



**Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București**  
**Facultatea de Energetică**  
**060042 București, Splaiul Independenței, nr. 313, sector 6**



# **PROIECT DE DIPLOMĂ**

---

**Optimizarea funcționării unei microrețele utilizând inteligență artificială**

**Autor:** Marian-Adrian TUDORICĂ

**Coordonatori științifici:** As. Drd. Ing. Andrei TUDOSE

**Ș.l. dr. ing. Irina-Ioana PICIOROAGĂ**

**București**  
**Iulie 2024**



Proiect de diplomă

**Optimizarea funcționării unei microrețele utilizând inteligență artificială**

prezentat la

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

**Facultatea de Energetică**

pentru obținerea titlului de

**Inginer**

*Specializarea:* Ingineria Sistemelor Electroenergetice

de către

**Marian-Adrian TUDORICĂ**

(absolvent UPB)

sub îndrumarea

As.drd ing. Andrei TUDOSE

Ș.l. dr. ing. Irina-Ioana PICIOROAGĂ

Susținut la data de **01-02.07.2024**, în fața comisiei de examinare

<b>Președinte</b>	Prof. dr. ing. Ion TRIȘTIU
<b>Membru</b>	Prof. dr. ing. Ioana FĂGĂRĂȘAN
<b>Membru</b>	Prof. dr. ing. Sorina COSTINAȘ
<b>Membru</b>	Prof. dr. ing. Virgil DUMBRAVĂ
<b>Membru</b>	Prof. dr. ing. Radu PORUMB
<b>Membru</b>	Ș.l.dr.ing. Tudor LEONIDA
<b>Secretar</b>	As.drd ing. Andrei TUDOSE
<b>Membru supleant</b>	Prof. dr. ing. Mihai SĂNDULEAC
<b>Membru supleant</b>	Ș.l.dr.ing. Dorian SIDEA
<b>Secretar</b>	As.drd.ing. Nicolae ANTON

Această lucrare a fost pregătită în cadrul Facultății de Energetică a UPB

## Cuprins

1. INTRODUCERE .....	4
2. ASPECTE GENERALE PRIVIND CONCEPTUL DE MICROREȚEA.....	6
2.1. Componentele unei microrețele .....	6
2.2. Identificarea Constrângerilor .....	8
3. EVOLUȚIA INTEGRĂRII SURSELOR REGENERABILE ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE.....	9
3.1 Considerații inițiale.....	9
3.2 Tendințe curente și viitoare.....	10
4. TEHNICI DE CALCUL EVOLUTIV .....	13
4.1. Introducere algoritmi genetici.....	14
4.2 Algoritmi genetici în sisteme de comandă și control.....	19
5. STUDIU DE CAZ .....	20
5.1 Colectarea datelor .....	20
5.2 Prelucrarea datelor .....	22
5.3 Selectarea tehnicilor de I.A.....	23
5.4 Dezvoltarea modelului matematic .....	23
5.5 Dezvoltarea programului de calcul .....	25
5.6 Simulări.....	28
6. OBSERVAȚII ȘI CONCLUZII .....	40
7. BIBLIOGRAFIE .....	41

## 1. INTRODUCERE

Un sistem electroenergetic reprezintă ansamblul complex format din totalitatea instalațiilor electroenergetice interconectate prin care se realizează producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei pe un anumit teritoriu.

În cadrul sistemului electroenergetic, o microrețea reprezintă o infrastructură, specializată în furnizarea și gestionarea energiei electrice într-o zonă restrânsă. Microrețelele sunt proiectate pentru a satisface cerințele specifice ale utilizatorilor, și oferă posibilitatea utilizării exclusive a surselor de energie regenerabile.

O microrețea poate fi implementată la nivelul unei clădiri, unui cartier rezidențial, unei zone izolate, unui parc fotovoltaic sau altor zone geografice mici. În mod obișnuit, microrețelele sunt compuse din surse de energie regenerabile, precum panouri fotovoltaice, respectiv turbine eoliene de mici dimensiuni. Microrețelele pot ajuta la atenuarea vârfurilor de zi, respectiv seară, oferind simultan siguranță în alimentare, în cazul întreruperilor cu energie electrică.

Stocarea energiei, realizată cu baterii, este o componentă esențială a microrețelilor, și are ca rol gestionarea fluctuațiilor asociate cu generarea de energie electrică din surse regenerabile. Bateriile asigură o metodă de stocare a surplusului de energie electrică în timpul perioadelor când cererea de energie nu depășește producția, respectiv oferă siguranță în alimentare atunci când există avarii sau când cererea de energie electrică depășește producția.

Microrețelele sunt proiectate pentru a fi utilizate autonom, sunt capabile să genereze, stocheze și distribuie energie electrică într-o anumită zonă, și în caz de necesitate pot fi interconectate cu Sistemul Energetic Național, având astfel posibilitatea de a injecta energie electrică în rețeaua națională când sistemul de stocare își atinge limitele superioare sau pentru a sprijini Sistemul Electroenergetic Național prin participarea la piața de echilibrare, respectiv poate absorbi energie din rețeaua națională atunci când sistemul de stocare își atinge limitele inferioare, oferind astfel o siguranță mărită în alimentare.

Inteligența artificială (I.A.) este o unealtă specializată în crearea de sisteme capabile să îndeplinească sarcini precum, rezolvarea problemelor, luarea deciziilor, învățare, prezicere. I.A. cuprinde mai multe subdomenii precum, machine-learning, robotică, sisteme expert, etc. Scopul principal al inteligenței artificiale este de a dezvolta sisteme, care, în cazuri specifice să poată depăși abilitățile cognitive umane.

Inteligența artificială implementată în sistemele de comandă ale microrețelor poate aduce îmbunătățiri majore în ceea ce privește eficiența. Algoritmii de inteligență artificială sunt utilizați pentru analizarea datelor privind producția, utilizarea și cererea de energie, având astfel capacitatea de a anticipa cu mare precizie cererea și producerea viitoare de energie.

Sistemele de control avansat ale microrețelor ce au încorporată inteligența artificială gestionează eficient distribuția energiei, iar prin monitorizarea permanentă a parametrilor sistemului pot ajusta în timp real fluxul de energie.

Modelele de inteligență artificială implementate în sistemele de comandă și control ale microrețelor au ca rol principal optimizarea operațiilor. Prin gestionarea strategică a momentelor când interacțiunile dintre microrețea și sistemul electroenergetic se produc, sistemul de comandă și control poate minimiza numărul de interacțiuni.

Algoritmul poate programa interacțiunile în afara orelor de vârf, în particular noaptea, când sistemul electroenergetic național nu mai suferă la fel de multe fluctuații precum ziua, când parcurile fotovoltaice sunt în funcțiune. Capacitatea de a programa interacțiunile cu sistemul electroenergetic este benefică în mod particular, pentru evitarea orelor de vârf, când cererea de energie electrică este mare și rețeaua electrică națională este supusă unui grad mai ridicat de încărcare.

Sistemele de stocare sunt esențiale pentru a optimiza cererea și oferta de energie electrică în interiorul microrețelei. Sistemele de stocare a energiei, precum bateriile, beneficiază de sistemele inteligente de comandă și control bazate pe inteligența artificială prin optimizarea încărcării respectiv descărcării bateriilor. În timpul perioadelor când cererea de energie este mică, algoritmul poate redirecționa surplusul de energie către sistemul de baterii pentru a înmagazina energia, respectiv, atunci când cererea de energie depășește capacitatea de producție, algoritmul poate comanda sistemului de stocare să injecteze energia necesară în microrețea.

Prin optimizarea proceselor de stocare și interacționare cu sistemul electroenergetic, algoritmul asigură buna funcționare la eficiență maximă a sistemului de stocare, maximizând astfel durata de viață a bateriilor, contribuind astfel la o infrastructură fiabilă, eficientă din punct de vedere economic și sustenabilă din punct de vedere al dezvoltării durabile.

## **2. ASPECTE GENERALE PRIVIND CONCEPTUL DE MICROREȚEA**

Prin analiza componentelor fundamentale și constrângerilor unei microrețele, pornind de la sursele de energie, până la sistemul de comanda și control, rezultă astfel cerințele, respectiv parametrii necesari pentru proiectarea algoritmului de optimizare a funcționării unei microrețele.

### **2.1. Componentele unei microrețele**

O microrețea reprezintă o infrastructură formată din surse de energie, utilizatori, respectiv un sistem de stocare a energiei, care poate funcționa în paralel cu Sistemul Electroenergetic Național, sau independent, ca un sistem izolat. În general, sunt gestionate prin sisteme avansate de control, cu rol în optimizarea sistemului. Microrețelele oferă beneficii atât economice cât și de mediu, prin reducerea costurilor energiei electrice și promovarea utilizării surselor de energie regenerabilă. Prin modularitate și scalabilitate oferă posibilitatea extinderii, respectiv integrării mai multor componente, atât diverse surse de energie cât și utilizatori, putând fi astfel proiectate pentru cerințe specifice.

În mod obișnuit, energia electrică din cadrul unei microrețele este generată cu panouri fotovoltaice sau turbine eoliene, dar există și alte surse precum generatoare cu combustibil fosil, biomasa, hidrocentralele, etc.

Panourile fotovoltaice reprezintă una dintre principalele metode de alimentare cu energie a unei microrețele. Sunt surse semiconductoare proiectate să convertească energia solară în energie electrică prin efectul fotovoltaic, observat pentru prima dată în 1839 de fizicianul francez Alexandre-Edmond Becquerel.

Panourile sunt construite din materiale semiconductoare, în general silicon dopat cu impurități specifice astfel încât să formeze o joncțiune p-n. Celulele fotovoltaice pot fi monocristaline, policristaline sau altele precum silicon amorf, telură de cadmiu, seleniură de cupru, indiu și galiu. Când lumina solară atinge panoul, fotonii excită electronii de la stratul de valență până la stratul de conducție, generând perechi electron-gol în materialul semiconductor și crează astfel un câmp electric intern, respectiv curent electric. Pe panouri sunt montate contacte metalice pentru a permite conectarea, respectiv alimentarea altor sisteme. Pentru a produce tensiunea, respectiv curentul dorit, panourile se conectează în paralel și în serie. Curentul continuu produs de panourile fotovoltaice este transformat în curent alternativ cu invertere, fiind astfel compatibil cu sistemele locale, respectiv Sistemul Electroenergetic Național.

Turbinele eoliene sunt dispozitive mecanice proiectate să convertească energia cinetică a vântului în energie electrică prin intermediul unui generator. Turbinele eoliene sunt formate din trei componente principale: rotorul, generatorul, respectiv turnul de susținere.

Inverterele/ DC-AC (curent continuu – curent alternativ) sunt echipamente ce facilitează conversia curentului continuu în curent alternativ. Sunt dispozitive semiconductoare precum IGBT uri (insulated gate bipolar transistors) sau MOSFET uri (metal-oxide-semiconductor field effect transistors), care se folosesc de principiile semiconductoare pentru a controla curentul și tensiunea. Pulse Width Modulation (PWM) este o tehnică folosită de inverterele/converterele DC-AC pentru a sintetiza formele de undă ale curentului/tensiunii alternativ/a de la sursele de curent/tensiune continuu/a. PWM implică generarea unor pulsuri de frecvență ridicată, astfel se regulează frecvența și parametrii la ieșire a tensiunii alternative.

Pentru stocarea energiei produsă de panourile fotovoltaice, în general, în cazul microrețelilor se folosesc sisteme de stocare a energiei, compuse din baterii, echipamente electro-chimice care stochează și injectează energia în funcție de nevoie. La baza bateriilor se afla principiile electro-chimice de conversie a energiei. Ecuațiile Nernst și Butler-Volmer sunt folosite pentru a descrie reacțiile termodinamice și cinetice ale conversiei. Principalele trei componente ale unei baterii sunt electrozii, electrolitul și separatorul. Electrozii sunt realizați din materiale active precum oxidul de litiu și cobalt ( $\text{LiCoO}_2$ ) sau grafit. Electrolitu este o soluție care facilitează transportul ionilor între electrozi. Separatorul, este o membrană poroasă care previne scurtcircuitul prin separarea fizică a electrozilor.

Utilizarea energiei electrice în majoritatea microrețelilor este realizată de utilizatorii rezidențiali, care au cerere de energie mai mică raportată individual comparativ cu utilizatorii comerciali sau industriali, dar numărul mare de utilizatori rezidențiali dintr-o anumită microrețea îi poate face utilizatori primari. Alte tipuri de utilizatori ai energiei electrice în microrețele pot fi: comerciali, industriali, instituționali, iluminatul stradal, etc.

Specificatiile tehnice ale microrețelilor sunt esențiale pentru proiectarea, implementarea și controlul eficient al sistemului, parametrii echipamentelor de generare, de stocare, inverterelor, transformatoarelor, protecțiilor, monitorizării și sistemelor de comandă și control.

Sistemul de comandă și control din cadrul unei microrețele este esențial pentru optimizarea managementului energiei, îmbunătățirea eficienței sistemului și asigurarea stabilității. Ele sunt formate de obicei din algoritmi complecși de calcul și pot încorpora inteligență artificială. Sistemul cuprinde algoritmi de control, precum algoritmi machine-learning, de optimizare, de analiză predictivă. Datele necesare algoritmilor sunt preluate de la senzori, aparate de măsură, prognoze meteo, respectiv date istorice ale generării/producerii și utilizării de energie. Tehnicile de anticipare a cantității de energie necesară, ajută la o mai bună stocare a energiei, minimizând astfel interacțiunile dintre microrețea și SEN.

## 2.2. Identificarea Constrângerilor

Prin analizarea microrețelor care au ca sursă principală de energie panourile fotovoltaice, trebuie luate în considerare limitările cât și constrângerile, precum:

- Intermitența puterii generate: Panourile fotovoltaice generează putere în funcție de prezența soarelui, ceea ce determină o limitare în fiabilitatea microrețelor, în special atunci când intensitatea luminoasă este mică sau inexistentă, raportat la ciclicitatea noapte-zi, respectiv primavară-vară-toamnă-iarnă. Această constrângere se poate minimiza prin utilizarea sistemelor de stocare a energiei;
- Capacitatea de stocare a energiei: Sistemul de stocare a energiei este una dintre principalele componente ale unei microrețele moderne. Limitările acestora sunt legate de capacitatea bateriilor, restricționând cantitatea de energie care poate fi stocată, eficiența sistemului în timpul încărcării respectiv descărcării, rata de autodescărcare și durata de viață a sistemului;
- Stabilitatea și sincronizarea cu Sistemul Electroenergetic Național: Microrețelele interconectate cu rețeaua națională trebuie să respecte cerințele de stabilitate și sincronizare. Astfel, microrețelele necesită un sistem de comandă și control avansat cât și mecanisme de sincronizare, astfel încât să asigure o conectare ideală cu Sistemul Electroenergetic Național;
- Menținerea nivelului de tensiune și frecvenței: Fluctuațiile în generarea de putere din panourile fotovoltaice impactează nivelul tensiunii și frecvența din cadrul microrețelei. Pentru a menține stabilitatea sistemului, trebuie implementate mecanisme de reglare a frecvenței și nivelului de tensiune;
- Standardele și condițiile necesare interconectării cu SEN: Pentru a fi în conformitate cu standardele și cerințele de interconectare, trebuie incluse sisteme de protecții adiționale, precum și standarde tehnice pentru echipamente, pentru sistemul de stocare și pentru sistemul inteligent de comandă și control;
- Rentabilitatea economică: Panourile fotovoltaice și turbinele eoliene din cadrul microrețelor oferă posibilitatea minimizării costurilor în alimentarea cu energie electrică, dar trebuie luate în considerare costurile inițiale, operaționale, tarifele/prețul energiei electrice;
- Natura variabilă a utilizării energiei electrice: Este necesar luarea în considerare a curbei de sarcină, pentru a analiza și gestiona fluctuațiile zilnice, săptămânale, sezoniere, respectiv specifice anumitor zile precum sărbătorile naționale.



