

ANALIZA SISTEMELOR DE COGENERARE – INDICATORI DE PERFORMANȚĂ

Claudia IONIȚĂ, Mircea MARINESCU, Alexandru DOBROVICESCU,
Eugenia Elena VASILESCU

UNIVERSITATEA POLITEHNICA, București

Abstract. This paper presents a comparative analysis of cogeneration systems. A number of performance criteria are used to compare the schemes with each other and with separate generation plants. Criteria such as the energy efficiency, fuel savings, total fuel consumption, exergetic efficiency, energetic and exergetic costs for utilities are discussed. The cogeneration systems analyzed in this study are: a steam cycle with back-pressure turbine, a gas turbine based system, a combined cycle and a Diesel engine based system. The comparison indicates the feasibility of the cogeneration systems.

NOMENCLATOR

\dot{Q} flux de căldură (kW);

P puterea produsă (kW);

\dot{Q}_{CG} flux de căldură produs în sistemul de cogenerare;

P_{CG} puterea generată în sistemul de cogenerare;

\dot{Q}_P^{ch} corespunde fluxului de căldură dezvoltat prin arderea combustibilului în sistemul de cogenerare;

E_{CG}^q exergia căldurii în sistemul de cogenerare;

E_{CG}^{fu} exergia combustibilului în sistemul de cogenerare (kW);

\dot{Q}_P^{ch} reprezintă fluxul de căldură echivalent combustibilului consumat pentru obținerea puterii în producția separată

\dot{Q}_P^{ch} fluxul de căldură echivalent combustibilului consumat pentru obținerea fluxului de căldură în producția separată

η^q randament de producere a energiei termice;

η^p randament de producere a energiei electrice;

η_{sep}^p randamentul de producere separată a puterii

C_{ch} costul combustibilului [Euro]

Indici inferiori și superiori

CG = cogenerare

P = referitor la putere

Q = referitor la fluxul termic

ref = referință

sep = producția separată de putere și flux de căldură

C = se referă la cererea consumatorului

1. INTRODUCERE

Cogenerarea este o metodă de producere simultană, în același echipament, pe baza aceluiași combustibil a energiei electrice și termice.

Instalațiile cu sisteme de cogenerare se folosesc pentru a produce putere mecanică sau electrică, iar căldura reziduală se folosește pentru obținerea aburului necesar consumului industrial sau casnic (pentru a satisface încălzirea spațiilor, a apei menajere sau pentru alte necesități).

Cogenerarea reprezintă pentru economia energetică o tehnologie cu avantaje considerabile în ceea ce privește consumul de combustibil, dar și pentru protecția mediului înconjurător.

Se consumă pentru o valoare dată a puterii și căldurii cu 10% până la 30% mai puțin combustibil în sistemele cu cogenerare decât în cazul în care se produc aceleași cantități de electricitate și căldură separat.

Tehnologia de cogenerare permite obținerea unei eficiențe de conversie mai mari decât prin metodele clasice prin care cele două forme de energie se produc separat, iar emisia de CO₂ este mai redusă.

Toate aceste concluzii au condus la un deosebit interes din partea guvernelor europene care au aprobat programe de cercetare și au sprijinit finanțari acest segment al industriei energetice.

2. SISTENE DE COGENERARE

Se consideră patru sisteme de cogenerare supuse unui studiu de fezabilitate în vederea găsirii celor mai avantajoase soluții cogenerative, care pot fi aplicate ca alternativă în condițiile unei situații existente la care cererea de abur în procesul de producție este de 11,5 t/h, la presiunea de 12 bar. În toate cele patru cazuri comparate criteriul fixat (comun) este cererea de abur de 11,5 t/h.

Sistemele de cogenerare analizate în acest studiu sunt: un ciclu de abur cu turbină cu contrapresiune (BC-TA), un sistem bazat pe turbină cu gaze (TG-B), un ciclu combinat (TG-B-TA) și un sistem de cogenerare cu motor Diesel (MD-B).

Schemele acestor instalații sunt reprezentate în figurile 1, 2, 3 și 4.

