

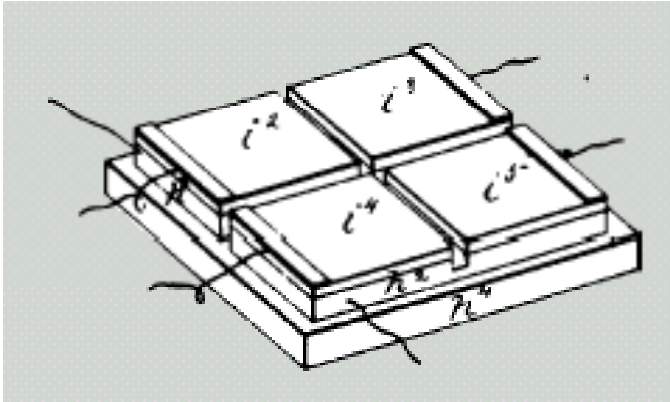
**PERSPECTIVE PENTRU PROGNOZA PUTERII
FURNIZATE DE CENTRALELE FOTOVOLTAICE**

Marius Paulescu

Universitatea de Vest din Timisoara

Viorel Bădescu

Universitatea Politehnica Bucuresti



1894 – Fritz patentează prima celulă solară



1953 - Chapin, Fueller și Pearson realizează prima celulă solară comercială (Bell Laboratories)



1960: Celulele solare sunt utilizate în principal la alimentarea sateliților

1970: Primele aplicații industriale

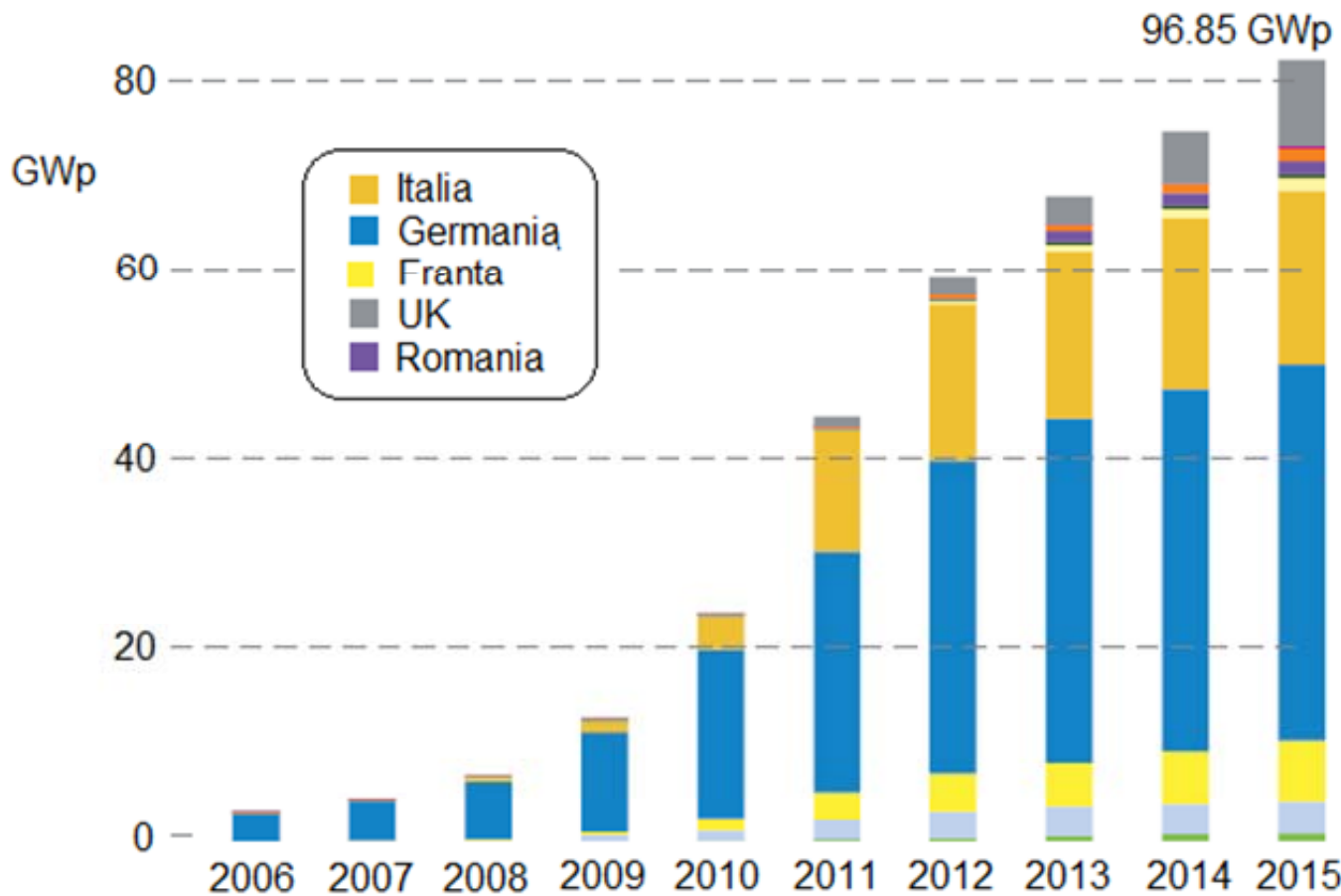
1980: Primele sisteme conectate în rețea.