### **3. EVOLUȚIA INTEGRĂRII SURSELOR REGENERABILE ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE**

Integrarea surselor regenerabile de energie în sistemele electroenergetice a început în secolul XIX și a luat amploare odată cu evoluția tehnologiei, respectiv intrării în vigoare a legislației specifice.

#### **3.1 Considerații inițiale**

Începând cu sfârșitul secolului XIX, au apărut primele încercări de generare a energiei electrice cu ajutorul turbinelor eoliene, respectiv în anul 1878 a fost pusă în funcțiune prima centrală hidroelectrică, în Anglia, Northumberland.

Începutul secolului XX a fost marcat prin studierea efectului fotoelectric și fabricarea primei celule fotovoltaice în anul 1954, de către Bell Labs, respectiv de construirea primei turbine eoliene de clasă megawatt, în anul 1941, Vermont, Statele Unite ale Americii.

Finalul secolului XX a adus inițiative legislative, guvernele au început implementarea programelor de susținere pentru energia regenerabilă. În anul 1978, a fost implementat Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA), prin care Statele Unite ale Americii încurajau dezvoltarea proiectelor cu energie regenerabilă.

La începutul secolului XXI, inovațiile tehnologice în domeniul energiei regenerabile, alături de suportul oferit de guverne, precum Acordul de la Paris din 2015 care a marcat un acord global de reducere a gazelor cu efect de seră, au făcut ca sursele de energie regenerabile să devină competitive combustibilului fosil.

Eforturile de integrare a energiei regenerabile în rețelele electroenergetice cuprind dezvoltarea rețelelor inteligente, a sistemelor automate de comandă și control, respectiv modernizarea rețelei electroenergetice, construirea unor sisteme de stocare și introducerea de stimulente și subvenții.

Guvernele au ajutat prin implementarea reglementărilor, respectiv legislației pentru a suporta energia regenerabilă, precum sistemul certificatele verzi, introdus de Guvernul României în anul 2004, prin HG nr. 1892/2004 [1]. Prin această hotărâre de guvern s-a stabilit sistemul de suport a energiei electrice din surse regenerabile inclus cu sistemul de tranzacționare a certificatelor verzi, respectiv HG nr. 750/2008: Schema de ajutor de stat regional privind valorificarea resurselor regenerabile de energie [2].

### 3.2 Tendințe curente și viitoare

Sectorul energetic global este într-o continuă evoluție accelerată de necesitatea limitării încălzirii globale, de sporirea securității energetice și de promovarea dezvoltării durabile. Un pas al acestei evoluții este reprezentat de microrețele și integrarea surselor de energie regenerabilă, care împreună oferă soluții fiabile în dezvoltarea durabilă a sectorului energetic, oferind soluții inovative pentru generarea, distribuția, respectiv controlul energiei.

Tendințele integrării energiei regenerabile în sistemele electroenergetice se clasifică în multiple categorii precum:

a. Progrese tehnologice:

Cercetarea și progresele din ultimii ani în domeniul energiei regenerabile sunt concentrate pe maximizarea eficienței, respectiv minimizarea costurilor de fabricare, respectiv utilizare, și scopul de a ridica fiabilitatea și accesibilitatea surselor regenerabile de energie la nivel global.

Unul dintre principalele obiective este maximizarea eficienței tehnologiilor în domeniul energiei regenerabile, precum energia solară, unde au fost realizate progrese către dezvoltarea de celule cu o eficiență ridicată, prin utilizarea de noi materiale precum perovskite care au o mai mare capacitate de conversie comparativ cu materialele tradiționale bazate pe silicon. Similar, în domeniul energiei eoliene, se cercetează modalități de proiectare a palelor de turbine eoliene cu un grad superior de aerodinamicitate, pentru optimizarea performanțelor de conversie a energiei eoliene în energie electrică și pentru a asigura durabilitate crescută în fața factorilor de stres precum vitezele mai ale vântului, fluctuațiile mari de temperatură și expunerea îndelungată la condiții meteorologice extreme.

Integrarea inteligenței artificiale în sistemele electroenergetice face posibilă optimizarea performanțelor sistemelor prin utilizarea de algoritmi care pot să prezică producția de energie, să optimizeze gestionarea sistemului, respectiv îmbunătățească planificarea mentenanței. Sistemele inteligente de stocare a energiei, sunt în curs de dezvoltare pentru a gestiona mai eficient natura variabilă a surselor de energie regenerabilă. Sistemele avansate de baterii, precum bateriile litiu-ion, oferă capacități de stocare mari, și permit înmagazinarea surplusului de energie, respectiv injectarea acestuia în rețeaua electroenergetică când este necesar. Dezvoltarea de sistemele inteligente de stocare a energiei este esențială pentru integrarea eficientă a surselor de energie regenerabilă în sistemul electroenergetic.

Progresele în domeniul fabricării și instalării contribuie la minimizarea costurilor utilizării surselor de energie regenerabilă. Creșterea numărului de furnizori, respectiv instalatori de panouri fotovoltaice determină o competiție ridicată, deci minimizarea costurilor. Complementar, noile modele de finanțare și suportul oferit de guvern facilitează implementarea surselor de energie regenerabilă pentru utilizatorii rezidențiali.

## b. Reglementări și legislație

Guvernele au rol în accelerarea integrării surselor de energie regenerabilă în sistemele electroenergetice cât și în microrețele prin implementarea legislației specifice precum:

- Feed-in Tariffs este o schemă de suport ce ofera producătorilor de energie din surse regenerabile contracte pe termen lung, la un preț fix, asigurând astfel fiabilitate financiară proiectelor;
- Standarde pentru energia regenerabilă unde este solicitat ca un procent stabilit din energia electrică vândută să fie produs de surse precum fotovoltaic sau eolian;
- Mecanismele de ajustare a emisiilor de carbon limitează producerea de energie electrică a industriilor cu emisii mari de carbon precum industria petrolieră prin taxe, oferind astfel competitivitate parcurilor fotovoltaice și fermelor eoliene.

Cooperarea internațională și standardizarea tehnologiilor microrețelilor sunt esențiale pentru integrarea la nivel global și respectarea reglementărilor. Standardizarea și cooperarea internațională includ:

- Standarde tehnice: Dezvoltarea uniformă a specificațiilor tehnice pentru componentele microrețelilor și sistemelor de comandă și control facilitează coordonarea și funcționarea eficientă prin minimizarea riscurilor de defecțiune și prin optimizarea proceselor de mentenanță.
- Standarde de interoperabilitate: Stabilirea unui set comun de instrucțiuni, protocoale și reguli ce asigură ca diferite sisteme pot să funcționeze împreună și permit integrarea și compatibilitatea diferitelor echipamente.
- Respectarea reglementărilor: Asigurarea că microrețelele se încadrează în standardele naționale și internaționale prin respectarea normelor și conformarea cu toate cerințele tehnice impuse, respectiv certificări și verificări tehnice periodice pentru a asigura buna funcționare în condiții de siguranță a microrețelei.
- Finanțare: Folosirea resurselor financiare și a investițiilor pentru a sprijini implementarea la scară largă a microrețelilor, în special în regiunile în care există o necesitate accentuată;
- Plase de siguranță socială: Implementarea măsurilor de protecție și suport pentru muncitorii și comunitățile afectate de tranziția la microrețele, dezvoltarea de programe de recalificare profesională, respectiv crearea de noi oportunități.

### c. Integrarea inteligenței artificiale în microrețele

Sistemele inteligente de comandă și control care au integrată inteligența artificială se folosesc de baze de date și analiză predictivă pentru a maximiza performanțele și eficiența microrețelelor. Inteligența artificială din componența microrețelelor este folosită la:

- Prognoza cererii de energie este realizată prin analizarea unor vaste baze de date, incluzând istoricul consumului, condițiile meteorologice și datele generate de senzori în timp real. Prin implementarea mai multor baze de date, analiza predictivă poate identifica mai ușor modele, respectiv tendințe de consum, precum consumul atipic datorat sărbătorilor legale sau altor evenimente. Prin prognoza avansată realizată de inteligența artificială, permite optimizarea operării microrețelei;
- Prognoza generării de energie regenerabilă este realizată prin modele de predicție meteorologică, luând în considerare factori precum viteza vântului, temperatura, intensitatea luminoasă, respectiv prin analizarea unor baze de date care includ istoricul producției de energie;
- Operarea automată a microrețelei este bazată pe abilitatea algoritmului de inteligență artificială de a reacționa, de a se adapta și de a învăța continuu. Sistemul poate ajusta în timp real încărcarea respectiv descărcarea bateriei în funcție de condițiile și parametrii analizați;
- Controlul în timp real al microrețelei permite algoritmului să răspundă în timp real modificărilor bruște, neașteptate ale cererii, producției sau pieței de energie, și are abilitatea de a face decizii instantaneu pentru a menține stabilitatea și eficiența microrețelei;
- Securitatea cibernetică are un rol important în detectarea și îndepărtarea amenințărilor cibernetice. Sistemele de inteligență artificială pot analiza traficul de pe rețelele ethernet, comportamentul utilizatorului conectat la sistem precum și detecta eventuale anomalii ale sistemului;
- Scalabilitatea sistemului inteligent de comandă și control este realizată prin simpla integrare a noilor panouri fotovoltaice, respectiv turbine eoliene, fără nevoia de a reprograma complet algoritmul;
- Îndepărtarea avariilor se poate realiza în timp real prin izolarea componentelor afectate și prin inițierea măsurilor de protecție;
- Monitorizarea și colectarea continuă a datelor sistemului permite algoritmului să adauge continuu noi informații în bazele de date, îmbunătățind astfel capacitatea decizională proprie a sistemului.

## 4. TEHNICI DE CALCUL EVOLUTIV

Tehnicile de calcul evolutiv reprezintă un subdomeniu al inteligenței artificiale bazat pe procesul de selecție naturală și sunt folosite pentru a rezolva probleme de optimizări prin îmbunătățirea soluțiilor cu fiecare generație [3]. Principalele tehnici sunt:

- Algoritmii genetici, bazați pe procesul de selecție naturală, algoritmul modifică continuu o populație de soluții individuale, selectând la fiecare pas indivizii cu cel mai mare punctaj, care devin părinți pentru noua generație;
- Strategiile evoluționare, bazate pe selecție și mutație, populației inițiale îi este aplicată o mutație gaussiană, iar selecția este bazată pe punctajul fiecărui individ;
- Evoluția diferențială, eficientă pentru optimizarea funcțiilor multidimensionale, populația caută soluția optimă prin intermediul unei funcții matematice simple, combinând poziția mai multor agenți ai populației;
- Optimizarea roiului de particule, inspirată de comportamentul păsărilor și peștilor, optimizează soluțiile printr-o populație de soluții candidat care caută rezultate mai bune bazat pe adaptarea lor la parametrii sistemului.

Datorită flexibilității matematice oferite, tehnicile de calcul evolutiv sunt folosite în diverse domenii precum:

- Optimizare: Controlul sistemelor, proiectarea circuitelor electrice, managementul resurselor, planificare predictivă, logistică;
- Machine Learning: Selectarea caracteristicilor, ajustarea parametrilor, proiectarea rețelelor neuronale convoluționale, crearea rețelelor neuronale;
- Robotică: Navigarea autonomă, planificarea drumului, optimizarea rutelor, stabilitate bipedă pentru roboți, control precis în operațiile robotice;
- Financiar: Optimizarea portofoliilor prin diversificarea investițiilor, dezvoltarea de strategii comerciale, managementul riscurilor, prin analiza de risc
- Bioinformatică: Prezicerea structurilor tridimensionale de proteine, analizarea genetică a diverselor condiții, prognoza potențialelor interacțiuni dintre molecule;
- Dezvoltarea de jocuri video: Optimizarea nivelului de dificultate prin evoluarea parametrilor, generarea automată a nivelelor care se potrivesc condițiilor specifice.

## 4.1. Introducere algoritmi genetici

Algoritmii genetici reprezintă un subdomeniu al inteligenței artificiale, o clasă de optimizare și căutare bazată pe principiile naturale de evoluție și genetică. Sunt eficienți în particular pentru rezolvarea de probleme complexe.

### a. Reprezentarea

Soluțiile, cunoscute și ca indivizi sau cromozomi, pot fi reprezentate în mai multe moduri, specifice problemei în cauză:

- Șiruri binare: Este cea mai comuna reprezentare, indivizii fiind codificați ca șiruri de zero și unu. Fiecare bit reprezintă o variabilă decizională.

Exemplu: Se presupun opt obiecte, numerotate de la „a” la „h”, fiecare obiect poate să fie inclus, reprezentat prin unu, sau să nu fie inclus, reprezentat prin zero. Se presupune că doar obiectele „a” și „d” sunt incluse, deci soluția este: „10010000”. Dacă doar obiectele „b”, „c” și „g” ar fi incluse, soluția ar fi: „01100010”

- Numere reale: Sunt folosite pentru probleme unde parametrii sunt continui, indivizii sunt reprezentați ca șiruri de numere reale.

Exemplu: Minimizarea unei funcții cu variabile naturale nenule. Se Presupun funcția  $f(x,y)=x^2+y^2$ ,  
deci soluția este  $[x, y] = [1, 1]$ ,  
 $f(x,y)=x^2+y^2=f(1,1)=1^2+1^2=1$ ;

- Permutări: Folosite pentru probleme de ordonare, unde soluția este reprezentată de o secvență de elemente.

Exemplu: Se presupun patru noduri, conexiunile și distanțele dintre ele. Se caută drumul cel mai scurt pentru a trece prin toate nodurile și pentru a reveni la nodul de la care s-a pornit. Exemplu soluție: [1, 3, 2, 4, 1]. Soluția reprezintă trecerea succesivă prin nodurile 1, 3, 2, 4, și revenirea la nodul 1.

### b. Populația inițială

Dimensiunea populației indivizilor influențează performanțele algoritmului. În mod obișnuit, numărul indivizilor dintr-o generație este cuprins între 20 și 100, dar pentru o diversitate genetică ridicată se pot folosi mai mulți indivizi.

Procesul începe cu o populație inițială de soluții generate aleator în cadrul spațiului de căutare fezabil, asigurând diverse puncte de pornire.

## c. Funcția Fitness

Funcția Fitness are rolul de a evalua performanțele fiecărei soluții, atribuind un punctaj final, astfel ghidează procesul de selecție pentru următoarea generație. În mod obișnuit, funcția Fitness este reprezentată de funcția obiectiv, precum minimizare sau maximizare, și, dacă este necesar, este transformată astfel încât să se potrivească în scheletul algoritmului genetic. În unele cazuri este necesară normalizarea punctajelor pentru a facilita comparațiile respectiv selecția. [4]

## d. Selecția

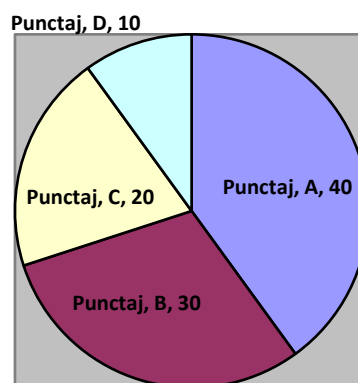
Mecanismele de selecție determină care dintre indivizi sunt aleși pentru reproducerea unei noi generații, în funcție de punctajul Fitness. Există multiple mecanisme de selecție a indivizilor printre care:

- Roata de ruletă: Fiecărui individ îi este atribuită o probabilitate de a fi selectat, direct proporțională cu punctajul Fitness. Această metoda favorizează indivizii cu punctaje mari, dar păstrează diversitate prin posibilitatea de a fi aleși inclusiv indivizi cu punctaje mici.

