



A XVIII-a Conferință internațională – multidisciplinară  
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”  
CLUJ NAPOCA, 2018

## **ANALIZA PERFORMANTELOR REALIZATE DE O CENTRALĂ FOTOVOLTAICĂ PENTRU O PERIOADĂ DETERMINATĂ DE TIMP**

Mircea GRIGORIU, Marius Constantin POPESCU

### **ANALYSIS OF A PHOTOVOLTAIC CENTER FOR A PERIOD DETERMINED TIME**

The paper describes the main methods to identify the parameters' values over a time period for a photovoltaic plant, in order to highlight the eventual equipment's dysfunctions. For a real example of parameters computation, there are made the following selections: the meteorological and climatologic parameters are for a location from Romania, having latitude  $44^{\circ}14'7''N$  and longitude  $28^{\circ}33'19''$ ; the general characteristics of the apparatus and equipment are selected from the providers catalogues; as the period of time is selected a special period, June 2014 - May 2015, characterized by a reduced sunlight, with consequently reduced solar radiation provided for the photovoltaic collectors. For statistic computations there are utilized data obtained from The National Institute of Meteorology (INM) for a period of 10 years.

Key words: photovoltaic plant, measurements, analysis  
Cuvinte cheie: centrală fotovoltaică, măsurători, analiză

#### **1. Introducere**

Condiția primară producerii și consumului energiei electrice este că aceste acțiuni să se petreacă simultan. Nu există modalități de stocare a energiei electrice în cantități mari astfel încât să se poată face rezerve pe durate mai îndelungate de timp. Din punct de vedere economic, există doar posibilitatea stocării unor cantități de energie sub

formă de energie potențială a apei în centrale hidroelectrice cu acumulare prin pompaj sau în mari lacuri de acumulare. Ambele metode implică investiții însemnate și această energie este stocată pentru perioade de timp relativ reduse, fiind utilizată doar pentru echilibrarea pieței de energie în vederea preluării unor vârfuri de consum zilnic-orare uzuale sau a unor situații de deficit a unei surse de energie primară. În cazul altor surse regenerabile de energie (energia vântului sau radiației solare), posibilitățile de stocare sunt inexistente - situația face ca centralele electrice care exploatează aceste tipuri de energie să fie cele mai vulnerabile pe piața de energie, pentru că depind în totalitate de disponibilitatea momentană a sursei primare și de cererea momentană pe piață.

Ca urmare, estimarea caracteristicilor factorilor purtători ai energiei este esențială atât pentru stabilirea capacității și dimensiunilor centralelor și a tipului echipamentelor utilizabile. În cazul centralelor fotovoltaice, nivelului radiației solare pentru o perioadă semnificativă de timp este factorul determinant în proiectare și exploatare. În cazul proiectării și echipării centralelor fotovoltaice, se ia în considerație nivelul radiației solare pentru perioade semnificative de timp, cel puțin echivalente perioadei de funcționare garantată de producător. Sunt determinante valorile medii, dar și fluctuațiile lunare și zilnice. În acest fel, poate fi decisă eficiența amplasării centralei în locația analizată și echipamentele cu care trebuie să fie echipată. În cazul exploatării, analiza trebuie să ia în considerație valorile medii lunare și anuale, alături de restricțiile de debitare în Sistemul Energetic Național. Estimarea producției centralelor poate fi luată în considerație numai pentru perioade mai lungi de timp. Analiza eficiența exploatării unei centrale după producția dintr-un singur an poate conduce la rezultate eronate, acest an putând fi unul mediu, dar și un an de maximă sau minimă radiație solară.

În vederea stabilirii radiației medii oferite de Soare într-o anumită locație de pe Pământ, se identifică mai multe metode, rezultate din medierea unor măsurători directe pe durate relevante de timp sau din calcule teoretice, bazate pe poziția locației și pe deplasarea Pământului în jurul Soarelui.

