

**Sistem integrat pentru caracterizarea și evaluarea performanțelor sistemelor fotovoltaice
(SICEPV)
Raport de etapă
Decembrie 2016**

Etapă I. Studiu asupra sistemelor integrate pentru caracterizarea și evaluarea performanțelor sistemelor fotovoltaice

Modelări și simulări SPICE/Matlab a diferitelor celule și module fotovoltaice. Influența variației radiației solare și a variației temperaturii asupra caracteristicii de curent și putere pentru o celulă/un panou fotovoltaic

1. Introducere

Efectul fotovoltaic este procesul fizic prin care *energia radiației luminoase* (fotonilor) este transformată direct în *energie electrică*. Evidențierea acestui efect în materialele semiconductoare este posibilă numai prin existența unei bariere de potențial, adică a unui câmp electric care să separe cele două tipuri de purtători de sarcină, *electroni* și *goluri*, generați în urma acțiunii radiației luminoase (purtători *fotogenerați*). Unul dintre dispozitivele semiconductoare în care acest efect poate fi pus în evidență este joncțiunea semiconductoare *p-n*.

Pentru obținerea efectului fotovoltaic este necesar ca energia fotonilor incidenti, $h\nu$, să fie cel puțin egală cu *lărgimea benzii interzise* a semiconductorului respectiv. În acest caz, prin acțiunea fotonilor asupra uneia sau alteia din regiunile care formează joncțiunea *p-n*, sau a ambelor regiuni, sunt generați *fotopurtători* de sarcină, *minoritari*. Fotopurtătorii generați în vecinătatea joncțiunii *p-n*, de o parte și de alta a joncțiunii, ca purtători de sarcină minoritari (goluri în regiunea *n* și electroni în regiunea *p*) sunt preluați de câmpul electric intern al joncțiunii și transferați în regiunile în care ei sunt purtători de sarcină *majoritari* (golurile în regiunea *p*, electronii în regiunea *n*). În același timp, fotopurtătorii de sarcină *majoritari*, generați în vecinătatea joncțiunii *p-n* (de o parte și de alta), vor fi respinși de câmpul electric intern al joncțiunii. Separarea în acest mod a sarcinii electrice create prin acțiunea radiației luminoase, determină apariția în regiunea *p* a unei sarcini nete *pozitive*, iar în regiunea *n* a unei sarcini nete *negative*, ceea ce conduce la micșorarea barierei de potențial, de la qV_0 (în cazul absenței radiației luminoase), la $q(V_0 - V_f)$, *la fel ca în cazul polarizării directe a joncțiunii p-n*. Mărimea V_f este diferența de potențial măsurabilă la capetele joncțiunii *p-n*, numită *tensiune fotoelectromotoare*. Valoarea tensiunii fotoelectromotoare V_f , numită și *tensiune fotovoltaică*, este valoarea tensiunii măsurată la *circuit deschis* (tensiunea de gol, V_{oc}).

2. Celula fotovoltaică cu joncțiune p-n

Celula fotovoltaică face parte din categoria *fotoelementelor*. Fotoelementele sunt dispozitive semiconductoare caracterizate de apariția unei tensiuni electromotoare sub acțiunea luminii. În circuitul în care este inclus un fotoelement, prin iluminarea acestuia, circulă un curent electric fără a fi aplicată o tensiune din exteriorul circuitului electric.

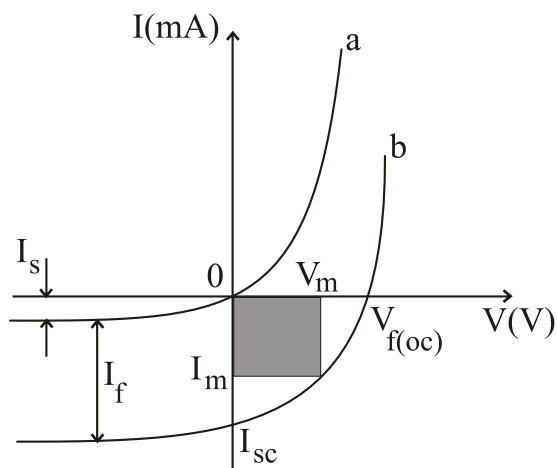
Curentul care trece prin joncțiunea p-n la întuneric este dat de expresia caracteristicii I-V a unei joncțiuni obișnuite:

$$I_0 = I_s (e^{qV/nkT} - 1), \quad (1)$$

unde I_s reprezintă curentul de saturație la polarizare inversă a joncțiunii (curba (a) din figura 1), q , sarcina electronului, n , coeficientul de neidealitate, k , constanta lui Boltzmann, T , temperatura exprimată în Kelvin.

În prezența radiației luminoase, caracteristica I-V este de forma:

$$I = I_s (e^{qV_{oc}/nkT} - 1) - I_f, \quad (2)$$



fiind ilustrată prin curba (b) din figura 1. Relația (2) reprezintă *ecuația fundamentală* a celulei fotovoltaice cu joncțiune p-n. În cadranul patru joncțiunea p-n se comportă ca generator de putere electrică. Tensiunea la *circuit deschis* se determină din relația (2), impunând condiția $I = 0$:

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_f}{I_s} + 1 \right). \quad (3)$$

Fig. 1. Caracteristica I-V a joncțiunii p-n: (a) la întuneric; (b) la iluminare

Expresia *curentului de scurt-circuit* rezultă din relația (2), impunând condiția $V = 0$:

$$I_{sc} = -I_f. \quad (4)$$

3. Simularea SPICE a celulelor și panourilor fotovoltaice

Simularea cu ajutorul programelor de calculator, a diferitelor fenomene fizice, reprezintă o modalitate de înțelegere și de studiere a fenomenelor respective, fără a avea nevoie de aparatură de laborator. Un program foarte potrivit pentru simularea funcționării și comportării oricărui circuit electric sau electronic, este programul SPICE.

SPICE este un program de simulare de uz general, pentru circuite electrice și electronice. Cu ajutorul lui se pot efectua analize neliniare de curent continuu, analize neliniare tranzitorii și analize

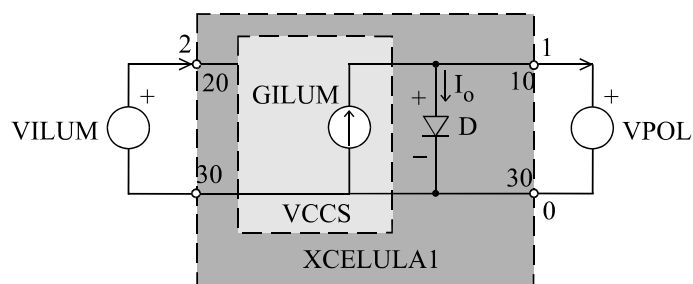
liniare de curent alternativ. În esență, programul rezolvă ecuațiile potențialelor la noduri, el fiind potrivit atât pentru rezolvarea circuitelor liniare cât și a celor neliniare.

Circuitele simulate și analizate cu programul SPICE pot să conțină atât elemente liniare, ca de exemplu: rezistoare, condensatoare, bobine, surse de tensiune și de curent independente, cât și surse dependente sau comandate, precum și elemente neliniare de tipul dispozitivelor electronice semiconductoare active: dioda semiconductoare, tranzistorul bipolar, tranzistorul cu efect de câmp metal-oxid-semiconductor, tranzistorul cu efect de câmp cu grilă joncțiune.

Programul SPICE construiește și rezolvă ecuațiile corespunzătoare circuitului care este analizat, folosind, așa cum s-a arătat, metoda potențialelor la noduri. Algoritmul programului este similar cu cel al unei rezolvări „manuale” a circuitului, cu utilizarea teoremelor lui Kirchhoff și a relațiilor constitutive ale elementelor din laturile circuitului, iar în final, rezolvarea sistemului de ecuații rezultat.

Numele de SPICE provine de la **S**imulation **P**rogram with **I**ntegrated **C**ircuit **E**mphasis (program de simulare destinat simulării circuitelor integrate). Un program folosit pe scară largă în mediul universitar, este varianta pentru PC (Personal Computer) a programului SPICE, numit PSpice. Acest program de simulare îndeplinește principalele cerințe privind folosirea lui atât în mediul universitar cât și în mediul industrial (reprezintă un program standard pentru simularea circuitelor electronice). Foarte important este faptul că rezultatele simulărilor pot fi prezentate într-o formă intuitivă și accesibilă.

Pentru simularea SPICE a modulelor fotovoltaice s-a folosit un circuit echivalent în care generatorul de curent care modelează curentul datorat iluminării celulei, este transformat într-o *sursă de curent comandată prin tensiune* (VCCS) (fig. 2). Această variantă este mai avantajoasă



decât cea în care polarizarea circuitului se face cu o *sursă de tensiune comandată prin tensiune* (VCVS), având câștigul în tensiune $e = 1$ (fig. 3), pentru motivul arătat în continuare.

