



FONDUL SOCIAL EUROPEAN  
Programul Operational Capital Uman  
Axa prioritară 6 „Educația și competențe”

Titlu proiect : Dezvoltarea competențelor de antreprenoriat ale doctoranzilor și postdoctoranzilor – cheie a succesului  
în carieră (A-Succes)

Cod contract: POCU/380/6/13 – cod SMIS: 125125



UNIVERSITATEA **POLITEHNICA** DIN BUCUREȘTI

Școala Doctorală **ENERGETICA**

# REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

*Îmbunătățirea rezilienței rețelelor urbane de distribuție pe baza  
strategiilor de insularizare intenționată*

*Improving the resilience of urban distribution networks based on  
intentional islanding strategies*

**Autor:** ing. Irina-Ioana PICIOROAGĂ

**Conducător științific:** Prof. em. dr. ing. Mircea EREMIA

## COMISIA DE DOCTORAT

|                               |                                  |       |                                                  |
|-------------------------------|----------------------------------|-------|--------------------------------------------------|
| <b>Președinte</b>             | Prof. em. dr. ing. Adrian Badea  | de la | Universitatea Politehnica din București          |
| <b>Conducător de doctorat</b> | Prof. em. dr. ing. Mircea Eremia | de la | Universitatea Politehnica din București          |
| <b>Referent</b>               | Prof. dr. ing. Ștefan Kilyeni    | de la | Universitatea Politehnica Timișoara              |
| <b>Referent</b>               | Prof. dr. ing. Mihai Gavrilăș    | de la | Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași |
| <b>Referent</b>               | Conf. dr. ing. Mihai Sănduleac   | de la | Universitatea Politehnica din București          |

**București  
2020**

# CUPRINSUL TEZEI

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Abrevieri.....</b>                                                                      | <b>7</b>  |
| <b>Mulțumiri.....</b>                                                                      | <b>9</b>  |
| <b>Abstract.....</b>                                                                       | <b>10</b> |
| <b>Introducere.....</b>                                                                    | <b>11</b> |
| <b>1. Conceptul Smart City .....</b>                                                       | <b>17</b> |
| 1.1. Definirea conceptului Smart City .....                                                | 17        |
| 1.2. Caracteristicile conceptului Smart City .....                                         | 18        |
| 1.3. Provocările întâmpinate de orașele inteligente .....                                  | 19        |
| 1.3.1. Încălcarea securității personale și a confidențialității .....                      | 20        |
| 1.3.2. Coeziune socială, incluziune și solidaritate .....                                  | 20        |
| 1.3.3. Costuri .....                                                                       | 20        |
| 1.3.4. Perturbarea pieței muncii .....                                                     | 20        |
| 1.3.5. Oligopolul.....                                                                     | 20        |
| 1.3.6. Reziliența.....                                                                     | 20        |
| 1.4. Acțiuni și strategii de implementare a conceptului Smart City.....                    | 21        |
| 1.5. Indicatori de performanță Smart City .....                                            | 22        |
| 1.6. Rolul rețelelor electrice inteligente în dezvoltarea conceptului Smart City .....     | 25        |
| 1.7. Tendințe în dezvoltarea rețelelor electrice inteligente în contextul Smart City ..... | 27        |
| 1.7.1. Electrificarea.....                                                                 | 28        |
| 1.7.2. Descentralizarea .....                                                              | 28        |
| 1.7.3. Digitalizare .....                                                                  | 32        |
| Observații și concluzii.....                                                               | 36        |
| <b>2. Conceptul de reziliență a rețelelor electrice urbane.....</b>                        | <b>37</b> |
| 2.1. Fiabilitate vs. Reziliență .....                                                      | 37        |
| 2.2. Vulnerabilitățile sistemelor electroenergetice .....                                  | 38        |
| 2.2.1. Vulnerabilitatea fizică în fața factorilor naturali .....                           | 38        |
| 2.2.2. Vulnerabilitatea fizică în fața factorilor umani .....                              | 40        |
| 2.2.3. Vulnerabilitate cibernetică.....                                                    | 40        |
| 2.3. Cuantificarea rezilienței în sistemele electroenergetice.....                         | 41        |

|           |                                                                                                                    |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.3.1.    | Evaluarea calitativă a rezilienței sistemelor electroenergetice .....                                              | 42        |
| 2.3.2.    | Evaluarea cantitativă a rezilienței sistemelor electroenergetice .....                                             | 43        |
| 2.4.      | Procedeul de analiză a rezilienței în sisteme electroenergetice .....                                              | 43        |
| 2.4.1.    | Definirea obiectivelor de reziliență.....                                                                          | 43        |
| 2.4.2.    | Definirea consecințelor și a indicatorilor de reziliență.....                                                      | 44        |
| 2.4.3.    | Caracterizarea dezastrului.....                                                                                    | 46        |
| 2.4.4.    | Determinarea gradului de distrugere.....                                                                           | 46        |
| 2.4.5.    | Colectarea datelor prin modelarea sistemului sau alte mijloace .....                                               | 46        |
| 2.4.6.    | Calculul consecințelor și a indicatorilor de reziliență .....                                                      | 47        |
| 2.4.7.    | Evaluarea îmbunătățirilor aduse în materie de reziliență .....                                                     | 47        |
| 2.5.      | Strategii de creștere a rezilienței rețelelor electrice urbane .....                                               | 48        |
| 2.5.1.    | Întărirea rețelelor de distribuție a energiei electrice.....                                                       | 48        |
| 2.5.2.    | Măsurile operaționale de creștere a rezilienței rețelelor electrice de distribuție.....                            | 49        |
|           | Observații și concluzii.....                                                                                       | 50        |
| <b>3.</b> | <b>Modul de funcționare insularizat al rețelelor electrice de distribuție.....</b>                                 | <b>51</b> |
| 3.1.      | Reglementări privind funcționarea insularizată a surselor distribuite de energie .....                             | 52        |
| 3.1.1.    | Standardul IEEE 1547 .....                                                                                         | 53        |
| 3.1.2.    | Standardul CEI 0-16.....                                                                                           | 54        |
| 3.1.3.    | Codul tehnic al rețelelor electrice de distribuție din România .....                                               | 54        |
| 3.2.      | Considerații privind funcționarea insularizată a resurselor distribuite.....                                       | 55        |
| 3.2.1.    | Configurații posibile ale insulelor intenționate .....                                                             | 55        |
| 3.2.2.    | Funcționarea insulelor intenționate.....                                                                           | 57        |
| 3.3.      | Aspecte privind nivelul de tensiune .....                                                                          | 59        |
| 3.4.      | Aspecte privind frecvența.....                                                                                     | 61        |
| 3.5.      | Tehnologii și strategii de implementare a procedurii de insularizare intenționată .....                            | 63        |
| 3.5.1.    | Rolul generării distribuite în cadrul strategiilor de funcționare insularizată .....                               | 64        |
| 3.5.2.    | Creșterea rezilienței rețelelor electrice de distribuție pe baza microrețelelor.....                               | 67        |
| 3.5.3.    | Aplicarea strategiilor de descărcare a sarcinii în modul de funcționare insularizat.....                           | 67        |
|           | Observații și Concluzii .....                                                                                      | 68        |
| <b>4.</b> | <b>Metode de optimizare utilizate în rezolvarea problemelor specifice rețelelor electrice de distribuție .....</b> | <b>69</b> |

