

# COMPETITIVITATEA ECONOMICĂ A TEHNOLOGIILOR MODERNE DE COGENERARE A ENERGIEI DIN BIOMASĂ SOLIDĂ LA SCARĂ MICĂ

Valentin ARION, Cristina GHERMAN, Viorica HLUSOV

Universitatea Tehnică a Moldovei

**Rezumatul lucrării:** În lucrare sunt considerate mai multe tehnologii de cogenerare a energiei (ORC, MAI, TA, TG, BIGCC) în baza utilizării paielor și a chips-urilor lemnoase în condițiile Republicii Moldova. În scopul determinării competitivității acestor surse de energie pentru fiecare din ele a fost determinat costul nivelat al energiei produse (CNAE), comparat ulterior cu costul electricității furnizate din rețeaua de interes public. Costurile nivelate evaluate stau la baza determinării tarifelor Feed-in de promovare a surselor regenerabile prin intermediul unui mecanism de sprijin al statului.

**Cuvinte cheie:** costul nivelat al energiei produse, cheltuielile totale actualizate, energia totală actualizată, cogenerare, biomasă, tarife feed-in.

## 1. Introducere

Republica Moldova deține anual un important potențial de biomasă solidă estimat la nivel de cca 600 mii tone echivalent petrol, din care cea mai mare parte (peste 75%) o constituie deșeurile agricole, ce includ paietele, tulpinile de floarea soarelui și porumb, ramurile de la curățirea grădinilor și viilor etc. [1]. Populația din zonele rurale beneficiază de disponibilitatea biomasei solide și o utilizează drept combustibil pentru prepararea hranei și încălzirea locuințelor. Însă în multe cazuri arderea biomasei solide are loc în instalații tradiționale, cu randamente scăzute, ceea ce conduce la un consum ineficient de combustibil. A venit timpul de a aplica tehnologii eficiente de valorificare energetică a deșeurilor agricole solide, inclusiv prin producerea concomitentă a căldurii și electricității (cogenerarea energiei).

În lucrare este evaluată competitivitatea economică a mai multor tehnologii moderne de cogenerare a energiei, bazate pe utilizarea biomasei solide, cu puteri instalate cuprinse între 100 și 6000 kW, printre acestea fiind: motoarele cu ardere internă, turbinele cu gaze, turbinele cu abur, turbinele cu lichide organice (ORC) și tehnologia ciclului combinat cu gazeificarea integrată a biomasei.

Criteriul aplicat la ordonarea tehnologiilor la faza pre-investițională este  $CNAE \rightarrow \min$ , unde CNAE este costul nivelat al energiei produse. În plus, CNAE stă la baza stabilirii tarifului Feed-in pentru electricitatea produsă din sursele regenerabile, promovate prin mecanisme de suport din partea statului.

## 2. Metodologia de calcul a costului nivelat al energiei (cnae)

Costului nivelat al energiei (CNAE) se determină prin raportarea cheltuielilor totale actualizate (CTA), aferente producerii energiei pe durata de viață a sursei, la energia totală actualizată (ETA), generată în acest interval de timp -

$$CNAE = CTA / ETA. \quad (1)$$

### Determinarea cheltuielilor totale actualizate

Calculul CTA și ETA, se bazează în totalitate pe aplicarea modelului static-echivalent [2,3].

Cheltuielile totale, aferente unei instalații de cogenerare  $CTA_{cogen}$ , au următoarea structură:

$$CTA_{cogen} = CTA_I + CTA_{O\&M} + CTA_{comb}, \quad (2)$$

unde:  $CTA_I$  reprezintă cheltuielile cu investiția;

$CTA_{O\&M}$  - cheltuielile de operare și mentenanță și

$CTA_{comb}$  - cheltuielile cu combustibilul.

Mai jos vom aduce principalele formule de calcul pentru cele trei componente ale  $CTA_{cogen}$ . De menționat că anul de actualizare  $\theta$ , de regulă, este anul ce precede primul an de funcționare a sursei ( $\theta = 0$ ).