În prima figură se prezintă schematic opțiunea de cogenerare cu turbină cu abur alimentată de un generator de abur. Se observă că aburul cu presiune înaltă obținut la generator este destins în turbină până la nivelul de presiune cerut de consumator și anume 12 bar și temperatura de 237°C. Eficiența acestui sistem este bună însă nu permite obținerea unei puteri mari, puterea obținută fiind de numai 1200 kW.

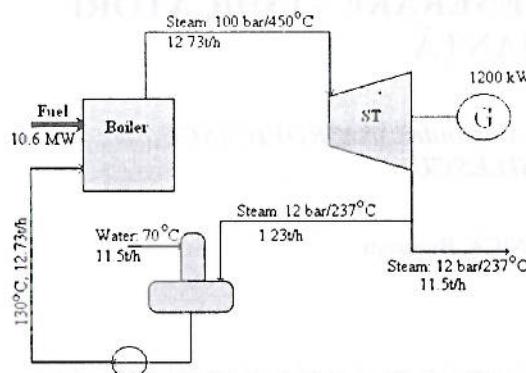


Fig. 1. Sistem de cogenerare cu turbină cu abur.

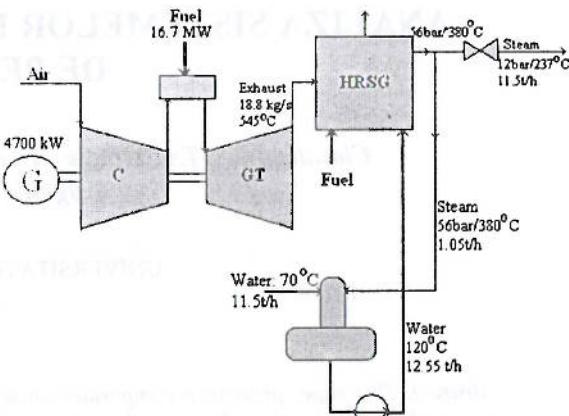


Fig. 2. Sistem de cogenerare cu turbină cu gaz.

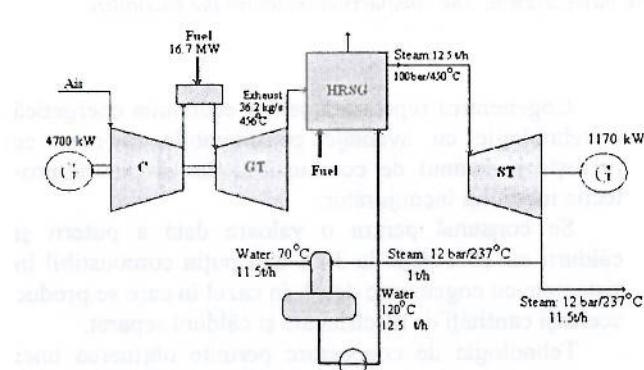


Fig. 3. Sistem de cogenerare cu ciclu combinat.

În figura 2 este prezentat sistemul de cogenerare cu turbină cu gaze. Instalația este alimentată cu aer care este mai întâi comprimat (\dot{m}_p) după care este introdus în camera de ardere împreună cu combustibilul. Ca urmare a reacției chimice sunt produse gazele de ardere care intră în turbină unde sunt mai departe destinate. Turbina produce o putere electrică utilă de 4,7MW. Gazele de ardere parcurg turbina și la ieșire sunt conduse în generatorul recuperator de căldură unde își reduc temperatură și sunt evacuate în final în atmosferă. În recuperator se obține debitul de abur de 11,5 t/h repartizat printr-un proces de laminare la presiunea necesară de 12 bar.

În figura 3 rezultă încă o schemă de cogenerare propusă prin combinarea primelor două opțiuni; puterea electrică este produsă de generatorul cuplat cu turbina cu gaze, dar și de un alt generator cuplat la instalația de turbină cu abur. Puterea generată de sistem atinge 5,8 MW.

Cea de-a patra opțiune cuprinde un motor Diesel, un cazan recuperator de căldură (cu ardere suplimentară) și este prezentată în figura 4.

