

Ion Cristian POPA

Mihăiță LINCĂ

Ion Cristian POPA

Mihăiță LINCĂ

**PROIECTAREA CENTRALELOR
FOTOVOLTAICE ȘI ANALIZA UNOR ASPECTE
SPECIFICE**



**EDITURA UNIVERSITARIA
CRAIOVA, 2026**

Referenți științifici:

Prof.univ.dr. ing. Alexandru BITOLEANU

Prof.univ.dr. ing. Mihaela POPESCU

Copyright © 2026 Editura Universitaria

Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României

Popa, Ion Cristian

Proiectarea centralelor fotovoltaice și analiza unor aspecte specifice /

Ion Cristian Popa, Mihăiță Lincă. - Craiova : Universitaria, 2026

Conține bibliografie

ISBN 978-606-14-2253-1

I. Lincă, Mihăiță

621.3

© 2026 by Editura Universitaria

Această carte este protejată prin copyright. Reproducerea integrală sau parțială, multiplicarea prin orice mijloace și sub orice formă, cum ar fi xeroxarea, scanarea, transpunerea în format electronic sau audio, punerea la dispoziția publică, inclusiv prin internet sau rețele de calculatoare, stocarea permanentă sau temporară pe dispozitive sau sisteme cu posibilitatea recuperării informațiilor, cu scop comercial sau gratuit, precum și alte fapte similare săvârșite fără permisiunea scrisă a deținătorului copyrightului reprezintă o încălcare a legislației cu privire la protecția proprietății intelectuale și se pedepsesc penal și/sau civil în conformitate cu legile în vigoare.

INTRODUCERE

În ultima vreme, centralele bazate pe surse regenerabile de energie s-au dezvoltat în mod spectaculos și se regăsesc într-o multitudine de aplicații rezidențiale. Dintre acestea, o dezvoltare explozivă au avut și sistemele fotovoltaice [1] [2], a căror putere instalată la nivel mondial este de 177 GW [3]. Europa rămâne lider mondial în ceea ce privește capacitatea instalată în surse care utilizează panouri fotovoltaice (PV), cu 87,78 GW la finele anului 2014. Ulterior, s-a înregistrat o creștere anuală de cca 26 %, între 2016 și 2022 [4]. Astfel, puterea instalată la nivelul anului 2022 este de 1185 GW [5].

Dezvoltarea obținerii energiei electrice din surse regenerabile este o prioritate a politicilor UE [6]. Ca stat membru, România trebuia să atingă, până în anul 2020, obiectivul de 24 % din consumul de energie să provină din surse regenerabile.

Documente inițiale ale UE [7] prevedeau o țintă de 32 % energie regenerabilă consumată până în 2030, dar în 2023 ponderea vizată a fost majorată la 42,5 % [8] [9] [10].

Surse regenerabile de energie (SRE)

Sursele regenerabile de energie sunt integrate în rețelele electrice de distribuție, asigurând creșterea performanțelor prin [11]: îmbunătățirea profilului tensiunii, reducerea pierderilor, creșterea calității energiei electrice și a fiabilității alimentării utilizatorilor.

Producerea de energie electrică utilizând surse de energie distribuite de capacitate redusă, permite furnizarea de energie electrică în apropierea utilizatorilor, devenind astfel un suport pentru energia produsă centralizat, cu beneficii referitoare la reducerea pierderilor de energie electrică în timpul transportului și a costurilor generate de modernizarea rețelelor de distribuție [12]. În ceea ce îi privește pe utilizatori, costurile reduse, fiabilitatea ridicată, calitatea bună a energiei electrice și o anumită autonomie a rezervelor de energie, sunt aspectele care interesează în momentul adoptării soluției de producere a energiei din surse de energie distribuite, dar acest lucru este posibil numai cu investiții suplimentare.