Pentru a demonstra diferențele semnificative de radiație solară, au fost analizate valorile medii ale energiei radiante în perioada iunie 2014 – mai 2015, dovedită a fi de minimă radiație pentru o perioadă de referință analizată de 10 ani. Valorile radiației s-au stabilit pe trei căi: prin măsurători directe, efectuate chiar la locația centralei fotovoltaice; prin măsurători efectuate de către Institutul Național de Meteorologie (INM), la stația meteorologică cea mai apropiată de câmpul fotovoltaic;

prin calcul efectuat pe baza datelor geografice și topometrice din teren, ale datelor astronomice la locația dată.

Caracteristicile generale ale echipării pentru centrala ipotetică sunt: coordonate geografice (latitudine  $44^{\circ}14'7''N$ ; longitudine  $28^{\circ}33'19''$ ); unghiurile uzuale caracteristice ale modulelor instalate (azimut  $A_z = 30^{\circ}$  înclinație față de orizontală  $S = 30^{\circ}$ ); caracteristicile echipamentelor centralei [1, 2].

## 2. Determinarea nivelului radiației solare înregistrate

### 2.1 Prin măsurători directe, în situ

O centrală fotovoltaică trebuie să fie prevăzută cu sisteme de măsurare și colectare a datelor meteorologice și electrice în timp real, cu transmitere la distanță, având un serviciu de monitorizare la distanță 365 zile/an.

Se presupune echiparea centralei cu echipamente de colectare și transformare a energiei de tip invertoare ASTRID – COPERNIC de 1,25 MW în cabine individuale și tablouri ASTRID [3]. Se presupune că tabloul comunică prin protocoale ModBus pe interfață RS485 [4], conform uzanțelor unor centrale de acest tip. Sistemul trebuie să aibă capacitatea de a măsura: parametrii electrice ai șirurilor de module (curent continuu și tensiuni); radiația solară pe șirul de panouri; temperatura panoului fotovoltaic ș.a. Sistemul poate transmite date și poate fi controlat de la distanță [5, 6, 7].

Locația aleasă a fost echipată cu aparatură de măsură, astfel încât se pot furniza valorile măsurate cu echipamentele instalate pe viitoarea locație a presupusei centrale pentru perioada aleasă, aprilie 2014, mai 2015, sunt indicate în tabelul 1.

Tabelul 1 Total anual  $E_{total} = 1654,27 kWh / m^2$

<b>Luna</b>	<i>VI 2014</i>	<i>VII 2014</i>	<i>VIII 2014</i>	<i>IX 2014</i>	<i>X 2014</i>	<i>XI 2014</i>	<i>XII 2014</i>
<b>Energie livrată kWh/m<sup>2</sup></b>	<i>159,70</i>	<i>213,04</i>	<i>210,93</i>	<i>170,57</i>	<i>120,19</i>	<i>52,96</i>	<i>52,31</i>
<b>Luna</b>	<i>I 2015</i>	<i>II 2015</i>	<i>III 2015</i>	<i>IV 2015</i>	<i>V 2015</i>		
<b>Energie livrată kWh/m<sup>2</sup></b>	<i>67,91</i>	<i>68,49</i>	<i>126,42</i>	<i>188,14</i>	<i>223,61</i>		

Din motive tehnice ale instalației, cca 3 % din întreaga radiație solară nu poate fi convertită în energie electrică, deci valoarea reală a energiei radiației solare convertibile este  $E_{real} = E_{total} \cdot 0,97 = 1604 kWh / m^2$

## 2.2 Măsurători efectuate de către INM

Cea mai apropiată stație meteorologică de locația aleasă este Stația meteorologică Constanța. Întrucât INM a efectuat măsurători sistematice pentru perioade mai lungi de timp, aceste date pot fi prelucrate ca valori medii multianuale, anuale și lunare. Au fost solicitate de la INM date pentru o perioadă de 10 ani.

Datele furnizate de INM pentru mediile zilnice ale puterii radiante recepționate de la Soare la Stația meteorologică Constanța, pe durata anilor 2006 – 2016, măsurate în kWh/m<sup>2</sup> și zi, sunt indicate în tabelul 2.

Întrucât aceste date cu numărul de zile ale fiecărei luni, s-au determinat valorile medii lunare ale mediile puterii radiante recepționate de la Soare la Stația meteorologică Constanța, pe durata anilor 2006 – 2016, măsurate în kWh/m<sup>2</sup> și lună calendaristică. Aceste valori sunt indicate în tabelul 3 [8]. Pentru completarea informației, întrucât la Constanța nu sunt disponibile toate datele referitoare la nivelul radiației solare, au fost analizate și duratele medii de strălucire solară pentru aceeași perioadă de timp. Rezultatele sunt prezentate în tabelul 4.