3. CRITERII DE PERFORMANȚĂ

Performanțele sistemelor cogenerative se pot aprecia – conform principiilor Termodinamicii – cu o serie de criterii specifice de apreciere cum sunt: randamentul energetic, randamentul exergetic, eficiența raportului flux de căldură/putere, economia de combustibil față de consumul de combustibil al instalațiilor de producere

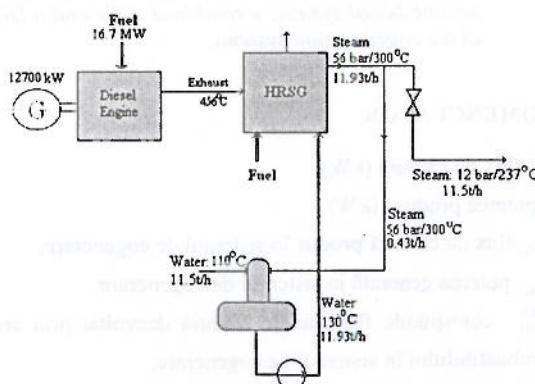


Fig. 4. Sistem de cogenerare cu motor Diesel.

separată a energiei, costul energetic și exergetic corespunzător fluxurilor utile de energie etc.

Randamentul energetic tratează numai partea cantitativă a energiei. Se ia în considerare numai primul principiu al termodinamicii care se oprește la granița dintre sistem și mediul exterior al acestuia, fiind capabil de a detecta numai pierderile de energie neutilizată și aruncată în mediul ambient; primul principiu nu face nici o diferență calitativă între diferite tipuri de energii și folosind aceeași unitate de măsură, se poate considera căldura și lucrul mecanic ca fiind echivalente. Sunt sesizate numai pierderile externe, cele interne nefiind luate în calcul.

Se definește ca:

$$\eta_e = \frac{\dot{Q}_{CG} + P_{CG}}{\dot{Q}_{CG}^{ch}} \quad (1)$$

Numai cel de-al doilea principiu al termodinamicii reușește să pătrundă în intimitatea proceselor precizând locul și cantitatea de energie neutilizată distrusă.

Randamentul exergetic evidențiază calitatea căldurii, adică nivelul de temperatură la care ea este livrată. Deci, o valoare corectă a performanței este obținută dacă energia conținută de combustibil este de asemenea luată în considerare:

$$\eta_{ex} = \frac{P_{CG} + E_{CG}^Q}{E_{CG}^{ch}} \quad (2)$$

Cererea de căldură și putere pentru un consumator industrial poate fi satisfăcută de o instalație cu cogenerare pe de-o parte, de instalații de producție separată a căldurii și puterii pe de altă parte sau împreună dacă instalația de cogenerare nu poate satisface singură cererea de căldură și putere.

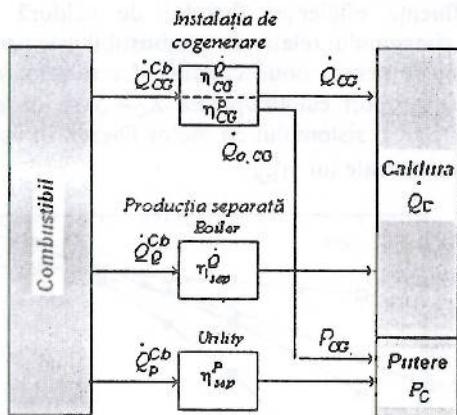


Fig. 5. Cogenerarea comparativ cu producția separată de căldură și putere.

Expresia generală pentru fluxul de căldură echivalent consumului total de combustibil:

$$\dot{Q}_{total}^{Ch} = (\dot{Q}_P^{Ch} + \dot{Q}_Q^{Ch}) + \dot{Q}_{CG}^{Ch} \quad (3)$$

Fluxul de căldură echivalent combustibilului consumat pentru obținerea căldurii și puterii în sistemul de cogenerare poate fi exprimat fie ca raportul între fluxul de căldură produs și randamentul termic, sau ca raportul între puterea produsă și randamentul electric.