1990: Expansiunea sistemelor integrate în clădiri

2000: Primele celule de înaltă eficiență (42%)

2010: Dezvoltarea explozivă a sectorului energetic fotovoltaic

Capacitatea PV instalată în Europa la sfarsitul anului 2015¹



ROMANIA

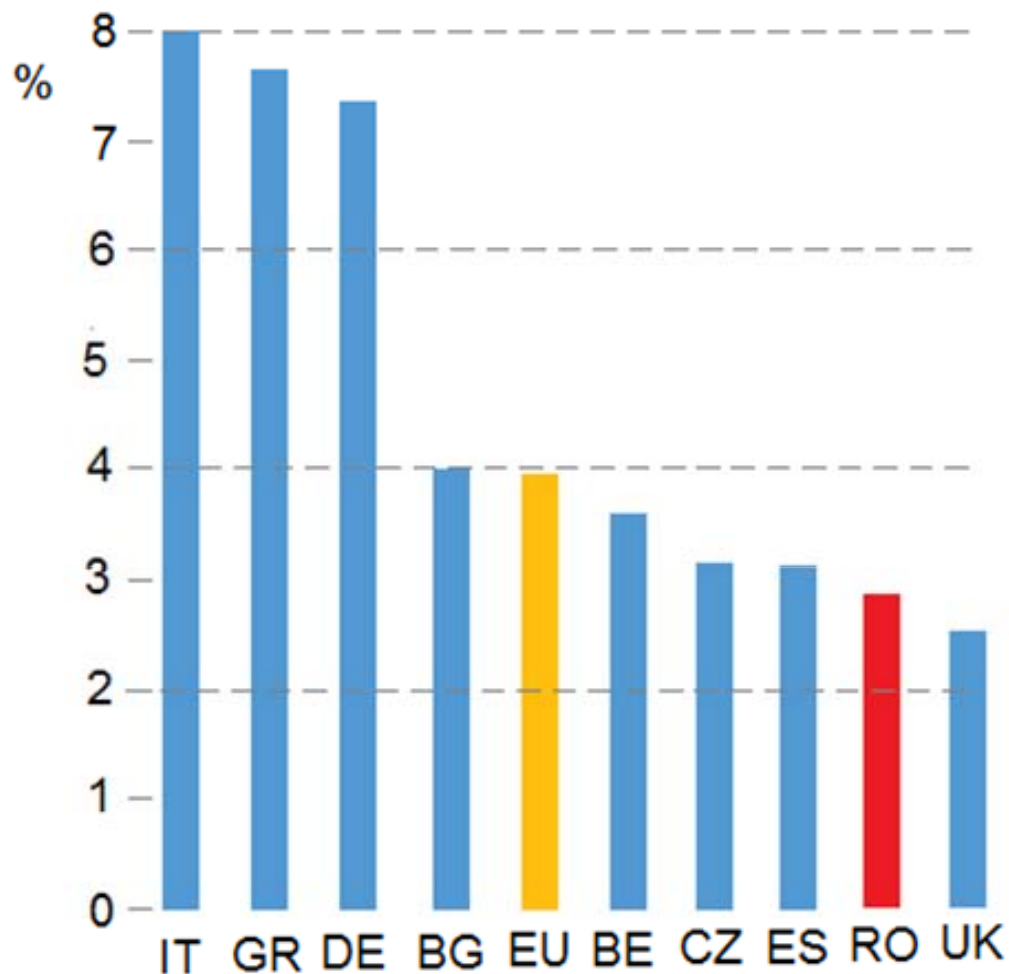
Date	Centrale PV operaționale
31.12.2011	< 2 MWp ²
15.04.2016	1 298 MWp ³

¹Solar Power Europe 2016

²Iacobescu F, Badescu V (2012) Renewable Energy 30, 117-125

³www.transelectrica.ro

Procentul din consumul de energie acoperit de centralele fotovoltaice în 2015 în diferite țări europene (sursa Solar Power Europe, 2016)

