în conferințe internaționale indexate BDI.

### 5.3. Direcții viitoare de cercetare

În urma acțiunilor de cercetare experimentală și dezvoltare realizate în cadrul lucrării, au fost identificate mai multe direcții viitoare de cercetare ce pot prezenta interes din perspectiva ținutelor privind Eficiența Energetică și, implicit, lupta împotriva schimbărilor climatice.

Cu toate că SAME a fost conceput având ca obiectiv general modularitatea sistemului, sunt necesare cercetări ulterioare privind potențialul de aplicare al SAME pentru utilizatori finali de dimensiuni mici (din punct de vedere energetic) – IMM (întreprinderi mici și mijlocii), acest sector având o pondere semnificativă în necesarul total de energie.

O direcție esențială, ce poate conduce la modificarea semnificativă a comportamentului utilizatorilor finali de energie în sensul aplatizării graficului de sarcină asociat acestora la nivelul elementelor de rețea electrică de distribuție, constă în dezvoltarea unui Mecanism Dinamic de Tarifare (MDT), pe zone de rețea, prin intermediul căruia să fie premiată utilizarea energiei la gol de sarcină și penalizată utilizarea energiei la vârf de sarcină.

O altă direcție esențială ce poate conduce la creșterea performanțelor energetice ale rețelelor electrice de distribuție aflate în proprietatea OD poate consta în dezvoltarea unui sistem de Demand Response (DR), pe zone de rețea și tipuri de utilizatori. Acest sistem se poate dovedi atractiv în sectorul rezidențial, însă implică asumarea unor costuri semnificative din partea OD pentru înlocuirea tablourilor electrice de distribuție din locuințe (în asemenea manieră încât să permită acționarea de la distanță, selectiv, a unor circuite specifice – e.g.: alimentarea cu energie electrică a frigiderului / mașinii de spălat rufe / aerului condiționat). O cercetare amănunțită privind receptivitatea populației, dar și rezultatele unei analize cost-beneficiu pot fi necesare pentru a evalua viabilitatea tehnică, financiară și comercială a acestui tip de acțiune.

De asemenea, sectorul terțiar (centre comerciale și depozite logistice) este extrem de atractiv pentru implementarea unui astfel de sistem de tip DR, datorită capacităților mari ale sistemelor de refrigerare și răcire deținute de utilizatorii din acest sector.

În ceea ce privește dezvoltarea capacităților de producere a energiei electrice din SRE, prin rezultatele obținute de Modulul de analiză a potențialului de AGS se justifică analiza juridică, comercială și financiară a modificării principalelor axe de finanțare rambursabilă / nerambursabilă în asemenea manieră încât utilizatorii finali ce doresc să devină utilizatori activi să fie încurajați să implementeze exclusiv sisteme hibrid (producere + stocare), devenind astfel participanți direcți la procesul de aplatizare a graficului de sarcină aferent elementelor de rețea electrică de distribuție.

Finanțarea proiectelor de tip convențional (doar centrală fotoelectrică) din surse publice nu se justifică în condițiile actuale ale pieței (costuri investiționale în continuă scădere și prețuri ale energiei electrice ridicate), conducând la obținerea unor indicatori financiari extrem de atractivi (de exemplu, valori ale RIR de peste 30-40%/an).

În ceea ce privește aplicarea procedurilor de Machine Learning / Artificial Intelligence în sectorul serviciilor energetice, pornind de la rezultatele referatului științific, se pot determina structurile optime ale sistemelor de monitorizare de tip Building Management System (BMS) / Warehouse Management System (WMS) ș.a. care să conducă la un flux de date optimizat din punctul de vedere al calității datelor înregistrate: punctele de măsurare, frecvența de preluare a datelor, nivelul de agregare, extrem de important pentru implementarea unor proceduri de Management Energetic Digitalizat.