Exemplu: Se presupun 4 indivizi și urmarim maximizarea funcției.

**Tabelul 4.1.1. Exemplu punctaje Fitness pentru indivizi, metoda roții de ruletă**

Individ	Punctaj
A	40
B	30
C	20
D	10



**Figura 4.1. Metoda Roții de Ruletă**

În exemplul de mai sus, individul „C”, are o șansă de 20% să fie selectat ca părinte pentru noua generație.

- Metoda turneului: Indivizii sunt împărțiți în grupuri egale, și individul cu punctajul cel mai mare din fiecare grup este selectat.

Exemplu: Se presupun 6 indivizi și sunt împărțiți aleator în 3 grupe.

**Tabelul 4.1.2. Exemplu punctaje Fitness pentru indivizi, metoda turneului**

Individ	Punctaj
A	5
B	10
C	20
D	25
E	15
F	25

**Tabelul 4.1.3. Exemplu grupare, metoda turneului**

Grupa	Individul 1	Individul 2
1	A (5)	D (25)
2	E (15)	B (10)
3	C (20)	F (25)

Se confruntă indivizii din fiecare grupă. Pentru prima grupă, se compară punctajul individului „A”, cu punctajul individului „D”, rezultând astfel selectarea individului „D”.

În urma turneului, indivizii selectați pentru reproducere sunt „D”, „E”, respectiv „F”. Se observă că individul „E”, cu un punctaj individual mai mic decât punctajul individului „C” a trecut de selecție prin această metodă.

#### e. Funcția de recombinare

Funcția de recombinare sau crossover reprezintă operatorul principal pentru combinarea informației genetice a doi părinți pentru a produce moștenitori. Există mai multe metode de recombinare a informației genetice precum:

- Crossover într-un punct: Un singur punct de recombinare este ales, apoi segmentele părinților sunt interschimbate astfel încât să creeze doi moștenitori.

Exemplu:

Părintele 1: A B C | D E F

Părintele 2: 1 2 3 | 4 5 6

„|”, după a 3 a genă, reprezintă punctul de crossover.

Moștenitorul 1: A B C | 4 5 6

Moștenitorul 2: 1 2 3 | D E F



- Crossover în doua puncte: Două puncte de recombinare sunt alese, apoi segmentele părinților sunt interschimbate pentru a crea doi moștenitori.

Exemplu:

Părintele 1: A B | C D | E F

Părintele 2: 1 2 | 3 4 | 5 6

„|”, după a 2 a și a 4 a genă, reprezintă cele două puncte de crossover.

Moștenitorul 1: A B | 3 4 | E F

Moștenitorul 2: 1 2 | C D | 5 6

- Crossover uniform: Fiecare genă este aleasă independent de la unul dintre părinți cu probabilitate egală de selecție.

Exemplu:

Părintele 1: A B C D E F

Părintele 2: 1 2 3 4 5 6

Moștenitorul 1: A 2 C 4 E 6

Moștenitorul 2: 1 B 3 D 6 F

#### f. Mutație

Mutația introduce modificări aleatorii ale cromozomilor individuali pentru a menține diversitatea genetică. Există mai multe tipuri de mutații printre care:

- Mutația Bit-Flip: Este folosită în reprezentarea binară, unde biți individuali sunt schimbați cu o probabilitate aleasă.

Exemplu:

Se presupune șirul binar „0101” și probabilitatea de mutație  $p = 20\%$ .

Se generează un număr aleator, cuprins între 0 și 1, pentru fiecare bit din șir, dacă numărul generat este mai mic sau egal cu 0.2, bitul se schimbă din 1 în 0 respectiv din 0 în 1.

Soluție posibilă „1101”, a fost obținută prin mutația primului bit din șirul binar.

- Mutația Gaussiană: Este folosită în cadrul reprezentării cu numere reale. Metoda perturbă valorile prin adăugarea de zgomot Gaussian. Procesul este stocastic, valorile zgomotului Gaussian pot varia cu fiecare execuție.

Exemplu: Se presupun 3 soluții cărora li se aplică zgomot Gaussian:

**Tabelul 4.1.4. Exemplu mutație prin zgomot Gaussian**

Soluție	Valoare	Zgomot	Valoare + Zgomot
A	3	-0,05	2,95
B	-1	0,02	-0,98
C	0	0,05	0,05

Pentru individul „A”, după aplicarea mutației prin zgomot Gaussian, valoarea s-a modificat de la 3 la 2,95.

- Mutația prin schimbare: Este folosită în cadrul reprezentării cu permutări. Se aleg 2 poziții aleatoare și elementele din acele poziții își schimbă locurile între ele.

Exemplu: Se presupune șirul de soluții „ [A, B, C, D, E] ”.

După aplicarea mutației prin schimbare, se aleg aleator pozițiile 2 și 4, astfel rezultă soluția finală „ [A, D, C, B, E] ”.

#### g. Evaluarea indivizilor

După realizarea selecției, crossoverului și mutației, noua populație este evaluată, fiecărui individ fiindu-i atașat un punctaj Fitness. În mod obișnuit, cei mai buni indivizi din generația curentă sunt păstrați și pentru generația următoare pentru a asigura că performanțele atinse în generația anterioară nu se degradează.

#### h. Oprirea algoritmului

Algoritmul genetic rulează iterativ, evoluând populația de indivizi cu fiecare generație până unul dintre următoarele criterii este îndeplinit:

- Atingerea numărului maxim de generații: Algoritmul se oprește după depășirea unui număr impus de generații;
- Convergență: Algoritmul se oprește când punctajul Fitness al populației de indivizi converge, deci restul de iterații rămase nu mai produc soluții semnificativ mai bune;
- Atingerea pragului de Fitness: Algoritmul se oprește când punctajul Fitness atinge o valoare predefinită.

## 4.2 Algoritmi genetici în sisteme de comandă și control

În cadrul unei microrețele, sistemele clasice de comandă și control au rolul de a supraveghea și gestiona operarea, managementul și coordonarea componentelor din microrețea, asigurând o funcționare cât mai eficientă. Principalele funcții ale unui sistem de comandă și control includ:

- Monitorizare și achiziție de date: Echipamentele de măsură, precum voltmetre, ampermetre, termometre, monitorizează continuu parametrii sistemelor și transmit informații în timp real.
- Arhitectura de control: Un singur controler central sau mai multe controlere independente iau toate deciziile, bazate pe analizarea datelor istorice și datelor primite de la aparatele de măsură și senzori.

Algoritmii genetici sunt implementați în sistemele de comandă și control ale microrețelelor cu scopul de a optimiza încărcarea, respectiv descărcarea sistemului de stocare și pentru a îmbunătăți siguranța în alimentare, ridicând astfel eficiența, fiabilitatea și rentabilitatea economică a microrețelei.

Modul obișnuit de reprezentare a indivizilor este cu valori reale, iar funcția obiectiv trebuie minimizată astfel încât încărcarea, respectiv descărcarea sistemului de stocare nu iese din limitele impuse. În cazul în care o soluție iese din limitele impuse, funcția Fitness a individului suferă prin adăugarea unei penalități.

Funcția Fitness evaluează capacitatea de stocare a bateriei, asigurând un nivel de încărcare al bateriei suficient pentru alimentarea microrețelei în condiții nefavorabile, pentru o perioadă lungă de timp. În funcție de capacitatea de stocare a bateriei, funcția Fitness poate ține cont și de prețul energiei atunci când este necesar ca microrețeaua să absoarbă sau să injecteze energie în sistemul electroenergetic sau poate deveni un participant la piața de echilibrare.

Prin optimizarea sistemului de stocare, algoritmul genetic maximizează utilizarea energiei provenită de la sursele regenerabile, minimizând numărul de interacțiuni dintre microrețea și Sistemul Electroenergetic Național.

Prin analizarea datelor istorice de producție și consum, algoritmul genetic poate menține nivelul de încărcare al bateriei în limitele impuse, inclusiv în perioade particulare unde consumul de energie iese din intervalul normal, precum ziua de 1 mai, sărbătorile legale, zilele foarte reci de iarnă.

## 5. STUDIU DE CAZ

Studiul de caz este bazat pe simularea unui sistem de comandă și control pentru o microrețea, prin implementarea unui algoritm genetic și simularea diverselor scenarii cu ajutorul aplicației MATLAB, folosită la scară largă în mediul academic, specializată în manipulare matriceală, trasarea graficelor și implementarea algoritmilor.

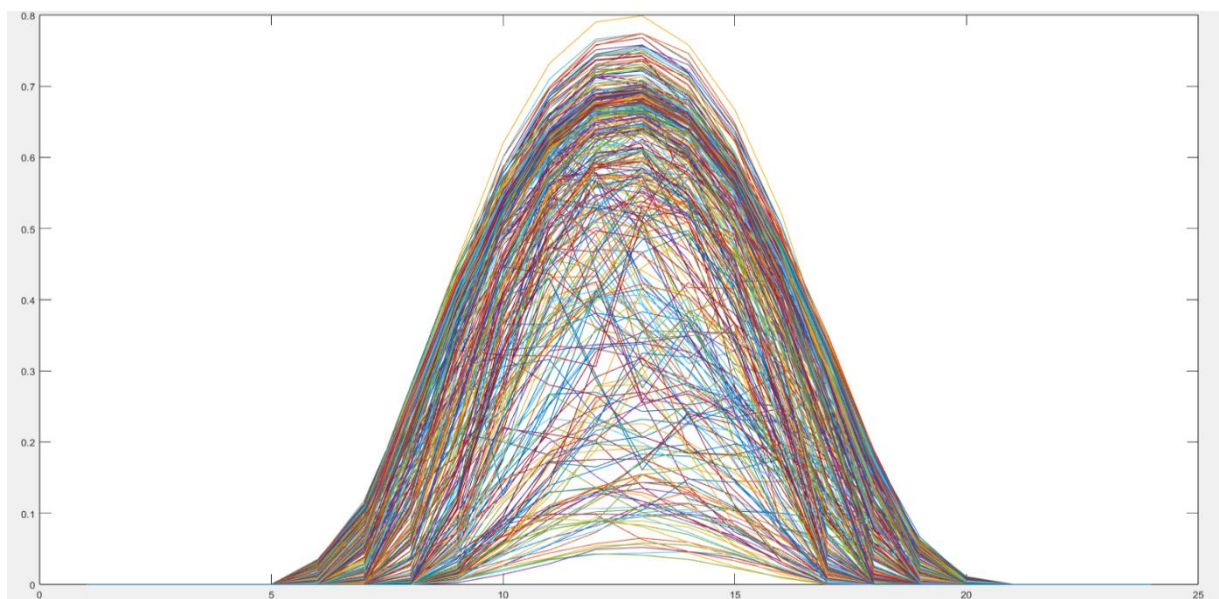
Microrețeaua simulată încorporează surse regenerabile de energie și anume panouri fotovoltaice și turbine eoliene, fapt pentru care este necesară o control mai eficient al resurselor pentru a asigura fiabilitatea sistemului și siguranță în alimentare.

Sistemul propus folosește algoritmi genetici pentru a modifica dinamic parametrii de control, optimizând echilibrarea sarcinii. Prin simularea mai multor scenarii operaționale, sistemul inteligent de comandă și control identifică strategii optime pentru stocarea surplusului de energie în baterii și pentru gestionarea distribuției.

### 5.1 Colectarea datelor

Datele necesare realizării algoritmului genetic pentru sistemul de comandă și control al unei microrețele sunt:

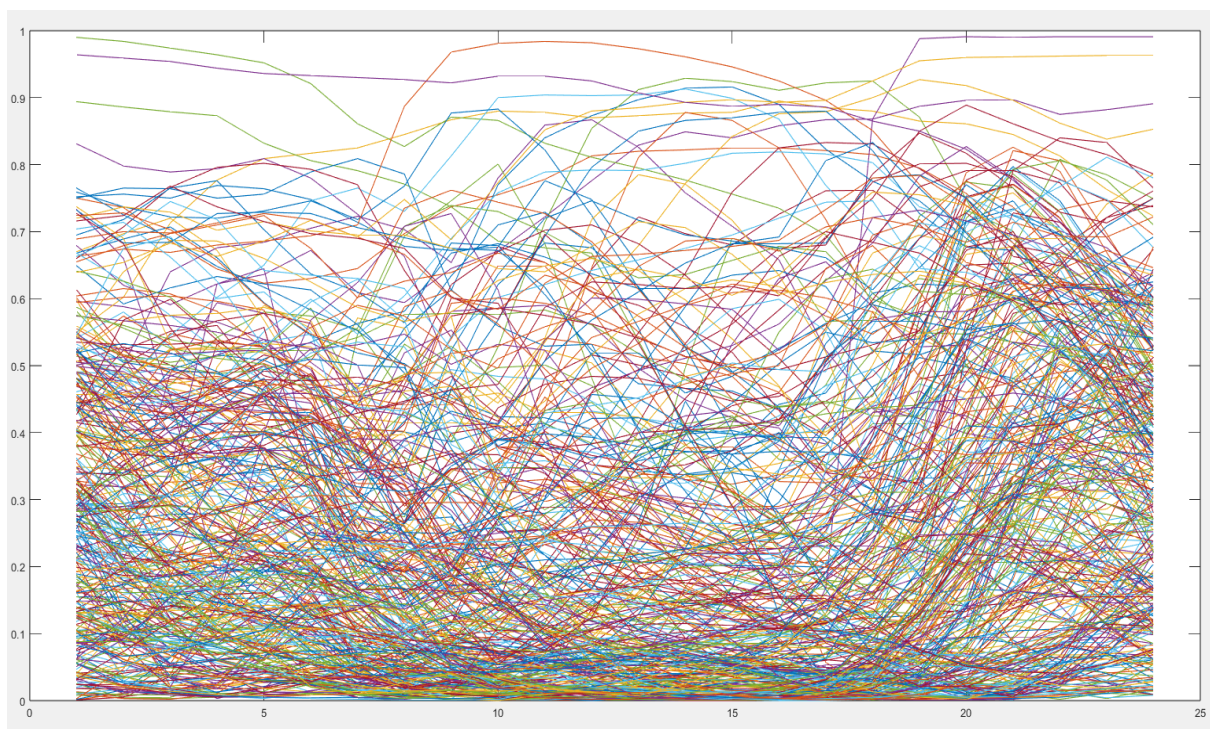
- Datele istorice zilnice privind producția de energie fotovoltaică în decursul unui an au fost extrase din baza de date a companiei Transelectrica [5] și reprezintă producția de energie electrică provenită de la panourile fotovoltaice pe durata anului 2023.