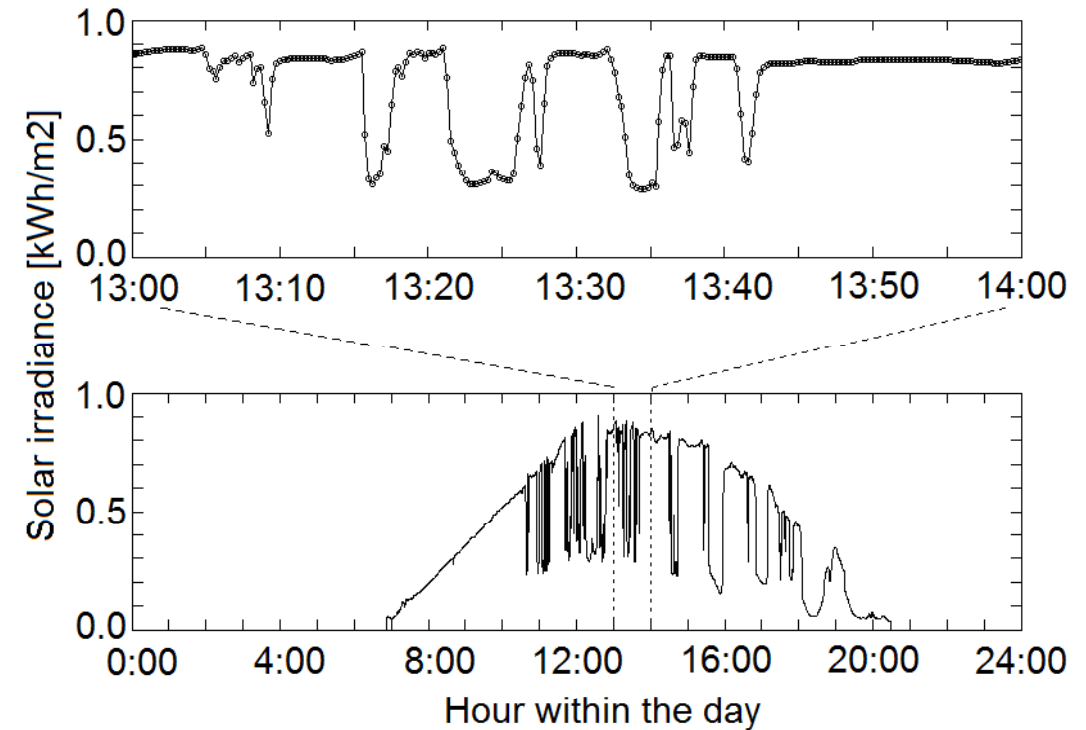


Rampa solară: variația puterii de ieșire a unei centrale fotovoltaice datorită variației rapide a irradianței solare

Centralele PV o amenințare la stabilitatea rețelei publice de distribuție a energiei electrice?

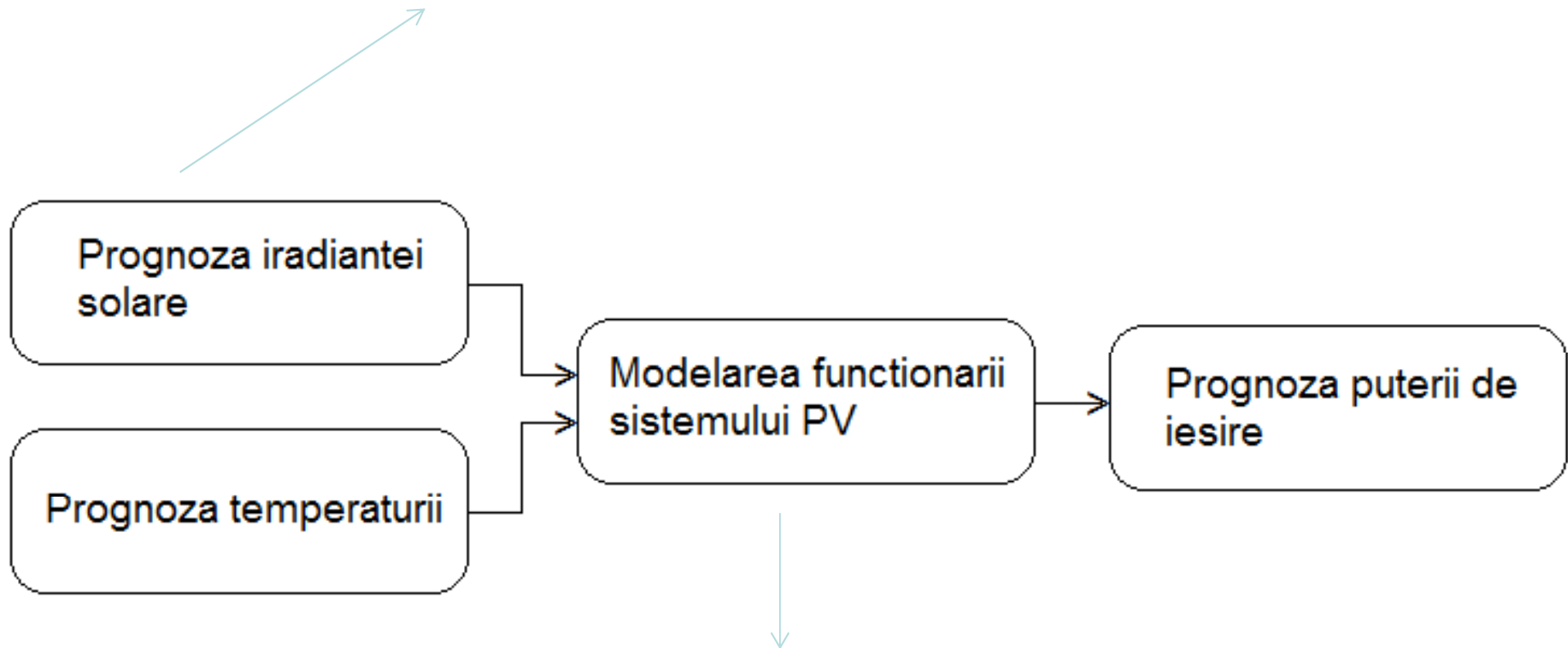
O soluție pentru integrarea pe scară largă a centralelor PV în rețea: **Prognoza cu acuratețe a energiei furnizate**

- Acuratețea prognozei puterii de ieșire a centralelor PV este determinată de acuratețea prognozei irradianței solare.
- Întrucât fluctuația regimului solar radiativ poate fi la o scară de timp de ordinul minutelor, prognoza de tip nowcasting a irradianței solare reprezintă o necesitate.