### Cheltuielile cu investiția

Cheltuielile  $CTA_I$  reprezintă costul investiției, eșalonate pe perioada de construcție  $d$ .

În cazul eșalonării investiției în rate egale  $I_0$  pe durata  $d$ , pentru  $CTA_I$  putem scrie -

$$CTA_I = I_0 \cdot \bar{T}_{d,i}, \quad \text{unde} \quad \bar{T}_{d,i} = [1 - (1+i)^{-d}] / i. \quad (3)$$

$$\text{În caz contrar - } CTA_I = \sum_{t=-(d-1)}^0 I_t \cdot (1+i)^{\theta-t}.$$

*Cheltuielile cu combustibilul -*

$$CTA_{\text{comb}} = C_{\text{comb},0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}, \quad (4)$$

$$C_{\text{comb},0} = W_0 \cdot b_0 \cdot c_0, \quad \bar{T}_{T,x_1} = [1 - (1+x_1)^{-T}] / x_1 \quad \text{și}$$

$$(1+x_1) = (1+i) / [(1+r_{\text{degr}}) \cdot (1+r_b) \cdot (1+r_{\text{comb}})],$$

- $C_{\text{comb},0}$  - valoare cunoscută a cheltuielilor cu combustibilul în anul de referință  $t_0$ , raportată la anul 0;  
 $W_0$  - valoarea de referință a volumului energiei produse;  
 $b_0$  - valoarea de referință a consumului specific de combustibil;  
 $c_{\text{comb},0}$  - valoarea de referință a costului combustibilului;  
 $r_{\text{degr}}$  - rata anuală de diminuare a volumului producției de energie (valoare negativă);  
 $r_b$  - rata anuală de creștere a consumului specific de combustibil;  
 $r_{\text{comb}}$  - rata anuală de creștere a costului combustibilului;  
 $T$  - durata de studiu;  
 $i$  - rata de actualizare.

În formula (4)  $\bar{T}_{T,x_1}$  reprezintă o durată a perioadei de studiu, recalculată (actualizată) la rata  $x_1$ . Rata  $x_1$  este o rată sintetică determinată de trei factori: factorul timp, degradarea instalației de producere și creșterea în timp a costului combustibilului,  $x_1 \approx i - r_{\text{degr}} - r_b - r_{\text{comb}}$ .

*Cheltuielile de operare și mentenanță -*

$$CTA_{\text{O\&M}} = C_{\text{O\&M},0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}, \quad (5)$$

$$\text{unde: } C_{\text{O\&M},0} = k_{\text{O\&M},0} \cdot I,$$

$$\bar{T}_{T,x_2} = [1 - (1+x_2)^{-T}] / x_2, \quad (1+x_2) = (1+i) / (1+r_{\text{O\&M}}), \quad x_2 = (1+i) / (1+r_{\text{O\&M}}) - 1,$$

- $C_{\text{O\&M},0}$  - valoare cunoscută a cheltuielilor O&M în anul de referință  $t_0$ , raportată la anul 0;  
 $k_{\text{O\&M},0}$  - valoarea de referință a cotei anuale pentru operare și mentenanță, % din valoarea investiției totale;  
 $r_{\text{O\&M}}$  - rata creșterii anuale a cheltuielilor de operare și mentenanță;  
 $\bar{T}_{T,x_2}$  - durata recalculată (actualizată) a perioadei de calcul, ce reflectă durata calendaristică a perioadei de calcul, rata de actualizare și dinamica cheltuielilor anuale de operare și mentenanță;  
 $x_2$  - rata sintetică de recalculare a duratei perioadei de studiu.