În continuare s-a efectuat însumarea orelor de strălucire a Soarelui pe durate similare celei analizate, aprilie 2014- mai 2015.

Rezultatele sunt prezentate în tabelul 5.

Se observă că anul aprilie 2014- mai 2015 a beneficiat de durata cea mai mică de strălucire din toată perioada de 11 ani analizată, conform datelor disponibile.

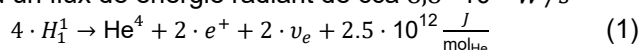
Tabelul 2

Radiația kwh/m <sup>2</sup>	Media lunară												Total
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
2006						7.043	6.422	6.06	4.601	2.735	1.587	1.462	29.91
2007	1.659	2.066	3.236	5.306	5.729	6.793	7.028	5.707	3.875	2.44	1.814	1.058	46.711
2008	1.416	2.102	3.12	4.196	6.037	6.498	6.498	6.03	3.47	2.848	1.386	1.033	44.634
2009	1.379	2.03	3.12	5.105	6.172	7.341	6.913	6.25	4.376	2.597	1.781	1.068	48.132
2010				5.126		6.338	6.743	6.268	4.176		1.941	1.396	31.988
2011		2.64	3.04			6.633	3.615			2.53	2.037	1.258	21.753
2012		2.723	3.968	5.274			6.723			2.917			21.605
2013	1.389	1.729	3.002	5.157	6.408	6.525	6.538	5.384	3.75	2.235	1.5449	1.324	44.985 9
2014	1.061	1.8644	3.16	3.908	5.738	5.507	6.203	5.702	4.073	2.485	1.196	1.008	41.905 4
2015		1.847				5.895	6.09	5.057	4.138	2.384			25.411
2016		1.985	2.733 4	4.584			6.705	5.52	4.529	1.864		1.361	29.281 4



### 3. Determinarea nivelului radiației solare

Determinarea teoretică, prin calcul, a nivelului radiației solare se poate realiza pe baza următoarelor categorii de date [9]: date geografice și topometrice din teren, date tehnice ale panourilor captatoare solare, date astronomice la locația câmpului fotovoltaic (unghiurile care dau poziționarea locației în fiecare perioadă a anului). Soarele este un astru de mărime mijlocie în interiorul căruia se produc reacții termonucleare de transformare a H în He, cu degajare continuă de energie, având un flux de energie radiant de cca  $8,8 \cdot 10^{25} \text{ W/s}$



Cantitatea de energie provenind de la Soare, care cade în unitatea de timp pe unitatea de suprafață, la o distanță de o unitate astronomică de 149,450,000 km de la centrul Soarelui, reprezintă densitatea de putere radiantă. La nivel planetar, valoare medie anuală a acesteia este numită constanta solară,  $I_0$ , și are valoarea calculate de  $1380 \text{ W/m}^2$  [10], ceea ce reprezintă cca  $33,3 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{zi}$ . Pentru România, valoarea medie este de  $1451 \text{ W/m}^2$ , iar în zona Constanța, valoarea poate ajunge la  $1600 \text{ W/m}^2$ . Relația de calcul este

$$I_\lambda = \int I_\lambda \cdot d\lambda, \quad (2)$$

unde  $I_\lambda$  este intensitatea de radiație având lungimea de undă  $\lambda$ , măsurată în  $(\text{W/m}^2 \cdot \mu\text{m})$ .