Iradianța solară măsurată cu eșantionare la 15 secunde în 20 iulie 2010 la Timisoara.

**Prognoza de tip nowcasting
a iradianței solare**



**Estimarea puterii de iesire
a unui sistem PV**

<http://solar.physics.uvt.ro/srms>

- In funcțiune din noiembrie 2008
- Include stațiile radiometrică, meteorologică și laboratorul PV
- **Singura stație radiometrică din Romania** care monitorizează radiația solară pe suprafețe orientate spațial.
- Prin conținut și eșantionarea fină (15 secunde), baza de date dezvoltată pe Platforma Solară reprezintă un **unicat în Romania**.

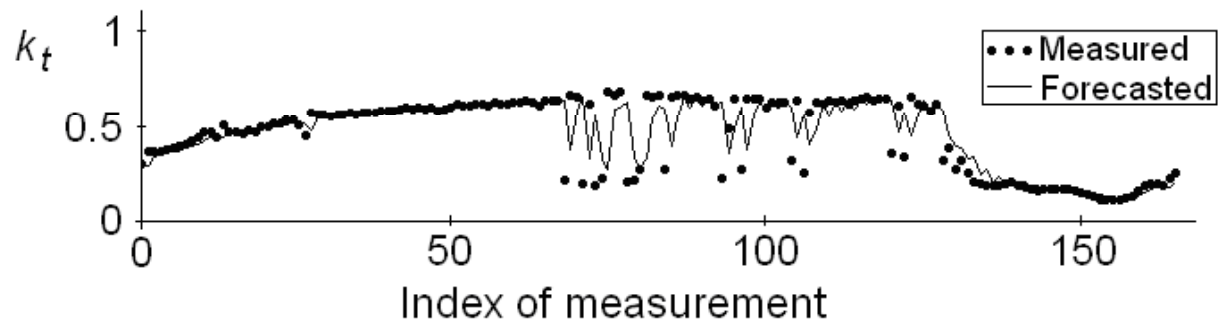


Proгноza iradianței solare pe termen scurt (0-3h) se bazează pe extrapoarea datelor măsurate

Procedura standard constă în prognозa indexului de claritate atmosferică

$$k_t = \frac{\text{Iradianta}_{\text{solara}}_{\text{masurata}}_{\text{la}}_{\text{sol}}}{\text{Iradianta}_{\text{solara}}_{\text{la}}_{\text{limita}}_{\text{superioara}}_{\text{a}}_{\text{atmosferei}}}$$

Indexul de claritate atmosferică măsurat și prognозat de modelul (ARIMA(2,1,2)) la un orizont de timp de 5 minute în July 17, 2010



O nouă procedură bazată pe indicatorul de însorire (SSN) a fost propusă în [1].

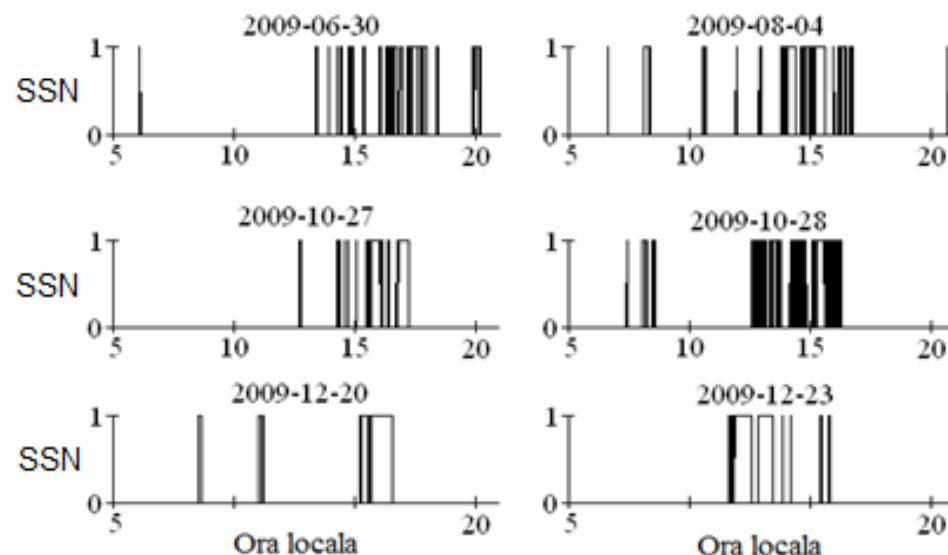
¹Paulescu M, Mares O, Paulescu E, Stefu N, Pacurar A et al. (2014) Energy Conversion and Management 79, 690-97

Indicatorul de însorire^{1,2} (SSN):

$$SSN = \begin{cases} 1 & \text{daca soarele straluceste} \\ 0 & \text{altfel} \end{cases}$$

SSN poate fi estimat în baza criteriului WMO privind pragul de strălucire a soarelui:

$$SSN = \begin{cases} 1 & \text{daca } Iradianta_directa > 120 \text{ W/m}^2 \\ 0 & \text{altfel} \end{cases}$$