|           |                                                                                                               |            |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.1.      | Metode deterministe .....                                                                                     | 69         |
| 4.1.1.    | Programare liniară și pătratică .....                                                                         | 70         |
| 4.1.2.    | Programare neliniară.....                                                                                     | 70         |
| 4.1.3.    | Programare dinamică .....                                                                                     | 71         |
| 4.2.      | Metode euristice și meta-euristice .....                                                                      | 71         |
| 4.2.1.    | Simulated Annealing .....                                                                                     | 71         |
| 4.2.2.    | Tabu Search.....                                                                                              | 72         |
| 4.2.3.    | Genetic Algorithms.....                                                                                       | 72         |
| 4.2.4.    | Particle Swarm Optimization.....                                                                              | 73         |
| 4.2.5.    | Ant Colony Optimization .....                                                                                 | 73         |
| 4.3.      | Problema de reconfigurare a rețelelor electrice de distribuție .....                                          | 73         |
| 4.3.1.    | Calculul utilizând curenți ca variabile .....                                                                 | 74         |
| 4.3.2.    | Calculul utilizând puteri ca variabile .....                                                                  | 75         |
| 4.4.      | Modele matematice de rezolvare a problemei de reconfigurare în rețelele electrice de distribuție .....        | 76         |
| 4.4.1.    | Problema de programare liniară mixtă cu variabile binare aplicată problemei de reconfigurare (MILP) .....     | 76         |
| 4.4.2.    | Problema de programare pătratică mixtă cu variabile binare aplicată problemei de reconfigurare (MISOCP) ..... | 83         |
| 4.4.3.    | Adaptarea algoritmilor genetici pentru rezolvarea problemei de reconfigurare.....                             | 85         |
| 4.4.4.    | Adaptarea metodei roiurilor de particule pentru rezolvarea problemei de reconfigurare .....                   | 89         |
| 4.5.      | Studiu de caz .....                                                                                           | 92         |
| 4.5.1.    | Descrierea rețelei electrice test .....                                                                       | 93         |
| 4.5.2.    | Aplicarea metodei MILP .....                                                                                  | 94         |
| 4.5.3.    | Aplicarea metodei MISOCP .....                                                                                | 96         |
| 4.5.4.    | Aplicarea algoritmilor genetici .....                                                                         | 97         |
| 4.5.5.    | Aplicarea metodei roiului de particule.....                                                                   | 99         |
| 4.5.6.    | Compararea metodelor de optimizare .....                                                                      | 102        |
|           | Observații și Concluzii .....                                                                                 | 104        |
| <b>5.</b> | <b>Modelul matematic de creștere a rezilienței prin partiționare optimă în insule ....</b>                    | <b>105</b> |
| 5.1.      | Cadrul de analiză a rezilienței .....                                                                         | 105        |
| 5.2.      | Modelul de identificare a căilor de conexiune.....                                                            | 106        |

|           |                                                                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.3.      | Modelul de creștere a rezilienței pe baza procedurii de insularizare optimizată .                              | 107        |
| 5.4.      | Modelul matematic de formare optimă a insulelor .....                                                          | 110        |
| 5.5.      | Parametri de securitate .....                                                                                  | 115        |
| 5.6.      | Modelul matematic de regim permanent .....                                                                     | 116        |
| 5.7.      | Indicatori de reziliență.....                                                                                  | 119        |
|           | Observații și Concluzii .....                                                                                  | 119        |
| <b>6.</b> | <b>Studii de caz și rezultate .....</b>                                                                        | <b>121</b> |
| 6.1.      | Creșterea rezilienței rețelelor electrice de distribuție pe baza procedurii de insularizare intenționată ..... | 121        |
| 6.1.1.    | Studiul rețelei electrice test IEEE 33-bus .....                                                               | 121        |
| 6.1.2.    | Studiul rețelei electrice test IEEE 69-bus .....                                                               | 126        |
| 6.1.3.    | Studiul rețelei electrice reale cu 170 noduri.....                                                             | 129        |
| 6.2.      | Partiționarea optimă în insule ținând cont de restricțiile de securitate.....                                  | 133        |
| 6.2.1.    | Scenariul I – fenomen meteorologic extrem .....                                                                | 134        |
| 6.2.2.    | Scenariul II – atac cibernetic asupra stației electrice .....                                                  | 137        |
| 6.2.3.    | Indicatorii de reziliență .....                                                                                | 141        |
| 6.3.      | Optimizarea funcționării în regim insular intenționat pe durata unei întreruperi prelungite .....              | 142        |
| 6.3.1.    | Scenariul I – fenomen meteorologic extrem .....                                                                | 144        |
| 6.3.2.    | Scenariul II – atac cibernetic asupra stației electrice .....                                                  | 149        |
|           | Observații și Concluzii .....                                                                                  | 154        |
| <b>7.</b> | <b>Concluzii finale.....</b>                                                                                   | <b>155</b> |
| 7.1.      | Concluzii generale.....                                                                                        | 155        |
| 7.2.      | Contribuțiile personale .....                                                                                  | 157        |
| 7.3.      | Propuneri de continuare a cercetării .....                                                                     | 158        |
|           | <b>Bibliografie.....</b>                                                                                       | <b>159</b> |
|           | <b>ANEXE .....</b>                                                                                             | <b>168</b> |
|           | Anexa 1. Analiza variației argumentului tensiunii în sisteme electrice de distribuție.....                     | 168        |
|           | Anexa 2. Ecuațiile Distflow .....                                                                              | 170        |
|           | Anexa 3. Metodologia de calcul a dezechilibrului de putere din cadrul insulelor .....                          | 172        |
|           | Anexa 4. Generalități privind reglajul frecvenței în sisteme electroenergetice.....                            | 177        |
|           | Anexa 5. Datele nodurilor și laturilor pentru rețelele electrice analizate.....                                | 180        |