Fig. 2. Circuitul electric echivalent ideal pentru simularea SPICE a celulei fotovoltaice. Varianta care include sursa de curent comandată prin tensiune. Se indică limitele subcircuitului XCELULA1

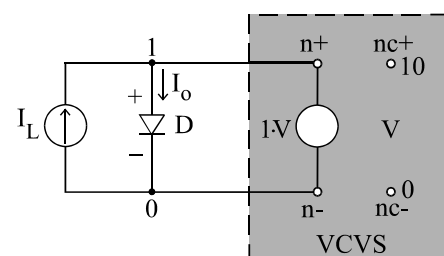


Fig. 3. Circuitul electric echivalent ideal pentru simularea SPICE a celulei fotovoltaice. Varianta care include sursa de tensiune comandată prin tensiune

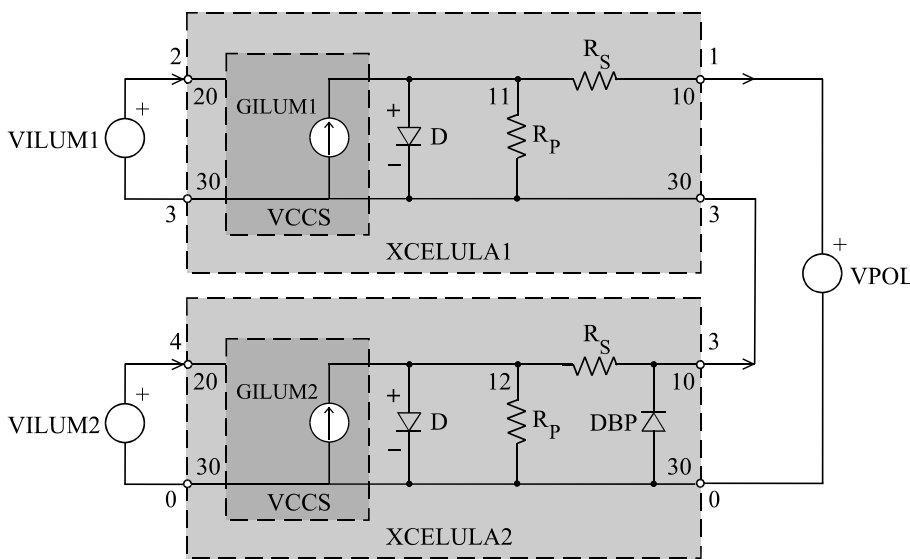
Tensiunea de comandă a sursei de curent se aplică în nodul (20), valoarea ei fiind numeric egală cu *iradierea*. În acest fel, pentru o valoare de 1000 V a tensiunii de comandă, curentul sursei comandate este egal cu curentul de scurt-circuit al celulei fotovoltaice, conform relației [1]:

$$GILUM = \frac{I_{sc}}{1000} I_r, \quad (5)$$

unde I_r reprezintă *iluminarea energetică* sau *iradierea*, măsurată în W/m^2 . Relația de mai sus se poate folosi pentru orice valoare a iradierii.

Folosirea acestei variante de circuit echivalent determină posibilitatea prezicerii, prin simulare, a comportamentului unei celule fotovoltaice la diferite valori ale iradierii, cunoscând comportamentul ei la o anumită iradiere (valoarea curentului de scurt-circuit sau a densității curentului de scurt-circuit). În plus, folosirea noțiunii de *subcircuit* în cadrul fișierului de intrare SPICE, dă posibilitatea de a folosi un același fișier de intrare pentru celule cu parametrii electrice și geometrice diferiți.

Circuitul electric echivalent real pentru simularea SPICE a două celule solare înseriate este reprezentat în figura 4 [2].



Pentru definirea modelului SPICE al celulei fotovoltaice, se consideră doi parametri de model SPICE specifici diodei semiconductoare: *curentul de saturație*, I_s , și *coeficientul de neidealitate*, N , pentru care se consideră valoarea 1,66 (valoarea reală pentru celulele fotovoltaice pe bază de siliciu fiind între 1 și 2).

Fig. 4. Circuitul electric echivalent real pentru simularea SPICE a două celule fotovoltaice înseriate. Se indică limitele subcircuitelor XCELULA1 și XCELULA2

Pentru calculul curentului de saturație al celulei fotovoltaice (joncțiunii *p-n*) se folosește relația (2), transcrisă pentru valorile maxime ale curentului și tensiunii. Se obține:

$$I_s = \frac{I_m}{e^{qV_m/nkT} \cdot qV_m/nkT}. \quad (6)$$

Modelul de diodă folosit pentru simularea modulelor fotovoltaice consideră o *diodă echivalentă* formată din însumarea celulelor fotovoltaice care alcătuiesc panoul respectiv.

Fișierul de intrare SPICE pentru simularea unui modul fotovoltaic cu 60 de celule fotovoltaice pe bază de *monocristal* (tip **BAUER BS 6MB12/250 W**), este redat mai jos. Parametrii de intrare ai simulării sunt parametrii mășurați experimental: iradierea, $I_r = 892 \text{ W/m}^2$, temperatura, $t = 33,7 \text{ }^\circ\text{C}$, curentul de scurt-circuit în aceste condiții, $I_{sc} = 8,51 \text{ A}$. Folosind modelul SPICE enunțat mai sus, s-a obținut și caracteristica I-V în condiții standard: $I_r = 1000 \text{ W/m}^2$, $t = 25^\circ\text{C}$, $I_{sc} = 8,72 \text{ A}$ (conform [3]). Aria modulului este egală cu $1,46 \text{ m}^2$. Fișierul SPICE este următorul:

```
PANOU MONOCRISTALIN 60 CELULE FOTOVOLTAICE
*SIMULAREA CARACTERISTICII IN CONDITII STANDARD
.SUBCKT CELULA_1 30 10 20 PARAMS: ARIA=1, JS=1M, JSC=1, RS=1, RP=1
GILUM 30 11 VALUE={({JSC/1000})*V(20)*ARIA}
D 11 30 DIODA
RP 11 30 {RP}
RS 11 10 {RS}
*N=60*1.66=100
.MODEL DIODA D IS={JS*ARIA} N=100
.ENDS CELULA_1
*ARIA SE EXPRIMA IN M^2
*JSC SE EXPRIMA IN A/M^2
XCELULA1 0 1 2 CELULA_1 PARAMS: ARIA=1.46 JS=0.0028M JSC=5.97 RS=0.16 RP=6000
VILUM 2 0 DC 1000
.TEMP 25
VPOL 1 0 DC 0
.DC VPOL 0 40 0.01
.PROBE
.END
PANOU MONOCRISTALIN 60 CELULE FOTOVOLTAICE
*SIMULAREA CARACTERISTICII IN CONDITII EXPERIMENTALE
.SUBCKT CELULA_1 30 10 20 PARAMS: ARIA=1, JS=1M, JSC=1, RS=1, RP=1
GILUM 30 11 VALUE={({JSC/892})*V(20)*ARIA}
D 11 30 DIODA
RP 11 30 {RP}
RS 11 10 {RS}
*N=60*1.66=100
.MODEL DIODA D IS={JS*ARIA} N=100
.ENDS CELULA_1
*ARIA SE EXPRIMA IN M^2
*JSC SE EXPRIMA IN A/M^2
XCELULA1 0 1 2 CELULA_1 PARAMS: ARIA=1.46 JS=0.0028M JSC=5.83 RS=0.16 RP=6000
VILUM 2 0 DC 892
.TEMP 33.7
VPOL 1 0 DC 0
.DC VPOL 0 40 0.01
.PROBE
.END
```

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 1 și figurile 5 și 6. Erorile relative ale valorilor *simulate SPICE* față de cele *mășurate experimental* sunt: 0% pentru I_{sc} , -6,31% pentru V_{oc} . Erorile relative ale valorilor *simulate SPICE* față de cele *de catalog* sunt: 0,11% pentru I_{sc} , 1,16% pentru V_{oc} .