Partea principală de radiație solară este constituită dintr-o gamă continuă de radiație de lungime de undă  $\lambda = 0.1 \div 24 \mu\text{m}$ , reprezentând emisia straturilor superioare ale Soarelui, a căror temperatura a fost evaluată la cca  $5760^\circ\text{C}$ . Diferența dintre valoarea intensității radiației solară la limita atmosferei terestre și la nivelul mării se datorează fenomenelor de absorbție și difuzie: absorbției radiației solare de către gazele atmosferice; difuziei moleculare, datorată moleculelor elementelor din atmosferă, precum și particulelor fine de praf în suspensie atmosferică; difuziei datorată aerosolilor. Radiația solară globală cuprinde două componente: radiația directă și difuză. Pentru determinarea fluxurilor de radiație solară directă și difuză, se iau în considerație legile mișcărilor aparente ale Soarelui în raport cu un observator terestru, urmând a se calcula coordonatele Soarelui în orice punct de pe Pământ și în orice moment al zilei. Astfel, Zenitul, adică înălțimea Soarelui față de un reper de pe Pământ, notată  $h(\text{rad})$  se determină cu relația

$$\sin h = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos H. \quad (3)$$

Similar, Azimutul Soarelui în raport cu Sudul terestru  $A_z(\text{rad})$  se calculează cu relația

$$\sin A = \frac{\cos \delta \cdot \sin H}{\cosh} \quad (4)$$

Declinația Soarelui,  $\delta$ , variază în timpul unui an între valorile  $\delta \in [-23^{\circ}27' \div +23^{\circ}27']$ , valoarea la un moment dat putând fi extrasă din Efemeridele Astronomice. Pentru determinarea declinației, există și două metode analitice, diferențiate prin precizia de calcul.

$$\delta = 0.302 - 22.93 \cdot \cos(\omega \cdot d) - 0.229 \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot d) - 0.243 \cdot \cos(3 \cdot \omega \cdot d) + 3.851 \cdot \sin(\omega \cdot d) + 0.002 \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot d) - 0.0055 \cdot \sin(3 \cdot \omega \cdot d) \quad (5)$$

unde,  $\omega = \frac{2 \cdot \pi}{366}$  este viteza unghiulară, iar  $d$  este numărul de ordine al zilei din an.

Eroarea absolută al calculului declinației utilizând această relație este  $\Delta \delta = \pm 0.0035^{\circ} \div \pm 12.6''$ . O metodă mai rapidă de calcul al declinației, dar cu o marjă mai mare de eroare, folosește următoarea relație

$$\delta = 23.45 \cdot \cos(30 \cdot m + d - 202), \quad (6)$$

unde  $m$  este numărul de ordine al lunii din an, ( $m = 1 \div 12$ ) iar  $d$  este numărul de ordine al zilei în cursul unei luni ( $d = 1 \div 31$ ).

Coroborat cu celelalte considerații, rezultă o variație corelativă a fluxului de radiație solară care atinge Pământul de  $\pm 3.4$ . Deci, se poate exprima coeficientul de corecție de distanță prin relația

$$C = 1 + 0.034 \cdot \cos[30 \cdot (m - 1) + d]. \quad (7)$$

În final, se poate calcula fluxul direct și difuz de radiație pentru o suprafață plană poziționată la nivelul solului în funcție de două unghiuri:  $S^{\circ}$ - înclinația suprafeței captatorului față de orizontală pentru captator așezat orizontal);  $\gamma^{\circ}$ - înclinația Azimutului captatorului față de Sud  $S = 0^{\circ}$ - suprafață orizontală;  $S = 90^{\circ}$ - suprafață verticală;  $S = 180^{\circ}$ - suprafață întoarsă, cu spatele la Soare;  $\gamma = 0^{\circ}$  - suprafața înclinată spre Sud;  $\gamma = -90^{\circ}$ - suprafața înclinată spre Est;  $\gamma = +90^{\circ}$ - suprafața înclinată spre Vest;  $\gamma = 180^{\circ}$ - suprafața înclinată spre Nord.

Pentru calculul unghiului de incidență  $i$  al radiației solare se consideră un sistem de coordonate triortogonal drept, având axa 1 după verticala locului (Zenit), axa 2 îndreptată către Vest, iar axa 3 îndreptată către Sud. Se definește cosinusurile directe ale razelor polare ( $\cos v, \cos w, \cos s$ ) astfel:

$$\cos v = \sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos H, \quad \cos w = \sin A_z \cdot \cosh = \cos \delta \cdot \sin H$$

$$\cos S = \cos \delta \cdot \sin \phi \cdot \left( \sin H - \frac{\text{tg} \delta}{\text{tg} \phi} \right) \quad (8)$$

