INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII

UNIVERSITATEA TEHNICĂ DIN CLUJ-NAPOCA

W13 - Tranziția Energetică și Orașele Verzi: Perspective academice pentru un viitor sustenabil





Senzori Inteligenți în Rețele Electrice inteligente

Prof. Octavian Postolache

Iscte- University Institute of Lisbon, Portugal

Instituto de Telecomunicacoes, Lisbon Portugal

Cluj, 05 Noiembrie 2025 |

Affiliations





Portugal
Lisbon



instituto de telecomunicações



iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Cuprins

01 Schimbări climatice, energie regenerabilă, retea electrica inteligentă

02 Senzori Inteligenti in Reteaua Electrica

03 Inteligenta Artificiala in Reteaua Electrica

04 Gemenii Digitali in Reteaua Electrica

05 Sisteme de Senzori Inteligenti - Studii de Caz

06 Concluzii

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Schimbări climatice, energie regenerabilă, retea electrica inteligentă

01

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Schimbările climatice: Fapte

- Schimbările climatice reprezintă una dintre cele mai mari amenințări la adresa mediului, societății și economiei.
- Încălzirea sistemului climatic este incontestabilă.
- Observațiile indică creșteri ale temperaturii medii globale a apei și a oceanelor, topirea pe scară largă a zăpezii și gheții și o creștere medie globală a nivelului mării.
- Încălzirea poate fi atribuită emisiilor de gaze cu efect de seră provenite din activitățile umane.





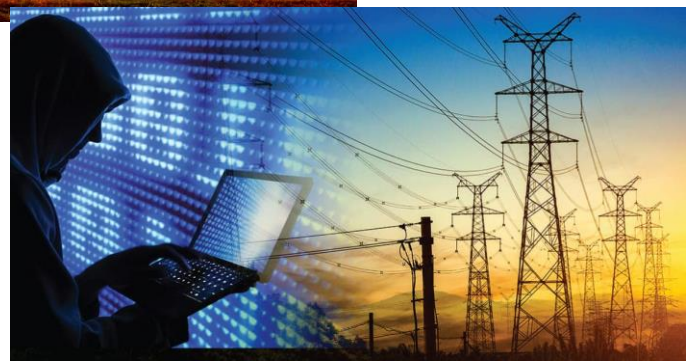
Energii regenerabile: Provocări

- **Schimbările climatice** impun integrarea pe scară largă a energiei regenerabile, în timp ce rețelele electrice se confruntă cu amenințări tot mai mari din partea fenomenelor meteorologice extreme și a atacurilor cibernetice**.**
- Eforturile de **modernizare a rețelelor de distribuție** și necesitatea introducerii tehnologiilor regenerabile cu emisii reduse de carbon în rețele → necesitatea de soluții bazate pe **sensori inteligenti** pentru monitorizare in cadrul retelelor electrice.









Energii Regenerabile – Digitalizarea Retelelor Electrice

Digitalizarea rețelei electrice – utilizarea noilor tehnologii ale informației și comunicațiilor permite:

- generarea,
- distribuția
- utilizarea inteligentă a energiei



→**rețeaua elétrica inteligenta**: fiabila și robusta, cu monitorizare eficientă dezvoltata prin utilizarea de: senzori inteligenți, IoT, AI, gemeni digitali.

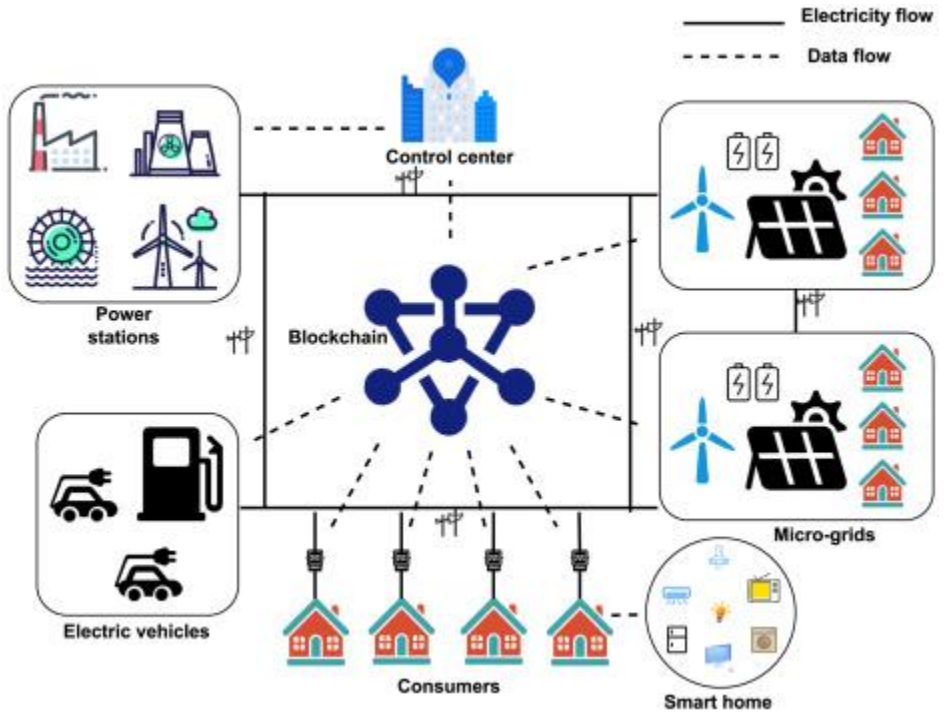
Detectie inteligentă - Integrarea Energiilor Regenerabile

Senzorii inteligenți permit, la nivelul întregii infrastructuri energetice:

- monitorizarea în timp real,
- controlul inteligent,
- Capacități predictive**.**

Inteligența la nivelul rețelei: asigura:

- fiabilitate sporită,
- gestionarea eficientă a resurselor energetice distribuite



https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.003

Detectare inteligentă - Procesul de Digitalizare al Rețelelor electrice

- **Implementarea senzorilor inteligenți** în infrastructura electrică, integrați cu rețelele de informații și comunicații, protejează rețelele inteligente și îmbunătățește eficiența energetică globală.

Monitorizare în timp real:
Urmărirea continua a starii rețelei la toate nivelurile de tensiune

Inteligență predictive
Anticiparea potențialelor perturbări înainte ca acestea să apară

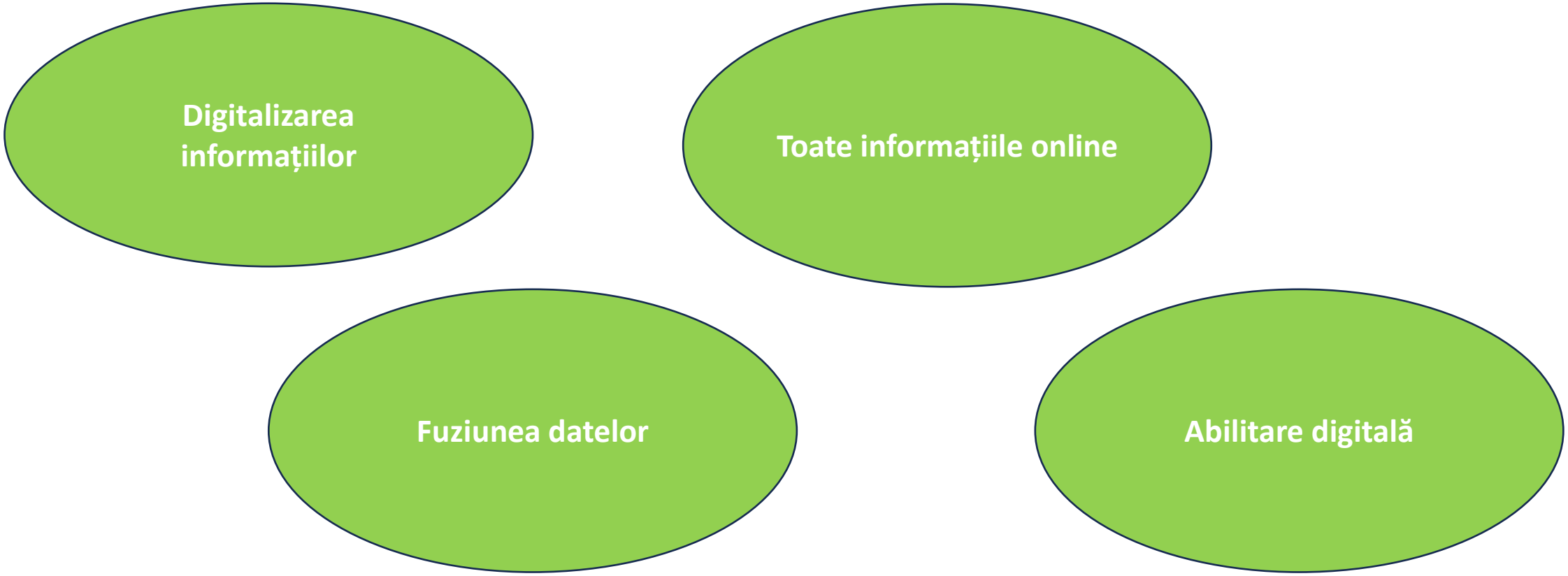
Gestionarea resurselor
Gestionarea eficientă a resurselor energetice distribuite

Asigurarea calității
Asigurarea standardelor de calitate a energiei promise

Urmărirea echipamentelor
Monitorizarea starii echipamentelor la toate nivelurile

Retelele Electrice Digitale

- **Rețea electrică digitală** →un nou ecosistem energetic bazat pe tehnologii precum cloud computing, big data, IoT, internet mobil, AI și Blockchain - *OFERĂ*

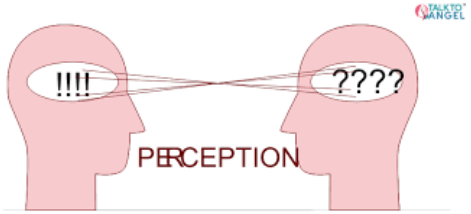


Rețele Electrice Digitale → Rețele Electrice Reziliente

Rețele Electrice Reziliente: Caracteristici

- Percepere
- Coordonare
- Adaptabilitate
- Apărare
- Recuperare
- Învățare







Rețelele electrice reziliente bazate pe tehnologia rețelelor inteligente cu senzori inteligenti → reprezintă o tendință cheie de dezvoltare, asigurând securitatea și economia în exploatare prin tehnologii avansate de detectie, măsurare și control.