Substituind componentele din (2) cu expresiile (3)-(5), pentru cheltuielile totale actualizate aferente sursei de energie, obținem -

$$CTA = I_0 \cdot \bar{T}_{d,i} + C_{\text{O\&M},0} \cdot \bar{T}_{T,x_1} + C_{\text{comb},0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}. \quad (6)$$

Energia totală actualizată

Energia totală produsă pe perioada de studiu, actualizată -

$$ETA = E_0 \cdot \bar{T}_{T,x_3}, \quad (7)$$

unde:  $E_0$  reprezintă valoarea energiei electrice produse în anul de referință  $t_0$ , raportată la anul 0;

$\bar{T}_{T,x_3}$  - o durată actualizată a perioadei de studiu;

$x_3$  - rată sintetică de recalculare a duratei perioadei de studiu.

Pentru rata echivalentă  $x_3$  avem -  $x_3 = [(1+i)/(1+r_{degr})] - 1$ .

Pentru o instalație de producere a energiei, determinând CTA și ETA, conform expresiilor (6) și (7), ușor găsim valoarea CNAE, aplicând formula (1).

### 3. O DESCRIERE GENERALĂ A DATELOR UTILIZATE ÎN CALCULELE ECONOMICE

În lucrare sunt considerate tehnologiile moderne de producere a energiei în cogenerare din biomasă solidă: motoarele cu ardere internă (MAI), turbinele cu gaze (TG), turbinele cu abur (TA), turbinele cu lichide organice (ORC) și tehnologia ciclului combinat cu gazeificarea integrată a biomasei (BIGCC), cu puteri cuprinse între 100 și 6000 kW. Pentru aceste tehnologii urma de a determina valoarea costului nivelat al energiei produse.

Tehnologiile studiate permit valorificarea pe larg a tuturor tipurilor de biomasă solidă, ce rezultă din silvicultură și agricultură, însă în lucrare calculele au fost realizate doar pentru două tipuri de biomasă: paie și chips-uri lemnoase. În instalațiile TA și ORC biomasa este arsă în mod direct, pe când în cazul instalațiilor MAI, TG și BIGCC biomasa mai întâi este convertită în singaz, cu care instalațiile respective ulterior sunt alimentate.

Incertitudinea datelor inițiale este abordată prin considerarea a două scenarii de calcul: unul *optimist* și altul *conservativ*.

*Scenariul optimist* este caracterizat de un set de informații inițiale, care conduce către valoarea minimă a lui CNAE, CNAE<sup>-</sup> (factorul de capacitate al sursei - valoarea maximă, randamentul - max., rata de creștere a consumului specific de combustibil - min., rata de creștere a costului combustibilului - min., rata de degradare a capacității instalațiilor de producere a energiei - min.). *Scenariul conservativ*, la rândul său, este caracterizat de un alt set de informații inițiale, care conduce către valoarea maximă conservativă a lui CNAE, CNAE<sup>+</sup>.

Astfel, în urma calculelor realizate pentru fiecare instalație de cogenerare au fost obținute cele două valori marginale ale CNAE, care determină intervalul de incertitudine al costului nivelat al energiei produse.

În scopul comparării ulterioare a tehnologiilor de cogenerare considerate, în calcule a fost acceptat un șir de parametri comuni, caracteristici situației din Republica Moldova, după cum urmează:

- *Durata de studiu.* Pentru instalațiile de cogenerare a energiei din biomasă solidă, durata de viață variază de la 7 până la 25 de ani. În calcule a fost acceptată o durată de studiu unică pentru toate tehnologiile considerate, egală cu 15 ani, care, eventual, poate fi durata de contractare cu producătorii de energie regenerabilă în cadrul unor contracte de tip Feed-in.
- *Durata de utilizare a puterii maxime (sau Factorul de capacitate).* Pentru toate tehnologiile considerate, în calcule au fost acceptate valori similare ale duratei de utilizare a *puterii electrice maxime*, cuprinse între 7000 (conservativ) și 8000 h/an (optimist).  
Durată de utilizare a *puterii termice maxime* deține valori cuprinse între 2000 și 4000 h/an. De menționat, că în situațiile în care la locul de consum a energiei termice va exista o cerere mai mare ( $T_m > 4000$  h/an), acest lucru va conduce doar la îmbunătățirea performanței surselor noi de energie.
- *Costul biocombustibilului și rata de creștere a lui.* Costurile biomasei solide acceptate: paie - 40-60 Euro/t și chips-uri - 70-100 Euro/t. Pentru tehnologiile MAI și TG, bazate pe utilizarea combustibil gazos, biomasa solidă este convertită în singaz. Costul final al singazului reflectă costul biomasei și a conversiei ei în singaz. Creșterea anuală a costului combustibilului: 3 - 5 %.
- *Căldura inferioară de ardere a combustibililor:* paie - 9-14 MJ/kg, așchii lemnoase - 10-16 MJ/kg și singaz - 4-7 MJ/m<sup>3</sup>.
- *Rata anuală de creștere a consumului specific de combustibil:* 0,5%, la fel ca și *rata de degradare a capacității de producere a instalației.*
- *Rata de actualizare* pentru toate tehnologiile - 12 % anual. Această rată reprezintă valoarea medie ponderată a costului capitalului implicat: 65% împrumut bancar la rata de 8 % capital propriu în proporție de 35% la rata de 20 %.

Pe lângă parametrii comuni, tehnologiile considerate sunt caracterizate și de un șir de parametri specifici:

- *Investiția specifică*, ce variază considerabil de la un tip de instalație la altul, precum și în funcție de puterea instalată a sursei. Pentru tehnologia ORC, de exemplu, au fost acceptate investiții specifice de la 4,7 mii €/kW pentru instalația cu puterea de 1800 kW și până la 10,5 mii €/kW pentru instalația cu puterea 400 kW, cu valorificarea energiei termice [4,5].
- *Cheltuielile de operare și mentenanță* în dependență de tipul instalației sunt acceptate la un nivel de 2,5-5% din investiția totală.

- *Costul energiei termice* produse de către instalațiile de cogenerare considerate a fost acceptat la nivelul costului căldurii produse la o sursă de referință.
- Pentru fiecare instalație de cogenerare considerată în calitate de sursă de referință a fost acceptată o centrală termică de aceeași putere, alimentată cu același tip de combustibil - paie sau chips-uri. Astfel, pentru instalațiile cu puterea termică de cca 100 kW a fost acceptat un cost al căldurii la sursa de referință de 37-49 Euro/Gcal; 500 kW: 36-48 Euro/Gcal; 1000 kW: 30-41 Euro/Gcal și pentru 5000 kW respectiv 30-40 Euro/Gcal.

#### 4. COMPETITIVITATEA ECONOMICĂ A TEHNOLOGIILOR CONSIDERATE

##### Compararea tehnologiilor

Pentru o comparare economică a tehnologiilor considerate de producere a electricității la scară mică (TA, ORC, TG, MAI și BIGCC) în lucrare a fost determinat *costul nivelat al energiei produse (CNAE)*. Calculele au fost realizate pentru două scenarii – optimist și conservativ. Compararea tehnologiilor s-a realizat în baza criteriului *CNAE* → *min*. În figura 1 sunt prezentate rezultatele calcului costului nivelat al electricității produse prin aplicarea tehnologiilor menționate atât în instalații de cogenerare, cât și în grupuri electrogene pentru diferite intervale de puteri instalate: 100-400, 500-600, 1000 kW și mai mult.

Analiza numerică comparativă indică asupra faptului că tehnologia TA de cogenerare a energiei pare a fi cea mai atractivă, fiind urmată de TG, MAI, ORC și BIGCC. Așa cum este de așteptat, instalațiile energetice de tip TA, bazate pe arderea directă a biomasei solide, dețin cel mai mic cost al energiei produse - practic pentru întreaga gamă de puteri considerate.