# MULȚUMIRI

Întregul proces de cercetare, în vederea realizării acestei lucrări, s-a desfășurat sub directa îndrumare a Domnului Prof. Emerit dr. ing. Mircea EREMI, căruia doresc să îi aduc cele mai sincere și calde mulțumiri pentru îndrumările și observațiile oferite în permanență cu profesionalism și dedicarea totală, în fiecare etapă a pregătirii mele doctorale. Pe lângă disponibilitatea și atenția continuă, mi-a asigurat pregătirea acestui studiul la una dintre cele mai prestigioase universități de inginerie din Europa, în cadrul unui stagiul de cercetare prin programul ERASMUS+ la Universitatea Politecnico di Milano, Italia.

În mod deosebit, aduc mulțumiri și Domnilor profesori Valentin ILEA și Cristian BOVO, căroră le sunt profund recunoscătoare pentru sfaturile și orientările cu bunăvoință acordate atât pe perioada stagiului de cercetare realizat la Universitatea Politecnico di Milano, cât și după finalizarea stagiului. Ideile și cunoștințele împărtășite de către dâșii au jucat un rol important în finalizarea acestei lucrării.

Aduc mulțumiri colectivului de cadre didactice din cadrul Facultății de Energetică a Universității Politehnica din București, o profundă recunoștință îndreptându-se către domnii profesori din comisia de îndrumare pentru cercetarea doctorală, pentru recomandările și timpul pe care mi le-au oferit neconținut, în orice împrejurare. În același timp, doresc să îmi exprim alese sentimente de grațitudine colegilor tineri din cadrul departamentului de Sisteme Electroenergetice pentru colaborarea ce s-a materializat în numeroase lucrări publicate împreună.

Mulțumesc în mod deosebit, și pe această cale, membrilor comisiei de analiză a tezei de doctorat, Prof. dr. ing. Ștefan KILYENI (Universitatea Politehnica Timișoara), Prof. dr. ing. Mihai GAVRILAȘ (Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași) și Conf. dr. ing. Mihai SÂNDULEAC (Universitatea Politehnica din București), pentru atenția cu care au parcurs teza de doctorat, pentru criticile și aprecierile constructive formulate.

În final, dar nu în ultimul rând, îi sunt recunoscătoare familiei mele pentru sprijinul moral constant pe care mi l-a oferit pe întreaga perioadă a studiilor doctorale și nu numai.

## CUVINTE CHEIE

**Capitolul 1:** indicatori cheie de performanță, rețele electrice inteligente, Smart City

**Capitolul 2:** fiabilitate, reziliență, vulnerabilitatea sistemelor electroenergetice

**Capitolul 3:** generare distribuită, insularizare intenționată, standardizare

**Capitolul 4:** algoritmi genetici, metoda roiurilor de particule, optimizare, problema de programare liniară, problema de programare pătratică, reconfigurare

**Capitolul 5:** căutarea în adâncime, dezechilibru de puteri, indicatori de reziliență, model de optimizare, parametri de securitate

**Capitolul 6:** GAMS, partiționare în insule, repartiția optimă a puterilor

## REZUMAT

Pe lângă creșterea demografică accentuată, orașele actuale se confruntă cu numeroase provocări în ceea ce privește schimbările climatice, actele de terorism și creșterea frecvenței dezastrelor naturale. În aceste circumstanțe, orașele inteligente ale viitorului trebuie să fie capabile să se adapteze rapid acestor noi amenințări prin dezvoltarea unor strategii de reziliență adecvate [1]. Motivat de necesitatea soluționării celor mai frecvente probleme urbane, conceptul „Smart City” urmărește îmbunătățirea condițiilor de trai prin managementul eficient al resurselor locale, fie ele de natură hardware sau software [2]. În cadrul orașului inteligent, sectoarele de energie, transport, apă, siguranță publică și alte servicii esențiale sunt gestionate astfel încât să asigure funcționarea adecvată a acestuia, ținând totodată seama de menținerea unui mediu curat, economic și sigur în care cetățenii să beneficieze de un trai de înaltă calitate. În acest ansamblu, infrastructura energetică este probabil cea mai importantă caracteristică din orice oraș, având în vedere dependența ridicată a celorlalte infrastructuri critice de aceasta. O indisponibilitate prelungită a alimentării cu energie electrică duce în cele din urmă la încetarea tuturor celorlalte funcții ale orașului [3].