**Figura 5.1.** Curba de producție – Fotovoltaic

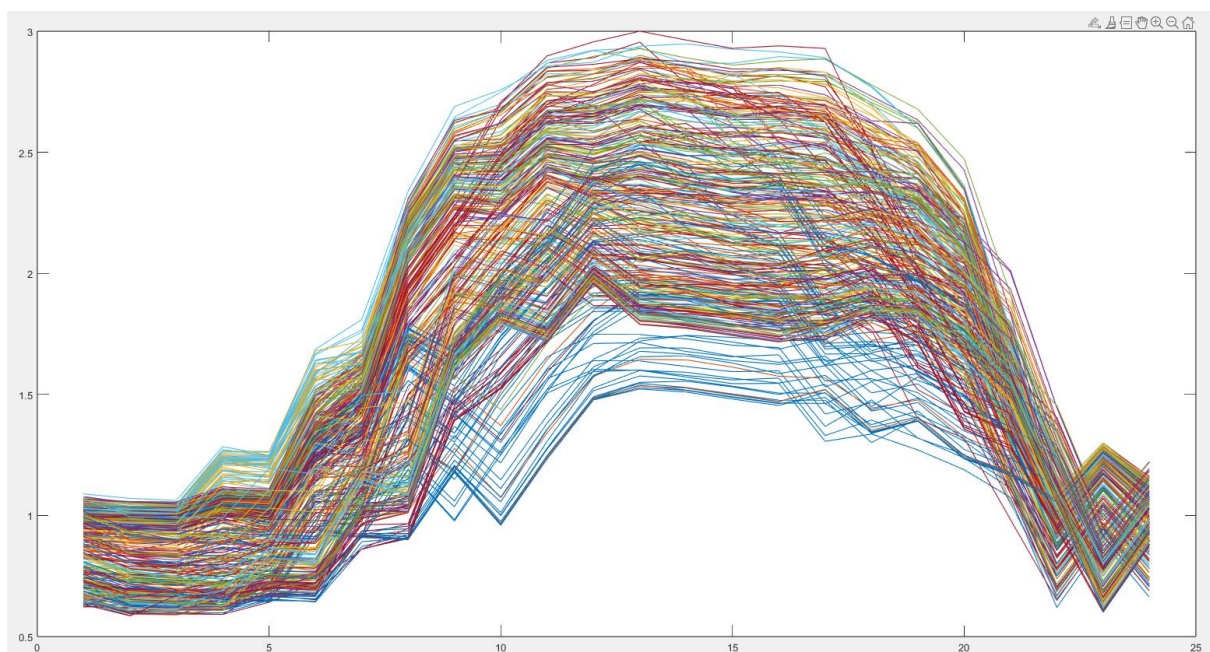


- Datele istorice zilnice privind producția de energie eoliană în decursul unui an au fost extrase din baza de date a companiei Transelectrica [5] și reprezintă producția de energie electrică provenită de la turbinele eoliene pe durata anului 2023.



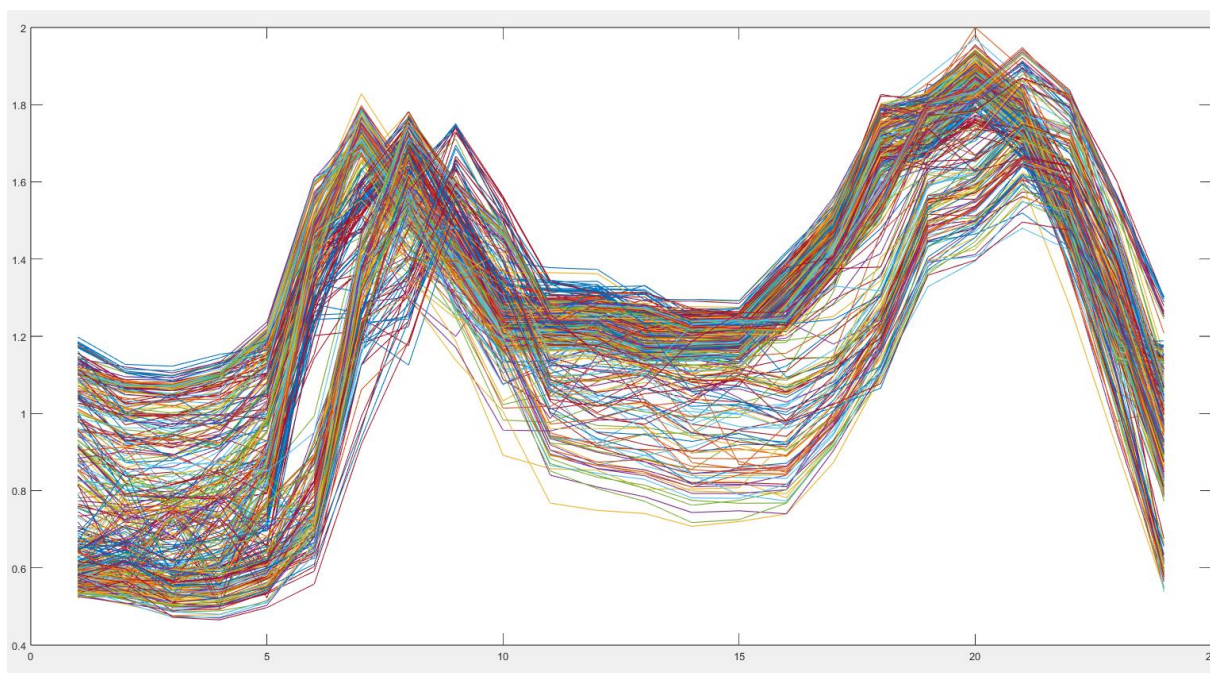
**Figura 5.2.** Curba de producție - Eolian

- Date istorice zilnice privind consumul comercial de energie în decursul unui an:



**Figura 5.3.** Curbă putere utilizată - Comercial

- Date istorice zilnice privind consumul rezidențial de energie în decursul unui an:



**Figura 5.4.** Curbă putere utilizată - Rezidențial

Pentru toate graficele de mai sus, axa orizontală reprezintă axa timpului, exprimat în 24 de ore, și fiecare curbă reprezintă o zi din anul 2023. Axa verticală reprezintă energia generată respectiv consumată.

## 5.2 Prelucrarea datelor

Pentru cele 4 seturi de date prelucrarea reprezintă normalizarea și scalarea datelor pentru a aduce toți parametrii într-un interval similar și pentru a facilita antrenarea modelului.

Exemplu: Se presupun într-un interval de 8 de ore, 8 de valori ale energiei:

**Tabelul 5.1. Exemplu date neprelucrate**

Ora	10	11	12	13	14	15	16	17
Energie	7	8	9	10	9	8	6	8

Pentru a facilita antrenarea modelului și urmărirea ușoară a graficelor, toate valorile au fost scalate prin împărțirea la cea mai mare valoare existentă în datele respective:

**Tabelul 5.2. Exemplu date prelucrate prin scalare**

Ora	10	11	12	13	14	15	16	17
Energie	0,7	0,8	0,9	1	0,9	0,8	0,6	0,8

### 5.3 Selectarea tehnicilor de I.A.

Din gama de tehnici disponibile, s-a selectat algoritmul genetic datorită versatilității matematice și abordării evolutive oferite de algoritm. Criteriile principale de selecție au fost atributele algoritmilor genetici, și anume:

- Interpretabilitate: Algoritmul genetic operează prin mecanisme concise, precum selecție, crossover și mutație. Transparența tehnicii face mai ușoară urmărirea evoluției populației de soluții mai ușor de urmărit și vizualizarea logicii decizionale în timpul procesului de optimizare.
- Complexitate computațională: Din punct de vedere al complexității computaționale, algoritmi genetici sunt mai eficienți în comparație cu metodele de căutare generale. Abordarea bazată pe populație ajută la găsirea unei soluții cât mai eficiente, în special în spații complexe și cu dimensiuni mari. Algoritmul genetic explorează spațiul soluțiilor într-o manieră ghidată, populația soluțiilor evoluând cu fiecare generație;
- Paralelizare: Capacitatea soluțiilor de a fi evaluate individual permite algoritmului genetic să utilizeze mediile moderne de calcul multi-nucleu. Paralelismul reduce semnificativ timpul de găsire a soluțiilor, permițând algoritmului să lucreze în timp real în situațiile când deciziile rapide sunt esențiale;
- Procesare în timp real: Algoritmi genetici pot fi proiectați să ofere îmbunătățiri progresive populației de indivizi, permițând funcționarea în medii unde sunt necesare răspunsuri rapide sau în timp real, fiind ideali pentru sisteme de control;

### 5.4 Dezvoltarea modelului matematic

Un model matematic este o reprezentare matematică abstractă și simplificată a unui sistem real și are ca scop descrierea și prezicerea comportamentului sistemului reprezentat, prin intermediul unor formule, ecuații, funcții și restricții matematice.

Modelul matematic proiectat pentru construirea algoritmului genetic este reprezentat de o funcție obiectiv care urmărește minimizarea și ține cont de puterea consumată de utilizatorii rezidențiali și comerciali, de puterea produsă de panourile fotovoltaice și turbinele eoliene și de puterea sistemului de stocare.

Modelul matematic al funcției obiectiv:

$$[\min] F = \sum_{t=1}^{24} P_{dez,t} = | ( P_{cons,t} - P_{fotov,t} - P_{eol,t} - P_{bat,t} ) | \quad (5.1)$$



Restricțiile impuse modelului matematic:

Prima restricție impune algoritmului ca nivelul de încărcare al sistemului de stocare să nu depășească intervalul impus, asigurând astfel ca algoritmul se încadrează în limite reale și crește durata de viață a bateriilor prin evitarea încărcării respectiv descărcării complete.

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (5.2)$$

A doua restricție impune ca nivelul de încărcare din prima ora a zilei  $n$ , să nu depășească cu mai mult de  $\pm 5\%$  nivelul de încărcare al primei ore din ziua anterioară. Această restricție menține nivelul de încărcare al bateriei la valoarea inițial inițializată pentru a asigura rezerva zilei următoare.

$$|SOC_{t(24)} - SOC_{t(1)}| \leq 5\% \quad (5.3)$$

Unde,

$P_{dez, t}$  – Surplusul sau necesarul de putere la ora  $t$ ;

$P_{cons, t}$  – Puterea consumată de la ora  $t$ ;

$P_{fotov, t}$  – Puterea generată de panourile fotovoltaice la ora  $t$ ;

$P_{eol, t}$  – Puterea generată de turbinele eoliene la ora  $t$ ;

$P_{bat, t}$  – Puterea injectată sau înmagazinată de baterie la ora  $t$ ;

$SOC_{min}$  – Nivelul minim de încărcare al sistemului de stocare;

$SOC_{max}$  – Nivelul maxim de încărcare al sistemului de stocare;

$SOC_{t(i)}$  – Nivelul de încărcare al sistemului de stocare la ora  $t(i)$ ;

În cazul în care o soluție încalcă una sau mai multe restricții, această soluție va fi penalizată prin adăugarea unei valori mari la funcția Fitness a respectivei soluții.

Exemplu: Presupunem ca algoritmul genetic a găsit o soluție al cărui punctaj Fitness este minim, presupunem valoarea 2, dar pentru a ajunge la acel punctaj, soluția a încălcat restricția 1, având la ora 14 un nivel de încărcare mai mare decât  $SOC_{max}$ . În acest caz, punctajului Fitness al individului îi este adăugat +50000, transformând individul respectiv într-un individ cu șanse minime de reproducere, astfel minimizându-se posibilitatea ca noua generație să încalce restricția.



## 5.5 Dezvoltarea programului de calcul

Dezvoltarea programului de calcul a început prin transpunerea funcției obiectiv și a restricțiilor în MATLAB:

```
function y = fobj(X)
global SOC Pdiff SOC_max SOC_min Wbat_max
y=0;
for i=1:24
    SOC(i+1)=SOC(i)+X(i)/Wbat_max;
    if SOC(i+1)>SOC_max
        y=y+50000;
    elseif SOC(i+1)<SOC_min
        y=y+50000;
    end
    Pdez(i)=Pdiff(i)+X(i);
end

y=y+sum(abs(Pdez));

if abs(SOC(25)-SOC(1))>0.05 %Soc_init-Soc_fin > 5%
    y = y + 5000 * abs(SOC(25) - SOC(1))*100;
end
```

S-au impus următoarele valori pentru parametrii microrețelei:

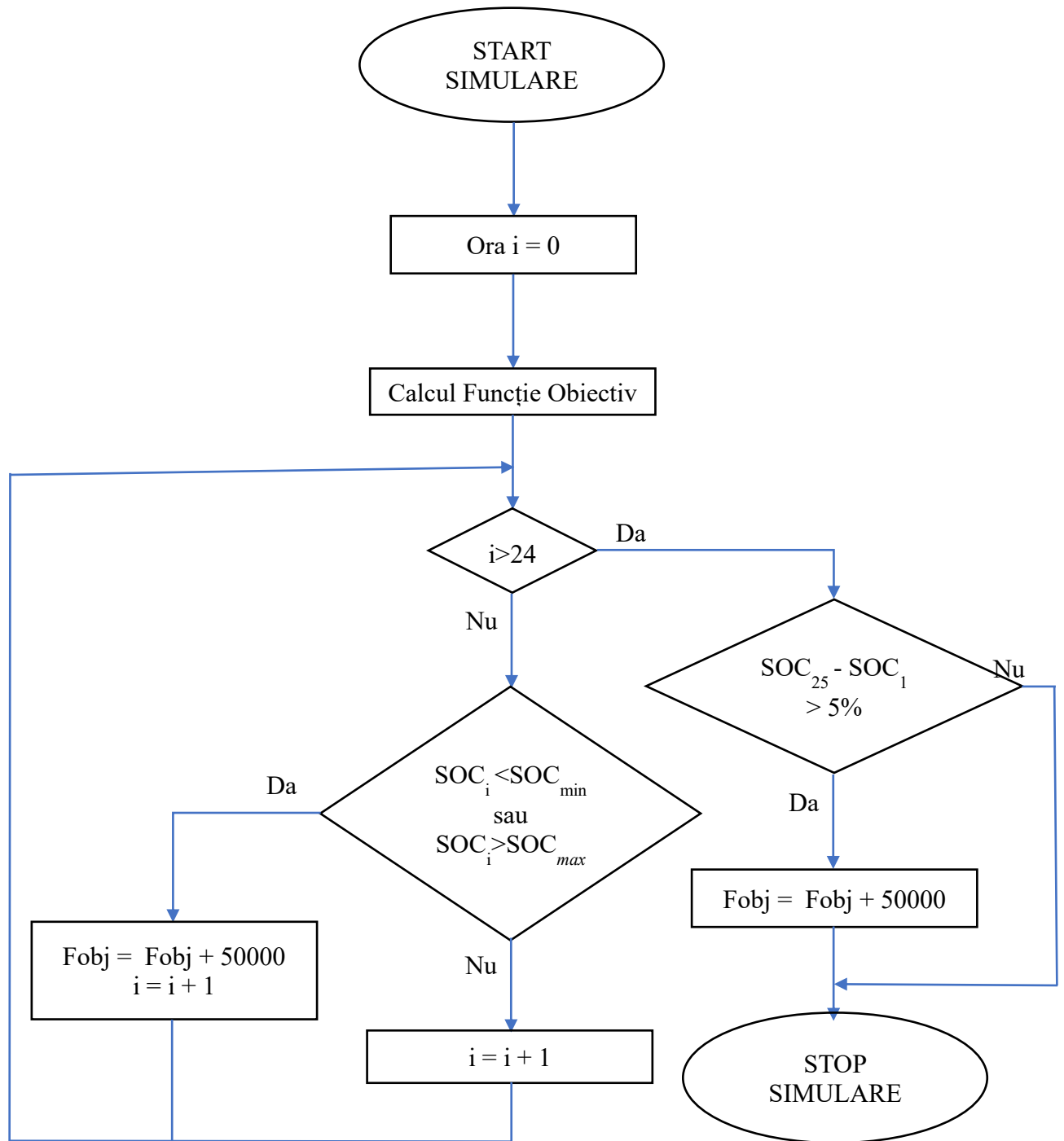
**Tabelul 5.3. Parametrii simulărilor**

Parametru	Notăție	Valoare	Unitete de măsură
Puterea maximă a panourilor fotovoltaice	Pmax_pv	5	MW
Puterea maximă a turbinelor eoliene	Pmax_eol	5	MW
Puterea maximă a consumului comercial	Pmax_cons1	3	MW
Puterea maximă a consumului rezidențial	Pmax_cons2	1.5	MW
Capacitatea de stocare a bateriilor	Wbat_max	5	MWh
Puterea maximă a bateriei	Pbat_max	1,25	MW

S-au impus următoarele valori pentru parametrii algoritmului genetic:

**Tabelul 5.4. Parametrii algoritmului genetic**

Parametru	Notăție	Valoare
Numărul indivizilor	PopulationSize	1000
Rata de crossover	CrossoverFraction	0,8
Numărul maxim de generații	MaxGenerations	2000
Toleranța algoritmului	FunctionTolerance	$10^{-10}$



**Figura 5.5.** Diagramă funcționare restricții

Prin intermediul figurii 5.5. se urmărește înțelegerea funcționării restricțiilor funcției obiectiv. Funcția este penalizată cu +50000 pentru fiecare restricție încălcată.