Tabel 1. Modul monocristal tip **BAUER BS 6MB12/250 W**

	I_r (W/m ²)	t (°C)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_m (A)	V_m (V)	η (%)	FU
STC-catalog [3]	1000	25	8,72	37,89	8,11	30,83	15,40	0,76
Experimental	892	33,7	8,51	36,16	7,93	28,80	17,54	0,74
SPICE	1000	25	8,71	37,45	7,99	29,77	16,29	0,73
SPICE	892	33,7	8,51	38,44	7,80	30,62	18,33	0,73

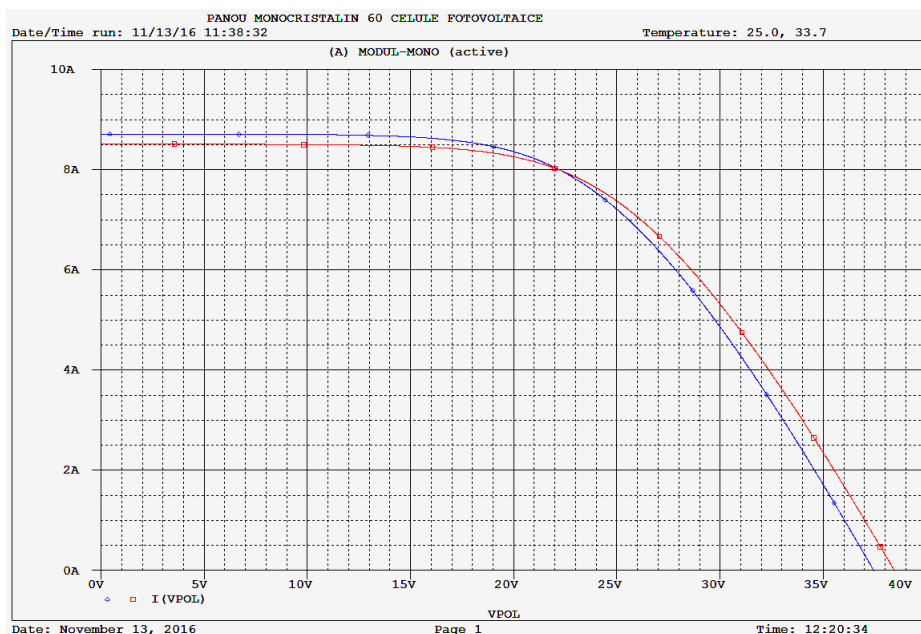


Fig. 5. Caracteristica curent – tensiune simulată SPICE a modului fotovoltaic tip Bauer BS 6MB12/250 W pentru două valori ale iradierii: $\diamond$ - 1000 W/m², $\square$ - 892 W/m²

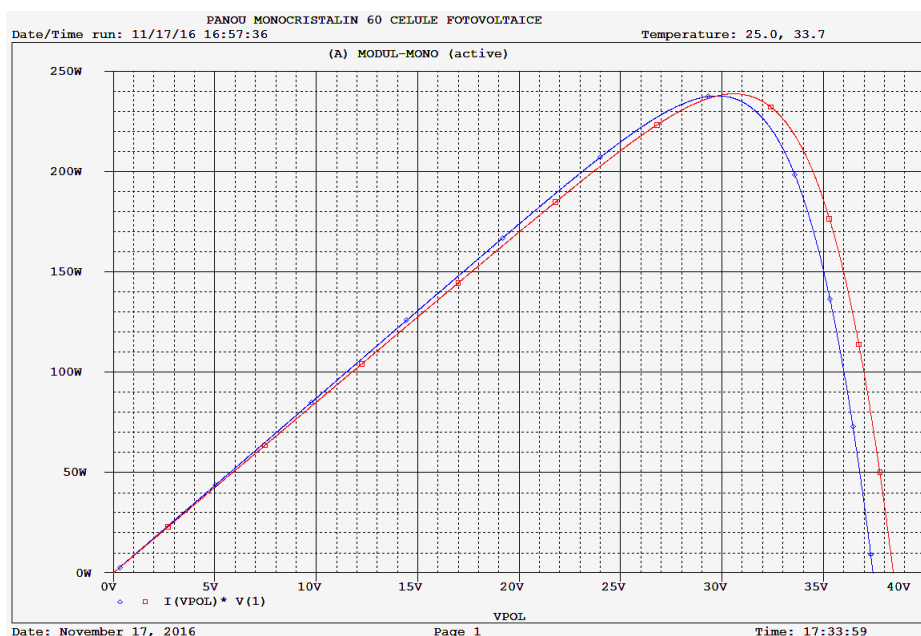


Fig. 6. Caracteristica putere – tensiune simulată SPICE a modului fotovoltaic tip Bauer BS 6MB12/250 W pentru două valori ale iradierii: $\diamond$ - 1000 W/m², $\square$ - 892 W/m²

Procedând similar, pentru un modul fotovoltaic cu 60 de celule fotovoltaice pe bază de *policristal*, tip **QCELLS Q.PRO-G3/245 W**, se obțin rezultatele prezentate în tabelul 2 și figurile 7 și 8. Erorile relative ale valorilor *simulate SPICE* față de cele *măsurate experimental* sunt: 0,11%

pentru I_{sc} , -4,25% pentru V_{oc} . Erorile relative ale valorilor *simulate SPICE* față de cele *de catalog* sunt: 0,12% pentru I_{sc} , -0,24% pentru V_{oc} . Parametrii de intrare ai simulării sunt parametrii măsurăți experimental: iradierea, $I_r = 1016 \text{ W/m}^2$, temperatura, $t = 29,4 \text{ }^\circ\text{C}$, curentul de scurt-circuit în aceste condiții, $I_{sc} = 9,43 \text{ A}$. Folosind modelul SPICE, s-a obținut și caracteristica I-V în condiții standard: $I_r = 1000 \text{ W/m}^2$, $t = 25^\circ\text{C}$, $I_{sc} = 8,52 \text{ A}$ (conform [4]). Aria modulului este egală cu $1,44 \text{ m}^2$.

Tabel 2. Modul policristalin tip QCELLS Q.PRO-G3/245W

	$I_r \text{ (W/m}^2\text{)}$	$t \text{ (}^\circ\text{C)}$	$I_{sc} \text{ (A)}$	$V_{oc} \text{ (V)}$	$I_m \text{ (A)}$	$V_m \text{ (V)}$	$\eta \text{ (\%)}$	FU
STC-catalog [4]	1000	25	8,52	37,15	8,05	30,75	14,70	0,78
Experimental	1016	29,4	9,43	36,50	8,79	27,95	16,79	0,71
SPICE	1000	25	8,51	37,24	7,81	29,94	16,24	0,74
SPICE	1016	29,4	9,42	38,05	8,65	30,54	18,05	0,74

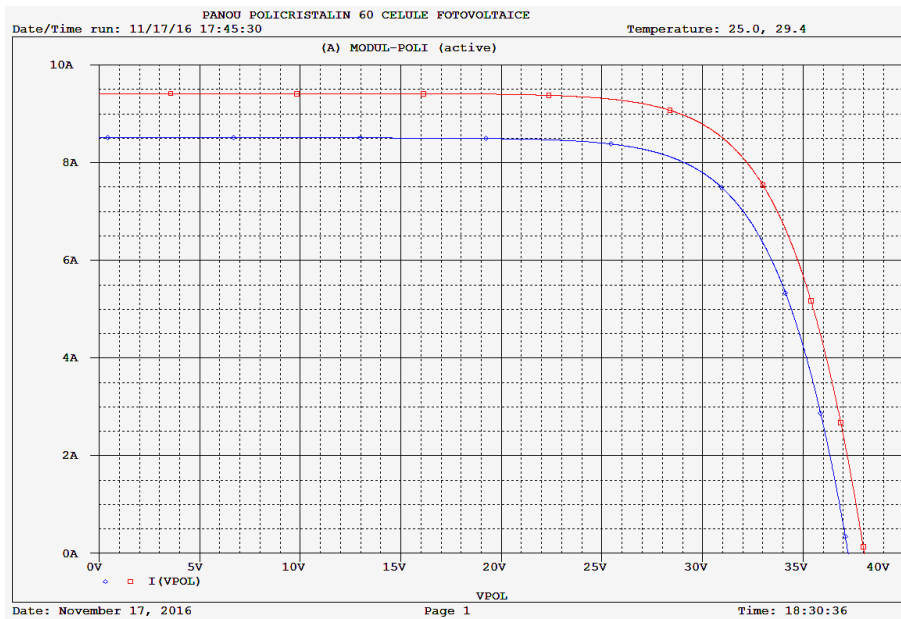


Fig. 7. Caracteristica curent – tensiune simulată SPICE a modulului fotovoltaic tip Q.PRO-G3/245 W pentru două valori ale iradierii: $\diamond$ - 1000 W/m^2 , $\square$ - 1016 W/m^2

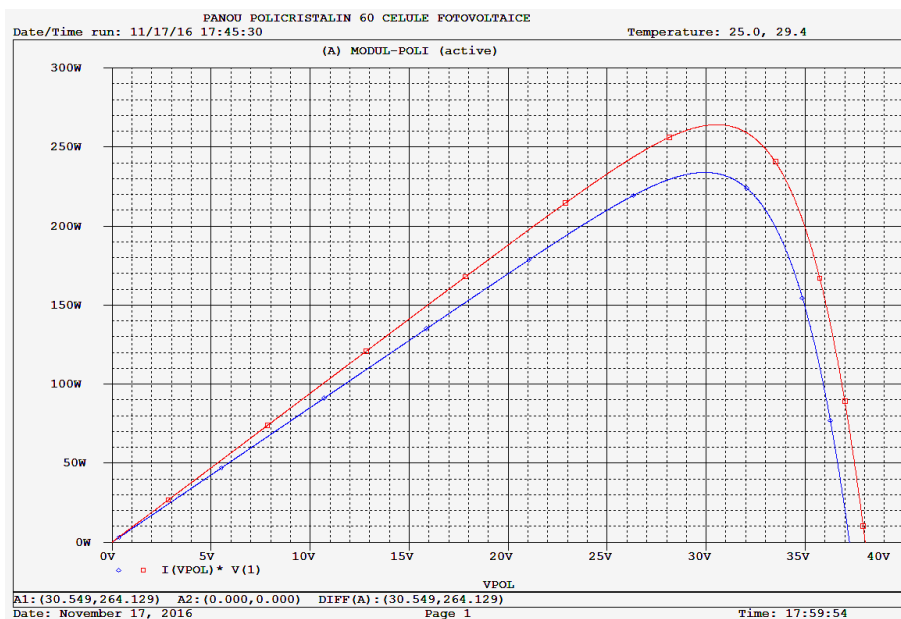


Fig. 8. Caracteristica putere – tensiune simulată SPICE a modulului fotovoltaic tip Q.PRO-G3/245 W pentru două valori ale iradierii: $\diamond$ - 1000 W/m^2 , $\square$ - 1016 W/m^2

Așa cum s-a arătat, folosirea variantei de circuit echivalent reprezentată în figura 4 determină posibilitatea prezicerii, prin simulare, a comportamentului unui modul fotovoltaic la *diferite valori ale iradierii*, cunoscând comportamentul lui la o anumită iradiere (valoarea curentului de scurt-circuit sau a densității curentului de scurt-circuit).