Pentru implementarea eficientă a conceptului de oraș inteligent, administrația urbană trebuie să își adapteze strategiile de dezvoltare în conformitate cu noile provocări, pentru a evita construirea un oraș mai „deștept”, dar mai vulnerabil. Plecând de la aceste premise, numeroase planuri actuale de dezvoltare urbană propun înglobarea unor tehnologii avansate de operare la nivelul tuturor infrastructurilor fundamentale ale orașelor, de la transport și servicii administrative, până la sisteme de furnizare a energiei electrice. Cu toate acestea, trebuie avută în vedere creșterea vulnerabilității orașelor în fața atacurilor având ca țintă tehnologia informației și comunicațiilor (ICT), ca urmare a intensificării dependenței digitale a comunităților municipale. Așadar, fără o înțelegere minuțioasă a noilor riscuri la care sunt expuse aceste tehnologii, pagubele fizice și digitale pot fi tot mai severe, ducând la întreruperi tot mai numeroase și mai prelungite [4].

Conform lucrării [5], o rețea electrică inteligentă urmărește trei categorii principale de obiective. Un prim obiectiv presupune modernizarea sistemelor electroenergetice prin automatizări, infrastructuri capabile de auto-remediere, monitorizare și control de la distanță. Al doilea obiectiv se concentrează pe informarea și educarea utilizatorilor în ceea ce privește utilizarea energiei electrice, prin propunerea de sisteme de tarifyare și opțiuni alternative de alimentare, pentru a eficientiza luarea deciziilor privind cantitatea și momentul consumului. Al treilea obiectiv îl reprezintă asigurarea securității și siguranței în funcționare, alături de integrarea generării distribuite, în special celei provenite din surse regenerabile. Incorporarea tuturor acestor soluții pun bazele unei infrastructuri energetice mai fiabilă, durabilă și rezilientă. În aceste condiții, o rețea electrică inteligentă constituie structura de bază fără de care un oraș inteligent nu poate fi realizat. Orașele inteligente depind așadar de o rețea electrică inteligentă pentru a asigura conservarea, gestionarea și furnizarea eficientă a energiei electrice către numeroasele sale funcții[6].

În contextul planificării urbane inteligente, sectorul energetic reprezintă, de asemenea, o componentă esențială în dezvoltarea unor strategii reziliente și sustenabile, având în vedere rolul fundamental al acestuia de a menține în funcțiune majoritatea infrastructurilor critice ale unui oraș, precum serviciile medicale și de urgență, telecomunicațiile și transportul. Caracterizate de o configurație complexă ce cuprinde o diversitate de infrastructuri critice extinse pe o vastă arie geografică (transformatoare, unități de generare, linii electrice etc.), sistemele electroenergetice sunt expuse în fața a numeroase pericole neprevăzute. Evenimentele dezastruoase, indiferent de originea lor



(catastrofe naturale, cum ar fi inundații, uragane, furtuni, sau cauzate de om, precum atacurile cibernetice și actele de vandalism), pot avea un impact negativ semnificativ asupra funcționării sistemelor de alimentare cu energie electrică. Din anii '80 și până în zilele noastre, atât frecvența cât și intensitatea întreruperilor în alimentarea cu energie electrică provocate de condițiile meteorologice extreme au fost în continuă creștere [7]. În condițiile unor astfel de schimbări drastice ale fenomenelor naturale, riscul asociat defecțiunilor asupra liniilor electrice se intensifică, iar transformatoarele de putere (și alte componente) pot fi supuse unor supraîncărcări. Pe baza acestor premise, pregătirea strategiilor potrivite și predictive de creștere a rezilienței, precum și a planurilor corective ce permit ameliorarea consecințelor unor astfel de fenomene extreme, reprezintă o preocupare actuală pentru companiile de furnizare a energiei electrice la nivel global.

Procesul de întărire a rețelelor electrice în fața situațiilor de urgență rămâne însă o provocare. În timp ce termenul de "reziliență" este folosit din ce în ce mai mult în activitățile de cercetare, sunt încă necesare studii dedicate cuantificării conceptului de reziliență pentru a putea fi utilizabilă în practică. Definiția rezilienței oferită de EPRI (Electric Power Research Institute) specifică trei factori principali: *prevenire*, *recuperare* și *supraviețuire* [8]. Conceptul de reziliență se diferențiază de noțiunile de fiabilitate și vulnerabilitate, prin obiectivele abordate ce se concentrează pe situații extreme rare. Aceste scenarii cu probabilitate scăzută de apariție cauzează scoaterea din funcționare concomitent a mai multor componente ale sistemului, afectarea unui număr însemnat de utilizatori, și necesită aplicarea unor strategii complexe de restaurare. Așadar, reziliența evidențiază capacitatea unui sistem de a se reface după o avarie gravă. Cu toate acestea, refacerea urmărită nu presupune o restaurare „perfectă” și revenirea în totalitate a sistemului la parametrii nominali, ci o stare de funcționare considerată acceptabilă pentru o perioadă limitată de timp. Planificarea unei reziliențe sporite a sistemelor electroenergetice trebuie să se concentreze asupra alocării optime a resurselor locale, stabilirea unor compromisuri între diferitele componente ale sistemului și dezvoltarea unor standarde bazate pe date specifice pentru asigurarea acesteia.