Implementarea datelor inițiale și a algoritmului genetic:

```
global SOC Pdiff SOC_max SOC_min Pbat_max Wbat_max

load('curba_vant')
Pmax_eol=5; %Puterea maximă a turbinelor eoliene în MW
P_eol=curba_vant.*Pmax_eol;
load('curba_soare')
Pmax_pv=5; %Puterea maximă a panourilor fotovoltaice în MW
P_pv=curba_soare.*Pmax_pv;

ziua=161; %ziua analizată
P_eol_zi=P_eol(:,ziua);
P_pv_zi=P_pv(:,ziua);

load('Consum') %doi consumatori 1-comercial 2-rezidential
Pmax_cons1=3; %Putere maximă consum comercial în MW
Pmax_cons2=1.5; %Putere maximă consum rezidential în MW

Cons1=Cons1.*Pmax_cons1;
Cons2=Cons2.*Pmax_cons2;
Cons1_zi=Cons1(:,ziua);
Cons2_zi=Cons2(:,ziua);

Pdiff=Cons1_zi+Cons2_zi-P_pv_zi-P_eol_zi;

Wbat_max=5; %MWh
Pbat_max=0.25*Wbat_max;
SOC_min=0.2;
SOC_max=0.9;
SOC(1)=0.5; %nivelul de încărcare al sistemului de stocare
lb=-Pbat_max;
ub=Pbat_max;

options=optimoptions('ga',...
    'PopulationSize',1000,...
    'CrossoverFraction',0.8,...
    'MaxGenerations',2000,...
    'FunctionTolerance',1e-10,...
    'PlotFcn',{ @gaplotbestf});

tic
[x fval]=ga(@fobj,24,[],[],[],[],lb,ub,[],options)
sim_time=toc
```

```

figure(2)
ax=gca;
plot(Pdiff)
hold on
plot(-x)
plot(SOC*100)
legend('Pdiff','Pbat','SOC')
hold off

Pdez=Pdiff+x';
figure(3)

bar([Cons1_zi,Cons2_zi,-P_eol_zi,-P_pv_zi,x',-Pdez],'stacked')
legend('cons1','cons2','eolian','fotovoltaic','Pbat','Pimb')

```

Pentru a putea urmări cu ușurință performanțele algoritmului, programul a fost realizat astfel încât să se poată alege ziua pe care se rulează simularea. Algoritmul genetic a fost implementat prin folosirea funcțiilor disponibile din toolbox-ul MATLAB's Global Optimization. [6]

## 5.6 Simulări

Simulările reprezintă un model computațional care folosește formule matematice, algoritmi și informații pentru a replica sistemul studiat. Scopul simulărilor este de a imita funcționarea unui proces în timp și sunt utilizate pentru a determina modul optim de funcționare al unui sistem real, fără a interacționa cu sistemul fizic, minimizând astfel costurile și riscurile.

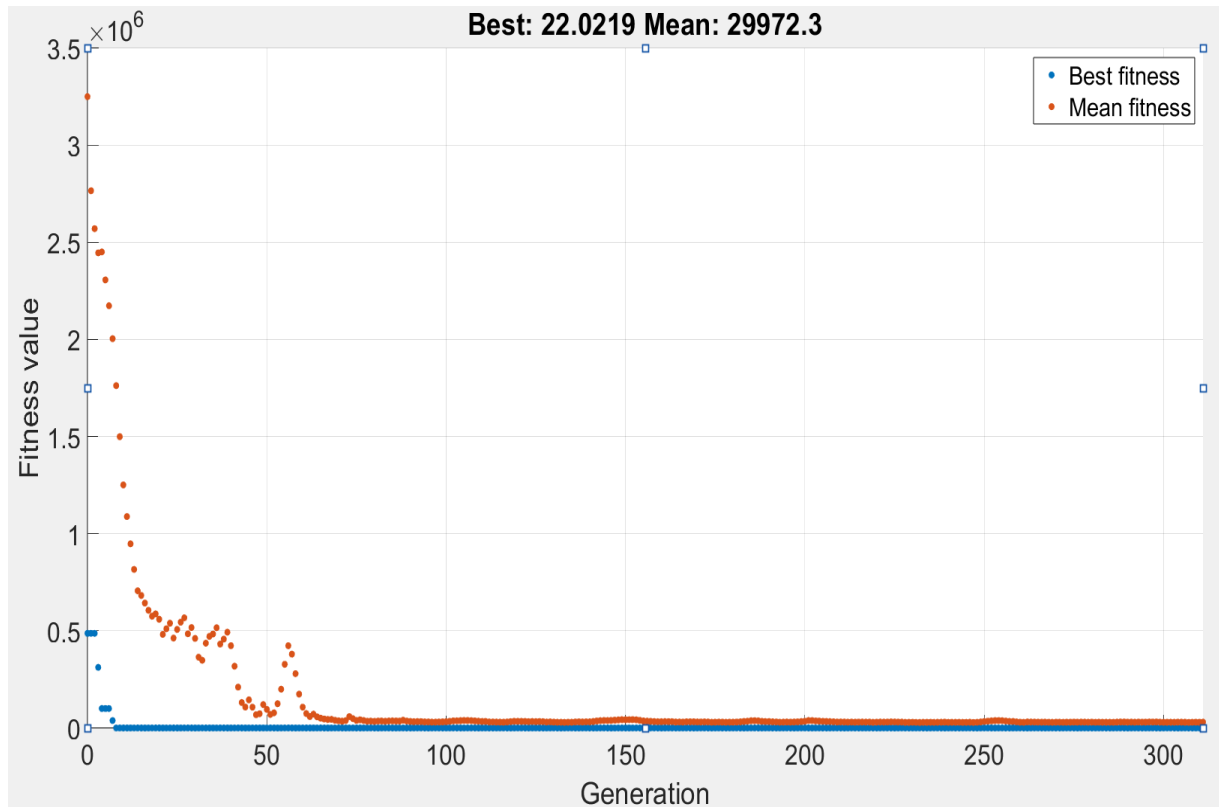
Simulările permit evaluarea performanțelor algoritmului genetic într-un mediu controlat, astfel, prin simularea mai multor scenarii, se studiază cum algoritmul genetic se adaptează, converge și rezolvă probleme de optimizare. Simulările permit ajustarea parametrilor precum dimensiunea populației de indivizi și numărul de generații pentru a stabili configurația optimă care oferă rezultatele dorite și pentru a minimiza utilizarea resurselor în cazul sistemelor slab echipate.

Prin efectuarea mai multor simulări se pot identifica potențiale probleme precum convergența prematură și pierderea diversității indivizilor. Prin identificarea în prealabil a potențialelor probleme, se pot face ajustări ale parametrilor modelului și algoritmului astfel încât să se minimizeze posibilitatea de apariție a problemelor.

Simulările sunt folosite și pentru a testa scalabilitatea sistemului, asigurând astfel că algoritmului genetic îi păstrează un grad ridicat de performanță în eventualitatea extinderii sistemului real.

Folosind datele inițiale s-au simulat patru scenarii:

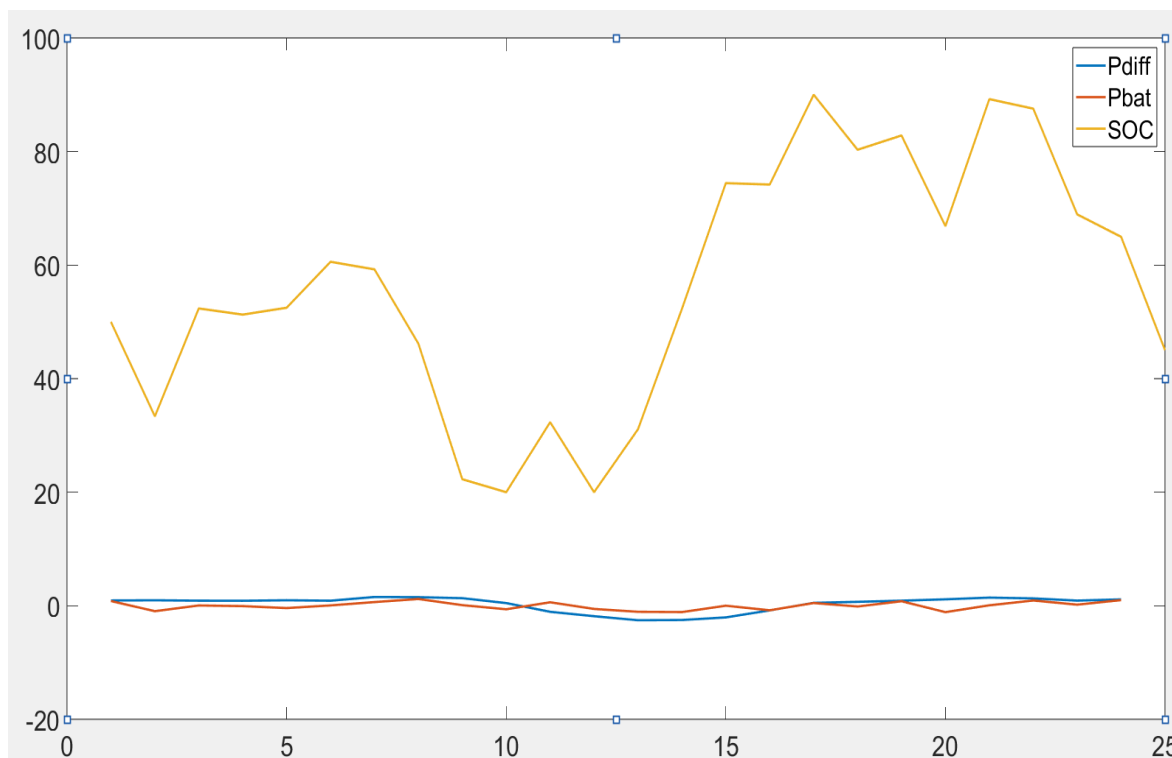
Primul scenariu a fost simulat într-o zi de ianuarie, pentru a observa funcționarea microrețelei atunci când panourile fotovoltaice au o producție de energie redusă:



**Figura 5.6.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – caz iarnă

Prin analizarea figurii 5.6. se observă următoarele aspecte:

- Algoritmul s-a oprit la a 322-a generație, cu mult înainte de a ajunge la limita superioară a numărului de generații, 2000. Acest lucru s-a întâmplat deoarece s-a atins toleranța impusă, adică diferența dintre cele mai bună soluții ale ultimelor generații nu a adus îmbunătățiri semnificative, astfel algoritmul a oprit simularea pentru a economisi resurse;
- Valoarea funcției Fitness, deci valoarea minimă a funcției obiectiv a celui mai bun individ, este de 22,0219. Se observă cum cea mai bună soluție a primei generații a avut valoarea de  $3.25 \times 10^6$ . Ținând cont de valoarea penalizării este inițializată cu 50000, se observă că începând cu generația 70, indivizii nu au mai fost penalizați;
- Se observă cum, în jurul generației 50, funcția Fitness a soluțiilor are o valoare mai mică decât funcția Fitness a indivizilor din generația 60, unde există un vârf, care simbolizează că soluțiile găsite au fost penalizate.



**Figura 5.7.** Nivelul de încărcare al bateriei și interacțiunea cu SEN - caz iarnă

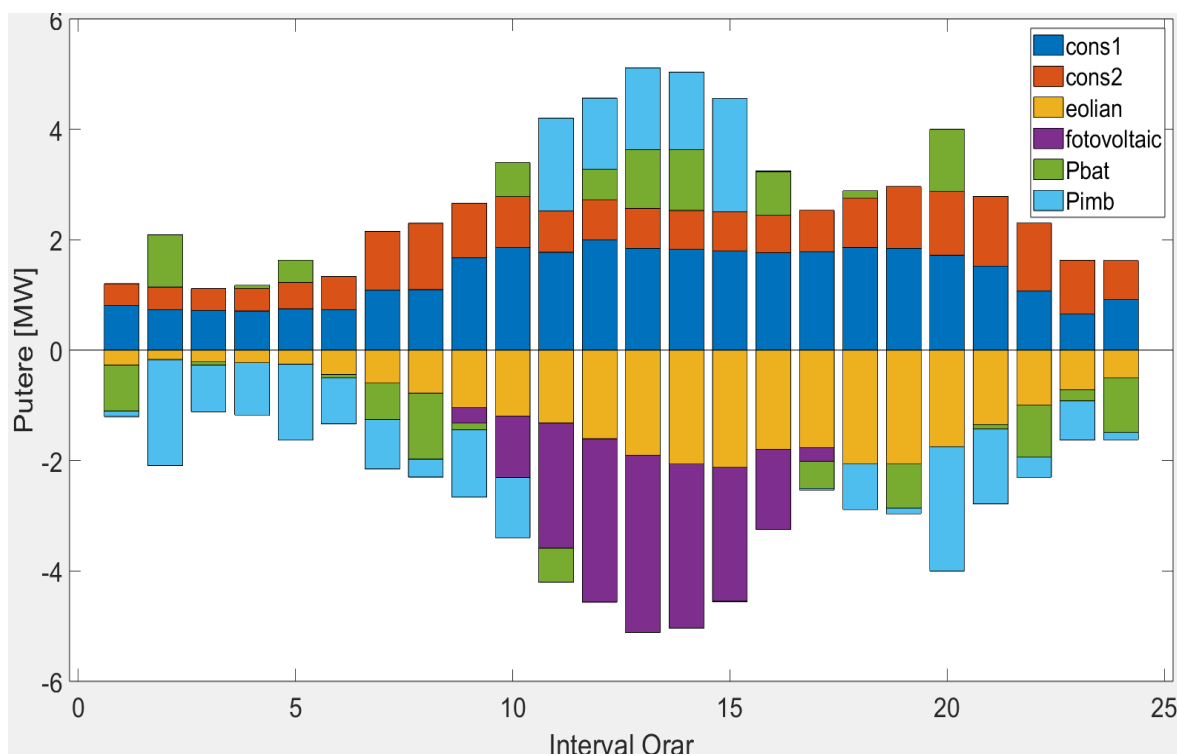
În figura 5.7. curba galbenă reprezintă nivelul de încărcare al bateriei în decursul a 24 de ore. Se observă ca nivelul de încărcare a atins limita inferioară impusă la orele 10 și 12, respectiv limita superioară impusă la orele 17 și 21, dar nu le-a depășit. Se remarcă stabilizarea valorii de încărcare a primei ore din ziua următoare la 45%.