Stabilitatea indicatorului de însorire SSSN² contorizează numărul de schimbări ale SSN într-un interval de timp:

$$SSSN_t \equiv \begin{cases} 1 & \text{daca } SSN_t < SSN_{t-1} \text{ (cand } SSN_1 = 1) \text{ sau } SSN_t > SSN_{t-1} \text{ (cand } SSN_1) = 0 \\ 0 & \text{altfel} \end{cases}$$

¹Badescu V (2002) Theoretical and Applied Climatology 72, 127-136

²Badescu V, Paulescu M (2011) Atmospheric Research 101, 194-204

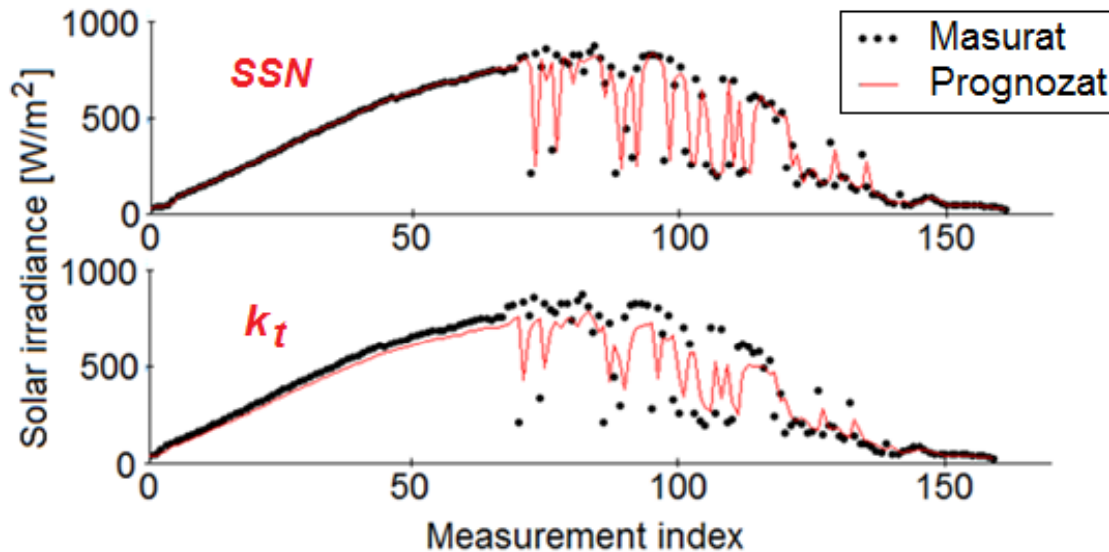
³Paulescu M, Badescu V (2011) Theoretical and Applied Climatology 103, 459-470

Ecuția modelului^{1,2}:

$$\hat{G}_t = \begin{cases} c_{cs} \cdot G_{0,t} & \text{if } SSN_t = 1 \\ \bar{\tau}_c \cdot G_{0,t} & \text{if } SSN_t = 0 \end{cases}$$

- $G_{0,t}$ - Irradianța solară estimată în condiții de cer senin
- $\bar{\tau}_c$ - Estimator dinamic pentru transmitanța norului
- c_{cs} - Corecție dinamică a transmitanței atmosferice
- $\bar{\tau}_c, c_{cs}$ - Sunt estimate într-un interval de timp egal cu orizontul de prognoză³

SSN este singurul parametru prognozat



Irradianța solară măsurată și prognozată în 3 august 2010 utilizând modelul cu două stări (SSN) și modelul standard (k_t)

¹Paulescu M, Mares O, Paulescu E, Stefu N, Pacurar A, Calinoiu D, Gravila P, Pop N, Boata R (2014) Energy Conversion and Management 79, 690-697.

²Paulescu M, Badescu V, Brabec M (2015) World Renewable Energy Congress, XIV, Bucuresti, Romania.

³Costa D, Mares O, American Institute of Physics, Convergence Proceedings 1634, 151-155.

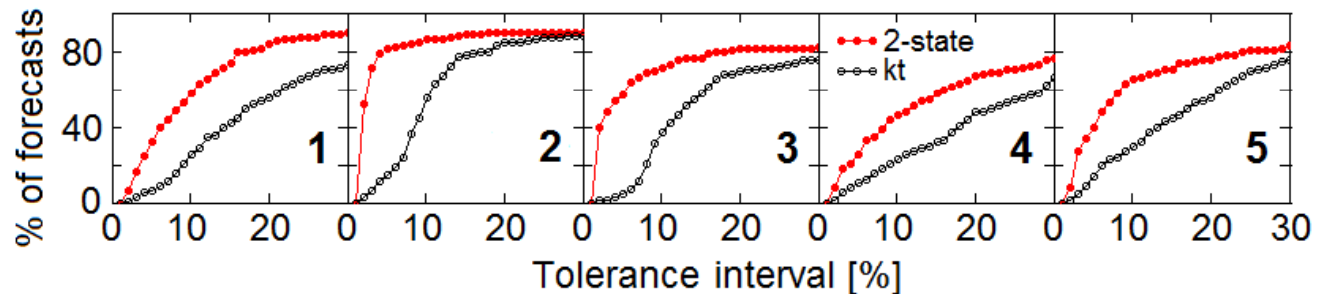
Performanța modelului cu două stări aplicat la prognoza iradianței solare la un orizont de timp de 5 minute în 5 zile din august 2010.