- Percepe în mod cuprinzător, rapid și precis situațiile operaționale,
- Coordonează resursele interne și externe,
- Face previziuni active,
- Intreprinde pregătiri pentru perturbări,
- Apără în mod activ împotriva amenințărilor,
- Restabilește rapid sarcinile importante,
- Imbunătățește continuu capacitățile.

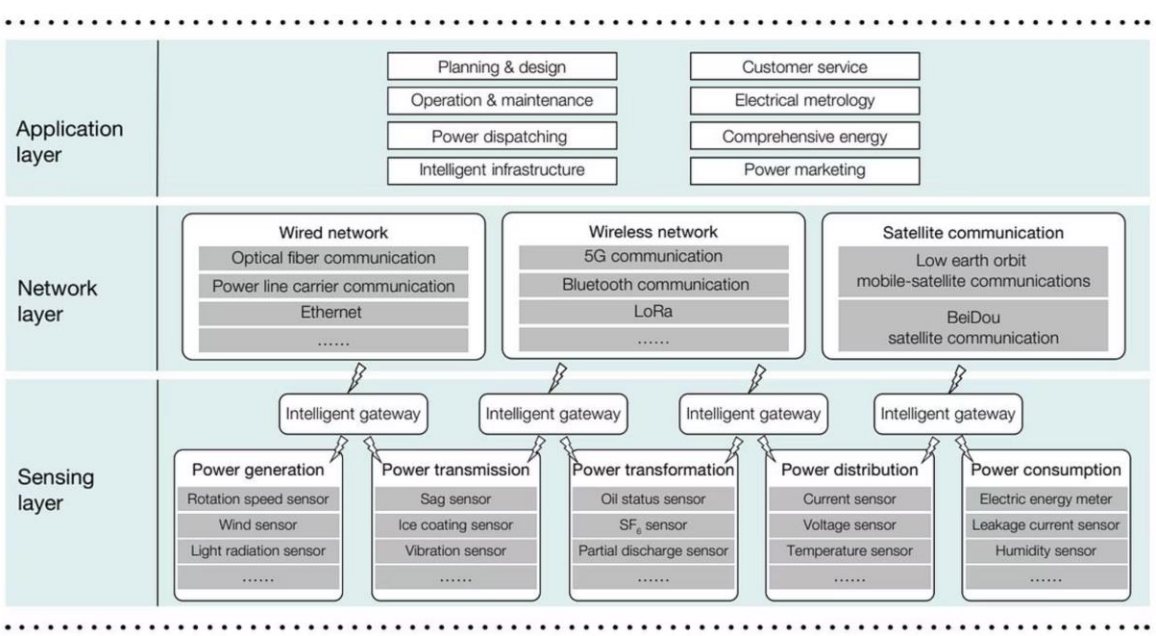
Arhitectura de detectie inteligenta in reteaua electrica

02

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Digitalizarea rețelei: Arhitectura bazata pe sensori inteligenti a retelelor electrice

Arhitectura multistrat



Stratul senzorilor inteligenti: o gamă largă de senzori electrici și neelectrici care colectează date în timp real din procesele de generare, transport, transformare, distribuție și utilizare finală**;**

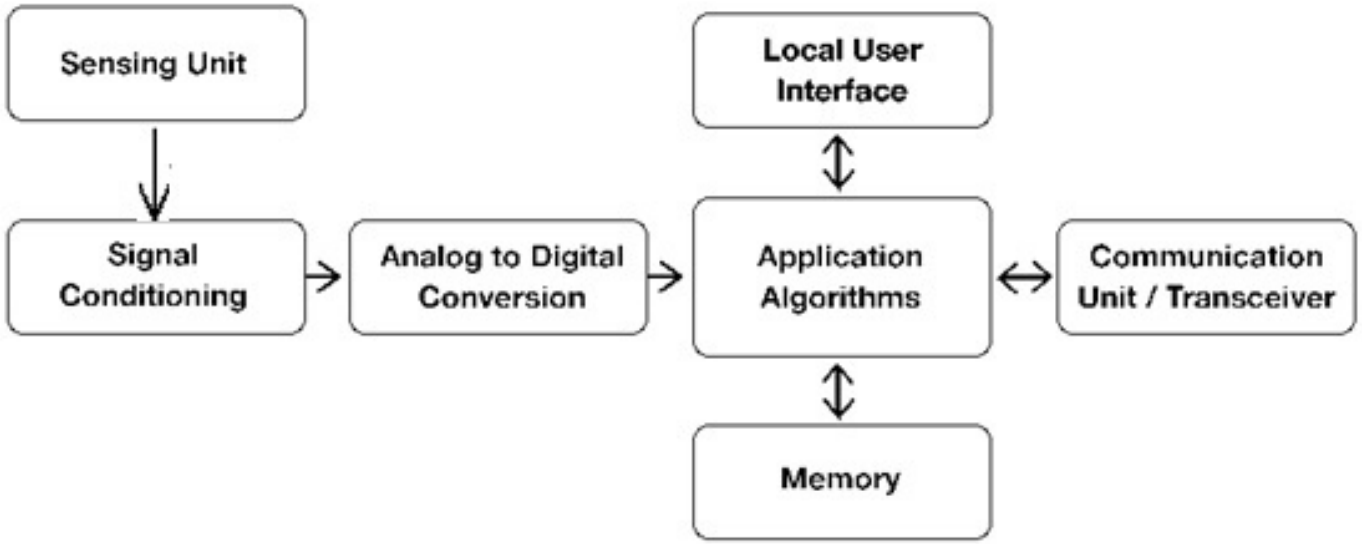
Stratul de rețea: comunicații prin cablu, wireless și satelit care transmit date de la senzori între stratul de detectare și stratul de aplicații;

Stratul de aplicații: suportă aplicații din domeniul energiei electrice, inclusiv planificare, operare, dispecerizare, servicii pentru clienți și piețe de energie electrică;

Arhitectura de detectare a rețelei: Stratul Senzorilor Inteligenti

Senzor Inteligent (SI): dispozitiv care utilizează o unitate de detectare pentru a colecta date dintr-un mediu fizic, pentru a efectua o funcție predefinită și programată asupra datelor colectate, apoi transmite datele printr-o conexiune în rețea.

Capacitățile actuale ale sistemelor de SI: Autoidentificare, Măsurarea cantităților fizice, Procesarea semnalelor digitale încorporate,comunicații de date cu dispozitive externe→ *edge computing, fog computing, cloud computing*.





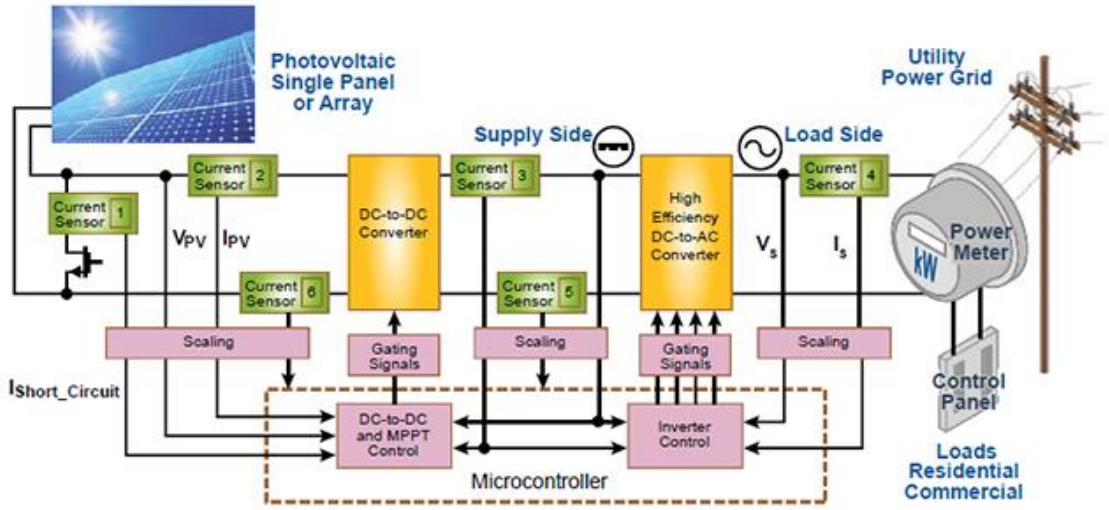
Arhitectura de detectare a rețelei : Stratul senzorilor Inteligenti

Senzorii Inteligenti in Reteaua Electrica sunt asociati cu masurări de:

- Tensiune;
- Curent
- Temperatură
- Fază
- Calitatea energiei

Pentru a detecta orice fluctuație a parametrilor în timp aproape real și a gestiona acțiunile corectivepentru a asigura fiabilitatea rețelei în condiții de defect

Exemplo Senzorii de curent sunt necesari în toate sistemele conectate la rețea pentru controlul convertoarelor și invertoarelor, optimizarea extracției de energie din panourile solare și detectarea defectelor pentru siguranță.