Tot mai multe proiecte urbane și studii de creștere a rezilienței se concentrează pe exploatarea conceptului de insularizare intenționată a rețelelor electrice urbane. În prezent, principalul obiectiv al strategiilor de sporire a rezilienței sistemelor electroenergetice îl reprezintă restaurarea rapidă a

serviciilor de alimentare cu energie electrică a componentelor critice ale sistemului. Fiabilitatea sistemelor de distribuție poate fi îmbunătățită semnificativ prin intermediul surselor de generare distribuită, ce sunt încurajate de noile reglementări să participe la procedura de restaurare prin modul de funcționare insularizat. Reconfigurarea rețelei electrice de distribuție poate modifica eficient procedura de insularizare și, astfel, oferă o oportunitate de a furniza mai mult din energia solicitată și de a reduce pierderile de putere din sistem. În cazul operațiunilor de urgență, insularizarea intenționată a generării distribuite este o soluție promițătoare pentru menținerea unui serviciu de alimentare fiabil în rețelele de distribuție inteligente, având în vedere prezența sarcinilor și infrastructurilor critice ce depind de acesta. Cu toate acestea, unitățile locale de generare nu pot asigura întotdeauna serviciul de alimentare cu energie electrică a tuturor utilizatorilor, motiv pentru care intervine necesitatea aplicării unor proceduri de „descărcare a sarcinii” ținând seama de niște criterii de prioritizate atribuite sarcinilor critice. Astfel, echilibrul generare-consum este menținut și este asigurată o bună funcționare a utilizatorilor/infrastructurilor critice pe perioade de criză prin repartiția optimă a resurselor distribuite în rețeaua electrică urbană.

Pe baza acestor argumente, *obiectivul acestei teze* este de a elabora un nou model de creștere a rezilienței și a flexibilității rețelelor electrice de distribuție pe baza partiționării optime în insule intenționate. Abordarea prezentată se bazează pe controlul deplin al activelor existente în rețelele electrice urbane în cazul unor scenarii de urgență și are în vedere considerentele practice ce vizează îmbunătățirea pregătirii și atenuarea riscurilor în astfel de situații.

În contextul actual, subiectul tezei de doctorat face parte din preocupările curente privind dezvoltarea orașelor inteligente, prin întărirea rezistenței infrastructurii lor energetice pe baza tehnologiilor specifice Smart Grid. Modelul secvențial propus în această teză este compus din două etape: procedeul de insularizare intenționată optimizată și gestionarea optimă a resurselor locale (generație distribuită, sisteme de stocare a energiei electrice, încărcări controlabile etc.). Modelul elaborat prezintă originalitate datorită implementării ecuațiilor de modelare dezvoltate de autorul tezei și este realizat cu ajutorul unor instrumente software de calcul moderne și eficiente. Folosind metodologia de creștere a rezilienței dezvoltată în acest studiu, se pot formula strategii de optimizare preventive înainte de momentul unei mari întreruperi,

pentru a oferi operatorilor posibilitatea de a lua decizia corectă în momentul apariției perturbațiilor.

În prima etapă a modelului are loc identificarea schemei optime de partiționare în insule cu ajutorul unui algoritm bazat pe teoria grafurilor. Tot în cadrul acestei etape are loc determinarea setărilor optime pentru producția de putere activă a surselor distribuite și programarea descărcării sarcinilor, luând în considerare restricțiile de securitate ce minimizează dezechilibrul de putere între generare și consum. Acest lucru este posibil prin asigurarea unei rezerve adecvate de reglaj, atât pentru puterea activă, cât și cea reactivă. La finalul acestei etape, se poate investiga valoare frecvenței în insule pentru a verifica benzile de reglaj disponibile. Dacă acestea nu sunt suficiente pentru a asigura o valoare adecvată a frecvenței, se pot face modificări asupra configurației obținute. În caz contrar, se trece la etapa următoare.

A doua etapă se ocupă de aspectele legate de funcționarea adecvată a insulelor formate, asigurând condiții corespunzătoare privind nivelul de tensiune și ceilalți parametri operaționali (pierderi de putere, curentul maxim admisibil prin laturi etc.). Cu alte cuvinte, partiționarea în insule determinată în prima etapă este verificată din punct de vedere al fezabilității. De asemenea, această partiționare poate fi corectată, dacă este necesar, pentru a satisface constrângerile legate de funcționarea sistemului. În acest scop, calculul regimului permanent de funcționare este încorporat în această etapă și se iau măsuri optime de gestionare a circulației de puteri și a rezervei de putere reactivă pentru a atenua abaterile de tensiune și a evita depășirea capacităților de transfer ale liniilor electrice.

Având în vedere că modelul propus în cadrul acestei lucrări ia în considerare factorii-cheie privind funcționarea adecvată a sistemelor de distribuție, precum echilibrul puterilor, prioritizarea sarcinilor critice, tensiunile și constrângerile de capacitate ale liniilor, acesta acoperă cerințele aplicațiilor practice.

Teza doctorală este constituită din 6 capitole, 5 anexe și un bogat studiu bibliografic, la care se adaugă *Introducerea* și *Concluziile finale*.

Capitolul 1, intitulat „*Conceptul Smart City*”, urmărește prezentarea conceptului de oraș inteligent, abordând aspecte privind caracteristicile și indicatorii de performanță ce îl definesc, precum și tendințele și provocările actuale cu care acesta se confruntă. Tot în cadrul acestui capitol este subliniat

rolul esențial al rețelelor electrice inteligente în contextul implementării acestui concept, fiind prezentate soluțiile specifice Smart Grid ce pot participa în procesul de dezvoltare a orașelor inteligente reziliente.

Realizând analiza caracteristicilor și indicatorilor de performanță ai Orașului Intelligent, concentrată pe aspectele de energie și de mediu, s-a concluzionat că asigurarea continuității serviciului de alimentare cu energie electrică reprezintă un indicator de performanță de importanță ridicată, alături de reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră. Pentru îmbunătățirea acestor indicatori, rețelele electrice inteligente reprezintă soluția de bază, avându-se în vedere tehnologiile încorporate ce permit o restaurare rapidă a alimentării cu energie electrică, dar și integrarea surselor regenerabile de energie. Din aceste considerente, cercetările prezentate în cadrul acestei teze de doctorat, intitulate „*Îmbunătățirea rezilienței rețelelor urbane de distribuție pe baza strategiilor de insularizare intenționată*”, se concentrează pe creșterea siguranței în funcționare a sistemelor de distribuție urbane în situații de urgență pe baza tehnologiilor specifice rețelelor electrice inteligente, ce includ surse regenerabile distribuite de energie.