Indexul de claritate atmosferică a fost prognozat de modelul ARIMA(2,1,2).

Pe ultima coloană este procentul de prognoze reușite într-un interval de toleranță de 2.5%.

Procentul de prognoze reușite într-un interval de toleranță dat.

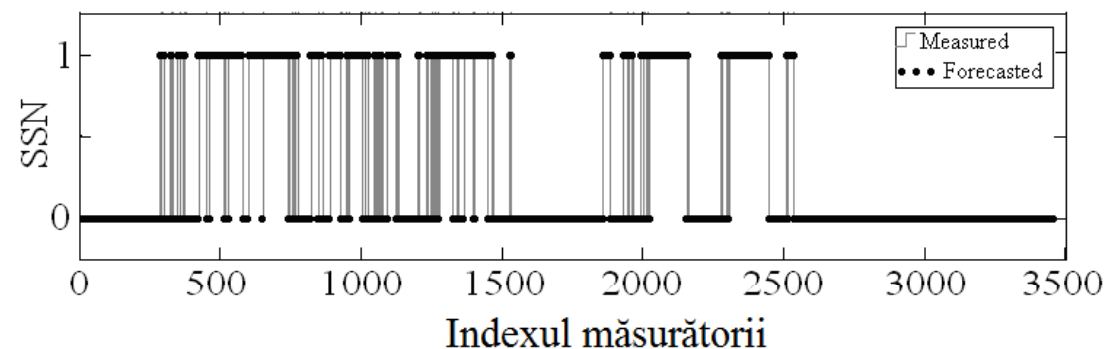
Data	Media SSN	Media SSSN	Model	$rMBE$	$rRMSE$	2.5%
01.08	0.300	0.0104	2-stari	0.008	0.335	20.9
			kt	-0.074	0.385	3.7
02.08	0.900	0.0055	2-stari	0.010	0.305	75.1
			kt	-0.061	0.289	8.8
03.08	0.654	0.0092	2-stari	-0.009	0.393	52.1
			kt	-0.052	0.346	1.8
04.08	0.492	0.0201	2-stari	-0.008	0.401	20.0
			kt	-0.070	0.398	6.3
05.08	0.328	0.0173	2-stari	-0.009	0.374	31.8
			kt	-0.065	0.382	8.2



Modele ARIMA: $(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d SSN_t = c + (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q) \varepsilon_t$

Modele aditive generalizate : $\pi_t \propto \alpha + \gamma UNGHI_INALTARE_t + \sum_{i=1}^I \beta_i SSN_{t-i} + \sum_{j=1}^J \delta_j SSSN_{t-j}$

Seria SSN măsurată și prognozată de către modelul ARIMA (2,0,2) în ziua de 21 iunie 2010 în Timisoara¹



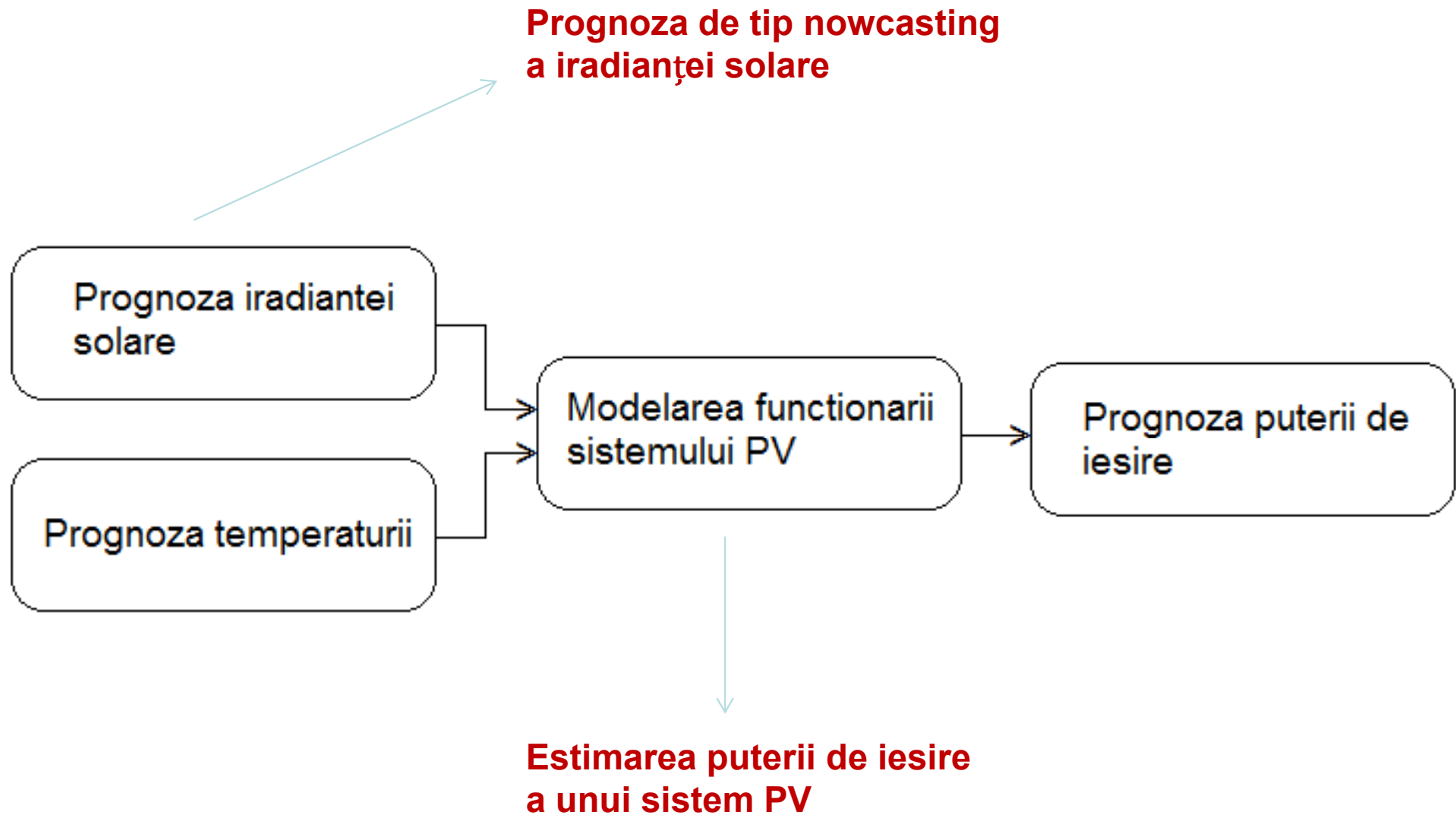
Acuratetea prognozei depinde de stabilitatea regimului solar radiativ^{2,3}