Surse regenerabile de energie și generarea distribuită

În ultimii ani, conceptul surselor de energie distribuită (DER - Distributed Energy Resources), care permite instalarea și conectarea surselor de energie regenerabile la rețelele electrice de distribuție, a câștigat tot mai mult teren datorită beneficiilor tehnice, economice și de mediu [13]. Printre aceste surse de generare distribuită, centralele fotovoltaice (PV) au avut un rol important în sistemele electroenergetice [14], [15].

Termenul de generare distribuită se referă la generarea de energie electrică în apropierea locului de consum, prin generatoare de putere mică, conectate uzual la rețeaua electrică de distribuție. Într-un mod mai comun, generarea distribuită poate fi definită ca o generare de energie electrică în rețelele electrice de distribuție la utilizator, având ca scop asigurarea unor surse de energie electrică activă.

Prin utilizarea generării distribuite în domeniul tehnologiilor energetice regenerabile, se reduce impactul negativ asupra mediului [16].

Sistemul de generare distribuită se compune din:

- generatoare alimentate din surse regenerabile de energie (SRE) – excepție făcând hidrocentralele mari ($P > 10$ MW) și centrale eoliene de mare putere;
- sisteme de cogenerare sau sisteme CHP (Combined Heat and Power) – pentru producerea combinată de energie termică și energie electrică (cogenerare);
- generatoare de rezervă – în situațiile în care generarea centralizată nu corespunde cerințelor, nevoilor sau are un cost ridicat.

În practică, generarea distribuită presupune unități de generare de putere relativ mică, amplasate în apropierea utilizatorului, cu scopul de a satisface nevoile acestuia, a sprijini funcționarea rețelei deja existente. Puterea acestor generatoare se încadrează, în general, în limita a maxim 50 MW [17].

Dintre sursele regenerabile de energie utilizate cu succes în generarea de energie electrică, fac parte: energia eoliană, energia solară, hidroenergia, energia geotermică, energia de biomasă.

Implementarea surselor de energie regenerabilă în sistemul energetic național reprezintă o prioritate a politicii în domeniul energetic.

Una din utilizările radiației solare o constituie transformarea acesteia în electricitate prin intermediul conversiei fotovoltaice. Termenul de "pilă"

fotovoltaică (în sensul pilă electrică) este foarte frecvent utilizat pentru a desemna celula fotovoltaică, deși aceasta furnizează energie electrică numai în prezența radiației solare și nu poate stoca energie [18].

Evoluția surselor fotovoltaice

Din analiză, evoluția capacității centralelor fotovoltaice în România în perioada 2018-2023, Figura 1 [18].