Cosinusurile directe ale normalei la suprafața de observație în același sistem de coordonate sunt date de relațiile

$$l = \cos S, \quad m = \sin \gamma \cdot \sin S \quad \text{și} \quad n = \cos \gamma \cdot \sin S$$

Unghiul de incidență al razei de soare față de o suprafață plană este dat de produsul scalar al vectorilor directori ai razei solare cu vectorii directori ai normalei la suprafața de captare.

$$\cos i = l \cdot \cos v + m \cdot \cos w + n \cdot \cos S \quad (9)$$

Pentru cazul unei suprafețe plane orizontale  $S = 0$ , cosinusul unghiului de incidență al razei versoare este  $\cos i = \cosh$ . Fluxul direct al radiației solare, perpendicular pe razele Soarelui are expresia

$$I = I_0 \cdot C \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-B}{\cosh}\right) = I_0 \cdot C \cdot \tau_D \frac{s}{m^2}, \quad (10)$$

unde  $I_0 = 1380 \frac{W}{m^2}$ ,  $A$ ,  $B$  – coeficienți de turbulență atmosferică;  $\tau_D = A \cdot \exp\left(\frac{-B}{\sinh}\right)$  - coeficient de transmisie al fluxului solar. Fluxul direct pe o suprafață de observație înclinată cu unghiul  $S$  față de orizontală și orientate cu unghiul  $\gamma$  în azimuth este dat de relația

$$P_D = I_0 \cdot C \cdot A \cdot \exp\left(\frac{-B}{\sinh}\right). \quad (11)$$

Coeficienții  $A, C$  sunt indicatori ai "clarității" cerului în ziua și la locul considerat, exprimând efectul de absorbție al radiației solare. În table sunt exprimate niște valori acceptate pentru acești coeficienți. Acest procedeu are un grad de aproximație superior măsurătorilor directe.

#### 4. Randamentul invertoarelor și panourilor soare

În tehnică, randamentul se definește prin raportarea unei puteri utile, obținută la capătul unui proces tehnic, la o putere consumată pentru realizarea respectivului proces tehnic. Randamentul echipamentelor principale ale unei centrale fotovoltaice se stabilește prin raportarea puterii furnizate de centrală către Sistemul Energetic Național, la puterea radiantă care este captată de către totalitatea panourile centralei. O măsură acceptabilă pentru energia lunară furnizată de o centrală fotovoltaică este măsurată reprezentată de energia acceptată pentru o centrală fotovoltaică de referință. În cazul centralelor existente, aflate în exploatare, această energie este tocmai energia injectată în rețeaua electrică, măsurată fie în incinta centralei, fie la punctul de conectare cu Sistemul Energetic Național. Pentru evitarea unor controverse, se poate accepta a doua variantă, măsurătoarea fiind efectuată de un operator independent de centrală. Pentru anul considerat de referință, iunie 2014 – mai 2015 această energie este indicată în tabelul 6. Energia lunară totală primită de la Soare de centrala fotovoltaică acceptată poate fi calculată multiplicând valorile nivelului radiației solare înregistrat în perioada iunie 2014 – mai 2015, indicate în tabelul 1, cu suprafața totală a panourilor captatoare de care dispune centrala ( $S = 16539 \text{ m}^2$ ), precizată anterior. Energia



totală anuală primită de la Soare de centrala fotovoltaică ar fi, conform ipotezelor acceptate, de 3.820,984 MWh.

Tabelul 6 Total energie produsă anual : 3.144,67 MWh

Luna	VI 2014	VII 2014	VIII 2014	IX 2014	X 2014	XI 2014	XII 2014
Energie livrată MWh	301,648	400,832	403,692	324,076	227,288	91,756	95,456
Luna	I 2015	II 2015	III 2015	IV 2015	V 2015		
Energie livrată MWh	128,87	141,34	245,30	360,26	425,15		

Ca urmare, randamentul centralei fotovoltaice are valoarea

$$\eta = \frac{P_{\text{electrica}}}{P_{\text{radianta}}} = \frac{3144.67}{3820.984} = 0.823 \quad (12)$$

adică:  $\eta = 82,3\%$

Teoretic, valorile probabile estimate pentru pierderile de putere înregistrate în timpul funcționării centralei fotovoltaice considerate sunt estimate pe baza experienței și ținând seama de tipul echipamentelor propuse a fi utilizate, astfel: pierderi datorate căldurii (temperatura prea mare) și slabei radiații (10.7%); pierderi datorate reflexiei panoului (3%); pierderi în cabluri electrice, invertoare și celelalte echipamente, cu excepția panourilor (14%).