Month	January	March	June	September	December
RMSE	0.079	0.108	0.111	0.132	0.074
SSSN	0.0032	0.0062	0.0065	0.0090	0.0028

¹Paulescu M, Badescu V, Brabec M (2013) Energy 54, 104-111

²Brabec M, Badescu V, Paulescu M (2013) Meteorology and Atmospheric Physics 120, 61-71

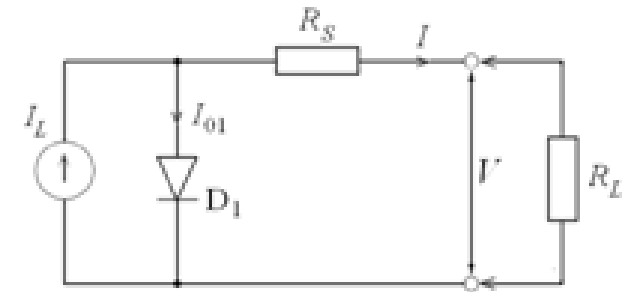
³Brabec M, Paulescu M, Badescu V (2014) Solar Energy 101, 272-282.



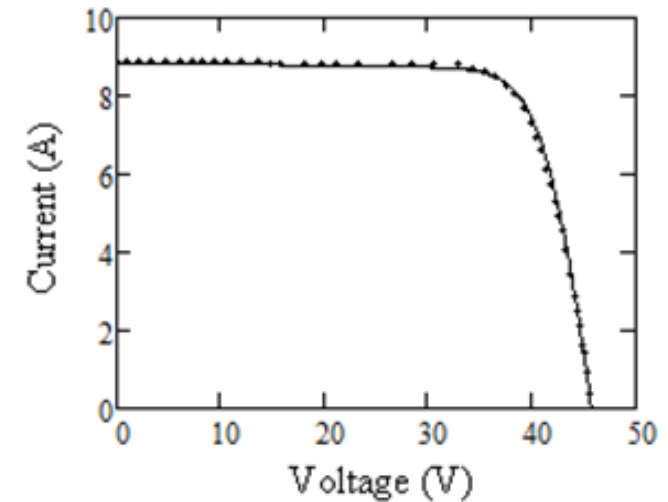
- STC –Standard Test Conditions- Iradianță 1000W/m², spectru AM1.5G, temperatura celulei 25°C
- Unii producători furnizează un set minimal de date in foaia de catalog a unui modul PV
- In general, caracteristica curent-tensiune este evaluată pe baza ecuatiei Shockley pentru celula solară:

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{e(V + IR_s)}{mk_B T}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p}$$

- Se generează un sistem puternic neliniar de de cinci ecuații cu cinci necunoscute (model 5-parametri)
- Procedura de rezolvare a sistemului propusă în [1] asigură convergența algoritmului numeric la soluția globală



Circuitul electric echivalent al celulei solare

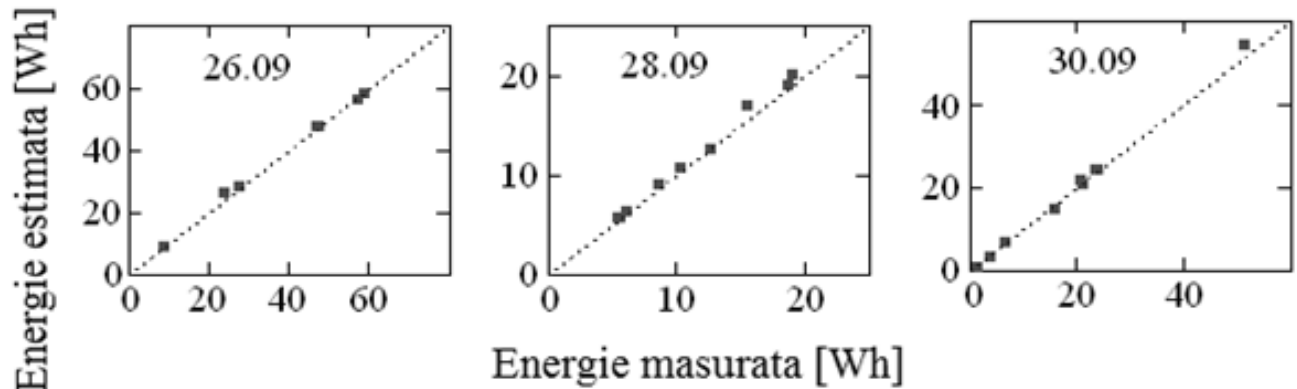


Caracteristica I-V estimată (linie) și măsurată (puncte) a unui modul PV comercial (Benqsolar) [1]