Suplimentar problemelor zilnice, rețelele electrice urbane se confruntă tot mai des cu evenimente dezastruoase având drept cauză fenomene meteorologice extreme, dar mai recent și atacuri umane (acte de terorism sau vandalism). Așadar, Capitolul 2, intitulat „*Conceptul de reziliență a rețelelor electrice urbane*” este dedicat explorării noțiunii de reziliență a sistemelor energetice. În cadrul capitolului sunt descrise atât pericolele la care sunt expuse rețelele electrice, cât și măsurile ce pot fi luate pentru a reduce gradul de vulnerabilitate al acestora. Totodată, în acest capitol este prezentă structura unui cadru de analiză a rezilienței, ce permite evaluarea strategiilor de creștere a rezilienței sistemelor electroenergetice pentru luarea deciziilor adecvate privind aplicarea măsurilor de întărire a acestora.

În Capitolul 3, „*Modul de funcționare insularizat al rețelelor electrice de distribuție*”, este prezentat cadrul de reglementare ce justifică utilizarea strategiilor de creștere a rezilienței bazate pe insularizarea intenționată a rețelelor electrice de distribuție propuse în această lucrare.

Având în vedere necesitatea dezvoltării unui model de optimizare care să răspundă rapid și eficient la problemele și scenariile analizate, în cadrul Capitolului 4, „*Metode de optimizare utilizate în rezolvarea problemelor*”.

*specifice rețelelor electrice de distribuție*”, au fost evaluate mai multe metode de optimizare frecvent utilizate pentru soluționarea problemei de reconfigurare a rețelelor electrice de distribuție. În urma analizei acestora din punct de vedere al performanței de calcul (timp de calcul) și al eficienței de identificare a soluției optime globale, a fost aleasă metoda de calcul utilizată în elaborarea modelului de partiționare optimă în insule a rețelelor electrice de distribuție. Așadar, în scopul dezvoltării unui algoritm rapid de restaurarea a serviciului de alimentare cu energie electrică prin partiționarea optimă în insule a sistemelor de distribuție, au fost evaluate din punct de vedere al performanței de calcul patru metode de optimizare frecvent utilizate, și anume problema de programare liniară și problema de programare pătratică (metode deterministe), respectiv algoritmi genetici și metoda roiului de particule (metode meta-euristice). În urma acestei analize, problema de programare pătratică a dovedit cele mai bune rezultate, fiind utilizată mai departe în cadrul studiului pentru elaborarea modelului de creștere a rezilienței sistemelor de distribuție.

Capitolul 5, *„Modelul matematic de creștere a rezilienței prin partiționare optimă în insule”*, este dedicat prezentării modelului propus pentru dezvoltarea strategiilor de creștere a rezilienței rețelelor electrice de distribuție pe baza procedurii de insularizare intenționată.

Având în vedere că majoritatea studiilor precedente din literatura de specialitate privind creșterea rezilienței pe baza funcționării insulare a sistemelor de distribuție nu consideră și aspecte privind valoarea frecvenței în insulele formate, metodologia elaborată în această lucrare introduce noi restricții de securitate. Pentru aplicarea acestor restricții ce privesc atât valorile frecvenței, cât și ale tensiunilor nodale, a fost necesară investigarea dezechilibrului de puteri între generare și consum în insulele obținute. În acest sens, a fost elaborat un model original de determinare a conexiunilor generatoarelor din insulele obținute, ce servește la calculul dezechilibrelor de puteri. Odată determinate valorile acestor dezechilibre, metodologia propusă ia măsuri de reducere a acestora pe baza benzilor de reglaj existente în insulele formate, pentru a asigura o cât mai bună funcționare a sistemului, chiar și pe durata unor situații de urgență. Trebuie menționat că modelul de partiționare optimă în insule ia în calcul asigurarea benzilor necesare de reglaj în insule, astfel răspunzând cerințelor de funcționare în mod insularizat intenționat.

Capitolul 6, *„Studii de caz și rezultate”*, reprezintă principala parte aplicativă a studiului. În cadrul acestui capitol sunt prezentate rezultatele

obținute în urma implementării modelului propus de partiționare optimă în insule a rețelei de distribuție. Pe lângă evidențierea beneficiilor aduse de strategia de insularizare în materie de sarcini restaurate, realizată prin testarea modelului pe două rețele test consacrate și pe o rețea de distribuție reală, studiul cuprinde și o analiză asupra gestionării optime a resurselor locale pe perioada unei întreruperi prelungite de 24 ore, aplicată în două scenarii ce modelează principalele două tipuri de risc la care sunt expuse rețelele electrice moderne (dezastre naturale și atacuri cibernetice).

Evaluarea potențialului funcționării insularizate a rețelelor electrice de distribuție, în ceea ce privește maximizarea restaurării serviciului de alimentare, a fost realizată pe baza beneficiilor aduse de modelul elaborat asupra a trei rețele electrice (două rețele test consacrate și o rețea electrică reală).

În urma rezultatelor prezentate, se disting următoarele concluzii:

- Partiționarea optimă în insule intenționate a sistemelor electrice de distribuție prezintă beneficii majore în menținerea în funcționare a sarcinilor electrice critice, prin alimentarea acestora pe perioada întreruperilor la parametri operaționali acceptabili, obținuți prin operarea corespunzătoare a resurselor distribuite.
- Pe baza indicatorilor de reziliență, au fost evaluate trei metodologii de restaurare a serviciului de alimentare pe perioada unei întreruperi, și anume procedeul de reconfigurare, partiționarea optimă în insule fără restricții de securitate, respectiv partiționarea optimă în insule cu restricții de securitate. Două scenarii au fost analizate în acest sens, ce modelează principalele tipuri de evenimente ce provoacă întreruperi prelungite (dezastre naturale și atacuri umane). În ambele situații, procedura de restaurare bazată doar pe reconfigurare a înregistrat cele mai mici valori ale indicatorilor, procentul de sarcini electrice restaurate fiind mult mai redus decât în cazul insularizării intenționate. În ceea ce privește cele două metodologii bazate pe insularizare, indicatorii de reziliență prezintă valori apropiate, mai mari în cazul fără restricții de securitate. Pentru a menține un dezechilibru între generare și consum cât mai scăzut (prin aplicarea restricțiilor de securitate), pentru a doua procedură de insularizare se recurge la descărcarea unei cantități mai mari de sarcini, rezultând un procent mai redus de sarcini restaurare, dar o valoare a frecvenței mai apropiată de valoarea nominală. Cu toate acestea, diferențele dintre valorile obținute pentru indicatorii de reziliență prin cele două procedee de insularizare sunt nesemnificative, având în vedere beneficiile

aduse privind valorile frecvenței în insule prin intermediul restricțiilor de securitate.