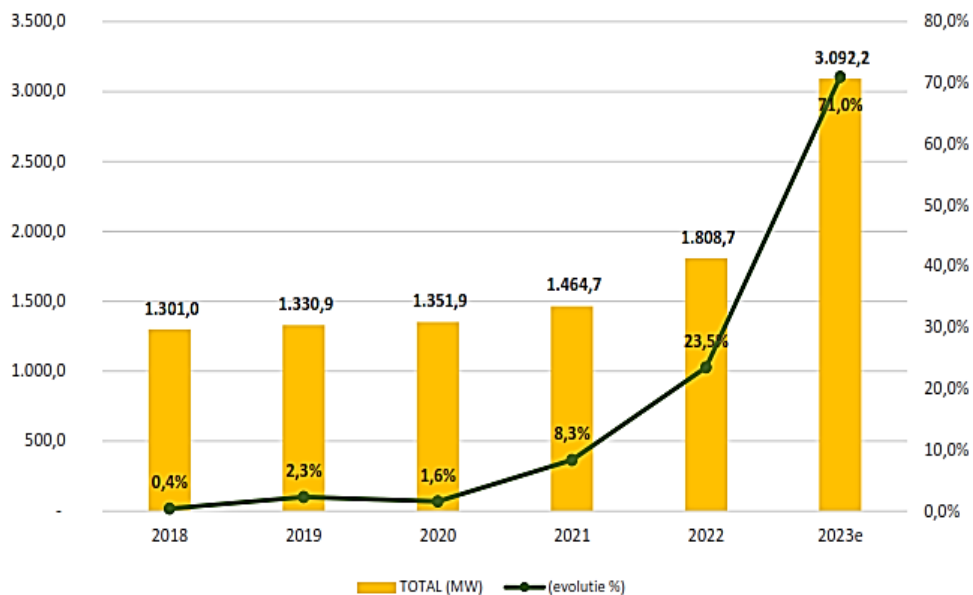


Figura 1. Evoluția capacității centralelor fotovoltaice în Romania în perioada 2018–2023

Se observă că, în anul 2018, puterea instalată a surselor fotovoltaice era de 1301 MW, în anul 2023 s-a ajuns la o putere instalată de 3092,2 MW, (ceea se înseamnă o creștere a capacității cumulată instalată cu 1791,2 MW), iar până în prezent creșterea continuă [19] [20].

România are un potențial semnificativ de producere a energiei electrice din surse regenerabile, aspect ilustrat în Tabelul 1, în care este prezentată evoluția capacităților din surse regenerabile și a puterii instalate în România, în perioada 2013–2023 [21] [22].

La sfârșitul anului 2023 capacitatea instalată acreditată în unitățile de producție a energiei din surse regenerabile a fost de 4653 MW. Evoluția puterii instalate în centralele fotovoltaice în perioada 2013–2023 arată o

dezvoltare puternică a acestui sector într-o perioadă de 10 ani, creștere care continuă și în prezent [21] [23] [24].

Tabelul 1. Evoluția capacității regenerabile și a puterii instalate în România în perioada 2013-2019

Surse regenerabile de energie	Producători E-SRE																						
	Număr												P _i [MW]										
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Centrale eoliene	60	64	66	67	67	66	66	63	59	53	53	2593	2810	2932	2963	2962	2961	2961	2960	2960	2960	2960	
Centrale hidroelectrice (<10 MW)	69	100	104	103	103	102	103	103	101	98	93	263	295	314	348	342	341	336	321	304	259	212	
Centrale pe bază de biomasă (toate tipurile de tehnologii, inclusiv cogenerare, deseuri municipale, ape uzate, etc.)	14	14	25	28	28	28	28	28	28	29	28	66	81	107	124	124	124	124	124	124	124	124	
Centrale fotovoltaice	370	403	514	577	576	576	573	568	558	554	552	1124	1217	1296	1360	1359	1359	1358	1358	1357	1357	1357	

În Figura 2 este prezentată structura capacității electrice acreditate instalată, pe tipuri de tehnologii regenerabile, la sfârșitul anului 2023 [21].

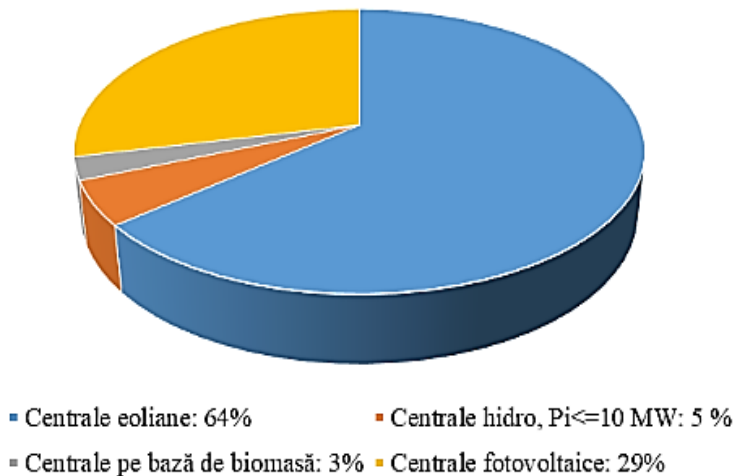


Figura 2. Structura capacității electrice acreditate instalată, pe tipuri de tehnologii regenerabile, la sfârșitul anului 2023

Concomitent cu creșterea ponderii centralelor electrice eoliene și fotovoltaice conectate la SEN au apărut și fenomene nedorite care afectează stabilitatea acestuia și determină creșterea tensiunii în imediata vecinătate a centralei. Acest ultim aspect este caracteristic centralelor electrice fotovoltaice instalate în gospodării individuale.