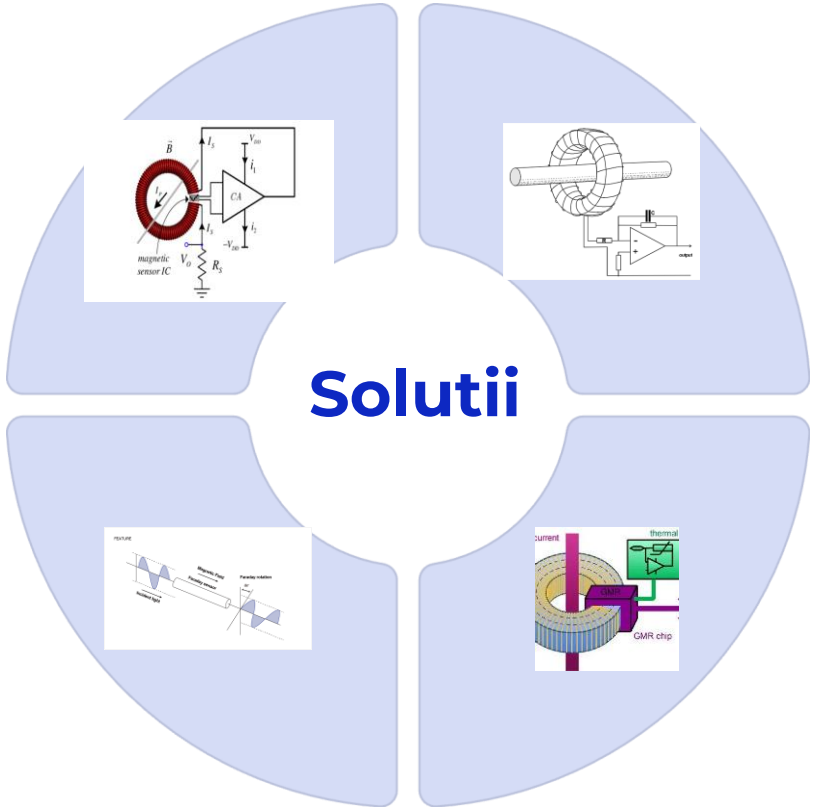
Stratul Senzorilor Inteligenti – Mãsurarea Tensiunii si Curentului

Senzori Electromagnetici

Transformatoarele de curent clasice cu miez feromagnetic ating o precizie ridicată datorită designului îmbunătățit, materialelor de calitate superioară și compensării electronice.

Senzori Optici

Senzorii bazati pe efectul Faraday care utilizeaza fibra optica ofera o izolare ridicata pentru retelele de inalta tensiune fara miez magnetic sau bobinaje de cupru.



Bobinele Rogowski

Senzori cu miez nemagnetic, ideali pentru curenți mari și frecvențe înalte, care utilizează integratoare electronice pentru procesarea ieșirii.

Senzori Magnetici

Senzorii cu efect Hall și GMR măsoară curenții alternativi și continui de bandă larga, oferind izolare galvanică intrinsecă.

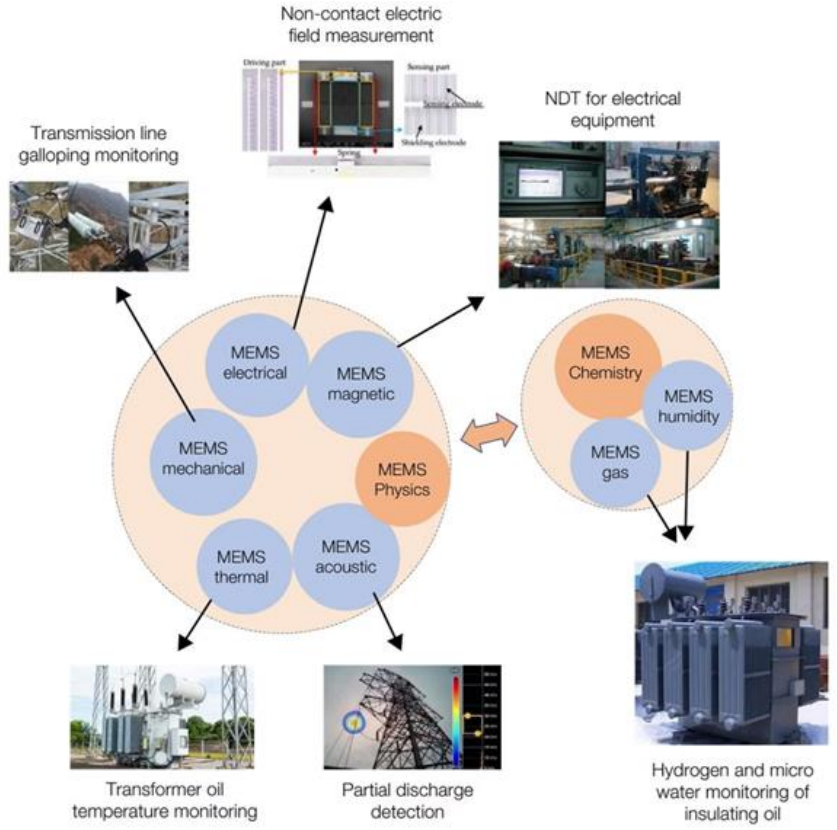
Stratul Senzorilor Inteligenti – MEMS

Senzorii inteligenti cu sisteme microelectromecanice (MEMS) fabricați prin tehnologia de micro-prelucrare oferă greutate redusă, dimensiuni mici, sensibilitate ridicată, fiabilitate ridicată și integrare ușoară.

Senzori de câmp electric
Senzori pe bază de siliciu sau metal care utilizează tehnologia IC pentru măsurarea câmpului electric AC/DC de înaltă sensibilitate și măsurarea tensiunii fără contact.

Senzori de accelerație
Senzori inerțiali multi-axiali pentru monitorizarea cu precizie ridicată și consum redus de energie a traiectoriei de galop a liniilor de transmisie

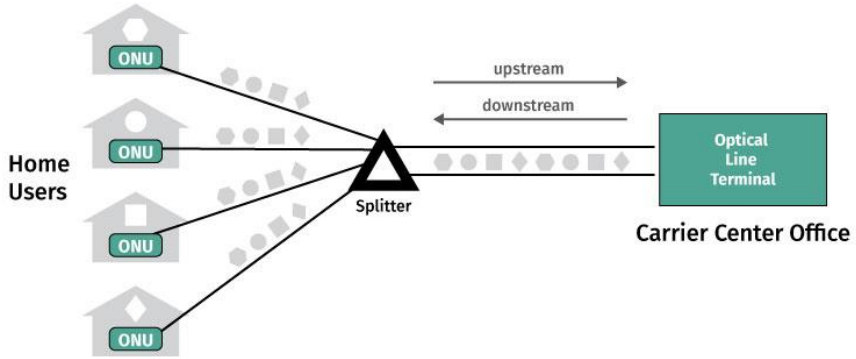
Senzori de presiune
Senzori MEMS obișnuiți pentru diverse aplicații ale sistemelor de alimentare cu energie, cu caracteristici de performanță excelente



Stratul de Rețea: Comunicație prin Cablu

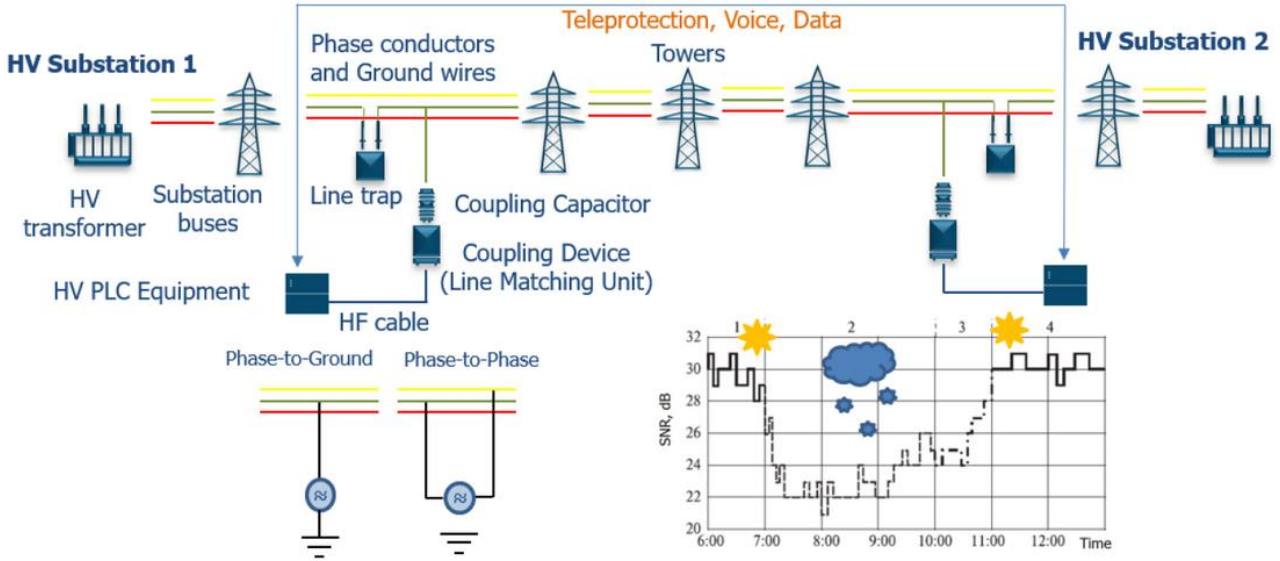
Comunicații prin cablu

Rețea pasivă de fibră optică (PON): oferă servicii de date punct-la-multipunct de înaltă calitate și acces la internet de mare viteză la un cost redus,permițând aplicații inteligente de rețea, cum ar fi monitorizarea, controlul și transmiterea datelor de la distanță.



Comunicații prin cablu

Power Line Carrier: utilizează linii de transmisie de înaltă tensiune ca canale de semnal de înaltă frecvență, oferind economie și fiabilitate.