Conform fișierului SPICE de mai jos, cunoscând valoarea densității curentului de scurt-circuit al modului fotovoltaic *monocristalin* (tip **BAUER BS 6MB12/250 W**) la iradierea de 1000 W/m^2 și temperatura de 25°C , egală cu $5,97 \text{ A/m}^2$ (conform [3]), se obțin, cu ajutorul simulării SPICE, valorile parametrilor (la iradierile de 1200 W/m^2 , respectiv 1500 W/m^2 , temperatura de 25°C): curentul de scurt-circuit (I_{sc}) și tensiunea la circuit deschis (V_{oc}). Rezultatele simulării sunt prezentate în figura 9 și tabelul 3.

```
PANOU MONOCRISTALIN 60 CELULE FOTOVOLTAICE
*SIMULAREA VARIATIEI CARACTERISTICII CU IRADIEREA
.SUBCKT CELULA_1 30 10 20 PARAMS: ARIA=1, JS=1M, JSC=1, RS=1, RP=1
GILUM 30 11 VALUE={{(JSC/1000)*V(20)*ARIA}
D 11 30 DIODA
RP 11 30 {RP}
RS 11 10 {RS}
*N=60*1.66=100
.MODEL DIODA D IS={{JS*ARIA} N=100
.ENDS CELULA_1
*ARIA SE EXPRIMA IN M^2
*JSC SE EXPRIMA IN A/M^2
XCELULA1 0 1 2 CELULA_1 PARAMS: ARIA=1.46 JS=0.0028M JSC=5.97 RS=1.1 RP=6000
.PARAM IL=1
VILUM 2 0 DC {IL}
.STEP PARAM IL LIST 1000 1200 1500
.TEMP 25
.OP
VPOL 1 0 DC 0
.DC VPOL 0 40 0.01
.PROBE
.END
```

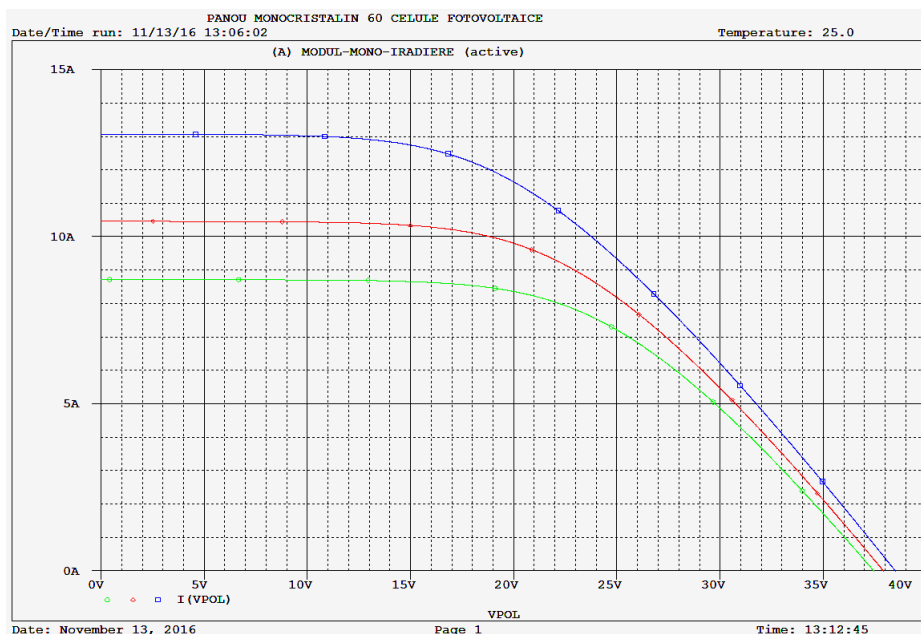


Fig. 9. Simularea dependenței caracteristicii curent – tensiune a modului fotovoltaic tip Bauer BS 6MB12/250 W pentru trei valori ale iradierii: ○ - 1000 W/m^2 , ◇ - 1200 W/m^2 , □ - 1500 W/m^2

Tabelul 3. Dependența curentului de scurt-circuit și tensiunii la circuit deschis de iradiere

I_r (W/m ²)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)
1000	8,71	37,45
1200	10,46	37,91
1500	13,07	38,49

Similar, se obține comportarea modului fotovoltaic în funcție de temperatură. Astfel, cunoscând valoarea densității curentului de scurt-circuit al modului fotovoltaic *monocristalin* la iradierea de 1000 W/m² și temperatura de 25°C, egală cu 5,97 A/m² [3], se obțin valorile parametrilor (la temperaturile egale cu 30°C, respectiv 50°C, iradierea de 1000 W/m²): curentul de scurt-circuit (I_{sc}) și tensiunea la circuit deschis (V_{oc}). Rezultatele simulării sunt prezentate în figura 10 și tabelul 4.

MODUL MONOCRISTALIN 60 CELULE FOTOVOLTAICE

*SIMULAREA VARIATIEI CARACTERISTICII CU TEMPERATURA

.SUBCKT CELULA_1 30 10 20 PARAMS: ARIA=1, JS=1M, JSC=1, RS=1, RP=1

GILUM 30 11 VALUE={(JSC/1000)*V(20)*ARIA}

D 11 30 DIODA

RP 11 30 {RP}

RS 11 10 {RS}

*N=60*1.66=100

.MODEL DIODA D IS={JS*ARIA} N=100

.ENDS CELULA_1

*ARIA SE EXPRIMA IN M^2

*JSC SE EXPRIMA IN A/M^2

XCELULA1 0 1 2 CELULA_1 PARAMS: ARIA=1.46 JS=0.0028M JSC=5.97 RS=1.1 RP=6000

VILUM 2 0 DC 1000

.TEMP 25 30 50

VPOL 1 0 DC 0

.DC VPOL 0 45 0.01

.PROBE

.END

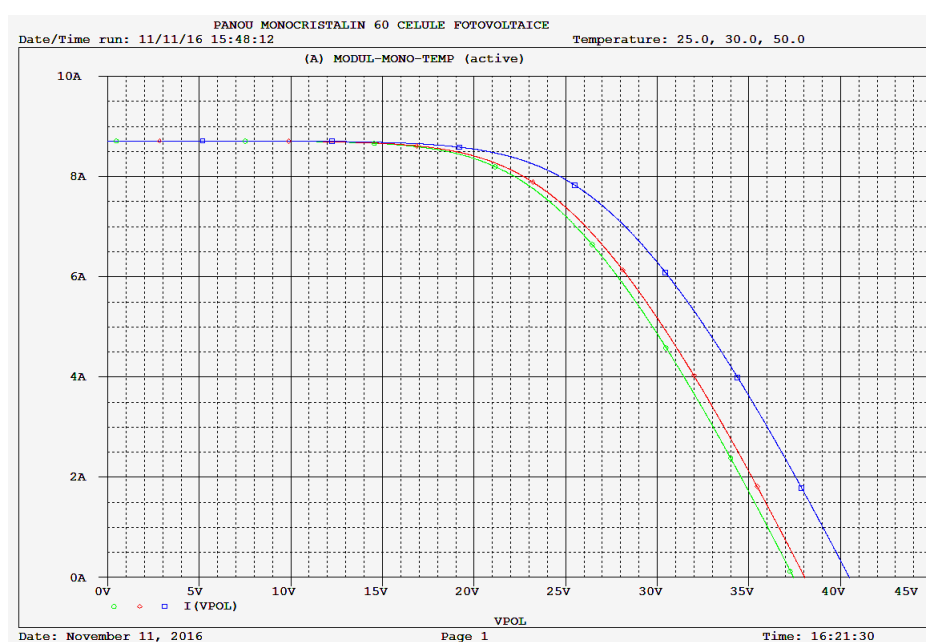


Fig. 10. Simularea dependenței caracteristicii curent – tensiune a modului fotovoltaic tip Bauer BS 6MB12/250 W pentru trei valori ale temperaturii: ○ - 25°C, ◇ - 30°C, □ - 50°C

Tabelul 4. Dependența curentului de scurt-circuit și tensiunii la circuit deschis de temperatură

t (°C)	I _{sc} (A)	V _{oc} (V) SPICE	V _{oc} (V) calculate relația (3)
25	8,71	37,45	37,49
30	8,71	38,05	38,12
50	8,71	40,48	40,63

4. Simularea MATLAB a celulelor și panourilor fotovoltaice

Simulink-ul reprezintă un toolbox al Matlabului foarte utilizat în mediile academice și în industrie, pentru modelarea și simularea sistemelor dinamice. Popularitatea acestuia mediu este dată de ușurința programării prin intermediul interfeței GUI (Graphical User Interface) și de diversitatea modelelor ce pot fi analizate, începând cu cele ideale, liniare până la cele mai realiste modele neliniare, continue sau discrete în timp.

