

## STUDII DE CAZ PRIVIND PRODUCȚIA PANOURILOR SOLARE CASE STUDIES FOR THE PRODUCTION OF SOLAR PANELS

MITROI Viorel-Ionuț-Marius

Facultatea: de Inginerie Industrială și Robotică, Specializarea: Logistică Industrială,  
Anul de studii: Master 1, e-mail: marius\_mitroi@ymail.com

Conducător științific: Ș.l. dr. ing. **Adrian POPESCU**

*REZUMAT: Presentation of the method to produce solar energy using solar cells and presentation of the manufacturing costs for the realization of silicon ingots and wafers, the costs for the conversion of solar cells, as well as the costs for the assembly of the solar module.*

*CUVINTE CHEIE: producție, flux logistic, panou solar.*

### 1. Introducere

În prezent, omenirea se confruntă cu o criză energetică serioasă. De aceea își întoarce atenția către sursele primare de energie și reconsideră utilizările posibile și rentabile ale energiei solare. Energia solară are calități remarcabile: este gratuită ca formă de energie primară, se găsește în cantități nelimitate. Energia solară este nepoluantă, inepuizabilă, ecologică și sigură. Aceasta facilitează economisirea resurselor energetice, fără a produce deșeuri sau a emite gaze poluante, precum dioxidul de carbon. Mai presus de problemele poluării și de impactul gazelor de seră, furnizarea de apă caldă menajeră reprezintă o parte considerabilă a facturii la energie a clădirilor, care poate fi redusă prin folosirea energiei solare. Soarele reprezintă o sursă de energie gratuită și ecologică. Radiația solară anuală medie în România variază între 1,100 și 1,300 kWh/m<sup>2</sup>. [1]

Soarele este o resursă naturală complet nepoluantă, iar lumina soarelui luminează în toată lumea. Este o resursă energetică durabilă care nu poate fi monopolizată. În fiecare an, cantitatea de energie solară care iradiază pe pământ este mai mare decât nevoia consumului uman. Dacă este posibil să se transforme această energie uriașă și nepoluantă pentru aplicare, atunci problema deficitului de energie pentru om poate fi rezolvată. În sursele de energie regenerate actuale, fotovoltaica este cea mai bună tehnică dezvoltată până în prezent și este cea mai potențială resursă energetică. Efectul foto-lectric este de a transmite energia solară prin intermediul celulelor solare pentru a o transfera în energie electrică. Acest tip de transformare fotoelectrică se realizează în principal cu ajutorul efectului fotoelectric al elementelor semiconductoare. [1]

Dispozitivul de producere a energiei implicate este celula solară. Modulele și, în consecință, tablourile sunt realizate prin conectarea în serie și paralel a unor astfel de celule solare. Această celulă solară este o diodă de joncțiune p-n care transformă energia luminii de la soare în energie electrică. Curentul și tensiunea astfel produse au o relație neliniară. Puterea astfel disponibilă de la o celulă solară atinge vârfuri la o anumită tensiune de funcționare. Această putere de vârf și tensiunea de funcționare corespunzătoare continuă să varieze cu schimbarea condițiilor de izolare și a temperaturii. [1]

Electronii semiconductorului de tip p și sarcinile electrice pozitive ale semiconductorului n sunt atrase între ele. Stratul de blocare se formează în zona neutralizată pozitiv-negativ la joncțiunea p-n. Dacă există o lumină, care luminează pe joncțiunea p-n, electronul liber va fi excitat și va curge într-un semiconductor de tip n, în timp ce încărcarea electrică pozitivă este mutată în semiconductor de tip p. Mai mult, este produsă forța potențială electrică. Dacă este conectat la sarcină, atunci va exista curent electric pe acesta. În simplitate, teorema de generare a energiei electrice din fotovoltaică este de a utiliza celula solară pentru a transforma direct energia foto în alt tip de energie electrică prin absorbția razelor ultraviolete cu lungimea de undă de 0,2 - 0,39 μm. Teorema operațională a unei celule este prezentată în fig. 1. Datorită valorilor mondiale de protejare a mediului, industria solară se dezvoltă rapid și devine populară. [1]