Stratul de Rețea: Comunicații fără fir

Tehnologiile 4G - 5G:
Tehnologii avansate de acces multiplu, antenă multiplă, codificare și modulație cu arhitecturi de rețea flexibile

Rețele cu consum energetic ultra-redus:
LoRa, NB-IoT, ZigBee și Bluetooth pentru rețele de senzori cu viteză, distanță și consum energetic îmbunătățite

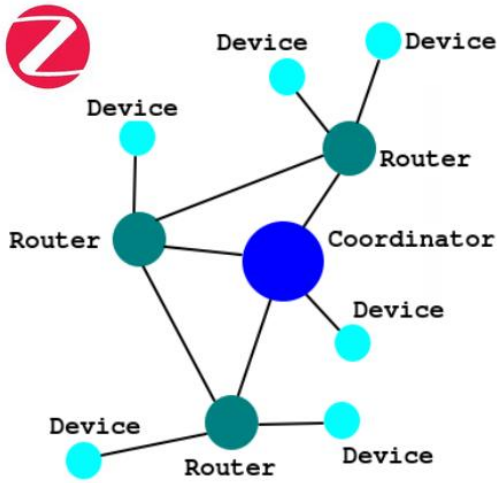
	SIGFOX	LoRa	clean slate cIoT	NB LTE-M Rel. 13	LTE-M Rel. 12/13	EC-GSM Rel. 13	5G (targets)
Range (outdoor) MCL	<13km 160 dB	<11km 157 dB	<15km 164 dB	<15km 164 dB	<11km 156 dB	<15km 164 dB	<15km 164 dB
Spectrum Bandwidth	Unlicensed 900MHz 100Hz	Unlicensed 900MHz <500kHz	Licensed 7-900MHz 200kHz or dedicated	Licensed 7-900MHz 200kHz or shared	Licensed 7-900MHz 1.4 MHz or shared	Licensed 8-900MHz 2.4 MHz or shared	Licensed 7-900MHz shared
Data rate	<100bps	<10 kbps	<50kbps	<150kbps	<1 Mbps	10kbps	<1 Mbps

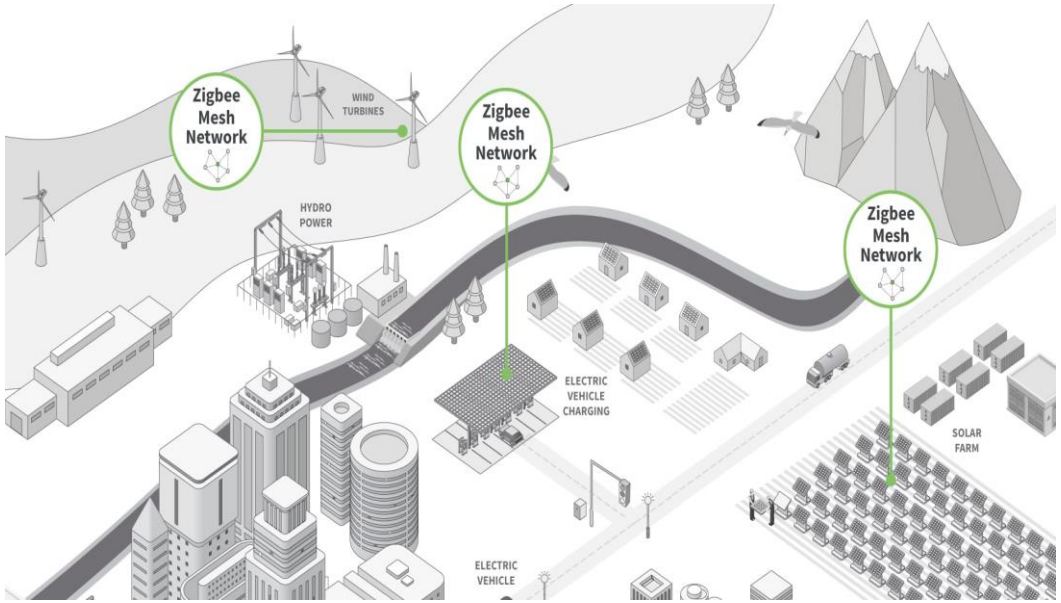


Stratul de Rețea: Rețele de Senzori Inteligenți

Caracteristicile Rețelei

- Self-organizing multi-hop architecture
- Small size and customizability
- Low cost and power consumption





Topologia *Mesh*

- *Topologia Zigbee Mesh* permite multiple interconectări între dispozitive, oferind redundanță și robustețe în rețea.
- Rețelele mesh sunt descentralizate, ceea ce înseamnă că fiecare nod este capabil să se auto-detecteze în rețea. Pe măsură ce nodurile părăsesc rețeaua, nodurile reconfigurează căile de rutare pe baza noii structuri a rețelei. T
- opologia mesh mesh este cea mai flexibilă topologie, permițând auto-repararea, ceea ce permite unei rețele să se reconfigureze automat în cazul unei defecțiuni a conexiunii.

Stratul de Rețea: Rețele de Senzori Inteligenți

Caracteristici Cheie in Rețelele de Sensori Inteligenti

Auto-organizare:
Nodurile monitorizează nodurile vecine, măsoară puterea semnalului și selectează nodurile adecvate pentru sincronizarea orei.

Controlul fluxului: Mecanismele adaptive verifică motivele pierderii pachetelor și ajustează transmisia în consecință

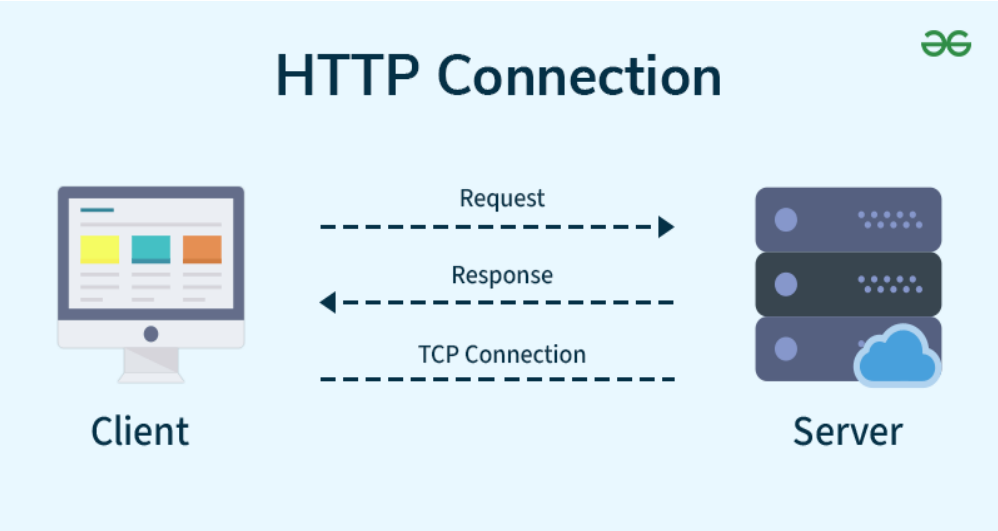
Interconectare IP:
Tehnologia IPv6 oferă resurse de adrese enorme, potrivite pentru implementări pe scară largă.

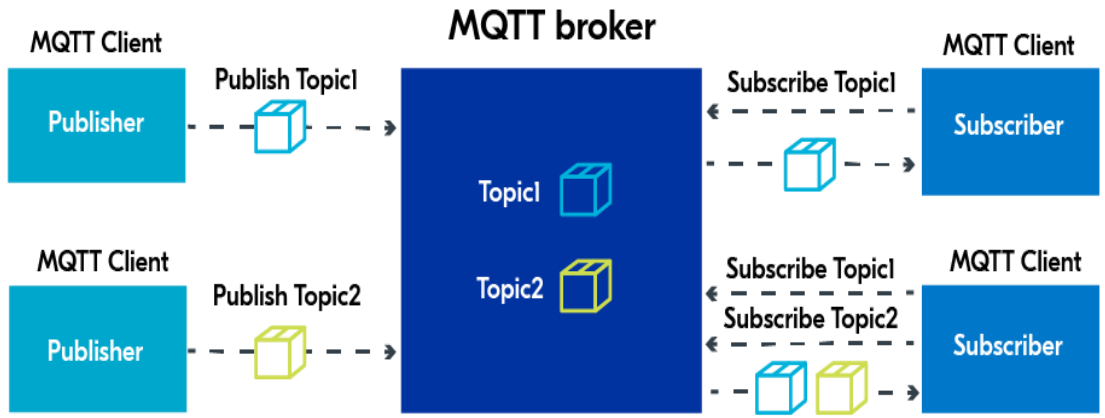
Protocoalele de comunicatii: Permite dispozitivelor să-și expună caracteristicile și să comunice cu servicii externe și centralizate,
Dispozitive eterogene → Protocoale multiple

- **HTTP, TCP, IPV6, XML, JSON, RSS, ATOM, REST, MQTT**

Stratul de Retea : Protocoluri de IoT

- **HTTP** este utilizat de World Wide Web (WWW) pentru a defini modul în care mesajele sale vor fi transmise și formatate. Acest protocol este responsabil pentru acțiunea pe care un server trebuie să o întreprindă în timpul trimiterii informațiilor prin rețea.
- **MQTT** (Message Queuing Telemetry Transport) se caracterizează prin eficiență și fiabilitate. În scenariile IoT, MQTT asigură o transmisie telemetrică a datelor fără întreruperi și eficientă.





Stratul de rețea: Comunicații prin satelit

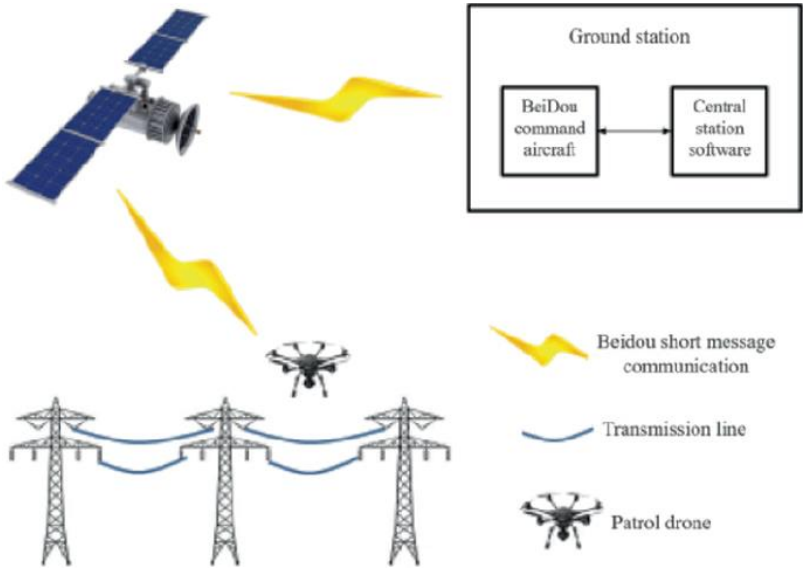
Orbită joasă în jurul Pământului

Întârziere redusă a semnalului și pierderi reduse ale conexiunii pentru comunicații mobile, achiziție de date și urmărire:-satelit artificial care orbitează în jurul Pământului la o altitudine de aproximativ 500 până la 2.000 de kilometri