Cartea abordează elemente specifice de proiectare și exploatare a centralelor electrice fotovoltaice, și valorifică experiența autorilor, de peste 15 ani, inclusiv partea de implementare a proiectelor realizate.

Lucrarea este structurată pe 8 capitole (din care 5 de fond), inclusiv determinări experimentale care susțin dezvoltările teoretice anterioare.

Primele trei capitole elaborate pe baza literaturii de specialitate, prezintă elementele comune specifice centralelor electrice fotovoltaice, care reprezintă fundamentul și sunt necesare dezvoltărilor ulterioare.

Capitolul 1 prezintă structura de putere a centralelor electrice fotovoltaice și rolul elementelor componente, precum și sistemele fotovoltaice care integrează atât partea de forță și de comandă cât și partea informațională.

Cerințele privind racordarea la rețeaua electrică de distribuție a centralelor electrice fotovoltaice sunt tratate în capitolul 2.

Urmărindu-se o tratare graduală a problematicii proiectării centralelor fotovoltaice, capitolul următor prezintă elementele teoretice fundamentale în proiectarea centralelor fotovoltaice.

Capitolul 4 abordează o problemă de actualitate în domeniu, și anume dimensionarea optimală a sistemului fotovoltaic în raport cu suprafața de teren prestabilită. Problema de optimizare este unidimensională, în care variabila este reprezentată de unghiul de înclinație al panourilor față de orizontală iar criteriul de performanță este maximizarea energiei electrice produsă de 1 kWp în primul an de exploatare, dacă pierderile sunt de 5,4%. Se utilizează un algoritm iterativ de căutare aleatorie obținându-se o valoare maximă de 1422 kWh, care corespunde unghiului optim de înclinare de 37°.

Proiectarea unei centrale electrice fotovoltaice de mare putere cu performanțe superioare este tratată în capitolul 5, în care sunt prezentate caracteristicile locației de amplasare și alegerea elementelor componente (panourile fotovoltaice și numărul acestora, invertoarele și transformatorul de distribuție). După alegerea invertoarelor, fiecare cu 2 intrări MPPT, se stabilește structura de conectare a panourilor și numărul invertoarelor,

rezultând un număr de 48 de invertoare și 4032 de panouri. Panourile sunt conectate câte 21 în serie rezultând 4 șiruri conectate în paralel, fiecărui inverter fiindu-i alocate 84 panouri, iar puterea de vârf debitată de centrala fotovoltaică este 1008 kW. În consecință, s-a ales transformatorul de distribuție cu puterea nominală de 1250 kVA, 0,4/20 kV, în conexiune Dy11.

Capitolul 6 descrie algoritmul de proiectare a unei centrale electrice fotovoltaice de mică putere destinată unei gospodării private. În prima parte se parcurg aceleași etape ca și în capitolul precedent, dar rezultatele sunt cantitativ și calitativ diferite. Astfel, inverterul ales are 4 intrări MPPT, iar structura sistemului fotovoltaic constă în 108 panouri conectate câte 18 în serie, respectiv 6 șiruri conectate în paralel. Șirurile sunt distribuite pe cele 4 intrări MPPT astfel: MPPT 1 și 2 – câte două șiruri, iar MPPT 3 și 4 – câte un șir.

Fundamentarea unui algoritm care să evidențieze un fenomen relevat experimental, cu efecte negative asupra consumatorilor și stabilității rețelei precum și aplicarea acestuia pentru centrala proiectată în capitolul anterior este prezentată în capitolul 7.