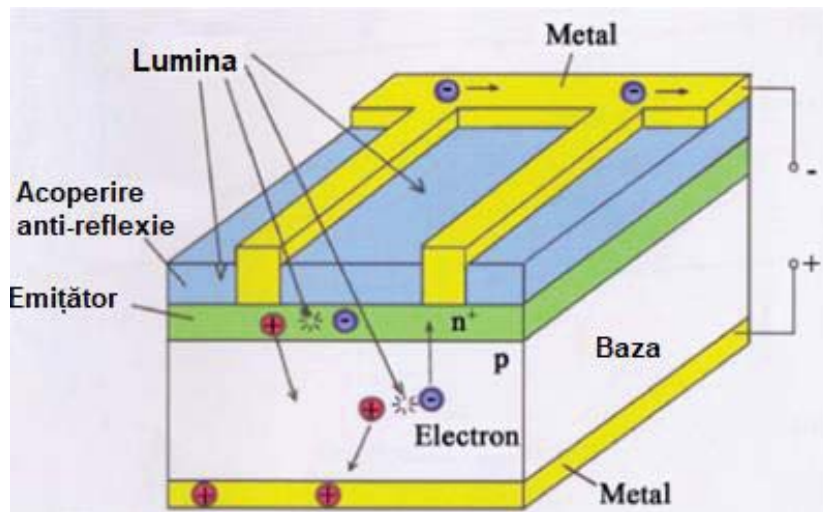


Fig. 1. Teorema operațională a unei celule solare [1]

## 2. Context general

După cum știm, celulele solare și panourile solare sunt componentele principale ale sistemului de energie solară. Pentru a afla mai multe despre panouri solare, este necesar să se descrie modul de producere a celulelor solare și a panoului solar.

Celulele solare utilizate în fotovoltaică pot fi grupate în două categorii: produse din siliciu cristalin (c-Si) și produse cu film subțire. Produsele c-Si cuprind în prezent 85% din piața totală. Producția c-Si implică procese multiple pentru fabricarea lingoului, a celulelor și a modulelor. Un motiv pentru acest lucru este că celulele c-Si au demonstrat eficiență solidă (între 15–22%). Eficiențe mai mari pot fi obținute, dar, în prezent acestea nu sunt competitive din punct de vedere comercial. Fiecare celulă c-Si generează o cantitate mică de energie electrică (până la 0,5 V), astfel încât pentru a obține o cantitate semnificativă de putere de ieșire, un proces de lipire este realizat pentru a combina mai multe celule. O schemă a liniei tipice de fabricare a celulelor solare este prezentată mai jos. [2]

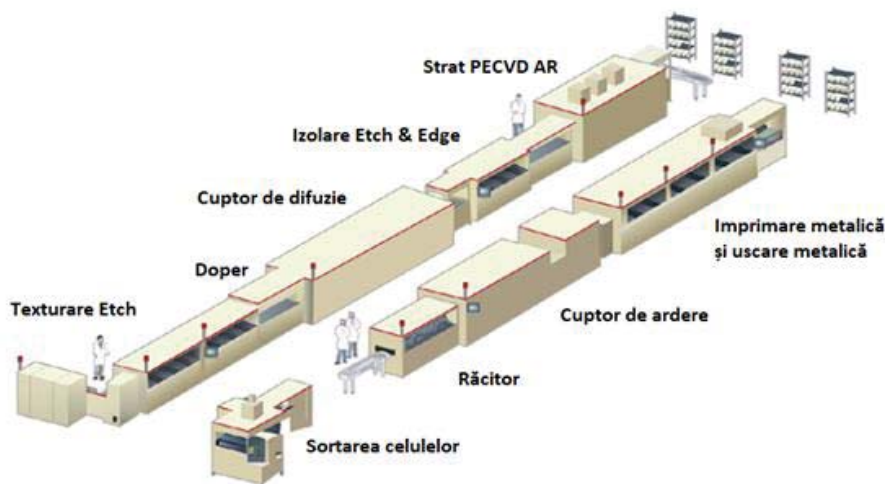


Fig. 2. Linie tipică de fabricare a celulelor solare c-Si [2]