Sistemul BeiDou

Poziționare la nivel milimetric și sincronizare la nivel de nanosecunde pentru inspecția dronelor, monitorizarea liniilor și controlul siguranței

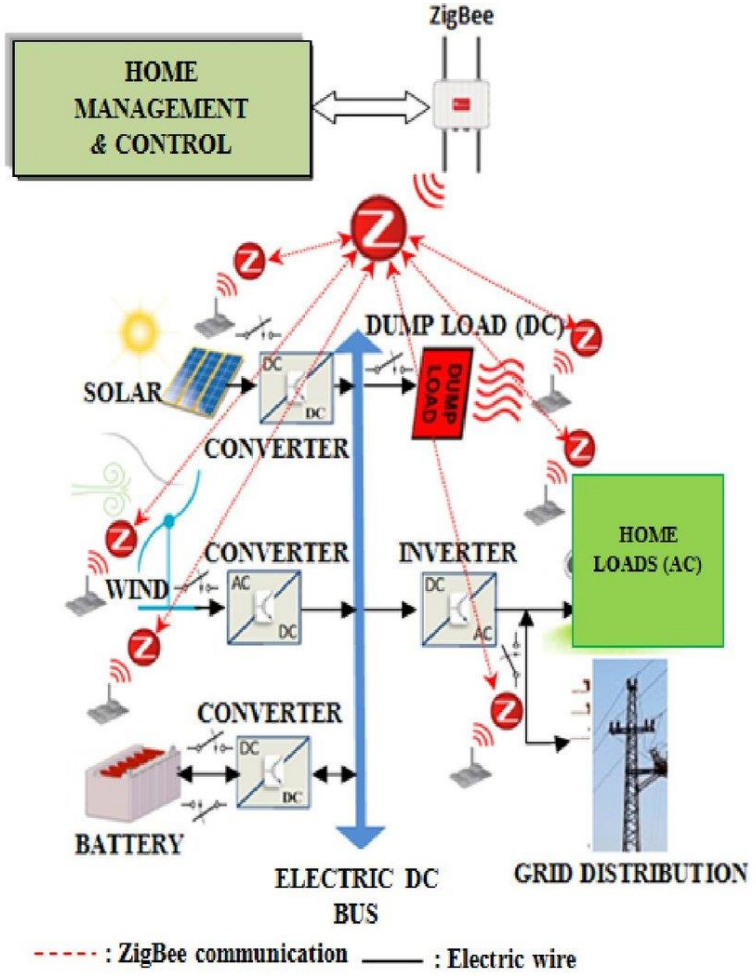




China Satellite Navigation Conference (CSNC 2021)
Design of Power Inspection System Based on BeiDou Short Message and UAV

Smart Sensor Networks: an example





Novel Approach to Reduce CO2 Emission in Smart Micro Grid

Inteligenta Artificiala in Retele Electrice Inteligente

03

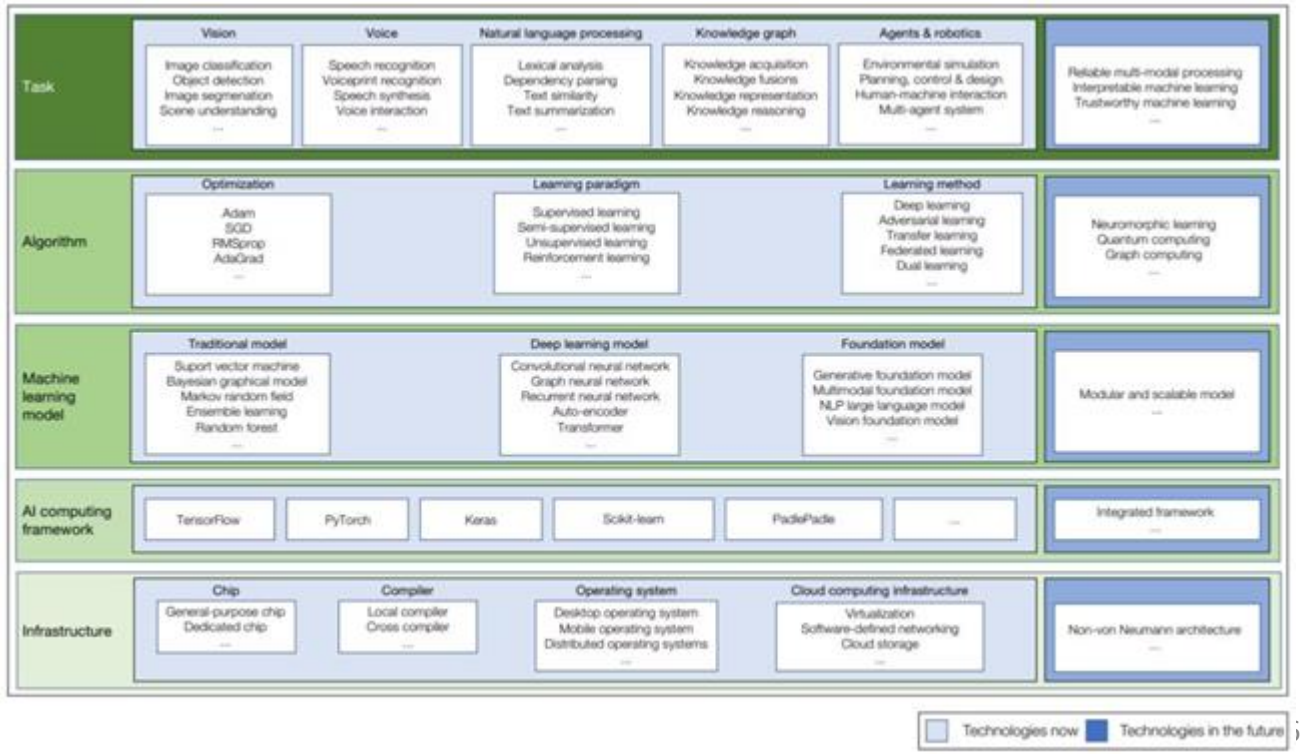
iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Inteligenta Artificiala (IA)

IA în rețelele electrice inteligente : permite integrarea surselor de energie neconvenționale, precum energia eoliană și solară, în rețea pe baza datelor furnizate de canalele de detectare inteligente.

Algoritmii IA pot analiza datele din prognozele meteorologice și cererea de energie pentru a optimiza producția surselor de energie neconvenționale, reducând dependența de combustibilii fosili și îmbunătățind sustenabilitatea generală**.**

Analiza datelor cu IA
Exemplu de *AI Framework*



Inteligența artificială (IA) – tipuri de algoritmi

Module AI (embedded AI) pot procesa și analiza fluxurile de date

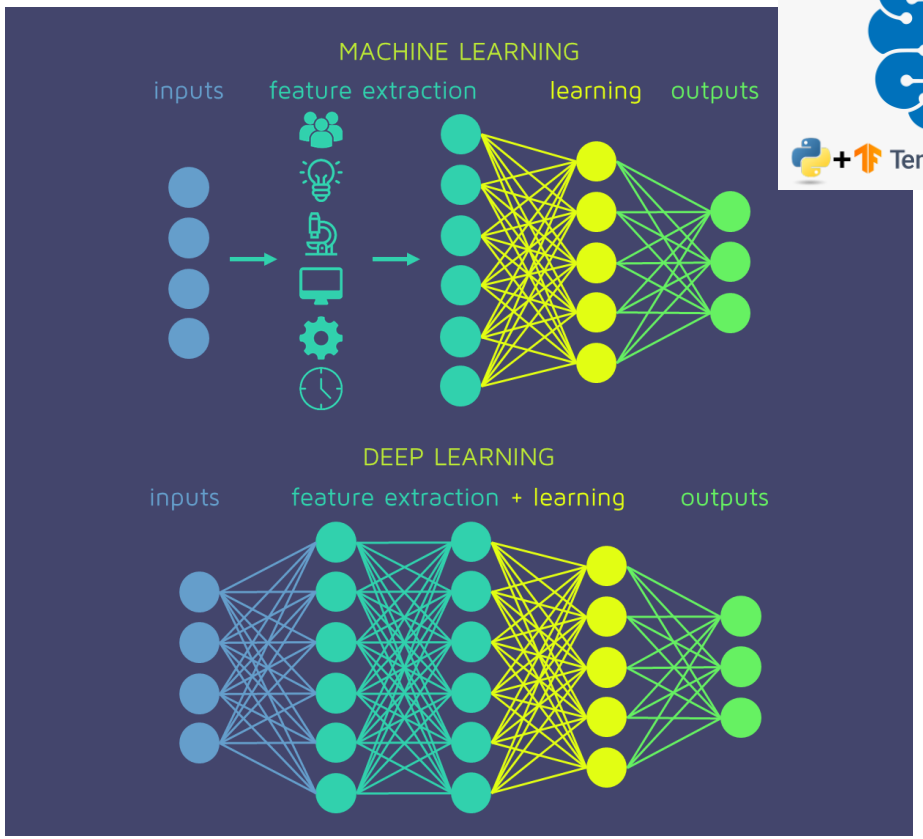
- Sisteme inteligente de senzori conectate la rețeaua electrică
- teledetecție (imagini din drone).

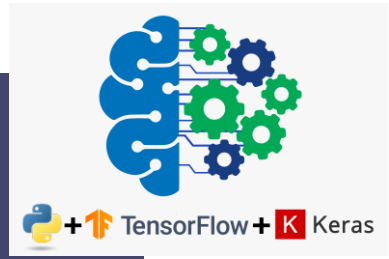
Tehnologii IA:

ML (invatare automata) :

- *artificial neural networks*,
- *support vector machines*,
- *decision trees*,
- *random forests*

DL (Învățarea profundă) asociată în principal cu analiza și clasificarea imaginilor (de exemplu, imagine termografică care indică o defecțiune în sistem)





Aplicații IA în rețelele electrice

Identificarea sarcinii
Analiza in platforma “edge” asociata contoarelor inteligente utilizând transformarea wavelet discretă pentru extragerea caracteristicilor și rețele neuronale încorporate pentru identificarea sarcinii.