Circuitul echivalent al unui panou PV este reprezentat în figura 11.

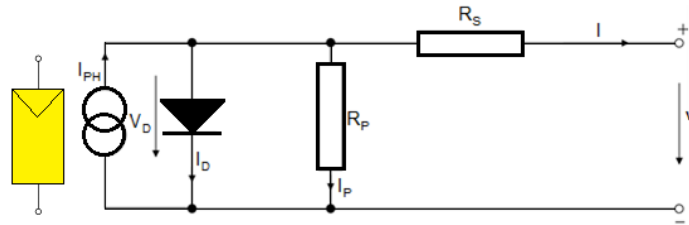


Fig. 11. Circuitul echivalent al unui panou PV

Relația matematică care modelează funcționarea unui panou PV:

$$I = I_{PH} \cdot N_p - I_D - I_{sh} \quad (7)$$

unde:

I = curentul de la panoul fotovoltaic,

I_{PH} = curentul generat prin efect fotoelectric,

N_p = numărul de panouri fotovoltaice conectate în paralel,

I_D = curentul prin diodă,

I_{sh} = curentul prin rezistența de șunt (R_P)

În cazul simulării noastre $N_p = 1$, deoarece deocamdată simulăm comportamentul unui singur panou.

Curentul prin diodă este dat de relația:

$$I_D = I_s \cdot N_p \cdot \left(e^{\frac{\frac{1}{N_s}(V+IR_s)}{n \cdot C \cdot V_T}} - 1 \right) \quad (8)$$

unde:

I_s = curentul de saturație,

V = tensiunea generată (la borne),

R_s = rezistența internă a celulei fotovoltaice (rezistența serie, de contact),

C = numărul de celule fotovoltaice ale panoului fotovoltaic,

N_s = numărul de panouri fotovoltaice conectate în serie,

V_T = tensiunea termică,

n, K_I = constante de fabricație preluate din fișa tehnică a panoului PV, $1 \leq n \leq 2$ (ex: factorul de calitate al celulei, coeficientul de temperatură, etc)

Valoarea curentului de saturație și a tensiunii termale sunt determinate conform ecuației:

$$I_s = \frac{I_{sc}}{e^{\frac{V_{oc} \cdot q}{k \cdot C \cdot T_{op} \cdot n}} - 1} \cdot \left(\frac{T_{op}}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\left(\frac{1}{T_{op}} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \left(\frac{q^2 \cdot E_g}{n \cdot k} \right)} \quad (9)$$

unde:

I_{sc} = curentul de scurt-circuit,

V_{oc} = tensiunea în circuit deschis,

T_{op} = temperatura achiziționată,

T_{ref} = temperatura de referință.

$$V_T = \frac{k \cdot T_{op}}{q} \quad (10)$$

unde:

k = Constanta lui Boltzman,

q = sarcina elementară.

Valoarea curentului prin rezistența de șunt (R_p) este determinată astfel:

$$I_{sh} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (11)$$

Valoriile curentului generat prin efect fotoelectric sunt direct proporționale cu valoriile radiației solare, astfel:

$$I_{ph} = [(T_{op} - T_{ref}) \cdot K_I + I_{sc}] \cdot I_r \quad (12)$$

unde:

I_r = radiația solară.

Modelul Simulink al panoului PV este prezentat în figura 12.

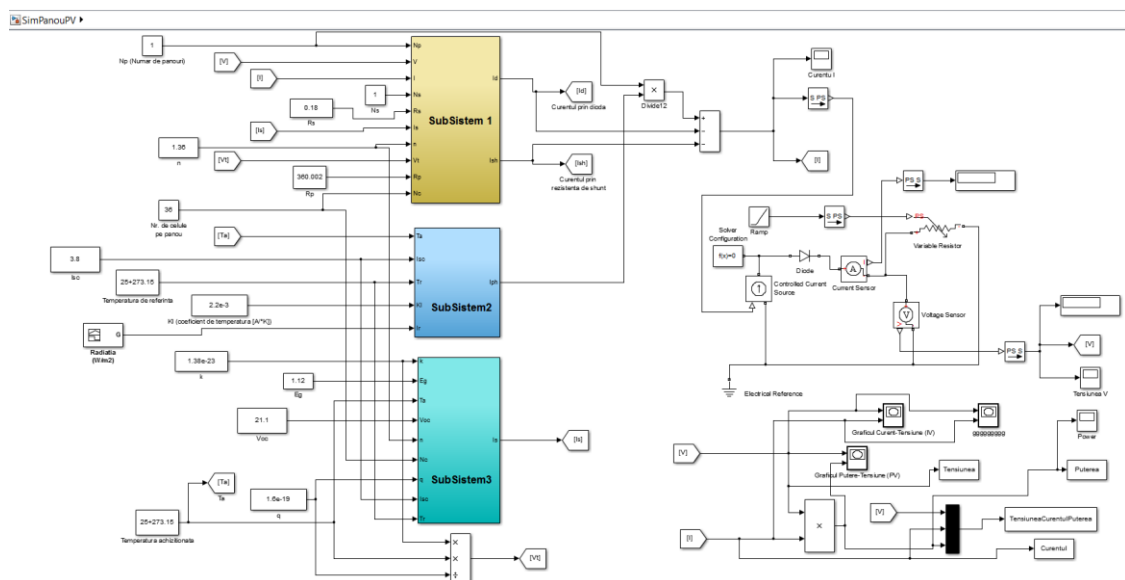


Fig. 12. Modelul Simulink pentru simularea unui panou PV cu 36 celule

Se observă că programul principal din Matlab/Simulink are trei subsisteme ce sunt reprezentate în figura 13.

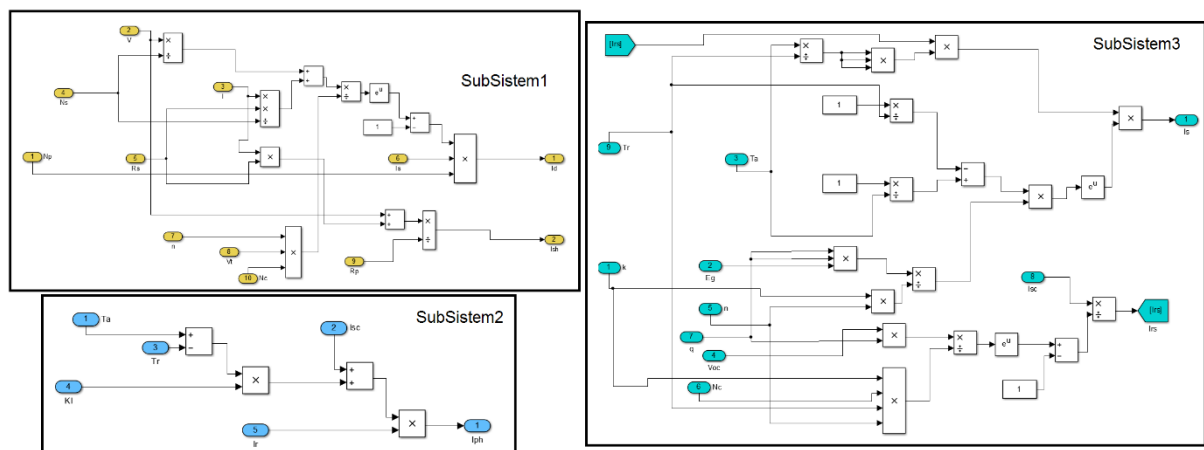


Fig. 13. Subsistemele programului de simulare a comportamentului unui panou PV

Pentru simularea modului de funcționare al unui panou fotovoltaic (PV) de tip BAUER BS 6MB cu ajutorul Matlab/Simulink, se folosesc următorii parametri funcționali:

	I_r [W/m ²]	T_{op} [°C]	N_p	C	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	R_s [Ω]	R_p [Ω]	T_{ref} [°C]	n	K_I	k	N_s	I_m [A]	V_m [V]
STC	1000	25	1	60	9,24	37,40	0,16	6000	25	1,6	0,016	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,56	30,40
Exper1.	911	36,6	1	60	8,51	35,88	0,16	6000	25	1,6	0,016	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,02	28,38
Matlab1.	911	36,6	1	60	8,51	35,88	0,16	6000	25	1,6	0,016	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8	28,9

Caracteristicile curent-tensiune (I-V) și putere-tensiune (P-V), cu datele obținute în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V de la HIT Solar, pentru un panou fotovoltaic de tipul BAUER BS 6MB, sunt prezentate în figura 14 și figura 15.