Curbele colorate albastru și portocaliu reprezintă interacțiunile dintre microrețea și Sistemul Electroenergetic Național.

Atunci când curba portocalie, reprezentată de puterea bateriei, ia valori negative, sistemul de stocare injectează putere în microrețea, respectiv când curba portocalie ia valori pozitive, sistemul de stocare încarcă bateria cu surplusul de putere al microrețelei.

Respectiv, când curba albastră, ia valori negative, microrețeaua absoarbe putere din rețeaua electrică națională, respectiv când curba albastră ia valori pozitive, microrețeaua injectează putere în rețeaua electrică națională.

Cazul ideal, atunci când valoarea funcției obiectiv este zero, implică suprapunerea celor 2 curbe, albastră și oranj, cu axa orizontală zero.



**Figura 5.8.** Graficul puterilor – caz iarnă

Figura 5.8. prezintă detaliat funcționarea sistemului. Valorile negative reprezintă puterea generată, respectiv puterea preluată de la sistemul de stocare și de la Sistemul Electroenergetic Național. Valorile pozitive reprezintă puterea utilizată rezidențial și comercial, respectiv surplusul de putere stocat în baterie sau injectat în rețeaua națională.

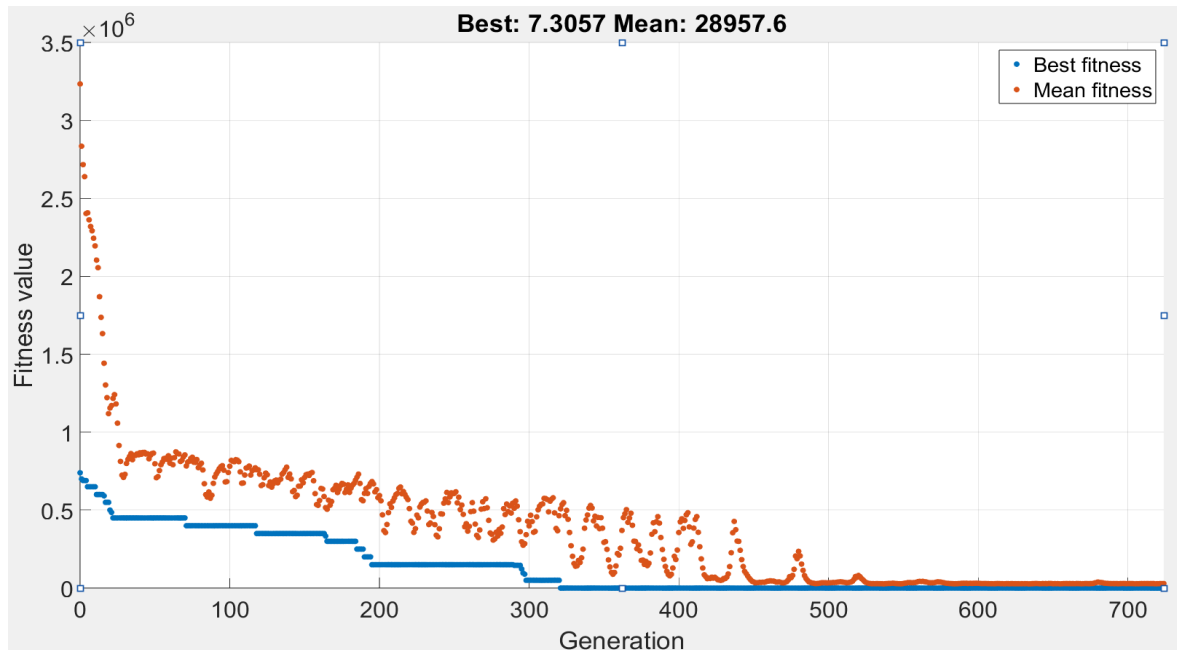
Exemplu de citire pentru figura 5.8, se analizează orele 14 și 20:

Ora 14: Conform datelor din figura 5.8, la ora 14 producția de energie a panourilor fotovoltaice, reprezentate cu violet, și producția de energie a turbinelor eoliene, reprezentată cu auriu, depășesc consumul utilizatorilor rezidențiali, reprezentați cu oranj, și utilizatorilor comerciali, reprezentați cu albastru. Astfel, se observă că există schimb de putere între microrețea și sistemul de stocare, reprezentat prin segmentul verde, cât și între microrețea și Sistemul Electroenergetic Național, reprezentat prin segmentul bleu-deschis.

Deci, conform figurii 5.8., la ora 14, sursele de energie regenerabilă vor avea o producție suficient de mare încât să acopere necesitățile utilizatorilor, să încarce bateria menținând nivelul de încărcare la cca. 45% și să injecteze putere în SEN.

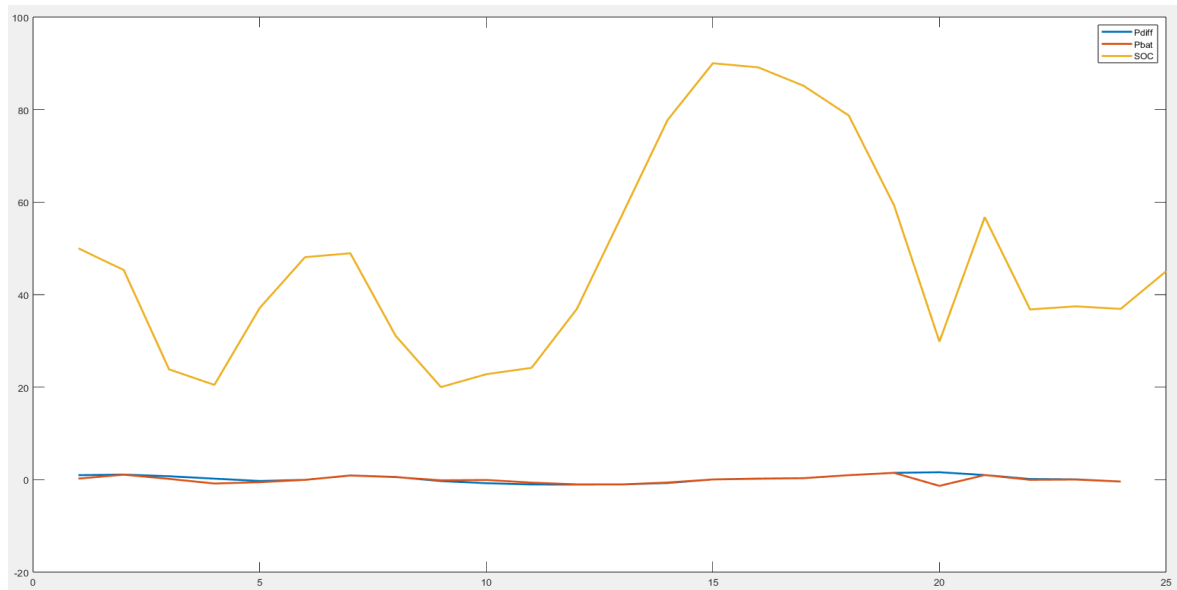
Ora 20: Conform datelor din figura 5.8., la ora 20 doar turbinele eoliene produc energie, dar nu suficientă încât să acopere necesitățile utilizatorilor, astfel, este realizat schimb de putere, microrețeaua absorbind putere din SEN. Se observă cum algoritmul a luat decizia de a încărca bateria până la cca. 70%, astfel reducând cantitatea de energie preluată din Sistemul Electroenergetic Național pentru următoarele 4 ore.

Scenariul 2 a fost simulat într-o zi de vară, pentru a observa funcționarea microrețelei atunci când panourile fotovoltaice au o producție de energie ridicată:



**Figura 5.9.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – caz vară

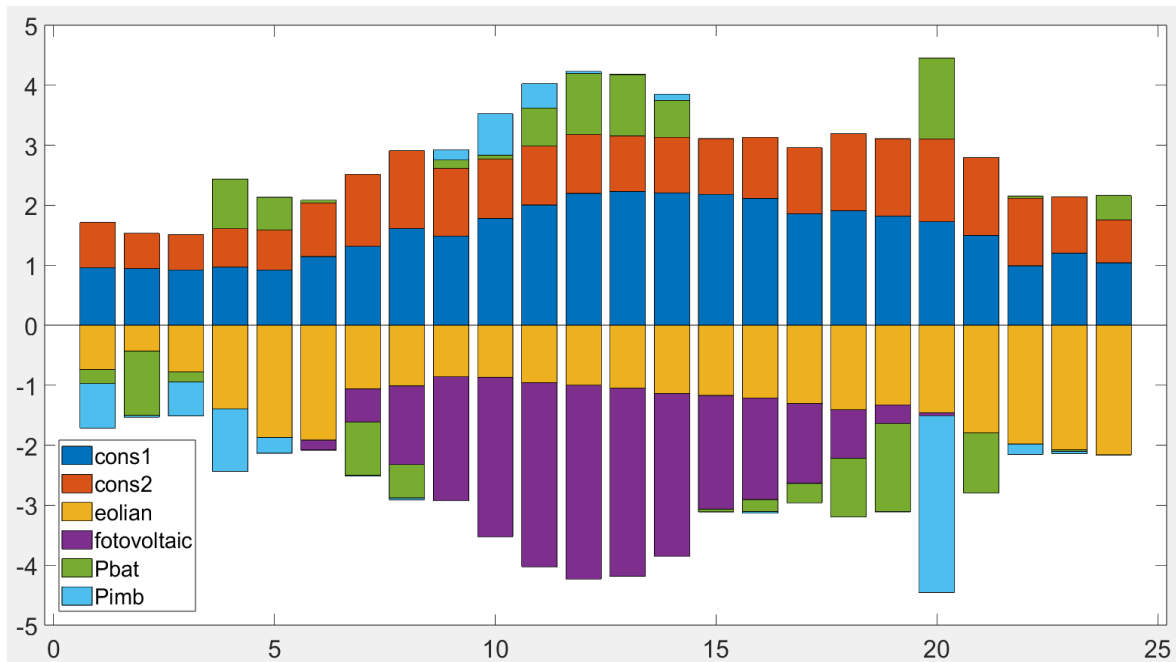
- Algoritmul s-a oprit la a 727-a generație;
- Valoarea funcției Fitness este de 7,3057;
- Se observă cum soluțiile au fost penalizate mai mult decât în cazul anterior.



**Figura 5.10.** Nivelul de încărcare al bateriei și interacțiunea cu SEN - caz vară

- Nivelul de încărcare al bateriei nu a depășit limitele impuse.

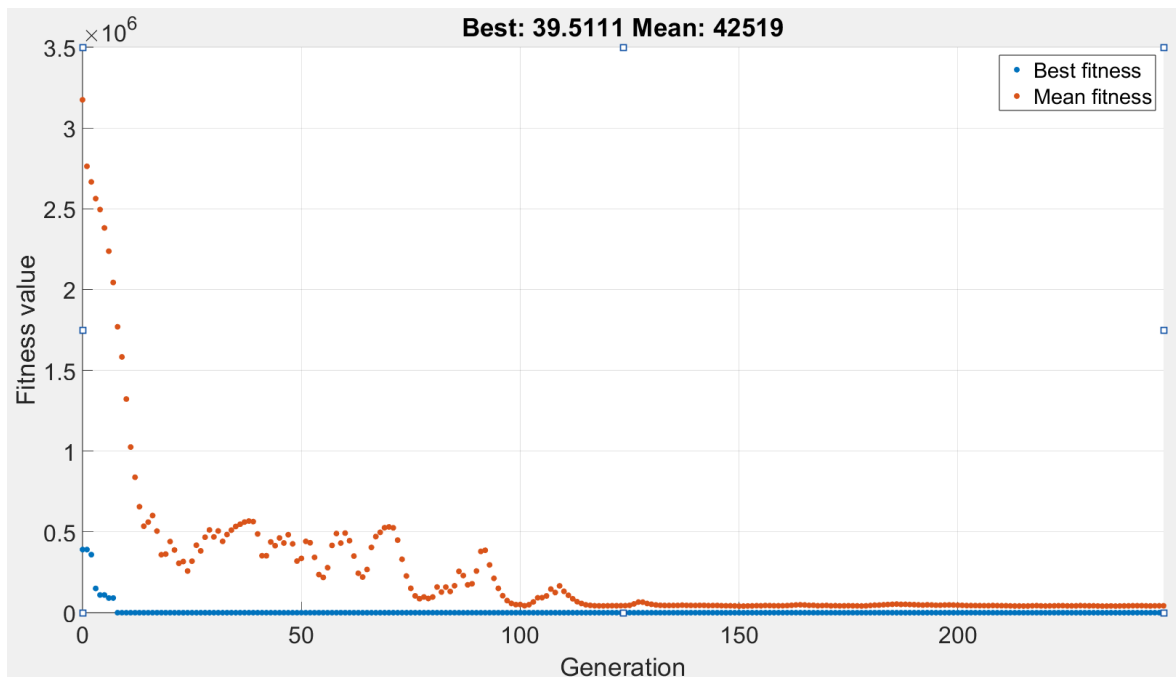




**Figura 5.11.** Graficul puterilor – caz vară

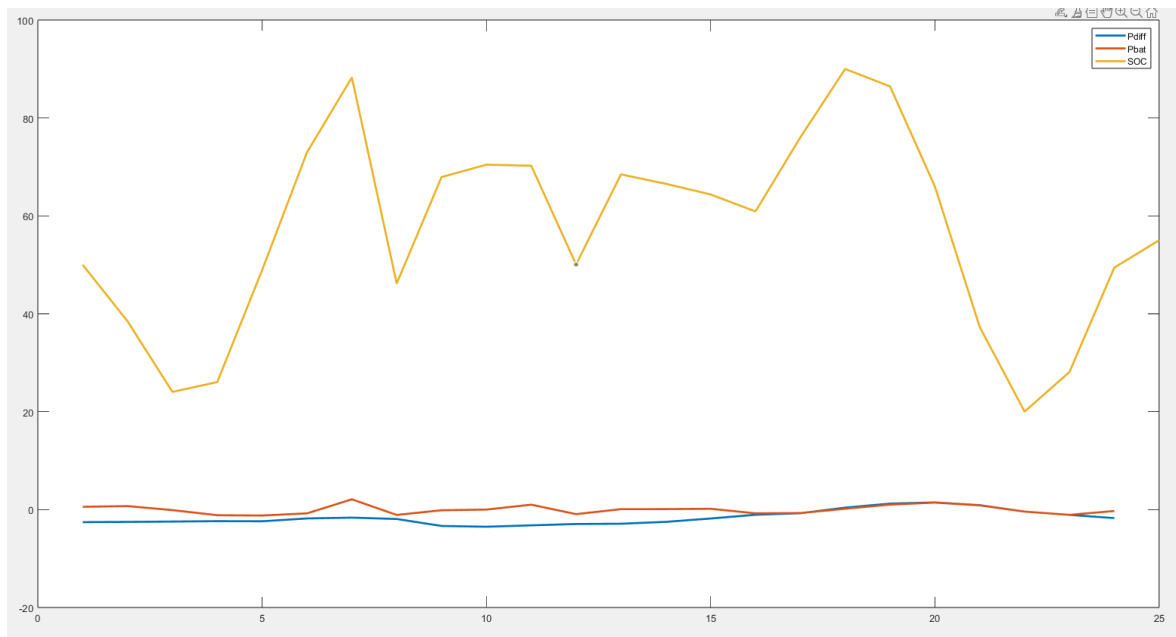
- Se observă că în intervalul 17-19, între microrețea și Sistemul Electroenergetic Național nu au existat interacțiuni.