Analiza descărcărilor parțiale
Extragerea informațiilor utile din datele senzorilor de bandă largă și frecvență înaltă pentru o percepție rapidă și un diagnostic precis

Echipament Amprenta vocală
Analiza semnalelor de vibrație și sunet pentru detectarea descărcărilor, supraîncălzirii, deformării bobinelor și slăbirii mecanice

Detectarea defecțiunilor la linii
Detectarea vizuală a informațiilor și detectarea inteligentă a defectelor folosind drone și dispozitive de calcul pentru inspecții automate

Tehnici de inteligență artificială (IA) în rețelele electrice inteligente

AI technique	Problem addressed	Benefits	Challenges	Applications
Machine learning (ML)	Analyses data to forecast energy demand and enhance energy supply	Improves energy efficiency, reduces energy waste, enhances customer experience	Requires high-quality data, can be complex to process.	Load forecasting, demand response, energy storage optimization
Deep learning (DL)	Analyzes complex data sets to detect anomalies and predict energy demand	Improves grid reliability, reduces power outages, enhances customer experience	Requires large amounts of data, can be computationally intensive	Fault detection, predictive maintenance, energy demand forecasting
Natural language processing (NLP)	Analyzes customer feedback and complaints to improve customer experience	Enhances customer experience, improves customer engagement	Requires high-quality data, can be challenging to implement	Customer service chatbots, sentiment analysis
Computer vision	Analyzes images to detect signs of wear and tear on grid infrastructure	Improves grid reliability, reduces power outages, enhances customer experience	Requires high-quality images, can be challenging to implement	Transmission line inspection, equipment monitoring
Reinforcement learning	Optimizes energy storage and release to stabilize the grid	Improves grid stability, reduces energy waste, enhances customer experience	Requires complex algorithms, can be challenging to implement	Energy storage optimization, grid stability management
Transfer learning	Applies pre-trained models to new data sets to improve energy demand forecasting	Improves energy demand forecasting, reduces energy waste, enhances customer experience	Requires high-quality data, challenge to implement	Energy demand forecasting, load forecasting
Clustering	Groups similar data points to identify patterns and drifts in energy dissipation to consumers.	Improves energy efficiency, reduces energy waste, enhances customer experience	Requires high-quality data, can be challenging to implement	Customer segmentation, energy consumption analysis
Decision trees	Analyzes data to make decisions about energy supply and demand	Improves energy efficiency, reduces energy waste, enhances customer experience	Requires high-quality data, can be challenging to implement	Energy supply and demand management, grid optimization

https://doi.org/10.3389/frai.2025.1551661

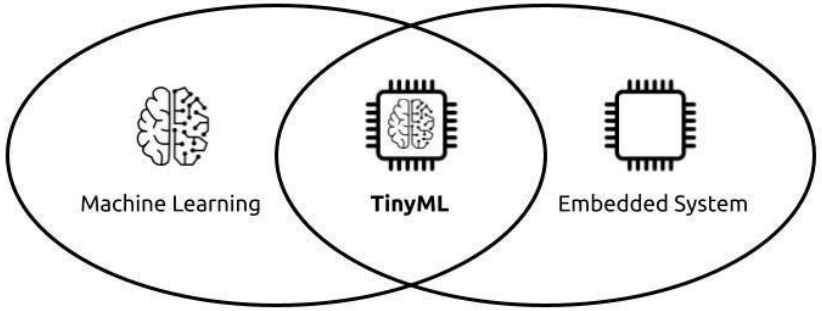
iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

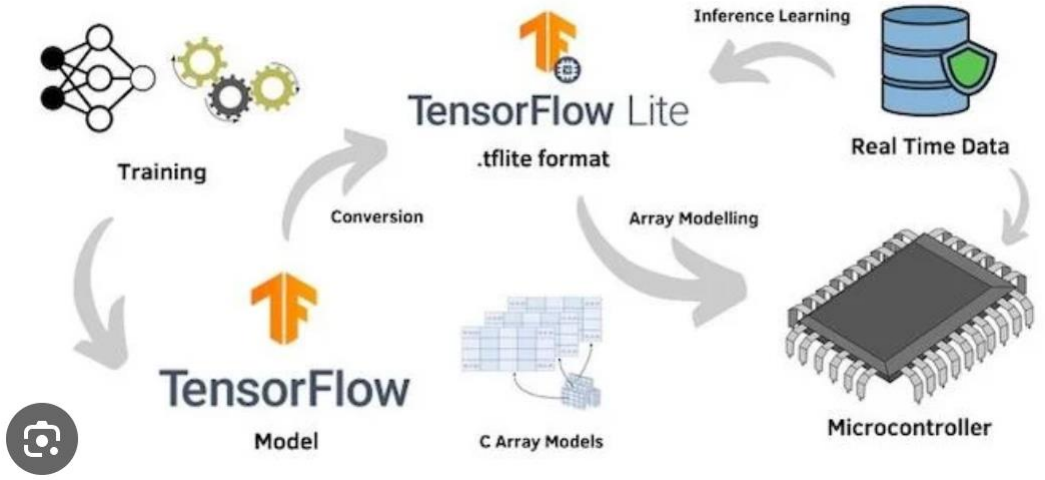
Embedded Artificial intelligence (AI): Implementation

Machine Learning (invatarea autómata) la scară mică este definită în sens larg ca un domeniu în rapidă creștere al tehnologiilor și aplicațiilor de învățare automată, incluzând:

- hardware,
- algoritmi,

software capabil să efectueze analize ale datelor senzorilor pe dispozitiv la o putere extrem de redusă (în intervalul mW și sub acesta) tinyml.org,





https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/what-is-tinyml/

Embedded Artificial intelligence (AI)

TensorFlow Lite with Arduino Nano 33 BLE Sense	Raspberry PI AI HAT	NVIDIA	Google
TensorFlow for Microcontrollers	Compatible AI frameworks like TensorFlow and PyTorch.	NVIDIA® Jetson Nano	Google Coral Dev Board

TensorFlow Lite

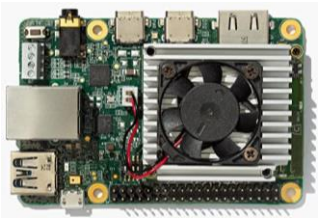






JetPack 5.1.1

Adds support for Jetson AGX Orin 64GB, Jetson Orin NX 8GB, Jetson Orin Nano 8GB, Jetson Orin Nano 4GB



API references

- PyCoral API (Python)
- Libcoral API (C++)
- Libedgetpu API (C++)

Digital Twins – Gemeni Digitali in retele electrice

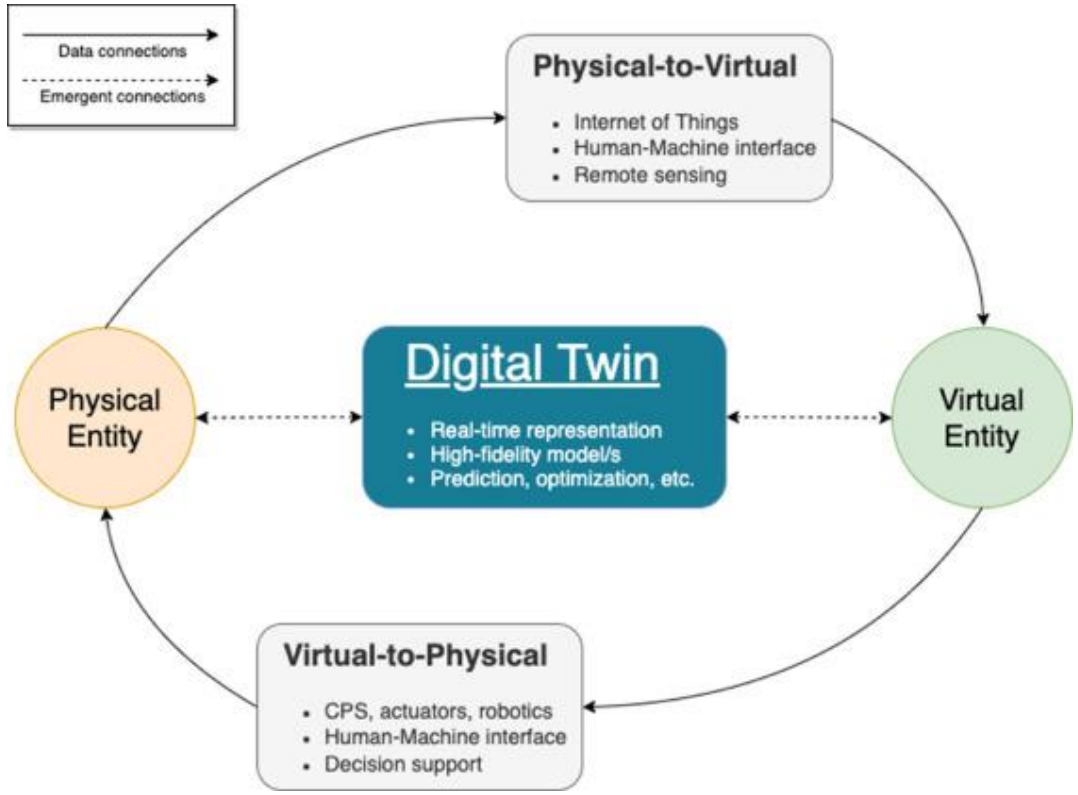
04

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Digital Twins (Gemeni Digitali) in Retele Energetice Inteligente

Conceptul DT (Gemeni Digitali)se referă la o reprezentare digitală a unei entități fizice care este capabilă să reflecte comportamentul său fizicprin aplicarea platformelor și interacțiunea bidirecțională a datelor în timp real.

- Prototipul DT este ilustrația tipului sau modelului geamănului fizic;
- Instanta DT este o instanță a entităților fizice conform prototipului DT.
- Un agregat DT este un grup de instanțe DT și alte agregate DT.