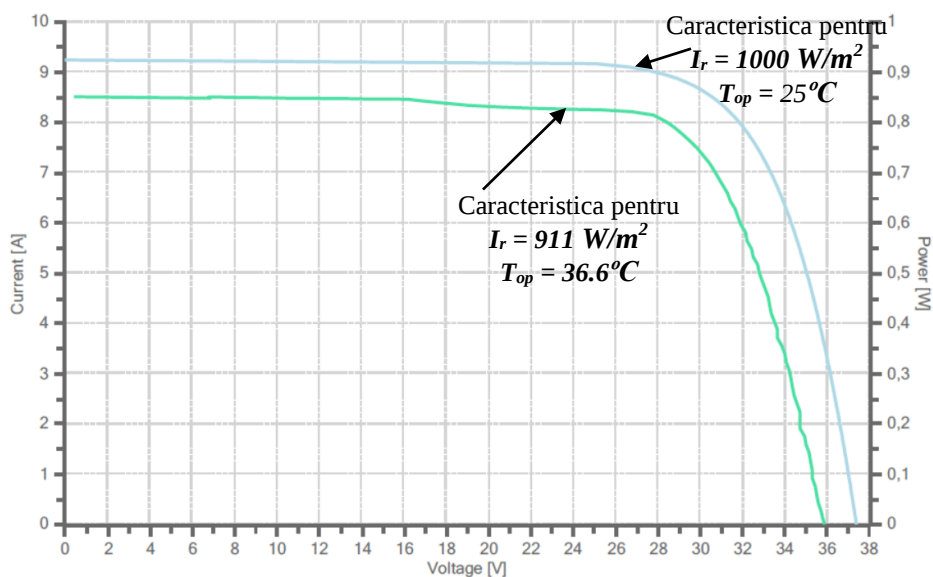


Fig. 14. Caracteristica curent-tensiune (I-V) a unui panou BAUER BS 6MB, obținută în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V

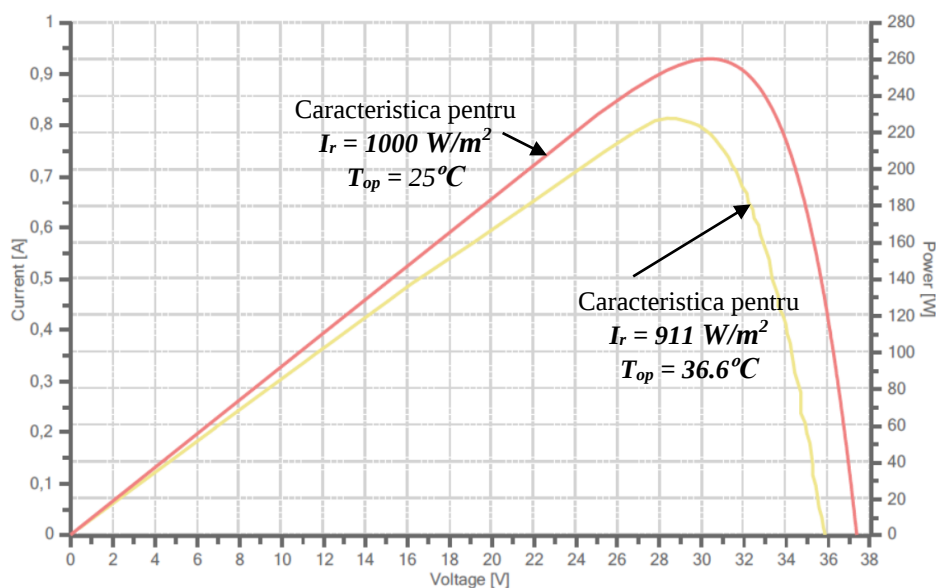


Fig. 15. Caracteristica putere-tensiune (P-V) a unui panou BAUER BS 6MB, obținută în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V

Caracteristicile curent-tensiune (I-V) și putere-tensiune (P-V), cu datele obținute în urma simulării cu ajutorul Matlab/Simulink, pentru un panou fotovoltaic de tipul BAUER BS6MB, sunt prezentate în figura 16 și figura 17.

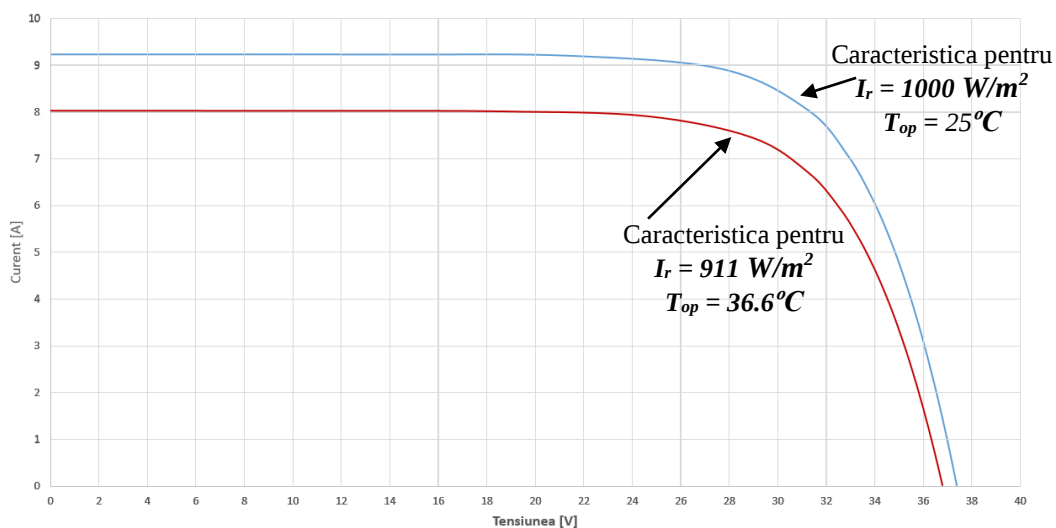


Fig. 16. Caracteristica curent-tensiune (I-V) a unui panou BAUER BS 6MB, obținută în urma simulării în Matlab/ Simulink

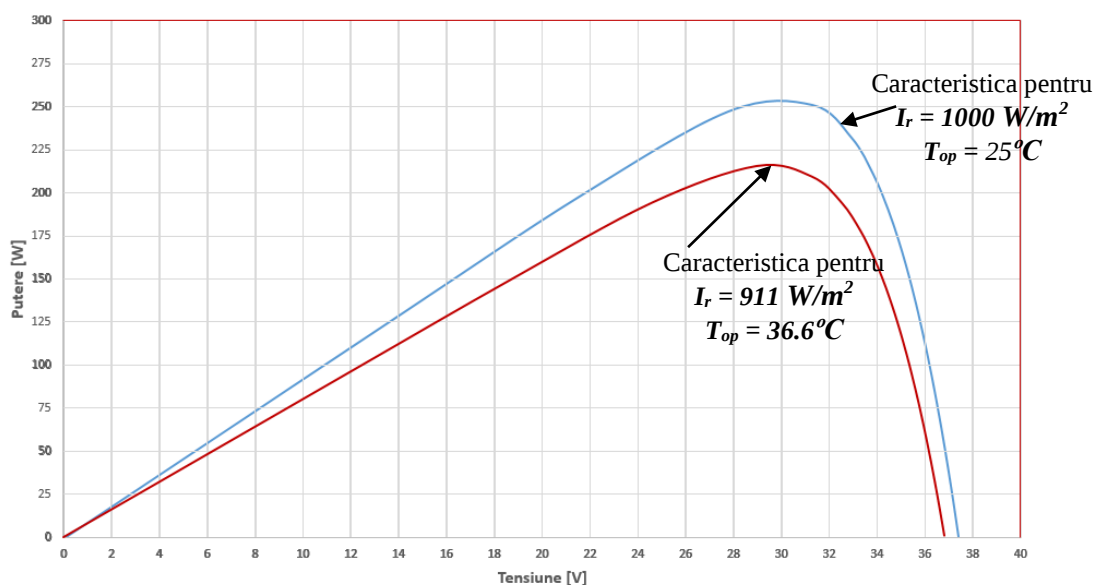


Fig. 17. Caracteristica putere-tensiune (P-V) a unui panou BAUER BS 6MB12, obținută în urma simulării în Matlab/ Simulink

Cel de-al doilea panou PV simulat cu ajutorul Matlab/Simulink este de tip QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, cu următorii parametrii funcționali:

	I_r [W/m ²]	T_{op} [°C]	N_p	C	I_{sc} [A]	V_{oc} [V]	R_s [Ω]	R_p [Ω]	T_{ref} [°C]	n	K_I	k	N_s	I_m [A]	V_m [V]
STC	1000	25	1	60	8,43	36,98	0,11	6000	25	1,6	0,04	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	7,97	30,75
Exper1.	936	28,3	1	60	9,05	36,46	0,11	6000	25	1,6	0,04	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,37	28,09
Exper2.	1016	29,4	1	60	9,43	36,50	0,11	6000	25	1,6	0,04	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,79	27,95
Matlab1.	936	28,3	1	60	9,05	36,46	0,11	6000	25	1,6	0,04	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,3	28,1
Matlab2.	1016	29,4	1	60	9,43	36,50	0,11	6000	25	1,6	0,04	$1,38 \cdot 10^{-23}$	1	8,7	28

Caracteristicile curent-tensiune (I-V) și putere-tensiune (P-V), cu datele obținute în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V de la HIT Solar pentru un panou fotovoltaic de tipul QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, sunt prezentate în figura 18 și figura 19.