Scenariul trei a fost simulat într-o zi de atipică, 1 mai, pentru a observa funcționarea microrețelei atunci când apar situații particulare:



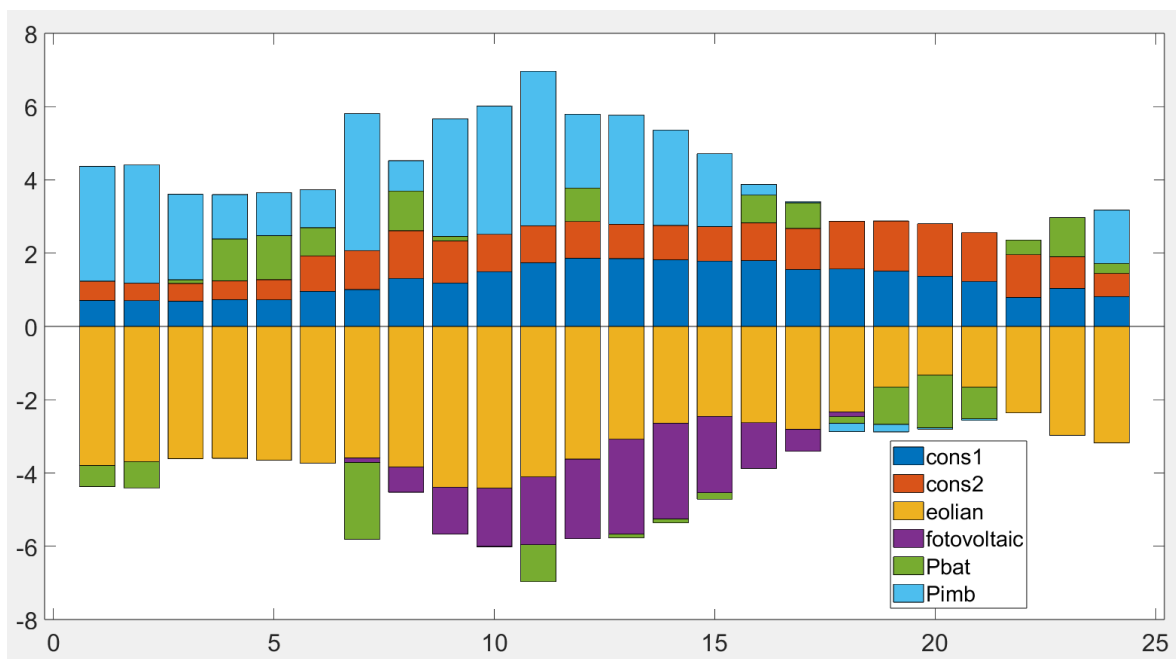
**Figura 5.12.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – caz 1 mai

- Se observă cum, datorită particularităților zilei analizate, valoarea funcției Fitness este de 39,5111, de 1.8 ori mai mare decât cazul analizat iarna și de 5.41 ori mai mare decât cazul analizat vara.



**Figura 5.13.** Nivelul de încărcare al bateriei și interacțiunea cu SEN - caz 1 mai

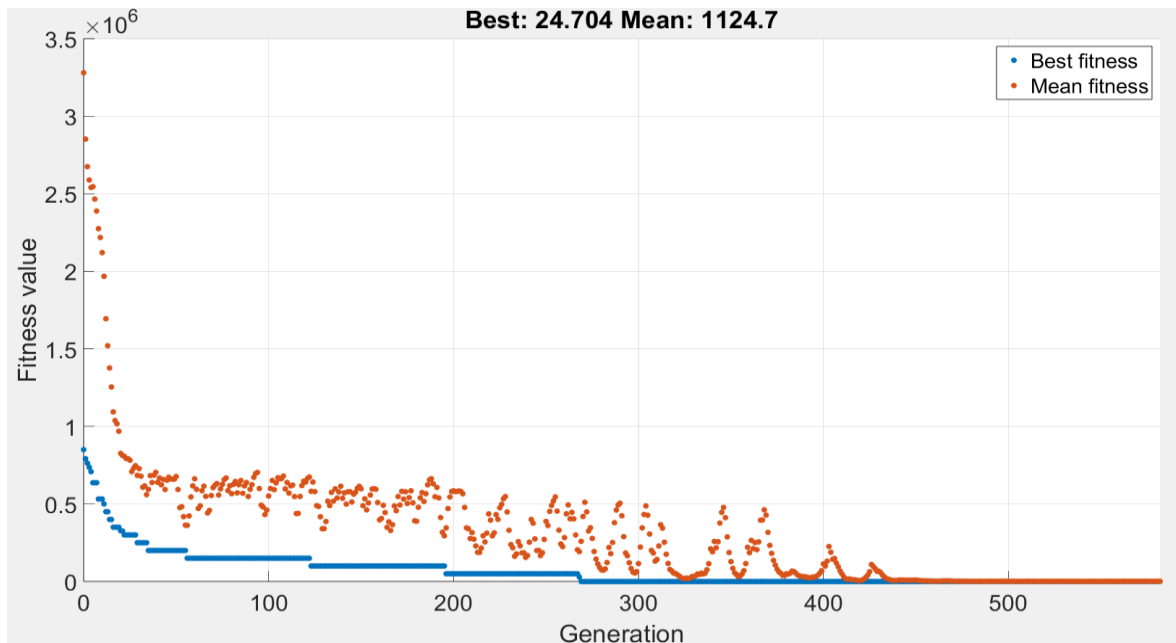
- Nivelul de încărcare al bateriei s-a menținut predominant peste 50% fără a depăși limitele impuse.



**Figura 5.14.** Graficul puterilor – caz 1 mai

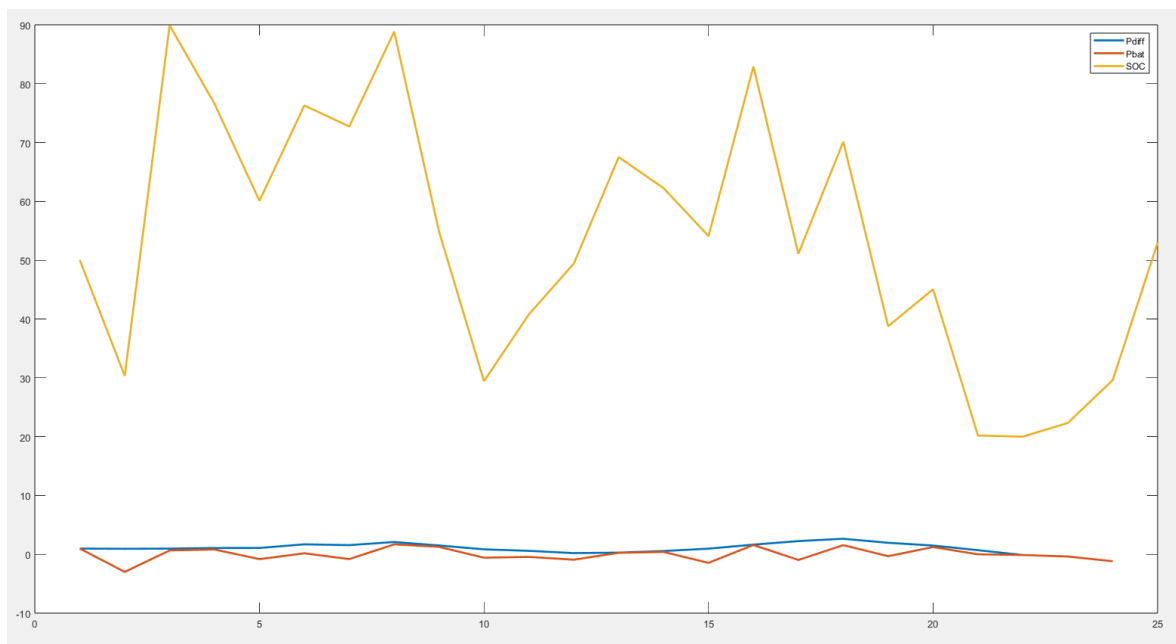
- Datorită utilizării reduse de energie, specifică zilei de 1 mai, și datorită cantității mari de energie eoliană produsă, se observă cum microrețeaua injectează energie în Sistemul Electroenergetic Național pentru 17 din cele 24 de ore ale zilei.

Scenariul patru a fost simulat într-o zi particulară de toamnă, când puterea produsă de turbinele eoliene este nesemnificativă pentru primele 18 ore din zi :



**Figura 5.15.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – caz toamnă, eolian minim

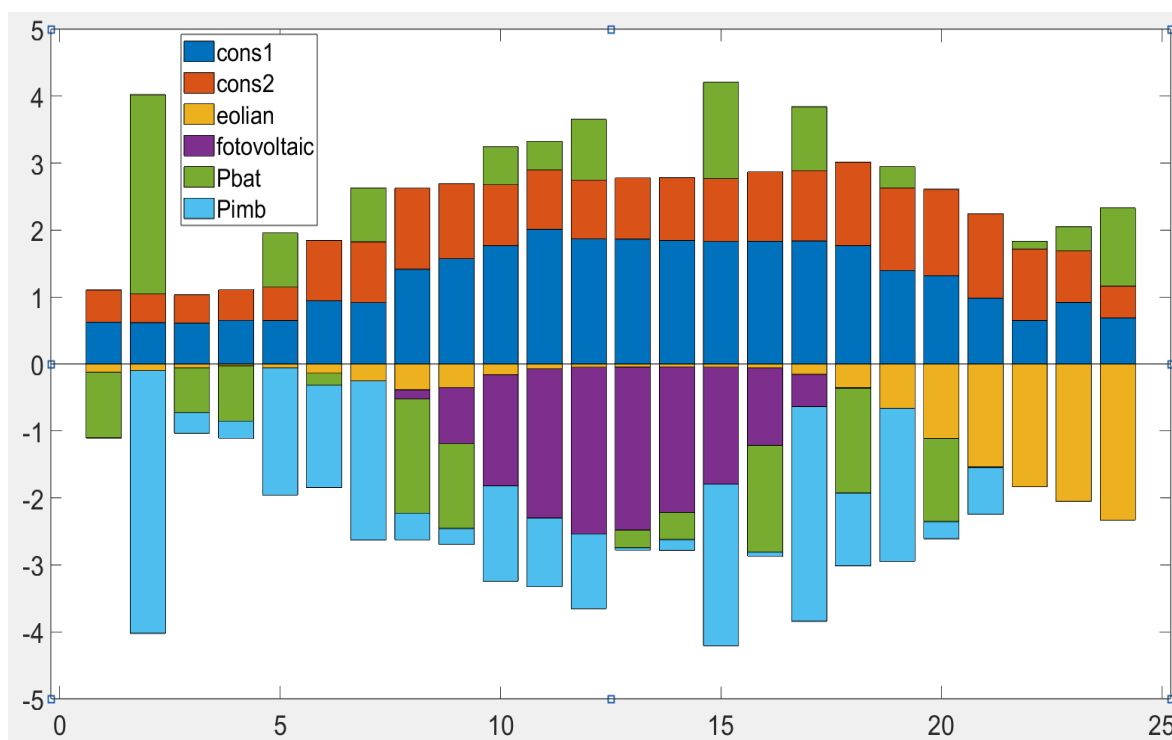
- Indivizii nu au mai fost penalizați începând cu generația 432;
- Valoarea funcției obiectiv este 24.704;
- S-a atins toleranța după 594 de generații.



**Figura 5.16.** Nivelul de încărcare al bateriei și interacțiunea cu SEN - caz toamnă, eolian minim

- Nivelul de încărcare al bateriei a oscilat puternic, dar fără a depăși limitele impuse.

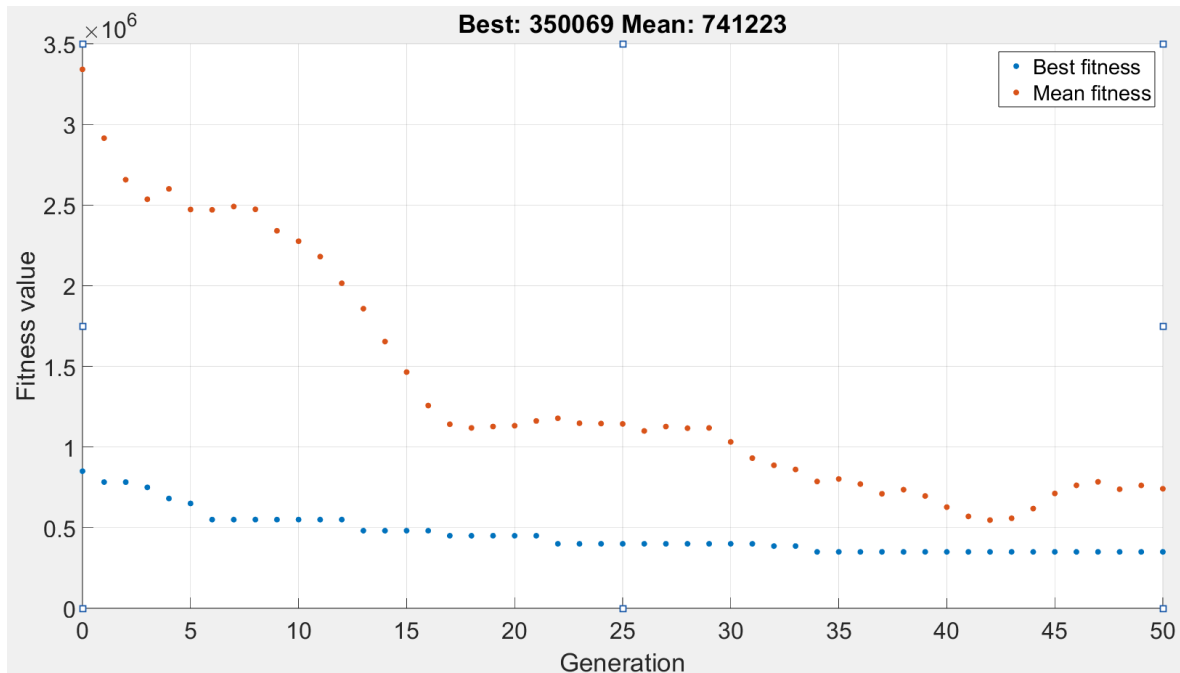
- Se observă trei ore în care nivelul de încărcare al bateriei se apropie de limita superioară, și anume, orele 02, 08 respectiv 16;
- Conform suprapunerii curbei albastre și curbei oranj în intervalul 22-24, în ultimele trei ore ale zilei nu au existat interacțiuni între microrețea și Sistemul Electroenergetic Național;
- În intervalul 21-22, nivelul de încărcare al sistemului de stocare atinge limita inferioară impusă, dar reușește în următoarele 2 ore să crească nivelul de la 20% la aproximativ 50%.