Procesul de fabricație începe cu o texturare etch și se termină cu sortarea celulelor. Pentru a simplifica, există trei etape primare ale procesului. În prima fază, fiecare placă de siliciu este curățată, stratul deteriorat este îndepărtat și apoi suprafața fiecărei plăci este texturată. Textura reduce cantitatea de reflexie și permite plăcii să absoarbă mai mult lumină soarelui, sporind dramatic eficiența celulei. După

curățare și texturare, pe fiecare placă se depozitează un strat antireflexiv, ceea ce sporește capacitatea celulei de a absorbi lumina soarelui. În cea de-a doua fază a procesului, plăcile sunt imprimate cu un model de material utilizat pentru colectarea electronilor generați din materialul fotovoltaic. În a treia etapă și în faza finală, fiecare celulă finită este testată cu lumină solară simulată și sortată în funcție de performanța electrică. [2]

Celulele solare cu film subțire folosesc în mod obișnuit siliciu amorf (A-Si) în procesul de fabricație. Eficiența celulelor cu film subțire este de obicei mai mică decât cu c-Si (în jur de 5 până la 12 la sută), dar este o soluție potențial mai ieftină datorită costurilor mai mici de materii prime și a suprafeței mai mari (cunoscută și sub denumirea de mărimea substratului). [2]

O descriere detaliată a procesului de producție c-Si: „O fabrică de producție a celulelor c-Si începe cu o placă de siliciu purificată, dopată cu bor, ca materie primă. Este nevoie ca fiecare celulă să treacă printr-o secvență de procesare pentru a crea celule solare funcționale. Celulele sunt trecute mai întâi prin pași pentru a înlătura neregulile de suprafață și margine, și producerea unei texturi uniforme care nu reflectă la suprafață. Un produs secundar al procesului de difuzie este crearea unui strat de sticlă fosfo-silicați (PSG) pe suprafața care trebuie îndepărtată într-o baie de gravare. Următorul pas este crearea unei acoperiri antireflective, constând dintr-un strat transparent de nitru de siliciu sau unul dintre mai mulți compuși cunoscuți ca „oxizi conductivi transparenti”, care ajută la captarea luminii prin reducerea reflecțiilor și stingerea anumitor activități electrice de suprafață. Ultimii pași ai procesului sunt procesul de imprimare în care grilele de electrozi din pastă de argint sunt imprimate pe partea de sus a celulei și se aplică două benzi de contact pe partea din spate a plafonului (o bandă de argint și un strat de aluminiu) pentru a produce câmpul de suprafață din spate. Plasa imprimată intră într-un cuptor de ~ 900°C pentru a face ca stratul imprimat să se afunde în placa de siliciu. O procedură de prevenire a scurtcircuitării celulei (numită „izolare de margine”) va fi, de asemenea, efectuată printr-o varietate de metode, prin finalizarea acestei etape. Celulele finite sunt testate expunându-le la o sursă de lumină strălucitoare și sortate în grade.” [2]

### 3. Studiu de caz: Costuri de fabricație a modulelor fotovoltaice din siliciu- cristalin

În ultimul deceniu, industria fotovoltaică, siliciu-cristalin (c-Si) a crescut rapid și a dezvoltat un lanț de aprovizionare cu adevărat global. Din 2014, c-Si a reprezentat mai mult de 90% din producția fotovoltaică și a abordat 96% din producție în 2017. Creșterea sa a fost determinată de creșterea cererii consumatorilor de energie fotovoltaică, precum și de progresele tehnice în ceea ce privește performanța celulelor și procesele de fabricație care au permis reducerea dramatică a costurilor. Răspândirea globală a lanțului de aprovizionare fotovoltaică a rezultat din disponibilitatea pe scară largă a infrastructurii de fabricație adaptabile, accesului la capital și stimulentele guvernamentale în multe țări și jurisdicții subnaționale. [3]

Figura 3 este o schemă a lanțului de aprovizionare fotovoltaic c-Si. Siliciul este materia primă folosită pentru fabricarea lingourilor de siliciu monocristalin sau multicristalin, care sunt apoi tăiate, fabricate în celule și fabricate în final în module complete. [3]

Figura 4 arată distribuția globală a lanțului de aprovizionare fotovoltaic c-Si la sfârșitul anului 2017. Acesta este clasificat în lingouri de siliciu, celule și module. Producția de lingouri a fost dominată de China, Coreea de Sud, Germania și Statele Unite în 2017. China și Taiwan au dominat producția de celule, în timp ce producția de module a avut loc în principal în China, Malaezia și Coreea de Sud.