- Coordonarea adecvată a resurselor distribuite în rețelele electrice urbane, ce includ generatoare distribuite, dispozitive de stocare a energiei și sarcini controlabile, permit „supraviețuirea” infrastructurilor critice pe perioada unei întreruperi prelungite în condiții de funcționare acceptabile, din punct de vedere al tensiunilor nodale și al frecvenței.

Contribuțiile principale ale acestei lucrări includ:

- i. *Realizarea unor studii bibliografice privind:*
  - Conceptul „Smart City” – Investigarea caracteristicilor și indicatorilor de performanță ce definesc acest concept pentru a identifica preocupările actuale privind dezvoltarea infrastructurilor urbane;
  - Rolul rețelelor electrice inteligente în implementarea conceptului de oraș inteligent;
  - Măsuri și strategii de întărire a rețelelor electrice urbane având în vedere preocupările actuale privind creșterea rezilienței sistemelor electroenergetice în fața dezastrelor naturale și a atacurilor umane;
- ii. *Analiza performanței de calcul a patru metode de optimizare frecvent utilizate în soluționarea problemelor specifice sistemelor electroenergetice (programare liniară și programare pătratică, algoritmi genetici și metoda roiului de particule), în scopul identificării celei mai eficiente metode de calcul;*
- iii. *Dezvoltarea unei metode rapide de restaurare a serviciului de alimentare cu energie electrică în sisteme inteligente de distribuție considerând prioritizarea sarcinilor critice;*
- iv. *Elaborarea unei metodologii originale de determinare a dezechilibrului de putere în insulele de rețea formate pentru monitorizarea și gestionarea factorilor-cheie de funcționare, precum nivelul de tensiune și frecvența;*
- v. *Dezvoltarea unui model secvențial de partiționare optimă în insule intenționate în scopul maximizării sarcinilor restaurate în urma unei întreruperi majore, ce ține de asemenea cont de*

restricțiile de securitate privind nivelul de tensiune și valoarea frecvenței (dezechilibrul generare-consum);

- vi. *Implementarea unor noi indicatori de cuantificare a rezilienței sistemului de distribuție pentru dezvoltarea strategiilor de reziliență potrivite fiecărui tip de scenariu;*
- vii. *Dezvoltarea unui model de gestionare optimă a funcționării resurselor distribuite (surse distribuite de generare, sisteme de stocare a energiei și sarcini electrice controlabile) în mod insularizat, pentru a asigura parametri funcționali adecvați pentru utilizatorii critici ai unei rețele electrice de distribuție urbane pe perioada unei întreruperi prelungite;*
- viii. *Valorificarea și diseminarea cercetărilor prin publicarea a numeroase articole în cadrul unor conferințe naționale și internaționale: Zilele Academiei de Științe Tehnice din România - ZASTR2017, Constanța, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering - EPE2018, Iași, International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering - ISFEE2018 și International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering - ATEE2019, București, IEEE PowerTech Milano 2019, International Universities Power Engineering Conference - UPEC2019, București, International Conference on Energy and Environment - CIEM2019, Timișoara, și reviste internaționale: Buletinul Științific al Politehnicii din București, Seria C: Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor, 2020.*

În vederea continuării studiilor prezentate în cadrul acestei teze de doctorat, se propun următoarele direcții de cercetare:

- O abordare multicriterială a problemei de optimizare, prin introducerea unei funcții multiobiectiv bazată pe o serie de termeni ponderați corespunzător, ce pot să includă reducerea variațiilor tensiunilor nodale, minimizarea numărului de operații de comutare necesare, aspecte economice privind costul generării surselor, ameliorarea unor aspecte de mediu (reducerea emisiilor) etc.;
- Analiza dinamică a procedurii de insularizare din punct de vedere al stabilității frecvenței și tensiunii;



- Extinderea analizei asupra unor rețele electrice urbane reale din viitoare orașe inteligente din România;
- Elaborarea unui ghid de recomandări privind măsurile de creștere a rezilienței rețelelor de distribuție urbane potrivite fenomenelor meteorologice specifice României.

## BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

- [1] Y. Arafah și H. Winarso, „Redefining smart city concept with resilience approach,” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 70, nr. 1, 2017.
- [2] M. Eremia, L. Toma și M. Sanduleac, „The Smart City Concept in the 21st Century,” *Elsevier Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 12-19, 2017.
- [3] **I. I. Picioroagă**, M. Eremia, V. Ilea și C. Bovo, „Resilient operation of distributed resources and electrical networks in a Smart City context,” *Buletinul Științific al Politehnicii din București, Seria C: Inginerie Electrică și Știința Calculatoarelor*, vol. 82, nr. 3, pp. 267-278, 2020.
- [4] P. Nicholas, „Smart city resilience: Digitally empowering cities to survive, adapt, and thrive,” McKinsey & Company, 2017.
- [5] K. Geisler, „The relationship between Smart Grids and Smart Cities,” IEEE Smart Grid, 2015.
- [6] **I. I. Picioroagă**, M. Eremia și M. Sănduleac, „Smart City: Definition and Evaluation of Key Performance Indicators,” în *International Conference and Exposition on Electrical And Power Engineering (EPE)*, Iași, Romania, 2018.
- [7] A. Kenward și U. Raja, „Blackout: Extreme Weather, Climate Change and Power Outages,” Climate Central, Princeton, 2014.
- [8] „Electric Power System Resilience: Challenges and Opportunities,” Electric Power Research Institute (EPRI), Palo Alto, California, 2016.
- [9] **I. I. Picioroagă**, M. Eremia și M. Sănduleac, „Economic Benefits of Energy Storage and Price-aware Demand Response for Future Smart Cities,” în *54th International Universities Power Engineering Conference*, Bucharest, Romania, 2019.
- [10] E. P. Trindade, M. P. F. Hinnig, E. M. d. Costa, J. S. Marques, R. C. Bastos și T. Yigitcanlar, „Sustainable development of smart cities: a systematic