## 5. Concluzii

- Cantitatea de energie produsă de o centrală fotovoltaică poate fi estimată ca o valoare medie multianuală și nu ca o valoare sigură, maximă sau medie. Pentru aceasta, este necesar să se cunoască date asupra locației centralei, caracteristicile echipamentelor cu care este echipată și date statistice asupra radiației solare pentru o perioadă cât mai întinsă de timp, astfel încât să se stabilească valori cât mai apropiate de cele medii multianuale.

- Parametrul care poate fi estimat cu precizie este randamentul centralei, estimat înainte de punerea în funcțiune (pe baza randamentelor furnizate de producătorii echipamentelor) sau determinat prin calcul după punere în funcțiune, pe baza măsurătorilor efectuate direct în cadrul centralei sau folosind facturile cu care este plătită energia furnizată de centrală.

Energia radiantă primită de la Soare, poate fi măsurată direct, poate fi măsurată, la stațiile meteorologice cele mai apropiate sau poate fi calculată pe baza datelor geografice și astronomice. Estimând valorile uzuale ale energiei produse în centrale fotovoltaice, s-a ajuns la un randament acceptabil pentru acest tip de centrale.

#### BIBLIOGRAFIE

- [1] \* \* \* Ningbo Qixin Solar Electrical Application Co., <http://www.nbqxsolar.com/en/about.php>, accesat ianuarie 2018.
- [2] \* \* \* SCADA Systems <https://www.engineersgarage.com/articles/scada-systems>, accesat ianuarie 2018.
- [3] \* \* \* Astrid Energy Entreprise SpA, accesat ianuarie 2018. <https://www.enfsolar.com/directory/component/16389/astrid-energy>
- [4] \* \* \* interfață ModBus RS485, accesat ianuarie 2018. [http://www.acdc-electronics.ro/interfata\\_modbus\\_master\\_rs485.pdf](http://www.acdc-electronics.ro/interfata_modbus_master_rs485.pdf).
- [5] Grigoriu, M., Popescu, M.C., Balas, V., Dinu, D.C., *Control Systems for Solar Energy Conversion*, Proceedings of the International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment (EEETE'10), pp.123–129, Bucharest, Romania, April 20-22, 2010.
- [6] Popescu, C., Grigoriu, M., Popescu, M.C., Popescu, L.G., Grofu, C.L., *Power Transformers Reliability Estimation Study*, Proceedings of the International Conference on Energy and Environment Technologies and Equipment (EEETE '10), pp.148–154, Bucharest, Romania, April 20-22, 2010.
- [7] Grigoriu, M., Popescu, M.C., Popescu, L.G., Dinu, D.C., Popescu, C., *A Wind Farm Balancing Analysis*, Proceedings of the 5<sup>th</sup> IASME/WSEAS International Conference on Energy & Environment (EE'10), Recent Advances in Energy & Environment, Published b6y WSEAS Press, pp.261-264, Cambridge, February 22-25, 2010.
- [8] Grigoriu, M., Raport de expertiză tehnică, București, 2015.
- [9] Duță, Gh., Niculescu, N., Stoenescu, P., ș.a. *Instalații de ventilare și condiționare*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [10] Lazăr, P., Popovici, T., Muntea, C., *Instalații de ventilare și climatizare*. Îndrumător. Institutul Politehnic, Cluj-Napoca, 1986.

Mircea GRIGORIU

<sup>1</sup>Politehnica University of Bucharest, Faculty of Power Engineering, 313, Splaiul Independenței, 060042, sector 6, Bucharest, Romania

Marius Constantin POPESCU

„Vasile Goldiș” Western University of Arad, Department of Engineering and Computer Science, 94-96 Revoluției Blvd., Arad, Romania