Ultimul capitol de fond prezintă, în prima parte, o sinteză a rezultatelor experimentale obținute pe cele două centrale proiectate în capitolele 5 și 6.

A 2-a parte a capitolului prezintă și analizează determinările experimentale, realizate de către autori în cadrul sarcinilor de serviciu pe 4 sisteme amplasate în condiții și puteri diferite. Obiectivul determinărilor îl constituie validarea tuturor rezultatelor și interpretărilor din capitolul 7.

Anexele, în număr de 3, prezintă implementarea proiectului din Cap. 6 și detaliază rezultatele din Cap. 7 și 8.

Contribuția autorilor:

Dr. ing. Ion Cristian Popa – cap. 1, 2, 3, 4, 5, 6 și 7.

Conf.dr.ing. Mihăiță Lincă – cap. 7 și 8.

1 ELEMENTE FUNDAMENTALE PRIVIND CONSTRUCȚIA ȘI FUNCȚIONAREA CENTRALELOR ELECTRICE FOTOVOLTAICE

1.1 STRUCTURA CENTRALELOR FOTOVOLTAICE

În funcție de modul în care se face conversia c.c.-c.a., centralele fotovoltaice se clasifică în centralele fotovoltaice simplu etaj și multi-etaj, la care conversia se face în mai multe etaje [25] [26].

O centrală fotovoltaică este formată din [26]:

- generatorul fotovoltaic (PV);
- convertorul electronic de putere;
- interfața cu rețeaua electrică de distribuție.

Centrala fotovoltaică simplu etaj permite absorbirea puterii optime generate de panourile fotovoltaice prin reglarea punctului de putere maximă, ceea ce presupune – convertorul conectat între panourile fotovoltaice și invertor prevăzut cu controler MPPT (Maximum Power Point Tracking) [27] [28]. Controlerul MPPT este un variator de tensiune continuă ce absoarbe puterea maximă furnizată de panouri la un moment dat și o livrează invertorului la tensiunea nominală de intrare (sau corespunzător bateriei de acumulatori, dacă sistemul este dotat cu stocare). [27] [29] [30].

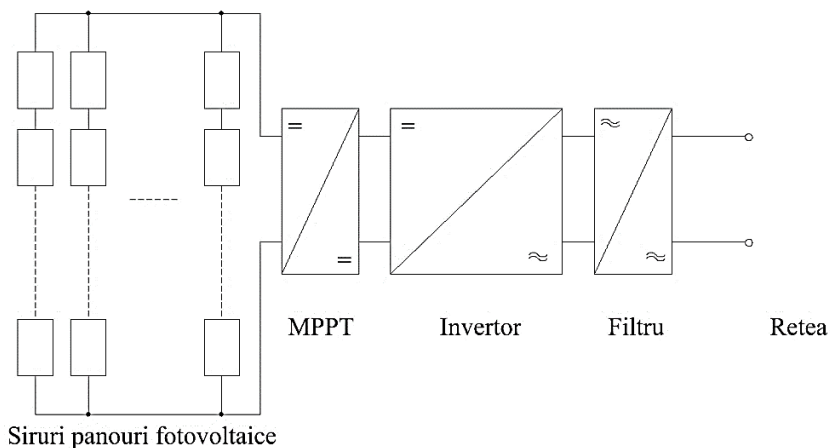


Figura 3. Schema bloc a unei centrale fotovoltaice simplu etaj

Așa cum se poate vedea din schema bloc a unei centrale fotovoltaice simplu etaj (Figura 3), ieșirea inverterului fotovoltaic este interfațată cu rețeaua electrică de distribuție, în punctul comun de conectare (PCC), printr-un filtru trece-jos și eventual, un transformator de separare. Filtrul de armonici, numit și filtru sinus este necesar pentru a avea la ieșirea sistemului fotovoltaic o tensiune sinusoidală (cu distorsiune foarte mică) [31] [32] [33] [34].