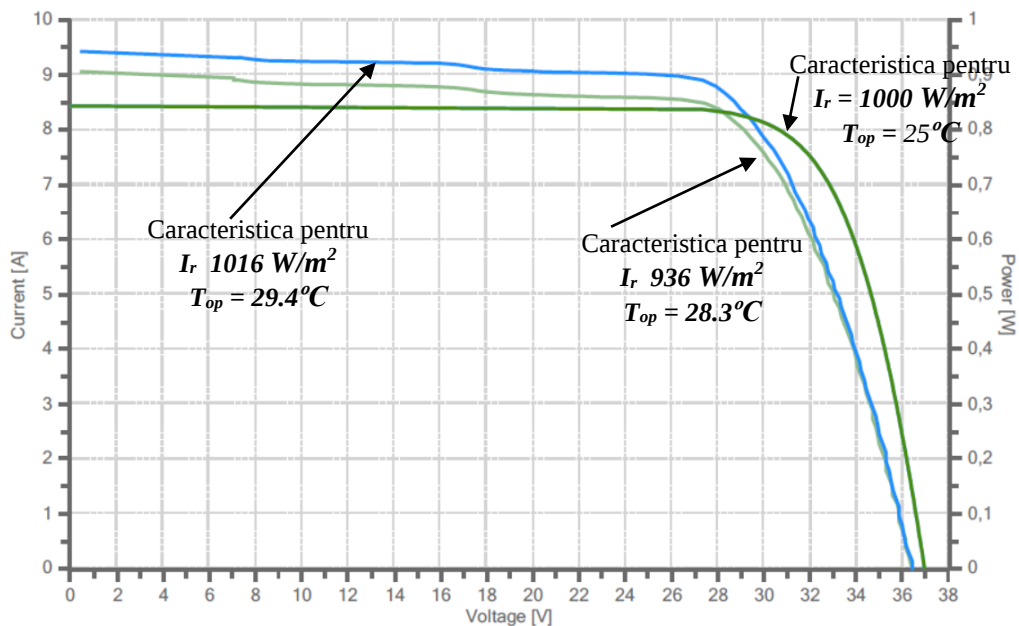


Fig. 18. Caracteristica curent-tensiune (I-V) a unui panou QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, obținută în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V

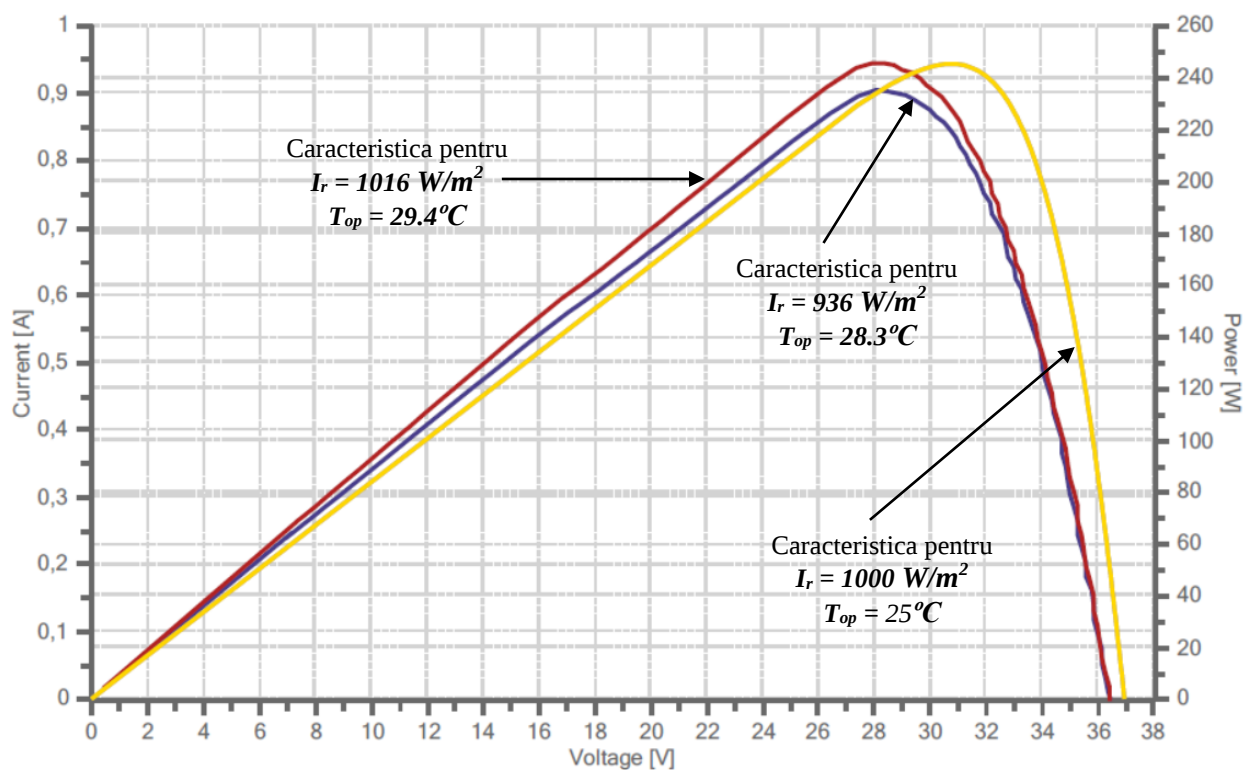


Fig. 19. Caracteristica putere-tensiune (P-V) a unui panou QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, obținută în urma măsurărilor cu dispozitivul SOLAR I-V

Caracteristicile curent-tensiune (I-V) și putere-tensiune (P-V), cu datele obținute în urma simulării cu ajutorul Matlab/Simulink, pentru un panou fotovoltaic de tipul QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, sunt prezentate în figura 20 și figura 21.

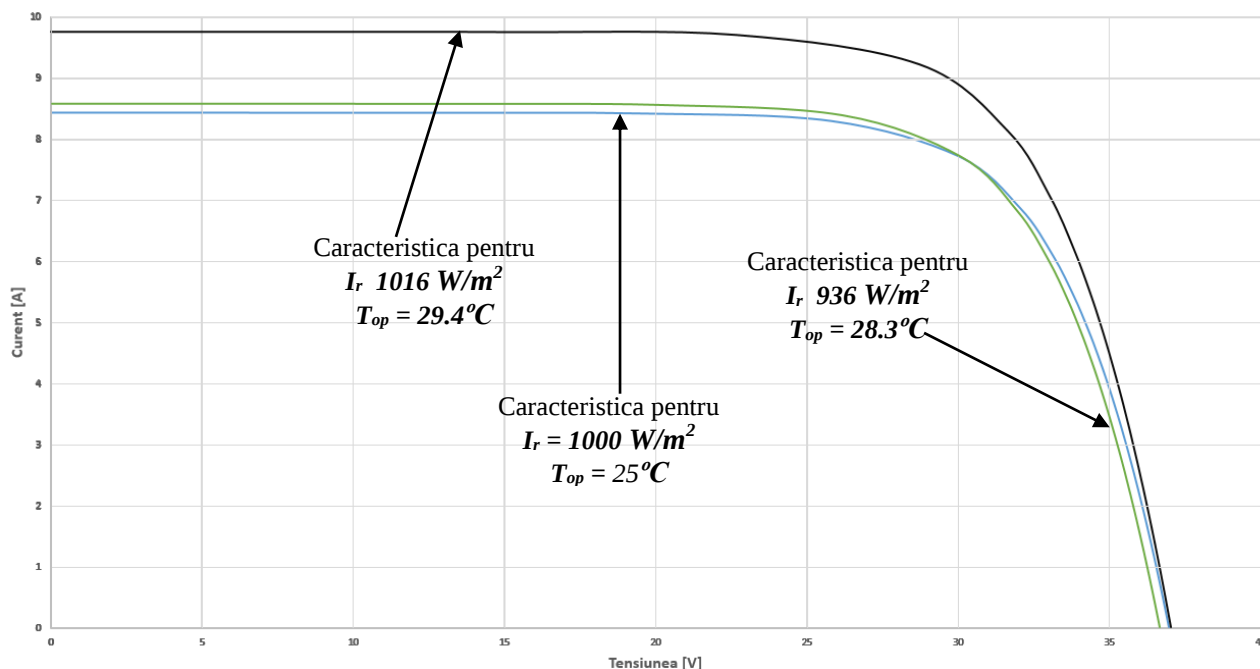


Fig. 20. Caracteristica curent-tensiune (I-V) a unui panou QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, obținută în urma simulării în Matlab/ Simulink