Figura 5 prezintă detalii pentru China și zonele înconjurătoare. Jiangsu este principala provincie din China pentru producția PV-urilor. Cu toate acestea, alte provincii chineze și țările asiatice au înregistrat recent o creștere rapidă a producției fotovoltaice. [3]

Numeroasele companii care intră în industria fotovoltaică au întâmpinat forțe dinamice ale pieței și fluctuații mari, bruște de preț. În 2005, prețurile medii de vânzare ale modulului erau în jur de 4 dolari / W, iar cererea modulului a fost foarte ridicată pe unele piețe, din cauza ratelor ridicate de alimentare în tarif. [3]

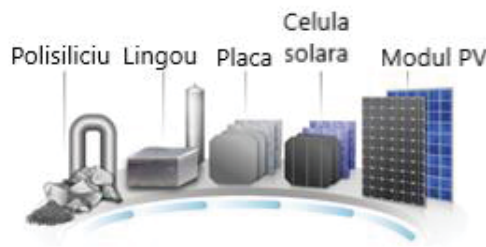


Fig. 3. Schema lanțului de aprovizionare a modului fotovoltaic c-Si [3]

Cinci ani mai târziu, piața a crescut, dar prețurile medii de vânzare ale modului au fost cu aproximativ 50% mai mici din cauza unui mediu de aprovizionare. La acea vreme (2010), a existat un dezacord considerabil cu privire la potențialul scăderii rapide ale prețurilor, dar în cele din urmă ritmul reducerilor de preț a accelerat. Prețul mediu de vânzare a modului a fost sub 1 USD / W până în 2012.

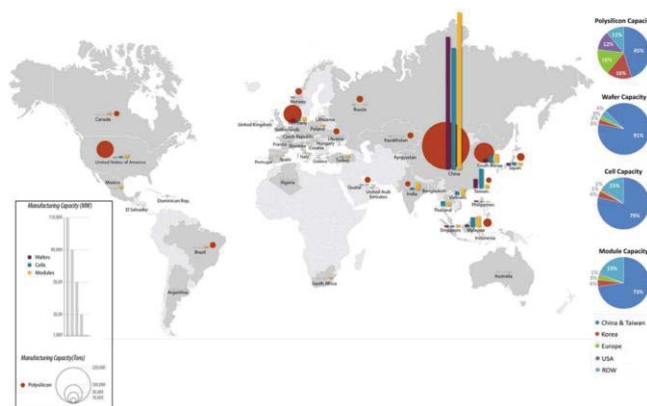


Fig. 4. Lanțul de aprovizionare c-Si pentru cele mai mari 393 de companii fotovoltaice la sfârșitul anului 2017 [3]

În 2018, prețurile modulelor au scăzut până la 0,20 USD - 0,40 USD / W din cauza unui mediu extrem de competitiv și a ofertelor. Provocarea producătorilor de fotovoltaice este să ofere un produs respectat, de înaltă calitate, de înaltă eficiență, garantat la un preț de vânzare competitiv - în timp ce, de asemenea, să obțină o marjă de profit acceptabilă. Presiunea de preț a acestei provocări este trecută pe întregul lanț de aprovizionare, de la module până la producția de polisiliciu. În acest tip de mediu concurențial, este important să înțelegem costurile de jos în sus ale fabricației actuale, precum și potențialele oportunități de reducere a costurilor care ar putea permite producătorilor să devină rentabili, menținând prețuri scăzute sau chiar reducând în continuare prețurile. [3]

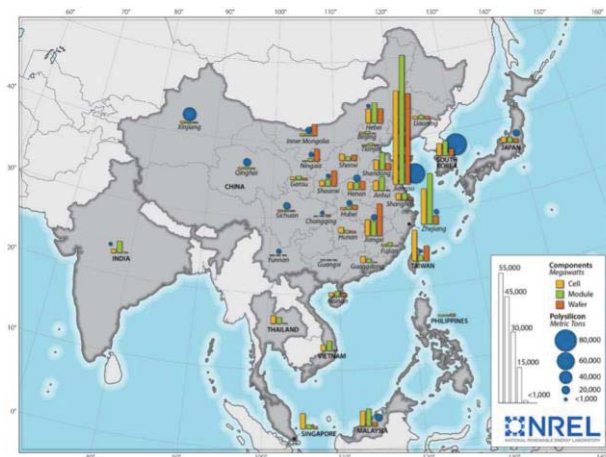


Fig. 5. Lanțul de aprovizionare c-Si din China și zonele înconjurătoare la sfârșitul anului 2017 [3]