Instalațiile de tip TG și MAI, alimentate cu singaz, produs din biomasa solidă disponibilă, strâns concurează între ele; la capacități mai mari de 500 kW tehnologia MAI se dovedește mai eficientă decât TG. În plus, e cunoscut că la scăderea gradului de încărcare a generatorului, randamentul TG se diminuează considerabil, pe când la MAI el este mult mai înalt și stabil.

Tehnologia ORC (cicului organic Rankine) se poziționează într-un mod dual – pe de-o parte pare a fi cea mai atractivă, iar pe de altă parte până în prezent rămâne a fi puțin utilizată. ORC permite de a valorifica practic toate tipurile de deșuri agricole solide, inclusiv și cele cu un potențial energetic scăzut, însă pentru această tehnologie este caracteristic un *indice de cogenerare* ( $\beta$ ) scăzut; aceasta înseamnă că pentru ORC cantitatea de energie electrică generată este mică în raport cu căldura produsă. Electricitatea fiind o formă superioară de energie, convertibilă practic în toate celelalte forme, o valoare mare a indicelui  $\beta$  semnifică o calitate deosebită a conversiei combustibilului; pentru instalațiile de cogenerare de tip ORC cu puteri nominale între 400-1700 kW producția de căldură este cca de cinci ori mai mare decât cea de electricitate ( $\beta = 0,22-0,18$ ). Este greu de găsit locații (aplicări) atractive pentru instalațiile ORC, în care întreaga cantitate a energiei termice produse de-a lungul anilor (pe durata de viață) să poată fi economic valorificată; aceasta este cea mai mare piedică în implementarea instalațiilor ORC.

Tehnologia ciclului combinat cu gazeificarea integrată a biomasei (BIGCC) la puteri mici (cea mai mică putere nominală este de 6100 kW) concurează cu MAI. La capacități de cca 10-15MW centralele BIGCC ar reprezenta cea mai atractivă soluție de conversie a biomasei solide în electricitate și căldură.

##### Compararea cu rețeaua de interes public

Fezabilitatea implementării tehnologiilor menționate de generare a energiei se determină în raport cu sursele de electricitate și căldură existente pe piața locală.

Pentru instalațiile de cogenerare costul nivelat al energiei termice în calcule a fost acceptat la nivelul costului respectiv la *sursele de referință* (centralele termice). Costul nivelat ce a rezultat pentru electricitatea produsă în cogenerare este comparat cu costul electricității furnizate din rețeaua de interes public, la barele de medie tensiune, la care ar putea fi racordate instalațiile considerate.

Dacă vom admite că sursele noi pot fi puse în funcționare peste 3 ani de la momentul realizării studiului, atunci pentru perioada de 15 ani ce va urma, vom determina costul nivelat al energiei, furnizate din rețea

$$CNAE_{rețea} [6] : CNAE_{rețea} = c_{e, rețea,3} \cdot \bar{T}_{T,x} / \bar{T}_{T,i},$$

unde  $c_{e, rețea,3}$  reprezintă costul electricității după 3 ani,  $c_{e, rețea,3} = c_{e,0} \cdot (1 + r_{rețea})^3$ ,

$\bar{T}_{T,x}$  - o durată recalculată a perioadei de studiu;

x - o rată sintetică determinată din expresia:  $1 + x = (1 + i)/(1 + r_{rețea})$ ;

$r_{rețea}$  - rata creșterii anuale a costului energiei electrice furnizate din rețea.

În ipoteza unei creșteri anuale de 6-8% a costului energiei electrice furnizate din rețea, pentru costul nivelat  $CNAE_{rețea}$  al electricității la barele MT rezultă - 14-17c€/kWh.

În figura 1 pentru comparare este afișat și costul  $CNAE_{rețea}$ . După cum clar se vede din această figură, tehnologiile moderne de cogenerare a energiei din biomasa solidă, la scară mică, nu pot concura cu sursele

tradiționale.