**Figura 5.17.** Graficul puterilor – caz 1 mai

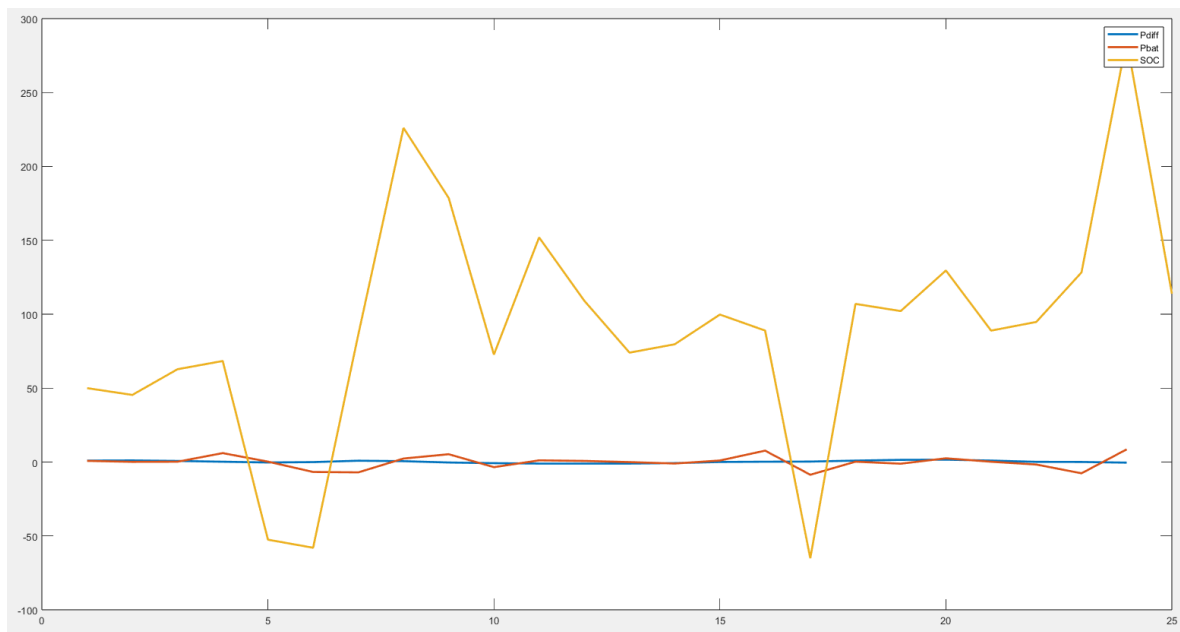
- Datorită producției mici de energie eoliană, algoritmul decide să încarce sistemul de stocare până la 90% la ora 02, astfel minimizând pentru următoarele 2 ore, puterea absorbită din Sistemul Electroenergetic Național.
- Pentru ultimele 3 ore ale zilei, când puterea generată de turbinele eoliene crește, se observă cum algoritmul genetic nu realizează interacțiuni cu SEN și reușește să aducă nivelul de încărcare al bateriei la 50% doar din producția proprie.
- Începând cu ora 10, când panourile fotovoltaice încep să genereze o cantitate de energie considerabilă, se observă cum algoritmul ia decizia de a încărca în continuare bateria, pregătindu-se astfel pentru ora 16 când necesarul de putere a fost aproape integrat absorbit din sistemul de stocare.

În scenariul cinci, se repetă simularea scenariului doi – caz vară, dar simularea este oprită brusc după doar 50 de generații:



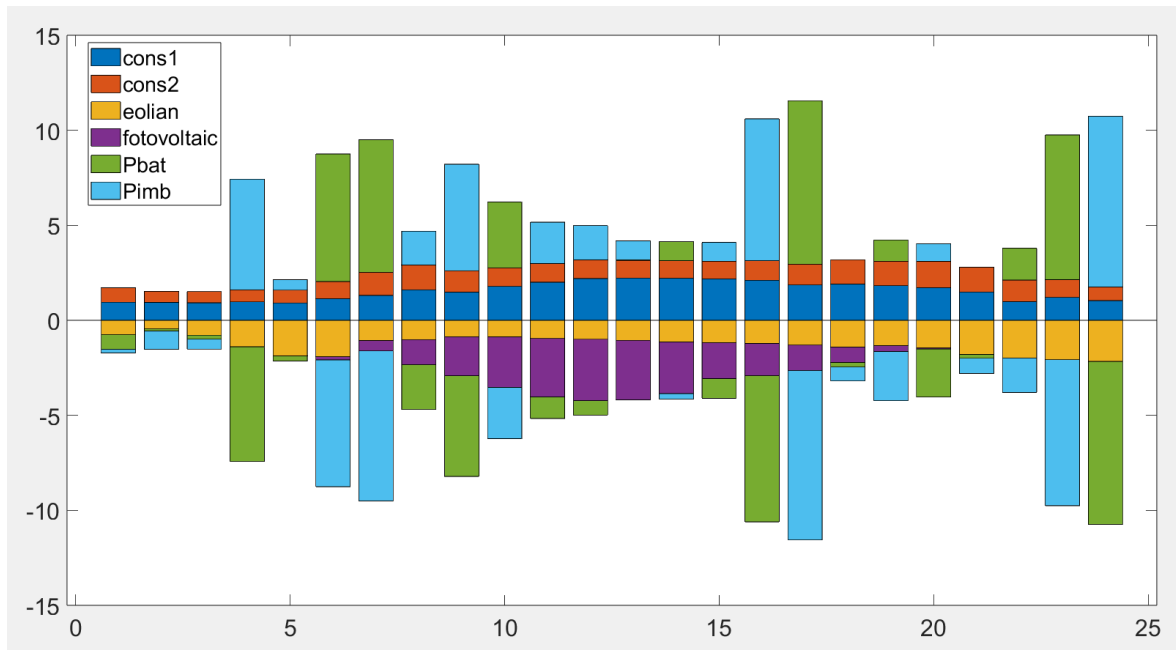
**Figura 5.18.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – caz oprit brusc

- Comparativ cu valoarea funcției obiectiv obținută după 727 de generații , se observă cum, prin oprirea bruscă a simulării după 50 de generații, noua valoare a funcției este 350069.



**Figura 5.19.** Nivelul de încărcare al bateriei și interacțiunea cu SEN - caz oprit brusc

- Se observă cum nivelul de încărcare al bateriei depășește excesiv atât limitele superioare cât și limitele inferioare, soluția finală fiind penalizată de mai multe ori.



**Figura 5.20.** Graficul puterilor – caz oprit brusc

- Se observă interacțiuni iraționale între microrețea și Sistemul Electroenergetic Național, precum intervalul 16-17, unde, la ora 16, algoritmul a luat decizia de a injecta putere din sistemul de stocare în SEN, iar la ora 17 a absorbit putere din SEN pentru a readuce bateria la același nivel de încărcare avut anterior.

În scenariul șase, se repetă simularea scenariului doi – caz vară, modificând parametrii inițiali ai algoritmului genetic.

Scenariul șase are ca scop înțelegerea importanței parametrilor algoritmului genetic și analizarea rezultatelor obținute în urma simulărilor.

**Tabelul 5.5.** Parametrii inițiali ai algoritmului genetic

Număr indivizi	1000
Număr generații	2000
Crossover	0,8

Se notează:

Simulare 1.x. și se modifică doar numărul de indivizi;

Simulare 2.x. și se modifică doar numărul de generații;

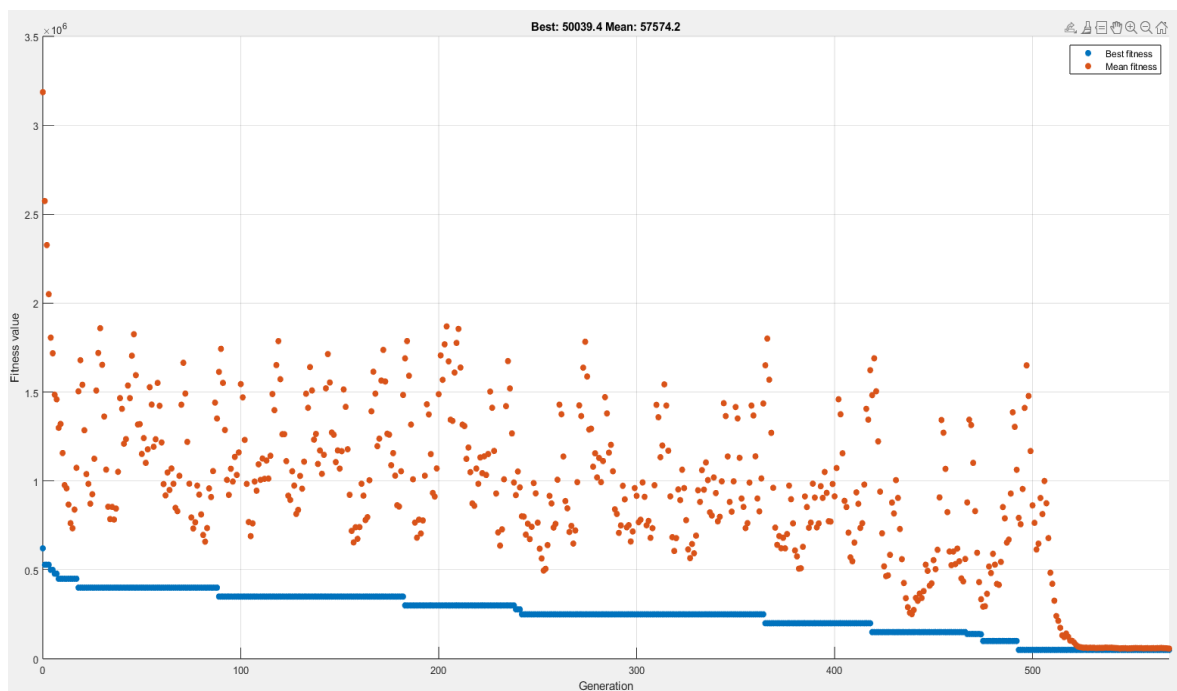
Simulare 3.x. și se modifică doar rata de încrucișare.

**Tabelul 5.6.** Rezultate obținute prin modificarea parametrilor algoritmului genetic

	Număr indivizi	Număr generații	Crossover	Valoarea Funcției Fitness	Timp simulare
	[-]	[-]	[%]	[-]	[secunde]
Scenari Inițial	1000	2000	0,8	7,3057	36,2
Simulare 1.1	100	2000	0,8	250.041	51,7
Simulare 1.2	10	2000	0,8	650056	3,5
Simulare 2.1	1000	200	0,8	100047	12,1
Simulare 2.2	1000	20	0,8	431176	3,1
Simulare 3.1	1000	2000	0,6	39,4086	35,7
Simulare 3.2	1000	2000	0,4	50039	43,7
Simulare 3.3	1000	2000	0,2	50039	54,5
Simulare 3.4	1000	2000	0	400039	57,6
Simulare 4	10000	20000	0,8	7,30569	74,9

Conform simulărilor se observă că atât numărul indivizilor, numărul generațiilor cât și rata de încrucișare au un nivel de importanță similar, astfel, se observă că alegerea parametrilor potriviți sistemului este un pas important în dezvoltarea algoritmului.

Simularea 4 din tabelul 5.6. indică faptul că resursele infinite nu reprezintă un factor cheie în dezvoltarea algoritmilor genetici. Se observă cum, comparativ cu scenariul inițial, simularea 4 are numărul indivizilor și numărul generațiilor de 10 ori mai mare, iar cu un timp dublu de rulare, simularea 4 a îmbunătățit funcția obiectiv cu doar 0.0025%.

**Figura 5.21.** Evoluția soluțiilor algoritmului genetic – crossover 0.2

- Prin vârfurile prezente până la generația 500, se observă lipsa încrucișării soluțiilor performante.

## 6. OBSERVAȚII ȘI CONCLUZII

Optimizarea funcționării unei microrețele utilizând inteligență artificială prezintă performanțe ridicate în gestionarea și controlul microrețelei. Algoritmii genetici demonstrează o capacitate robustă de rezolvare a problemelor complexe de optimizare inerente microrețelelor, precum gestionarea sistemelor de stocare, programarea interacțiunilor cu sistemele electroenergetice exterioare. Prin imitarea procesului de selecție naturală, algoritmul genetic îmbunătățește iterativ soluțiile sistemului.

Un beneficiu notabil al algoritmilor genetici este reprezentat de scalabilitate. Microrețelele, caracterizate de natura lor modulară și varietatea surselor de energie, necesită tehnici de optimizare adaptabile. Prin procesul de căutare al soluțiilor bazat pe indivizi, algoritmi genetici gestionează cu eficiență dinamica și scalabilitatea microrețelelor, adaptându-se diferitelor configurații fără pierderi semnificative ale performanțelor.

Capacitatea microrețelelor de a lua decizii în timp real este un element crucial în menținerea stabilității și siguranței în alimentare, astfel, prin potențialul procesării paralele, algoritmi genetici pot converge cu rapiditate către soluții cât mai performante, fiind astfel potriviți pentru sistemele de comandă și control în timp real.

Integrarea inteligenței artificiale în sistemele de comandă și control din cadrul microrețelelor reprezintă un progres în optimizarea eficienței și fiabilității sistemelor sustenabile de energie. Inteligența artificială, prin tehnici avansate de învățare automată și algoritmi de optimizare, precum algoritmul genetic, îmbunătățește gestionarea puterii în microrețele și controlul în timp real al sistemelor, precum sistemul de stocare a energiei.

Prin utilizarea inteligenței artificiale, microrețelele pot prognoza cerințele utilizării de energie, pot optimiza stocarea energiei și pot programa schimburile de putere cu sistemele electroenergetice. Algoritmii genetici permit identificarea anomaliilor sau defecțiunilor și pot răspunde rapid pentru a îndepărta problema, îmbunătățind astfel fiabilitatea sistemului și siguranța în alimentare.

Prin utilizarea inteligenței artificiale în sistemele de comandă și control ale microrețelelor se facilitează integrarea surselor regenerabile de energie, și contribuie astfel la o tranziție energetică sustenabilă, asigurând o gestionare inteligentă și adaptabilă în fața provocărilor dinamice ale domeniului energetic modern.



## 7. BIBLIOGRAFIE

- [1]-<https://energie.gov.ro/wp-content/uploads/2016/08/2.HG-1892-2004-pentru-stabilirea-sistemului-de-promovare-a-produserii-energiei-electrice-din-surse-regenerabile-de-energie-MO-1056-2004-1.pdf>
- [2] <https://energie.gov.ro/wp-content/uploads/2016/08/7.HG-750-2008-pentru-aprobarea-Schemei-de-ajutor-de-stat-regional-privind-valorificarea-resurselor-regenerabile-de-energie-MO-nr.-54318.07.2008-1.pdf>
- [3] Prof. dr. ing. Constantin BULAC - CALCUL EVOLUTIV Note de curs (2022 – 2023)
- [4] Seyedali Mirjalili, Jin Song Dong, Andrew Lewis – Nature Inspired Optimizers (2020)
- [5] [https://www.transelectrica.ro/widget/web/tel/sen-grafic/-/SENGrafic\\_WAR\\_SENGraficportlet](https://www.transelectrica.ro/widget/web/tel/sen-grafic/-/SENGrafic_WAR_SENGraficportlet)
- [6] <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html>