Estimarea marjei de profit necesare unei întreprinderi pentru a continua să funcționeze sau să se extindă este un calcul complex bazat pe stadiul de creștere al firmei, randamentele preconizate, nevoile de capital de lucru și alți factori. Marja de profit pe care o firmă o poate atinge depinde de structura costurilor și de situația ofertei și a cererii din industrie. Figura 6 prezintă marjele de profit brute și marjele de profit operaționale pentru 16 firme de producție fotovoltaică, tranzacționate public din 2010, pe baza datelor din Bloomberg LP (2018). Marja brută a rămas de obicei sub 20% din 2011 și a variat cu peste 50% în ultimii doi ani. Marja de operare a rămas sub 10% din 2011. [3]

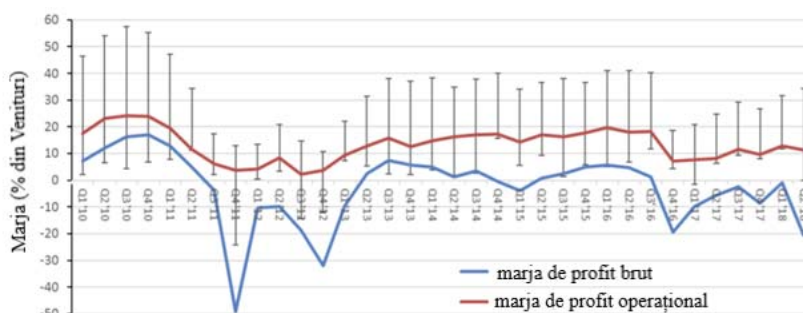


Fig. 6. Marjele brute pentru 16 producători de fotovoltaice

Industria fotovoltaică folosește în prezent două rute primare pentru convertirea materiei prime de polisiliciu brut în plăci terminate: ruta monocristalină folosind procedeul Cz și ruta multicristalină folosind procesul de solidificare direcțională (DS). Diferențele primare dintre aceste două abordări constau în modul în care polisiliciul este topit, cum se formează într-un lingou, dimensiunea lingoulului și modul în care lingourile sunt modelate în plăci. Metoda Cz creează un lingou cilindric, iar acesta este urmat de mai multe etape de tăiere pentru a produce plăci, așa cum este descris în figura 7. Pentru un creuzet tipic cu diametrul de 24, încărcat cu o greutate inițial de aproximativ 180 kg, aproximativ 35 de ore sunt necesare pentru a topi polisiliciul. Rezultatul este un lingou Cz cilindric cu masa de 150-200 kg (pașii 3-7 din figura 7). [3]

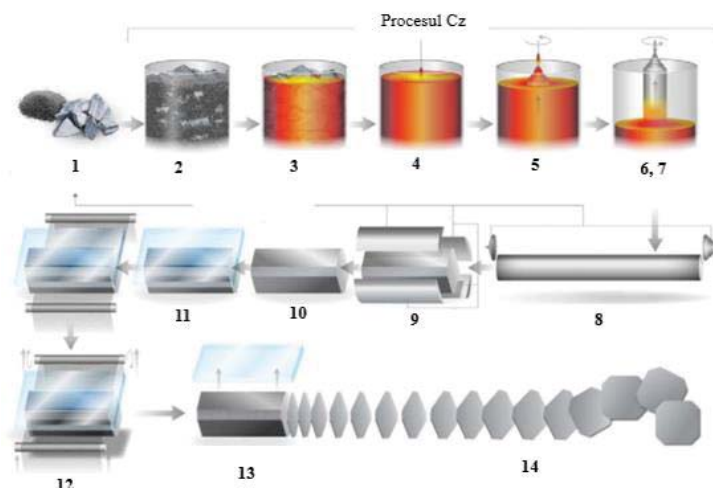


Fig. 7. Fluxul procesului pentru fabricarea de plăci monocristalino-siliciu prin creșterea cristalelor Cz [3]

Dincolo de celelalte consumabile identificate în Figura 8, estimăm costurile directe de producție rămase în cadrul COGS (forță de muncă, energie electrică, întreținere și depreciere), lucrând cu furnizorii de materiale relevante și furnizorii de echipamente de fabricație pentru a obține informații despre costul de proprietate pentru fiecare instrument. Costurile pas cu pas din figura 8 sunt bazate pe datele furnizate de cinci furnizori de echipamente și doi producători integrați care au activități semnificative în Asia. [3]