1.2 SISTEME FOTOVOLTAICE

Ansamblul compus din module fotovoltaice, dispozitive electronice de control și condiționare a energiei electrice, acumulatori și elemente de protecție este denumit sistem fotovoltaic. În funcție de particularitățile consumatorului de energie electrică, sistemele fotovoltaice pot fi divizate în sisteme autonome, conectate la rețea sau, sisteme hibride [30] [26]. Schema bloc a unui sistem fotovoltaic autonom este prezentat în Figura 4, săgețile indicând sensul de circulație al energiei.

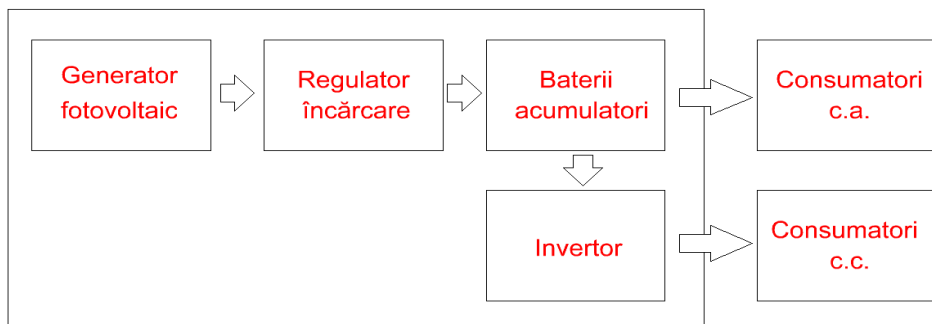


Figura 4. Structura unui sistem fotovoltaic autonom

Sistemele fotovoltaice autonome sunt utilizate în zone fără energie electrică. În principiu energia produsă de panourile solare este stocată în baterii, iar de acolo este furnizată cu ajutorul unui inverter utilizatorilor casnici la 230 V.

1.2.1 Generatorul fotovoltaic

În literatura de specialitate termenul de generator fotovoltaic se referă la elementele componente ale sursei de producere a energiei electrice de curent continuu, având ca sursă primară soarele.

În general, generatorul fotovoltaic este format din panouri fotovoltaice (matrice sau suprafață fotovoltaică).

1.2.1.1 Celulele fotovoltaice

Principiul de funcționare al celulelor fotovoltaice se bazează pe efectul fotovoltaic, adică, procesul de transformare a energiei solare în energie electrică [35] [36] [28].

Schema constructivă simplificată a unei celule fotovoltaice, având la bază material semiconductor de tip p, este prezentată în Figura 5 [37] [36] [38].

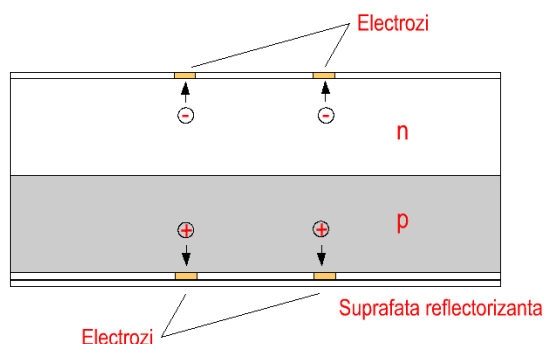


Figura 5. Schema constructivă simplificată a unei celule fotovoltaice

Celulele fotovoltaice sunt compuse din două sau mai multe straturi de material semiconductor, cel mai frecvent siliciu [39] [40] [41] [42] [43].

Curentul generat de o singură celulă este mic, de aceea se practică combinații serie – paralel ale acestora pentru a produce curenți suficient de mari. Combinațiile serie – paralel de celule sunt încapsulate în panouri care le oferă rezistență mecanică și la intemperii [30] [44].