## Bibliografie Selectivă

- [1] Espe E., Potdar V. și Chang E., "Prosumer Communities and Relationship in Smart Grids: A Literature Review, Evolution and Future Directions," *Energies*, Vol. 11, 2018.
- [2] Meng K., Dong Z.Y., Xu Z., Zhen Y. și Hill D.J., "Coordinated Dispatch of Virtual Energy Storage Systems in Smart Distribution Networks for Loading Management," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, Vol. 49, Issue: 4, pp. 776-786, 2017.
- [3] Solanki B.V., Raghurajan A., Bhattacharya K. și Canizares C.A., "Including Smart Loads for Optimal Demand Response in Integrated Energy Management Systems for Isolated Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 8, Issue:4, pp. 1739-1748, 2017.
- [4] Elmouatamid A., Ouladsine R., Bakhouya M., El Kmoun N., Zine-Dine K. și Khaidar M., "A Model Predictive Control Approach for Energy Management in Micro-Grid Systems," 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies – SEST, DOI: 10.1109/SES.2019.8848995, 2019.
- [5] Chen C., Duan S., Cai T., Liu B. și Hu G., "Smart energy management system for optimal microgrid economic operation," *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, Issue: 3, pp. 258 – 267, 2011.
- [6] Organizația Internațională pentru Standardizare, Grupul de standarde "ISO 50001 – Sisteme de Management Energetic," 2018.
- [7] Golovanov N., Mogoreanu N., Toader C. și Porumb R., "Eficiența Energetică. Mediu. Economia Modernă," Editura AGIR, București, ISBN 978-973-720-695-5, 2017.
- [8] Albert A., Gheorghe S., Golovanov N., Elefterescu L. și Porumb R., "Calitatea Energiei Electrice. Contribuții. Rezultate. Perspective," Editura AGIR, ISBN 978-973-720-497-4, București, 2013.
- [9] Lange S., Pohl J. și Santarius T., "Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?," *Ecological Economics*, Vol. 176, ISSN 0921-8009, 2020.

- [10] Efficiency Valuation Organization, "International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP)," 2016.
- [11] IEC 61000-40-30/2007, "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and Measurement techniques - Power quality measurement methods," 2007.
- [12] Leroy P.J., Rousseeuw M. și Annick M., "Robust Regression and Outlier Detection," Wiley, ISBN: 978-0-471-48855-2, 2003.
- [13] Ochoa L., Ciric R.M., Padilha-Feltrin A. și Harrison G., "Evaluation of distribution system losses due to load unbalance," 15th Power Systems Computation Conference PSCC, 2005.
- [14] Ignatius O.K., Saadu A.K. și Emmanuel O.S., "Analysis of copper losses due to unbalanced load in a transformer (a case study of New Idumagbo 2 x 15-MVA, 33/11-kV injection substation)," International Journal of Recent Research and Applied Studies (IJRRAS), vol. 23, Nr. 1, pp. 46-53, 2015.
- [15] Greff K., Srivastava R.K., Koutnik J., Steunebrink B.R. și Schmidhuber J., "LSTM: A Search Space Odyssey," Transactions on Neural Networks and Learning Systems, Vol. 28, Issue: 10, pp. 2222-2232, 2017.
- [16] Uddin M., Romlie M.F., Abdullah M.F., Halim S.A., Bakar A.H.A. și Kwang T.C., "A review on peak load shaving strategies," Renewable and Sustainable Energy Reviews, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.056>, 2017.
- [17] Van den Bergh K. și Delarue E., "Cycling of conventional power plants: technical limits and actual costs," Energy Conversion Management, Vol. 97, pg. 70–7, 2015.
- [18] Joshi K.A. și Pindoriya N.M., "Day-ahead dispatch of Battery Energy Storage System for peak load shaving and load leveling in low voltage unbalance distribution networks," Proceedings of the IEEE power & energy society general meeting, pg. 1-5. 2015.
- [19] Luo X., Wang J., Dooner M. și Clarke J., "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation," Appl Energy, Vol. 137, pg. 511–536, 2015.
- [20] Farahzad K., Shahbahrami A. și Ashouri M., "Optimal Capacity Determination for Electrical Distribution Transformers Based on IEC 60076-7 and practical load data," International Journal of Engineering and Manufacturing, Vol. 10, pp. 1-11, DOI:10.5815/ijem.2020.01.01,2020.