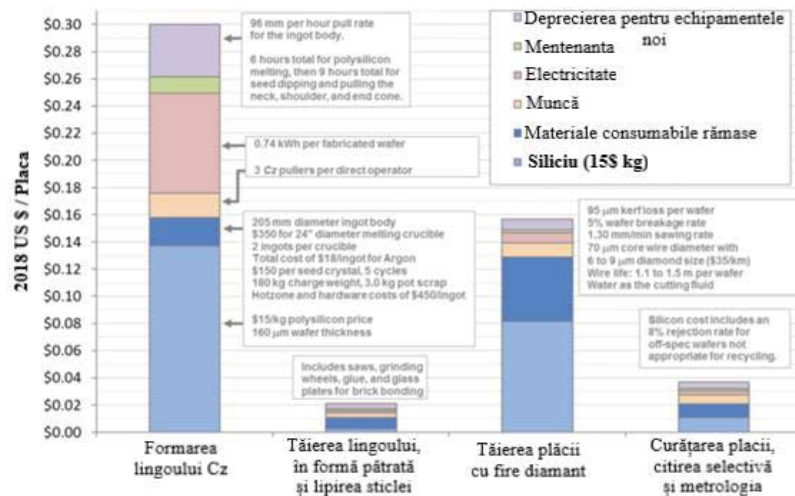


Fig. 8. Costuri pas cu pas pentru producția plăcilor Cz în China

Capacitatea de a comisiona instalații de fabricație în esența oricărei țări duce la unele presupuneri simplificate pentru calculele costurilor de la țară la țară. În primul rând, deși unele costuri de transport și logistică variază între țări, toate consumabilele necesare pentru a transforma polisiliciul brut în plăci ar putea fi ușor achiziționate de la numeroși furnizori și expediate în esență oriunde pe glob. Funcționarea completă, echipamentul de producție de calitate este, de asemenea, disponibil pentru achiziționarea de la diferiți furnizori de echipamente și toți furnizorii sunt în general dispuși să vândă aproape oricui din lume, cu un randament garantat. Cei mai mulți furnizori de echipamente pot oferi, de asemenea, instruire pentru forța de muncă locală dacă clientul o solicită. [3]

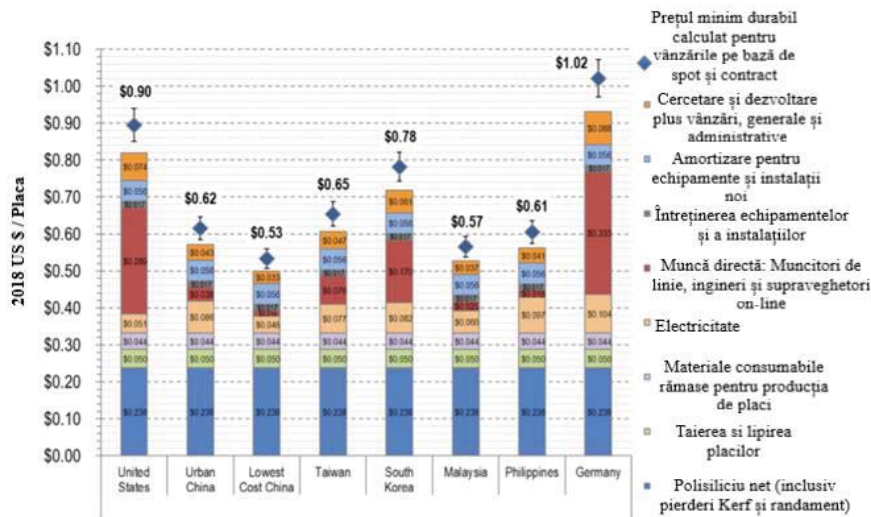


Fig. 9. Costurile totale pentru plăca în funcție de țară [3]

Figura 10 prezintă informațiile despre costurile de proprietate modelate pentru fiecare etapă, presupunând un amplasament de fabricație de 1 GW situat în China. Costurile materiale prezentate în figura 10 sunt o funcție a consumului pe celulă înmulțit cu costul pe unitate. De exemplu, metalizarea este cel mai mare cost direct pentru conversia celulelor, la 24% din costul total. Pe baza prețurilor de argint și aluminiu și compoziția acestor paste, inclusiv aditivii, calculăm costurile totale ale materialelor de metalizare de 0,015 USD ± 0,002 USD / W. Figura 10 include, de asemenea, costurile tipice de energie electrică și CapEx pentru conveioare și echipamente de manipulare. Manipularea crește randamentul, deși o parte din forța de muncă umană este necesară pentru operațiunile de logistică, inclusiv primirea de plăci