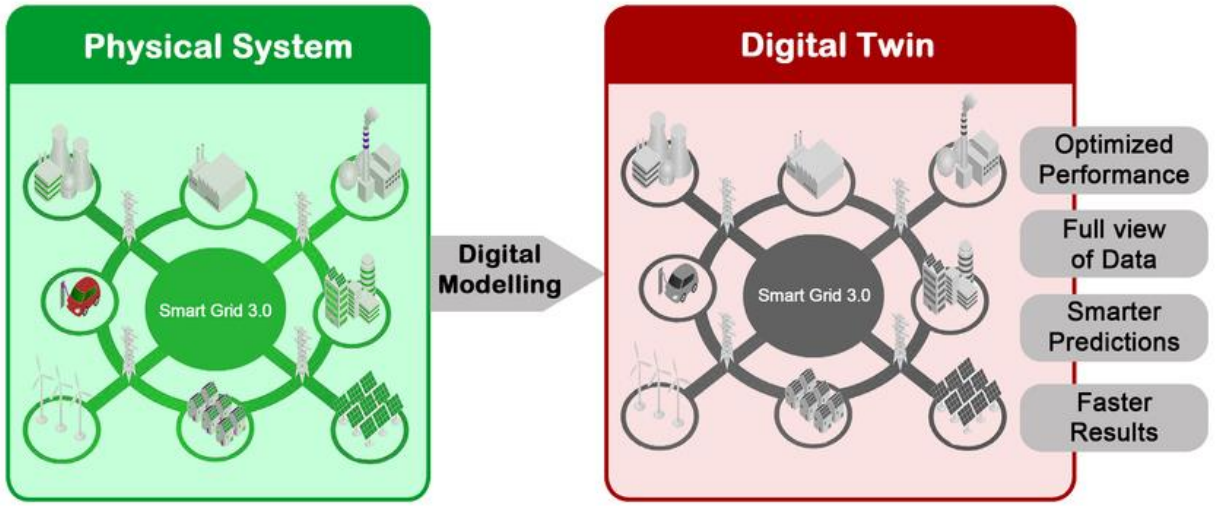


Digital Twins (Gemeni Digitali) in Retele Energetice Inteligente

Aplicatii DT:

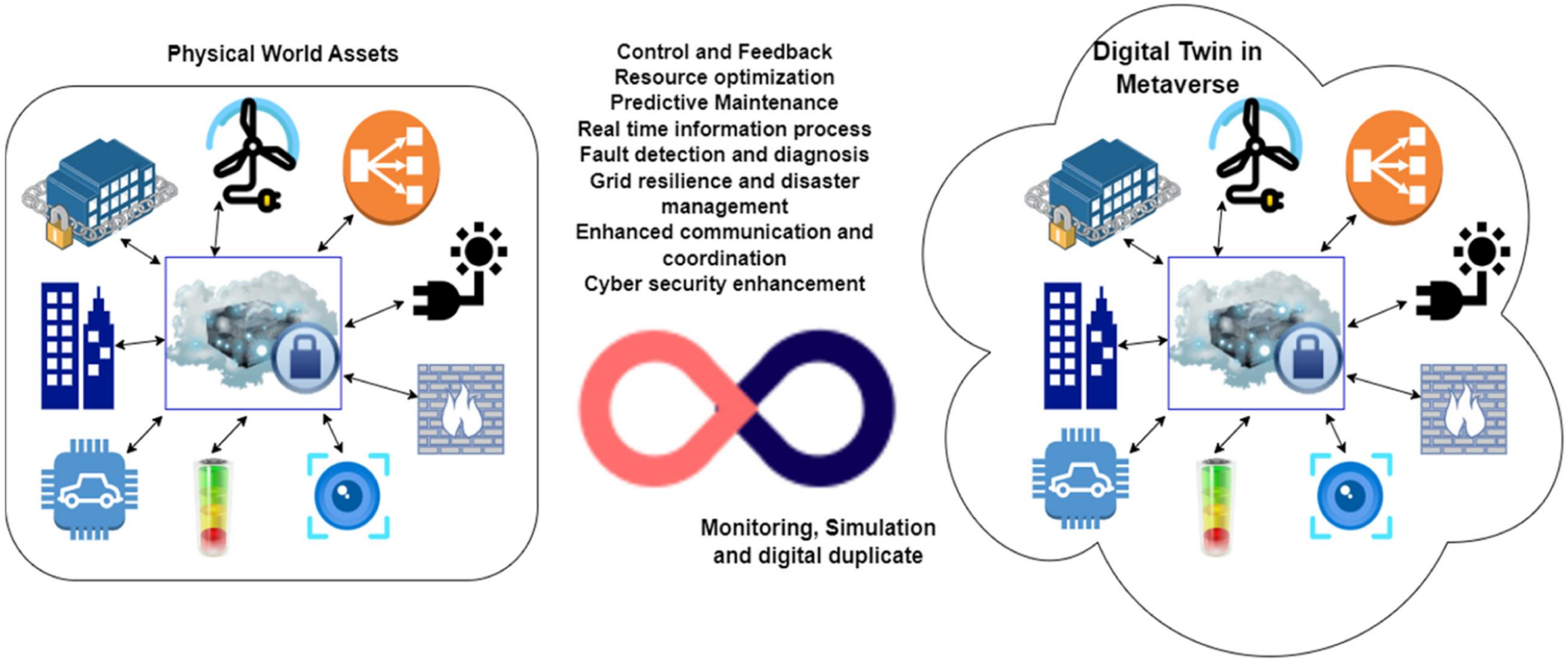
- Prognozarea cererii de energie pentru fiecare consumator prin abordări de învățare automată (ML) într-un DT de planificare și operare.
- Îmbunătățirea gestionării și distribuției rețelei utilizând modele de simulare bazate pe date în timp real pentru surse de energie distribuite.
- Îmbunătățirea reparării și întreținerii panourilor solare prin identificarea comportamentului anormal.
- Reparații și întreținere anticipate pentru parcurile eoliene, pentru a sprijini și asista echipele de service.

10.1109/ACCESS.2023.3241588



Gemenii digitali în digitalizarea rețelelor electrice inteligente

Senzori și actuatori inteligenți ca facilitatori DT



https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105850

Studii de Caz

05

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Senzori inteligenți pentru monitorizarea producerii de energie electrică

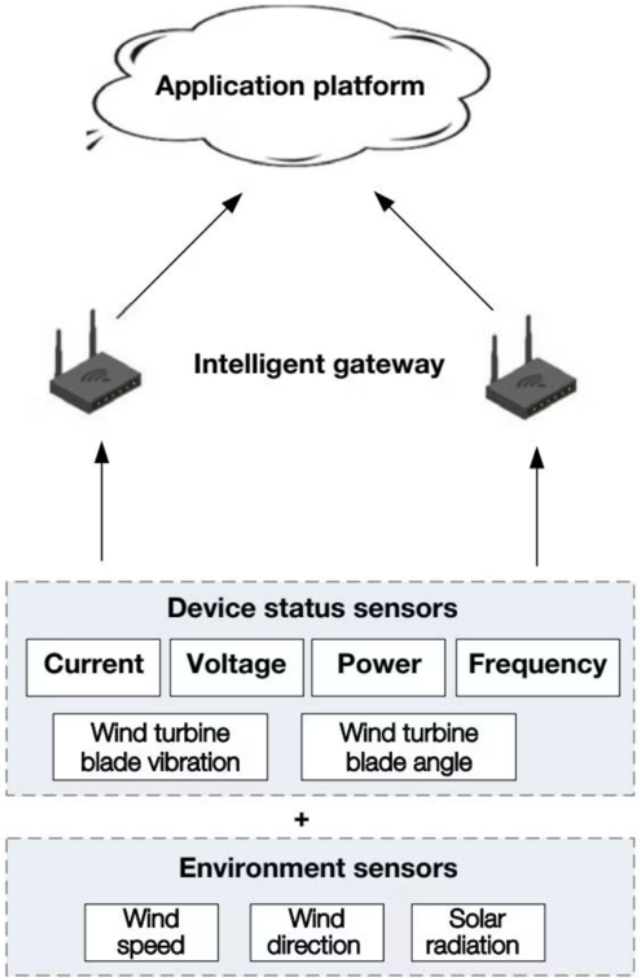
Solutia Existenta:

Senzorii inteligenti monitorizează liniile aeriene, cablurile subterane și turnurile de transmisie.

Senzorii de curent utilizează în general transformatoare, senzori de mișcare mecanică și senzori cu fibră optică, cu limitări în ceea ce privește acoperirea, dimensiunea și costul.

Solutia viitoare

Sensing se concentrează pe aplicații de energie regenerabilă cu senzori electrici, senzori de viteză/direcție a vântului, senzori de stare a turbinei, senzori de stare a palelor, senzori de radiație luminoasă și senzori de siguranță a mediului.



Senzori inteligenți pentru transmisia de energie

Senzorii inteligenti pentru transmisia de energie monitorizează liniile aeriene, cablurile subterane și turnurile de transmisie. Senzorii de curent utilizează în general transformatoare, senzori de mișcare mecanică și senzori cu fibră optică, cu limitări în ceea ce privește acoperirea, dimensiunea și costul.