Doar implicarea statului – adoptarea unei scheme de sprijin a implementării surselor „verzi” de energie, poate face ca investițiile să vină către acest sector.

Producerea energiei din biomasa solidă, la capacități mai mari de 4000-5000 kW, se dovedește a fi fezabilă pentru toate tehnologiile considerate în condițiile Republicii Moldova.

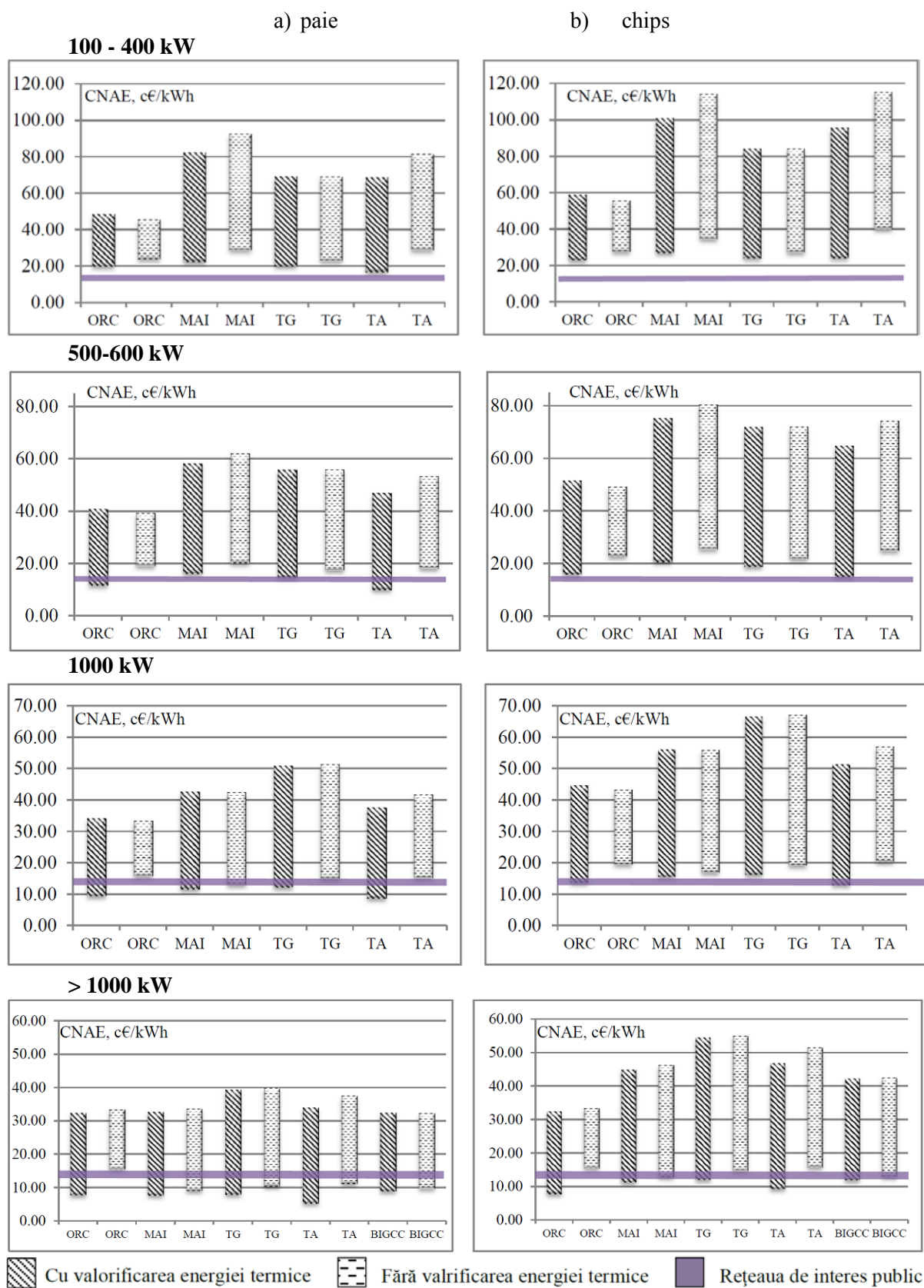


Figura 1. Costul nivelat al electricității produse pentru tehnologiile considerate