Celulele fotovoltaice de construcție modernă produc energie electrică de putere ce depășește cu puțin un watt la tensiuni de 0,5÷0,6 V [45] [46].

1.2.1.2 Tipuri de celule fotovoltaice

a) Celule cristaline

La celulele fotovoltaice actuale randamentul este de cca 12 – 17 %. Adesea, fabricantul acordă o garanție la randament de 80 – 85 % (la puterea de vârf) după 20 ani.

Scăderea randamentului este cauzată de fenomene complexe, cum ar fi recombinarea purtătorilor de sarcină electrică [46] [37].

a₁) Celule cu siliciu mono-cristalin

Au, ca avantaj principal, randamentul foarte bun (cca. 17 %).

Dezavantajele constau în costul ridicat de producție și reducerea rapidă a randamentului la scăderea iradiației solare.

a₂) Celule cu siliciu policristalin

Au randament bun (cca. 13 %) și prețul de producție mai scăzut. Au același dezavantaj ca și cele cu siliciu mono-cristalin.

b) Celulele cu siliciu amorf

Aceste celule prezintă, ca și fenomen caracteristic, un grad mare de îmbătrânire, de până la 25 % în primul an de funcționare ca urmare a efectului Staebler-Wronski [47]. După cca. 1000 ore de expunere la soare, celulele ating un grad de saturare stabil [46] [37].



Figura 6. Celule fotovoltaice din siliciu: monocristalin, policristalin, amorf

Îmbătrânirea provoacă în timp modificarea parametrilor de funcționare a elementelor semiconductoare a celulelor fotovoltaice, provocând o scădere a randamentului pe parcursul vieții acestora (cca 20 ani) [46] [37].

1.2.1.3 Conectarea celulelor într-un modul fotovoltaic

Conexiunea serie a celulelor fotovoltaice este practică pentru a obține surse de tensiune mărită. Rezultatul este denumit șir sau string. Similar, pentru a permite curenți de sarcină mari, se utilizează conectarea celulelor în paralel.

Generatoarele fotovoltaice de putere mai mare sunt constituite din mai multe șiruri conectate în paralel [46].

1.2.2 Module fotovoltaice

Cea mai mică instalație electrică formată din celule fotovoltaice interconectate în serie și/sau în paralel, celulele sunt încapsulate pentru a obține o rezistență mecanică mai mare și pentru a proteja celulele în raport cu mediul, se numește modul fotovoltaic [30] [46].

Există două tipuri principale de module fotovoltaice:

- modulul plat, în care aria iradiată este acoperită cu celule fotovoltaice și care recepționează atât radiația solară directă, cât și pe cea difuză;
- modulul concentrator cu elemente optice (oglinzi, lentile), care concentrează lumina incidentă într-o arie mică, acoperită cu celule fotovoltaice și care necesită urmărirea soarelui pentru a avea radiație directă.

Construcția modulului fotovoltaic plat, Figura 7, este, de obicei, dreptunghiulară, suportul este din aluminiu anodizat și separat de structura laminată a celulelor cu căptușeală, care nu permite pătrunderea umezelii. Celulele fotovoltaice sunt protejate de acțiunea condițiilor nefavorabile, de un sistem ce constă dintr-un strat de sticlă și minimum din două straturi (pe ambele părți) din etilen vinil-acetat (EVA) sau polivinil butirol, Figura 7.