și completarea ambalajelor și transportului celular. Muncitorii sunt, de asemenea, necesari pe o linie automată de conversie a celulelor, pentru a monitoriza și întreține echipamentul și pentru a inspecta la întâmplare celulele pentru defecte vizibile. Costurile totale pentru conversia celulelor, așa cum se arată în Figura 10, ajung la 0,0632 dolari / W. [3]

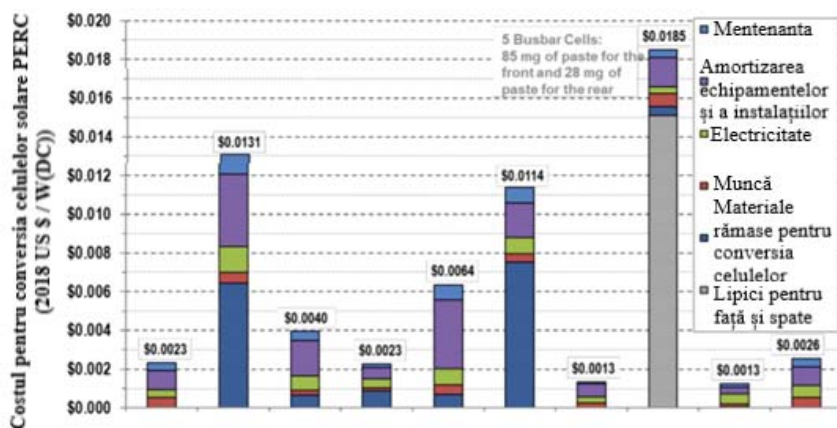


Fig. 10. Costuri pas cu pas pentru fabricarea celulelor [3]

Etapa de asamblare a modului implică conectarea electrică a celulelor în șiruri, aranjarea șirurilor de celule paralele într-un tablou, conectarea electrică a șirurilor cu panglici metalice, montarea tabloului pe un strat și laminarea. În cele din urmă, un cadru de aluminiu extrudat este de obicei plasat în jurul perimetrului modului. Figura 11 prezintă un flux de proces reprezentativ și schematic pentru un ansamblu complet de 60 de celule monocristaline de siliciu.

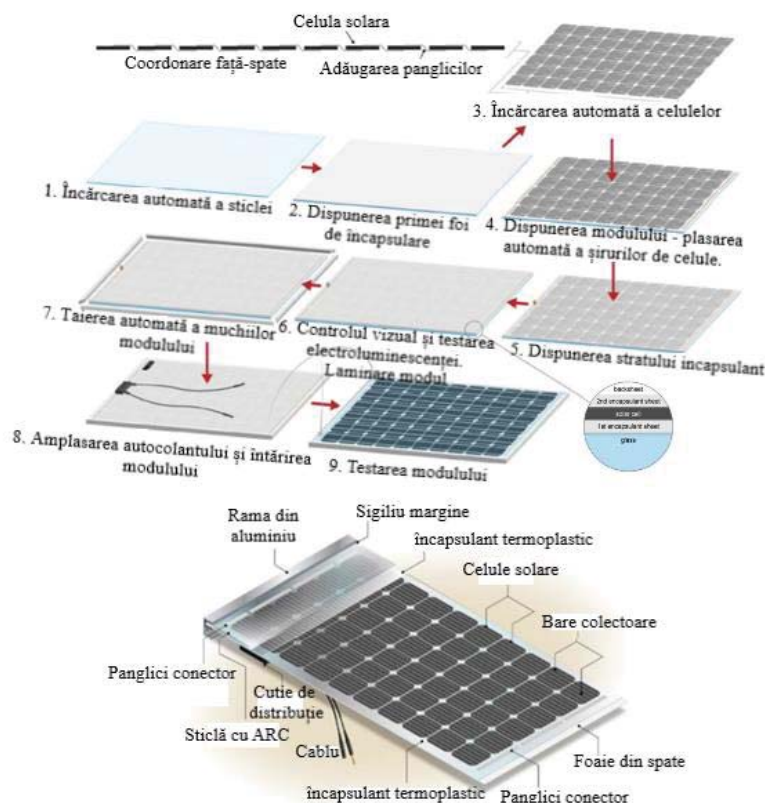


Fig. 11. Fluxul procesului (partea superioară) și produsul finit (partea inferioară) pentru ansamblul standard al modului monocristalinesiliciu cu 60 de celule [3]