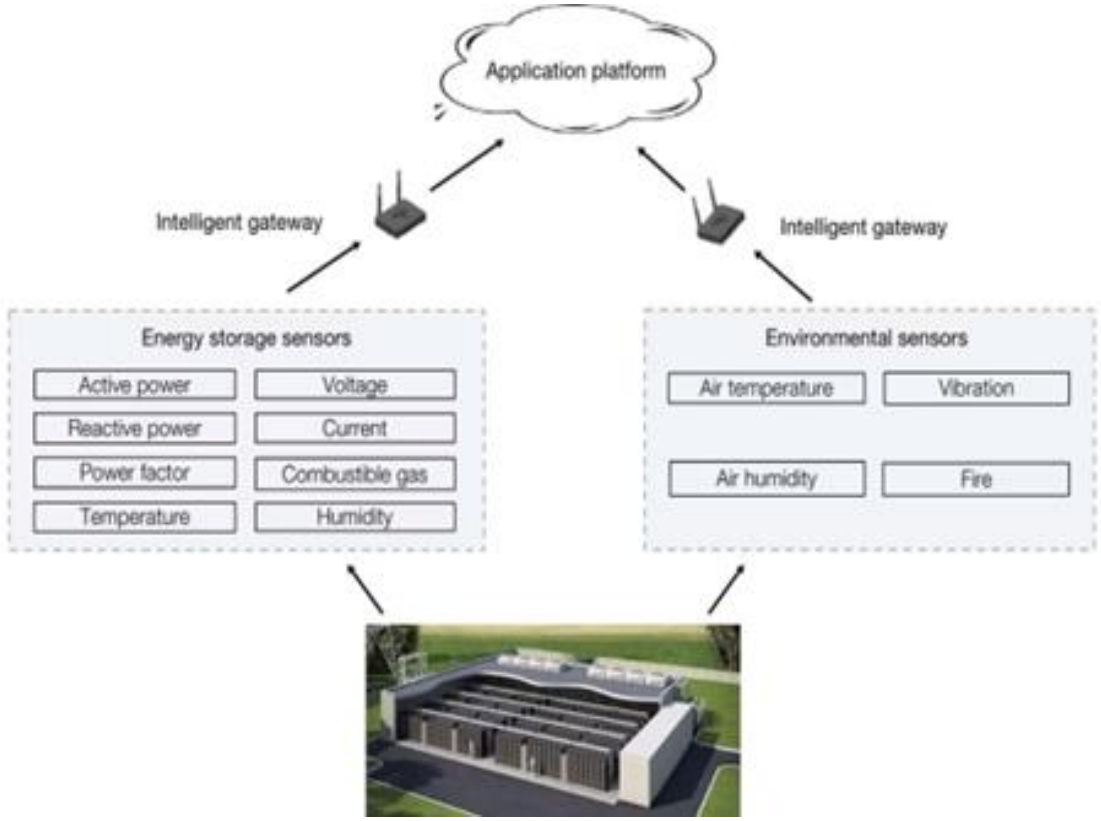
Monitorizarea liniilor:
Curent, tensiune, temperatură, vibrații, arcuri electrice, acoperire cu gheață, detectarea fulgerelor pentru sisteme aeriene și subterane

Monitorizarea turnului
Unghiul de înclinare, temperatura accesoriilor metalice, starea de poluare a izolatorilor pentru integritatea structurală

Monitorizarea echipamentelor
Starea transformatorului, a dulapului de distribuție, a întrerupătorului, a descărcătorului și a condensatorului prin intermediul mai multor tipuri de senzori

Energy Storage System

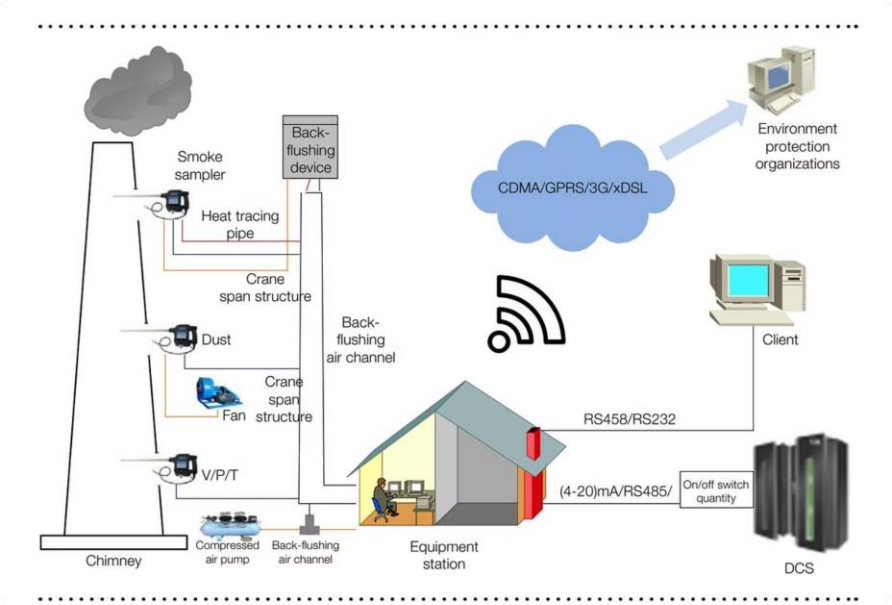
Senzorii inteligenti asociati stocarii energiei monitorizează temperatura și capacitatea reziduală a bateriilor și supercondensatoarelor.

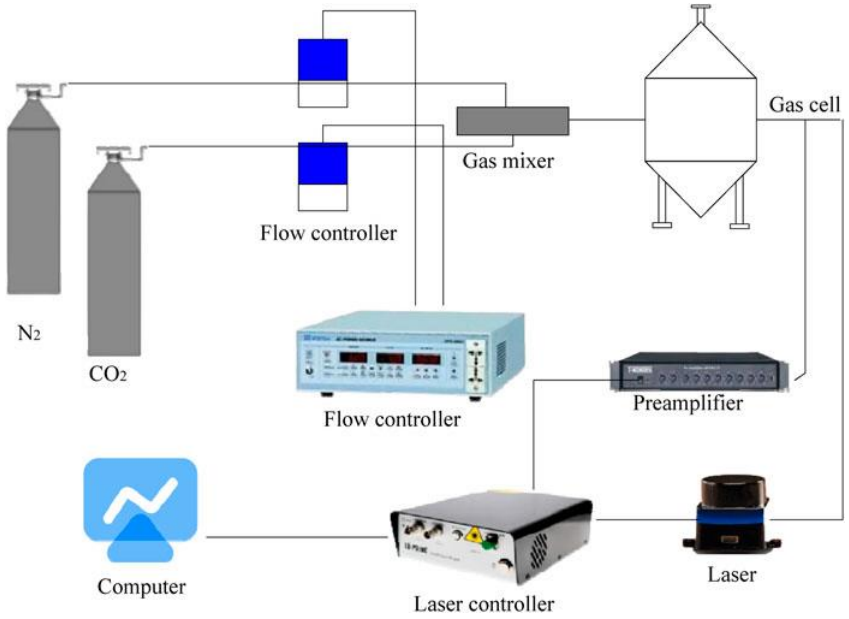


Capacitati de Monitorizare

Temperatura bateriei, umiditatea, gazele combustibile, condițiile micrometeorologice, accelerația și vibrațiile pentru evaluarea în timp real a stării de sănătate

Carbon Emission Monitoring





Analizoare bazate pe UV: neafectate de interferențele apei, gamă dinamică largă, nu este necesară uscarea probeiSpectrometre IR cu transformată Fourier: măsoară mai multe componente în timp real, sensibile la concentrații extrem de scăzute de gaz

Spectroscopia de absorbție bazata pela diodă Laser reglabilă (TDLA) este o metodă de detectare a gazelor care utilizează un laser reglabil pentru a măsura concentrația anumitor gaze (în acest caz, CO2 și N2).

Conclusions

06

iscte INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Concluzii

❖ **Sistemele de senzorii Inteligenti**

- reprezintă o tehnologie de vârf care poate satisface cerințele rețelelor inteligente, aflată în continuă evoluție, integrând vaste surse de energie regenerabile pentru o eficiență, flexibilitate și siguranță mai ridicate.
- sunt asociati mãosurarii fluxului de energie, controlului flexibil al generării și încărcării de energie, detectarii în timp util a evenimentelor din rețea, si a evaluarii în timp real a stării echipamentelor.

❖ **Sistemele de Senzori inteligenti** asociat rețelelor electrice

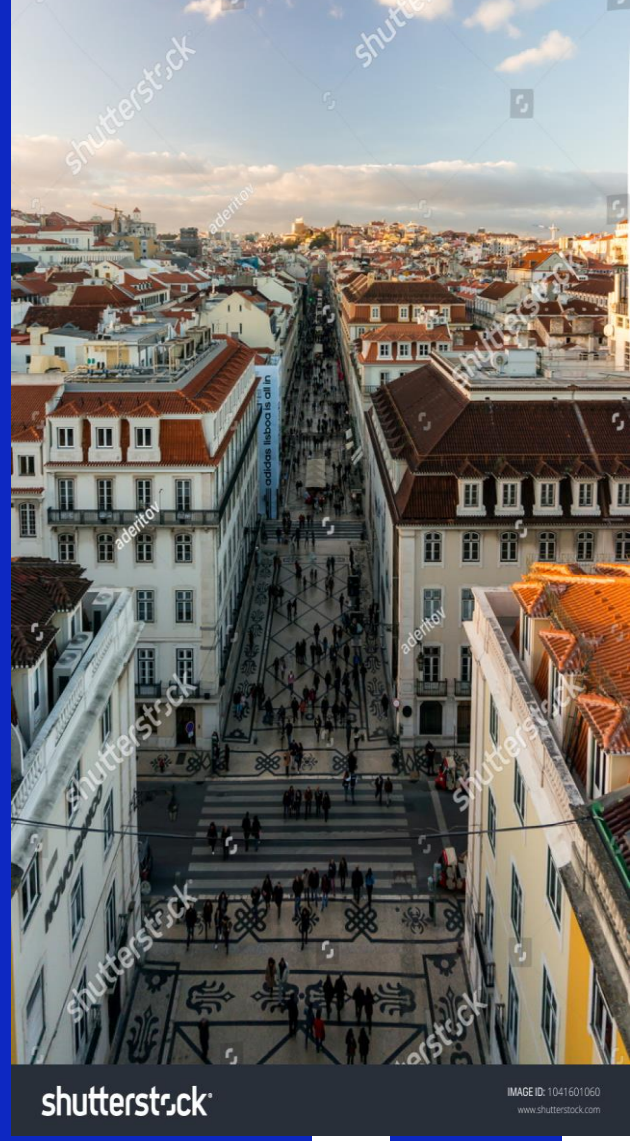
- implică integrarea diferitelor tehnologii precum WSN, IoT, IA, cu support in platformele computationale de tipo edge, fog și cloud.
- sunt aplicați cu succes în domeniile generării, transportului, transformării, distribuției și consumului de energie electrică, unde cerințele de standardizare sunt destul de ridicate.

❖ **Implementarea IA** la nivelul sistemelor de senzori inteligenti continua sa fie o provocare.

❖ Din perspectiva gestionării și monitorizării energiei, **tehnologia DT** (gemenii digitali) permite sistemelor și operatorilor să ia decizii optime și mai eficiente.

INSTITUTO UNIVERSITÁRIO DE LISBOA

Multumesc Mult!



Cluj, November 5th, 2025 | Technical University of Cluj Napoca Lisbon