## CONSTATĂRI ȘI CONCLUZII

1. Republica Moldova deține anual un potențial important de biomasă solidă estimat la nivel de cca 600 mii tone echivalent petrol, din care cea mai mare parte (peste 75%) o constituie deșeurile agricole (paiele, tulpinile de floarea soarelui și porumb, ramurile de la curățirea grădinilor și viilor etc.). Acest potențial de biomasă merită a fi valorificat pentru a produce căldură și electricitate utilizând tehnologii eficiente, precum tehnologiile de cogenerare a energiei (producerea concomitentă a căldurii și electricității).
2. În lucrare a fost realizată o evaluare economică a mai multor tehnologii moderne de producere a energiei din biomasa solidă (paie și chips-uri lemnoase) - turbinele cu abur (TA), turbinele cu lichide organice (ORC), motoarele cu ardere internă (MAI), turbinele cu gaze (TG), și tehnologia ciclului combinat cu gazificarea integrată a biomasei (BIGCC). Primele două tehnologii presupun arderea directă a biomasei solide pe când celelalte – conversia prealabilă a biomasei solid în gaz combustibil – singaz.
3. Analiza numerică efectuată a arătat că în condițiile Republicii Moldova producerea electricității din biomasă solidă se dovedește a fi atractivă doar pentru capacități unitare mai mari de 4000-5000 kW. Astfel, promovarea producției de căldură și electricitate, obținute în cogenerare din biomasa solidă, este posibilă doar cu sprijinul statului.
4. Costul nivelat al electricității, determinat pentru tehnologiile ORC, MAI, TG, TA și BIGCC, poate servi drept bază pentru stabilirea ulterioară a tarifelor feed-in, aplicate în cadrul unui mecanism de sprijin a surselor regenerabile adoptat în Republica Moldova.

## REFERINȚE

1. V. Arion, C. Gherman, S. Ungureanu, - *Solid Biomass Potential Assessment for Moldova*, 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Power Engineering, EPE-2010, 28-30 October 2010 - Iași, Romania.
2. *Ghid privind evaluarea economică a proiectelor din domeniile eficienței energetice și energiilor regenerabile* / Agenția pentru Eficiență Energetică; executori: V. Arion, V. Hlusov, C. Gherman, O. Șveț, Tipografia-Sirius, Chișinău. 2014, 204 p.
3. V. Arion, V. Hlusov, C. Gherman, *Substitution of dynamic models by equivalent-static ones in energy projects long-run cost assessment*, 6<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Power Engineering, EPE-2010, Oct. 28-30, 2010, Iași.
4. V. Arion, C. Gherman, O. Șveț, L. Arseni, *Costurile tehnologiilor moderne de producere a electricității din biomasa solidă*, Conferința Internațională “Energetica Moldovei 2012. Aspecte regionale de dezvoltare” 4-6 Octombrie, 2012 – Chișinău, Moldova.
5. V. Arion, C. Gherman, L. Arseni, *Evaluarea economică a tehnologiilor ORC și MAI de producere a energiei din biomasă solidă*, Conferința Internațională “Energetica Moldovei 2012. Aspecte regionale de dezvoltare” 4-6 Octombrie, 2012 – Chișinău, Moldova.
6. V. Arion, C. Gherman, C. Borosan, *Fezabilitatea edificării unei centrale de cogenerare pe biomasă, ciclu combinat, cu gazeificarea integrată*, Conferința Internațională “Energetica Moldovei 2012 ” 4-6 Octombrie, 2012 – Chișinău, Moldova.