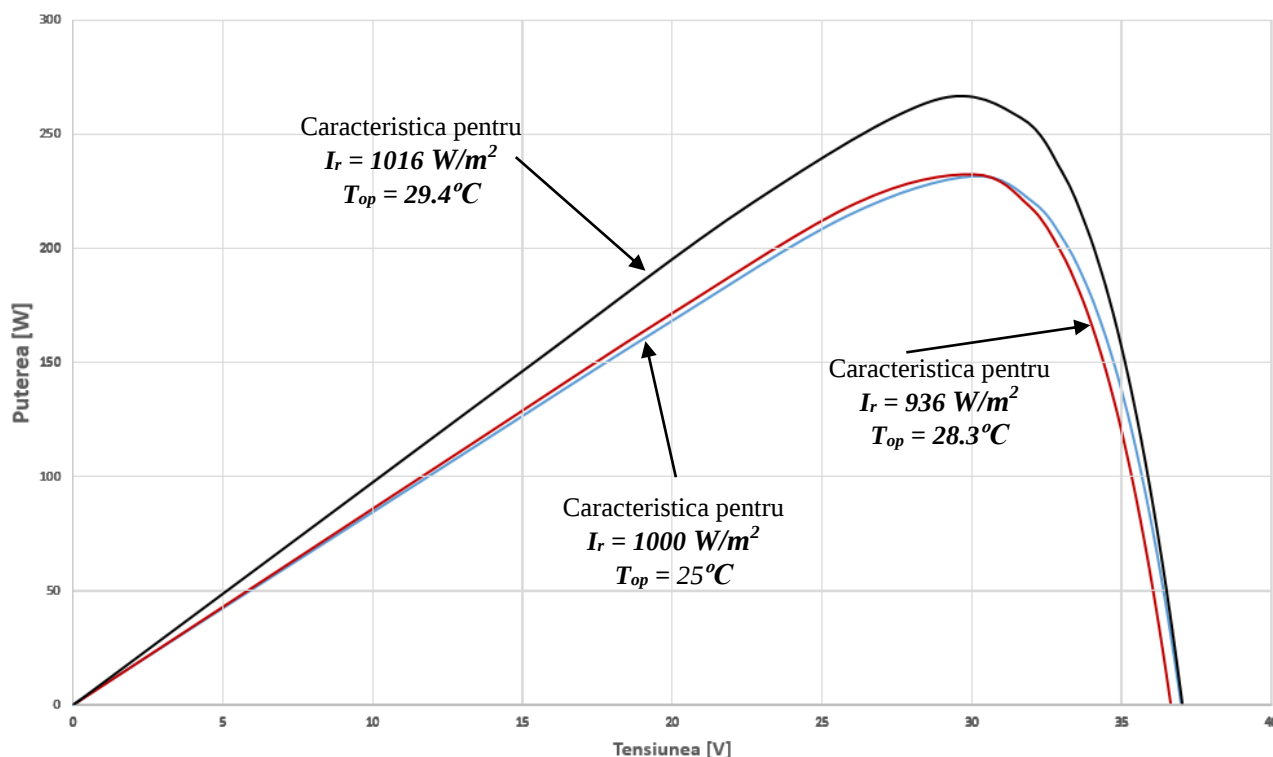


Fig. 21. Caracteristica putere-tensiune (P-V) a unui panou QCELLS Q.PRO-G3 de 245W, obținută în urma simulării în Matlab/ Simulink

5. Concluzii

Studiul prezentat ca raport al etapei 1 a arătat posibilitatea prezicerii, cu exactitate foarte bună, a comportării panourilor fotovoltaice în funcție de iradiere și temperatură, cunoscând valoarea densității curentului de scurt-circuit la o anumită iradiere și temperatură, prin folosirea unui model de simulare SPICE, dezvoltat în această etapă a proiectului.

Principala realizare a fost este reușita modelării și simulării funcționării celulelor PV în două moduri diferite și totodată în două medii de simulare diferite (SPICE respectiv Matlab/Simulink), ținând cont de diferiți parametri.

Modelarea și simularea în SPICE/Matlab/Simulink a fost făcută ținând cont de anumiți parametri, o parte dintre aceștia neregăsindu-se în fișa tehnică (datasheet-ul) a panourilor respective (R_s , R_p , n etc.).

Pentru simularea SPICE s-a folosit un circuit echivalent în care generatorul de curent care modelează curentul datorat iluminării celulei, este transformat într-o *sursă de curent comandată prin tensiune* (VCCS). Folosirea acestei variante de circuit echivalent a arătat posibilitatea prezicerii, prin simulare, a comportamentului unei celule fotovoltaice la diferite valori ale iradierii, cunoscând comportamentul ei la o anumită iradiere (valoarea curentului de scurt-circuit sau a densității curentului de scurt-circuit).

Pentru definirea modelului SPICE al celulei fotovoltaice, au fost considerați doi parametri de model SPICE specifici diodei semiconductoare: *curentul de saturație*, I_S , și *coeficientul de neidealitate*, N , pentru care se consideră valoarea 1,66 (valoarea reală pentru celulele fotovoltaice pe bază de siliciu fiind între 1 și 2).

Astfel, s-a evidențiat prin simulare SPICE, *creșterea direct proporțională* cu iradierea, a curentului de scurt-circuit: 8,51 A pentru 911 W/m², 9,34 A pentru 1000 W/m², 16,81 A pentru 1800 W/m² (vezi tabelul 3).

De asemenea, s-a observat *creșterea* tensiunii la circuit deschis cu temperatura, păstrând iradierea constantă. Rezultatele simulate sunt în concordanță foarte bună cu valorile obținute aplicând relația de calcul (3) pentru tensiunea V_{oc} .

Modelarea și simularea în Matlab/Simulink s-a bazat pe modelul obținut prin echivalarea panoului fotovoltaic cu un circuit electric simplu, cu valori pentru R_s (rezistența internă a celulei) și R_p (rezistența de șunt) obținute prin măsurători. Din această cauză, și rezultatele simulării sunt ușor diferite față de valorile specificate de producător, în condiții STC. Valorile acestor rezistențe (mai ales R_s) influențează în mod vizibil caracteristicile I-V și P-V. De asemenea, caracteristicile I-V și P-V variază semnificativ atât în cazul variației intensității radiației solare cât și în cazul variației temperaturii joncțiunii p-n.

Bibliografie

- [1] L. CASTANER, S. SILVESTRE, *Modelling photovoltaic systems using PSpice*, John Wiley & Sons, 2002.
- [2] E. Șt. LAKATOȘ, N. OLARIU, C. DUMITRACHE, Gabriela MĂNTESCU, L. OLTEANU, *Simularea SPICE a panourilor fotovoltaice*, E.E.A.-Electrotehnică, Electronică, Automatică, **58**(4), p. 56-63, 2010.
- [3] Bauer Solartechnik GmbH, Monocrystalline solar module, http://helios-resource.ru/solar_panels.files/6MB12.pdf, accesat Octombrie 2016
- [4] Hanwha Q CELLS USA Corp, Polycrystalline solar module, Qcells Q.PRO-G3 245, <https://d1819pwkf4ncw.cloudfront.net/files/documents/hanwha-q-cells-qpro-g3-datasheet-181375.pdf>, accesat Octombrie 2016

Tabel rezumativ al parametrilor panourilor fotovoltaice studiate

Tip panou	Condiții testare	I_m (A)	V_m (V)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_r (W/m ²)	t (°C)	A (m ²)	η (%)	FU	R_s (Ω)
BAUER BS 6MB12/250 W	STC-catalog [3]	8,11	30,83	8,72	37,89	1000	25	1,46	15,40	0,76	0,16
	Experimental	7,93	28,80	8,51	36,16	892	33,7	1,46	17,54	0,74	0,16
	SPICE	7,99	29,77	8,71	37,45	1000	25	1,46	16,29	0,73	0,16
	SPICE	7,80	30,62	8,51	38,44	892	33,7	1,46	18,33	0,73	0,16
QCELLS Q.PRO-G3/245W	STC-catalog [4]	8,05	30,75	8,52	37,15	1000	25	1,44	14,70	0,78	0,11
	Experimental	8,79	27,95	9,43	36,50	1016	29,4	1,44	16,79	0,71	0,11
	SPICE	7,81	29,94	8,51	37,24	1000	25	1,44	16,24	0,74	0,11
	SPICE	8,65	30,54	9,42	38,05	1016	29,4	1,44	18,05	0,74	0,11

Coordonator,
Universitatea VALAHIA din Târgoviște

Rector,
Conf. Univ. Dr. Călin OROS

Agent Economic
ICPE

Director General,
Dr. Dan-Vergil Raciovski

Director Proiect,
Conf. dr. ing. Florin DRAGOMIR

Responsabil de proiect
Dr. Viorel Ursu