- review of the literature,” *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, vol. 3, nr. 11, 2017.
- [11] A. Gaviano, K. Weber și C. Dirmeier, „Challenges and Integration of PV and Wind Energy Facilities from a Smart Grid Point of View,” *Energy Procedia*, vol. 25, pp. 118-125, 2012.
  - [12] „World Urbanization Prospects: The 2014 Revision,” United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division, Methodology Working Paper No. ESA/P/WP.238, 2014.
  - [23] **I. I. Picioroagă** și M. Eremia, „Smart City: Characteristics and key performance indicators,” Proceedings of the XIIth edition of the Annual Conference „The Academic Days of A.S.T.R”, nr. ISSN 2066-6586, pp. 249-254, 2017.
  - [36] M. Masera, E. F. Bompard, F. Profumo și N. Hadjsaid, „Smart (Electricity) Grids for Smart Cities: Assessing Roles and Societal Impacts,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, nr. 4, pp. 613-625, 2018.
  - [37] I. Maltese, I. Mariotti și F. Boscacci, „Smart City, Urban Performance and Energy,” Springer International Publishing Switzerland, 2016.
  - [46] A. G. Ianțoc, C. Bulac, I. Triștiu, **I. I. Picioroagă** și D. O. Sidea, „Impact Analysis of Distributed Generation on Voltage Stability in Radial Distribution Systems,” în *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, Timișoara, Romania, 2019.
  - [47] M. Sănduleac, M. Eremia și **I. I. Picioroagă**, „Resilience through Self-Sufficiency in Smart Cities: A Preliminary Bucharest Use Case,” în *International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, Bucharest, Romania, 2018.
  - [50] C. F. Calvillo, A. Sánchez-Miralles și J. Villar, „Energy management and planning in smart cities,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 273-287, 2016.
  - [52] L. Toma, M. Sănduleac, M. Eremia, **I. I. Picioroagă** și D. Sidea, „On the feasibility of massive deployment of energy storage systems,” în *International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance, Modern Management Technologies (CMDM)*, Bucharest, Romania, 2019.
  - [58] **I. I. Picioroagă**, M. Eremia, M. Sănduleac și D. O. Sidea, „Optimal Allocation of Energy Storage Systems for Resilient Distribution Networks Focusing on Critical Loads,” în *11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2019.

- [61] D. O. Sidea, L. Toma, M. Sănduleac, **I. I. Picioroagă** și V. A. Boicea, „Optimal BESS Scheduling Strategy in Microgrids Based on Genetic Algorithms,” în *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 2019.
- [66] M. Zhang și J. Chen, „Islanding and Scheduling of Power Distribution Systems With Distributed Generation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, nr. 6, pp. 3120-3129, 2015.
- [75] „Codul Tehnic al Rețelei Electrice de Transport,” Compania Națională de Transport al Energiei Electrice „Transelectrica” S.A., 2007.
- [76] Z. Bie, Y. Lin, G. Li și F. Li, „Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, nr. 7, pp. 1253-1266, 2017.
- [88] E. Vugrin, A. Castillo și C. A. Silva-Monroy, „Resilience Metrics for the Electric Power Resilience Metrics for the Electric Power,” Sandia National Laboratories, Albuquerque, SUA, 2017.
- [95] J. A. Laghari, H. Mokhlis, M. Karimi, A. H. A. Bakar și H. Mohamad, „A New Under-Frequency Load Shedding Technique Based on Combination of Fixed and Random Priority of Loads for Smart Grid Applications,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, nr. 5, pp. 2507 - 2515, 2015.
- [96] „IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems,” IEEE Std. 1547-2003, 2003.
- [97] „IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV),” IEEE Std. 929-2000, 2000.
- [98] „UL Standard for Safety Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources,” UL1741, 2018.
- [99] „IEEE 1547: Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces,” New York, SUA, 2018.
- [100] „Reference technical rules for the connection of active and passive consumers to the HV and MV electrical networks of distribution company,” CEI 0-16, 2019.
- [101] P. Meneses de Quevedo, J. Allahdadian, J. Contreras și G. Chicco, „Islanding in distribution systems considering wind power and storage,” *Elsevier Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 5, pp. 156-166, 2016.

- [103] M. Kreishan, G. Fotis, V. Vita și L. Ekonomou, „Distributed Generation Islanding Effect on Distribution Networks and End User Loads Using the Load Sharing Islanding Method,” *Energies*, vol. 9, nr. 956, 2016.
- [142] D. O. Sidea, **I. I. Picioroagă**, C. Bulac, I. Triștiu, M. Eremia și V. A. Boicea, „Optimal Reactive Power Dispatch in Distribution Power Systems Based on Particle Swarm Optimization,” în *International Conference on Energy and Environment (CIEM)*, Timișoara, Romania, 2019.
- [166] S. A. Alavi, V. Ilea, A. Saffarian, C. Bovo, A. Berizzi și S. G. Seifossadat, „Feasible Islanding Operation of Electric Networks with Large Penetration of Renewable Energy Sources considering Security Constraints,” *Energies*, vol. 12, nr. 537, 2019.