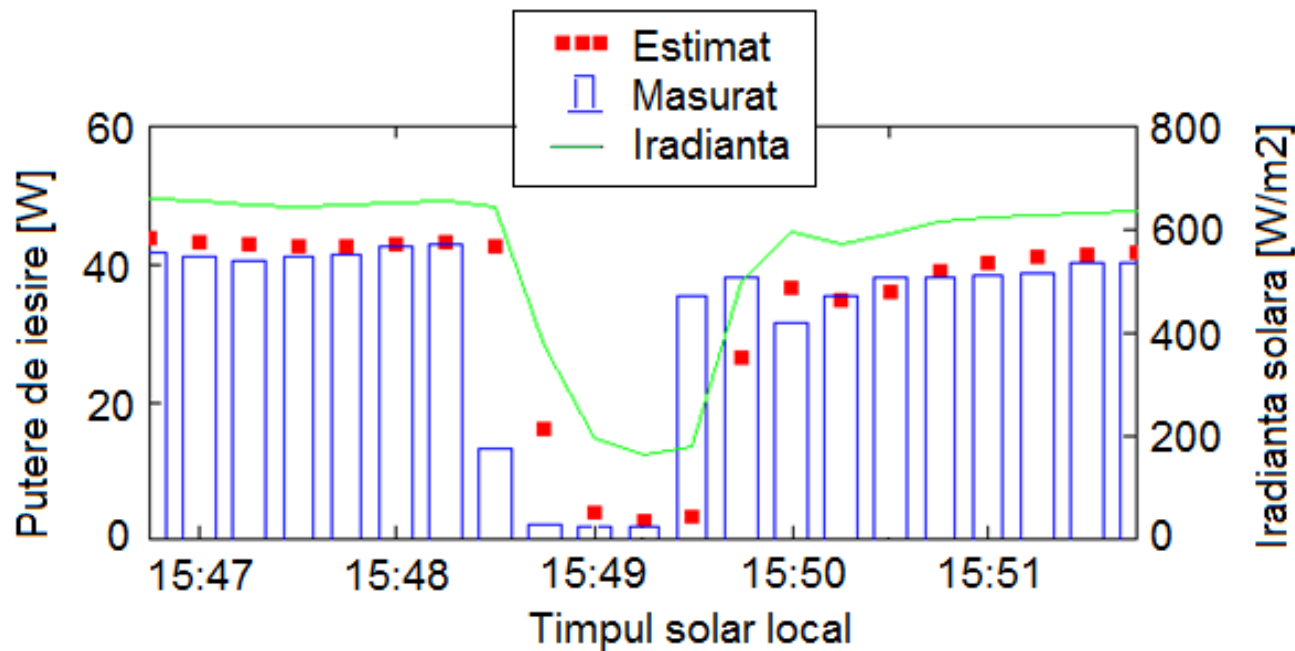
¹Mares O, Paulescu M, Bădescu V (2015) A simple but accurate procedure for solving the five-parameter model. Energy Conversion and Management 105, 139-148.



Estimarea puterii medii de ieșire a sistemelor PV



Energia furnizată de sistemul PV-R în tranșe orare în trei zile din septembrie 2012 [1].



Secvență de 21 de măsurători în ziua de 26 septembrie 2012 în care este evidentiat un scurt moment în care soarele este acoperit de nor [1]

¹Paulescu M, Badescu V, Dughir C (2014) New procedure and field-tests to assess photovoltaic module performance. Energy 70, 49-57.

In domeniul prognozei iradianței solare:

- Prognozarea cu acuratețe a puterii de ieșire a centralelor fotovoltaice poate contribui la integrarea pe scară largă a centralelor fotovoltaice în rețele inteligente de distribuție a energiei electrice.
- Acuratețea prognozei puterii de ieșire a unui sistem fotovoltaic este direct dependentă de acuratețea prognozei iradianței solare.
- Modelul cu două stări generează prognoze de calitate pe termen scurt. Acuratețea modelului cu două stări este dependentă de stabilitatea regimului solar radiativ.
- Chiar dacă multe eforturi au fost dedicate îmbunătățirii prognozei indicatorului de însorire, în continuare sunt necesare cercetări pentru a reduce persistența în prognoza indicatorului.

In domeniul modelării sistemului PV

- Necesitatea prezentării în foile de catalog ale modulelor fotovoltaice a caracteristicii I-V la STC
- Dezvoltarea de senzori pentru măsurarea densității fluxului de energie luminoasă în bandă largă cu timp de răspuns rapid