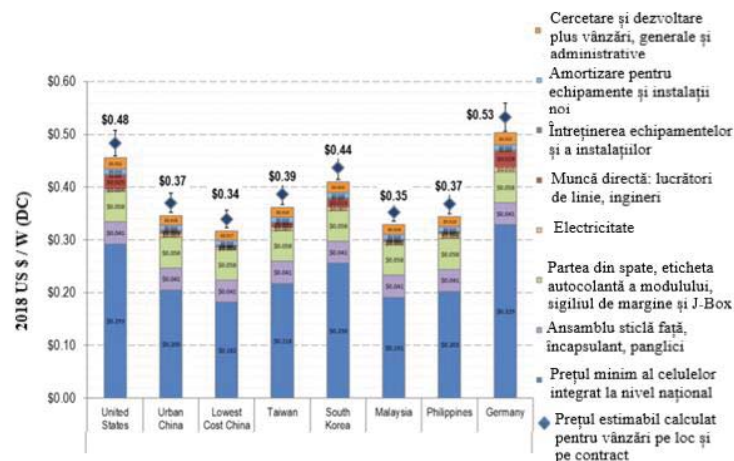


Fig. 12. Costurile de asamblare a modului PERC monocristaline, în funcție de țară [3]

#### 4. Fluxul logistic utilizat pentru producerea panourilor solare

Pentru producerea panourilor solare, am ales să utilizez fluxul logistic Ecoprogetti, care produce 116 module solare pe ora.

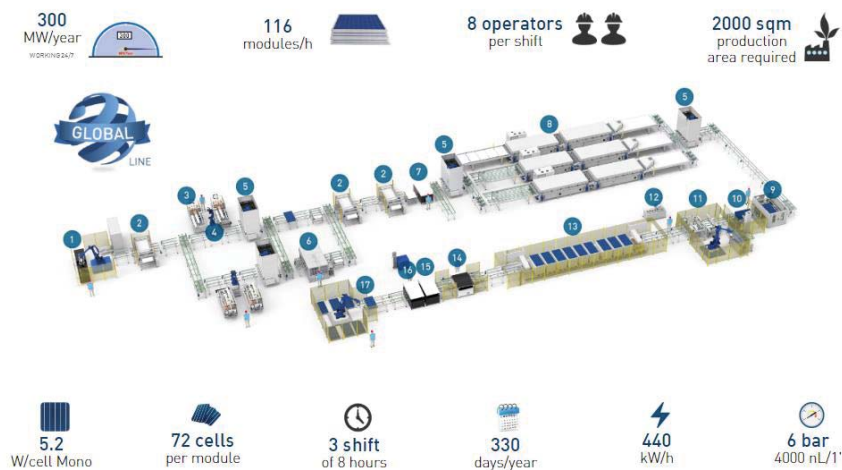


Fig. 13. Fluxul logistic Ecoprogetti [4]

#### 5. Concluzii

După prezentarea costurilor de producție pentru plăcile de siliciu, celulele solare și pentru asamblarea modului solar, am ales să utilizez fluxul logistic Ecoprogetti, următoarea etapă fiind optimizarea fluxului pentru îmbunătățirea procesului de fabricație.

#### 6. Bibliografie

- [1]. [https://www.researchgate.net/publication/282407881\\_Case\\_Study\\_of\\_Solar\\_Power\\_Producing\\_Efficiency\\_from\\_a\\_Photovoltaic\\_System](https://www.researchgate.net/publication/282407881_Case_Study_of_Solar_Power_Producing_Efficiency_from_a_Photovoltaic_System);
- [2]. <http://www.discoveryinvesting.com/blog/2014/7/30/disruption-on-its-way-to-solar-panel-manufacturing-a-case-study-of-aurora-control-technologies-acutsvxv-aactfotcbb>;
- [3]. <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72134.pdf>;
- [4]. <https://ecoprogetti.com/300mw-line>.