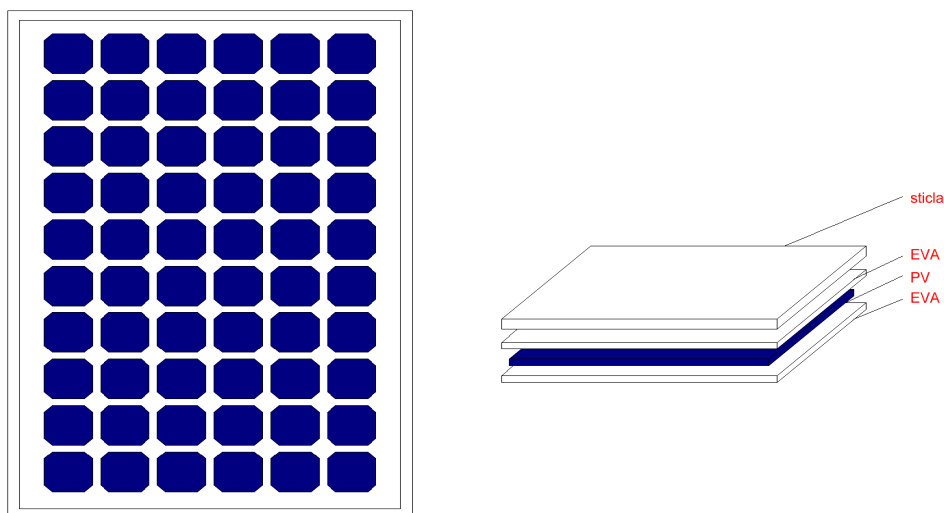


Figura 7. Schema constructivă a modulului fotovoltaic și încapsularea celulei fotovoltaice

Modulele plane sunt cele mai folosite deoarece au fiabilitate ridicată și durată de viață de 20–30 ani. Acestea se construiesc în straturi, pentru a proteja celulele fotovoltaice propriu-zise și pentru a obține rigidizarea ansamblului, Figura 8.

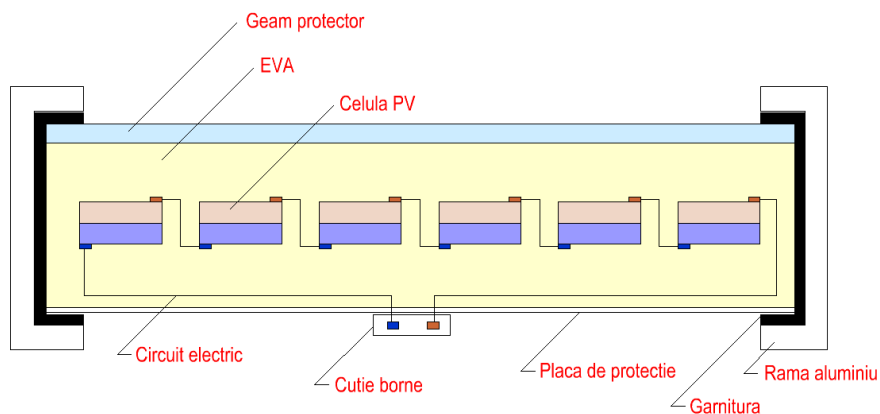


Figura 8. Secțiune printr-un modul fotovoltaic

1.2.3 Panouri fotovoltaice

Mai multe module conectate și rigidizate corespunzător, formează un panou fotovoltaic, Figura 9, [48].

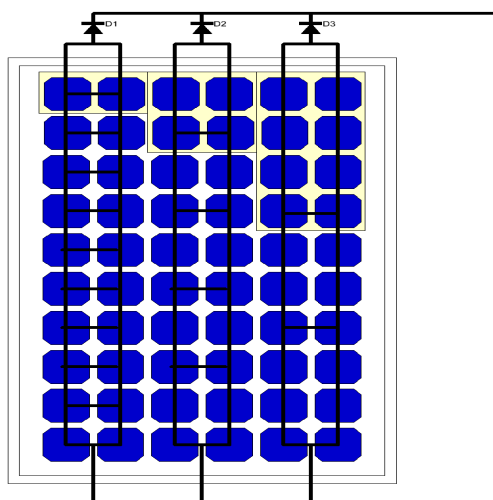


Figura 9. Schema de conexiuni a unui panou fotovoltaic compus din trei module