Introducând randamentele de producere a energiei termice și electrice pentru instalațiile cu cogenerare și cu generare separată ecuația (3) devine:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{total}^{Ch} &= \frac{P_C - P_{CG}}{\eta_{sep}^P} + \frac{\dot{Q}_C - \dot{Q}_{CG}}{\eta_{sep}^Q} + \frac{\dot{Q}_{CG}}{\eta_{CG}^Q} = \\ &= \frac{1}{\eta_{sep}^P} (P_C - P_{CG}) + \frac{\dot{Q}_C - \dot{Q}_{CG}}{\eta_{sep}^Q} + \frac{\dot{Q}_{CG}}{\eta_{CG}^Q} \end{aligned} \quad (4)$$

unde: $\eta_{sep}^P = \frac{P}{\dot{Q}_P^{Ch}}$; $\eta_{sep}^Q = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_Q^{Ch}}$; $\eta_{CG}^Q = \frac{\dot{Q}_{CG}}{\dot{Q}_C^{Ch}}$

Pentru simplificarea expresiilor și evidențierea raportului între căldură și putere se introduc două rapoarte flux de căldură/putere, unul pentru instalația cu cogenerare $\lambda_{CG} = \frac{\dot{Q}_{CG}}{P_{CG}}$ și altul pentru partea cerută $\lambda_C = \frac{\dot{Q}_C}{P_C}$,

ecuația (4) devine

$$\dot{Q}_{total}^{Ch} = \frac{1}{\eta_{sep}^P} \left(\frac{1}{\lambda_C} \dot{Q}_C - \frac{1}{\lambda_{CG}} \dot{Q}_{CG} \right) + \frac{\dot{Q}_C - \dot{Q}_{CG}}{\eta_{sep}^Q} + \frac{\dot{Q}_{CG}}{\eta_{CG}^Q} \quad (5)$$

Dacă se introduce $y = \frac{\dot{Q}_{CG}}{\dot{Q}_C}$, se obține:

$$\dot{Q}_{total}^{Ch} = \dot{Q}_C \left[\frac{1}{\eta_{sep}^P} \left(\frac{1}{\lambda_C} - \frac{y}{\lambda_{CG}} \right) + \frac{1-y}{\eta_{sep}^Q} + \frac{y}{\eta_{CG}^Q} \right] \quad (6)$$

Dacă instalația cu cogenerare furnizează toată căldura cerută: $y = 1$ și ecuația (6) devine:

$$\dot{Q}_{total}^{Ch} = \dot{Q}_C \left[\frac{1}{\eta_{sep}^P} \left(\frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_{CG}} \right) + \frac{1}{\eta_{CG}^Q} \right] \quad (7)$$

Consumul total de combustibil poate fi comparat cu cel al unui caz de referință, unde tot fluxul de căldură și puterea cerute de consumator sunt generate separat.

Se definește coeficientul consumului relativ de combustibil (ψ) ca raport între consumul total de combustibil și consumul de combustibil în cazul de referință când puterea și fluxul de căldură cerute sunt generate doar de producția separată:

$$\psi(PSI) = \frac{\dot{Q}_{total}^{Ch}}{\dot{Q}_{ref}^{Ch}} = \frac{\frac{1}{\eta_{sep}^P} \left(\frac{1}{\lambda_C} - \frac{1}{\lambda_{CG}} \right) + \frac{1}{\eta_{CG}^Q}}{\frac{1}{\eta_{ref}^P} \lambda_C + \frac{1}{\eta_{ref}^Q}} \quad (8)$$

Economia de combustibil a instalației de cogenerare este dată de diferența între consumul de combustibil la generarea separată și consumul de combustibil în instalația de cogenerare:

$$\Delta \dot{Q}_{ch} = (\dot{Q}_Q^{Ch} + \dot{Q}_P^{Ch}) - \dot{Q}_{CG}^{Ch} \quad (9)$$

Introducând randamentele, economia de combustibil devine:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{Q}_{ch} &= \dot{Q}_Q^{Ch} + \frac{\eta_{CG}^Q}{\eta_{sep}^P} \dot{Q}_{CG}^{Ch} - \dot{Q}_{CG}^{Ch} = \\ &= \dot{Q}_C \left[\frac{1}{\eta_{sep}^Q} + \frac{1}{\eta_{CG}^Q} \left(\frac{\eta_{CG}^P}{\eta_{sep}^P} - 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Raportul economiei de combustibil este definit ca un raport între economia de combustibil și consumul de combustibil în schema separată:

$$FESR = \frac{\Delta \dot{Q}_{ch}}{\dot{Q}_Q^{Ch} + \dot{Q}_P^{Ch}} = 1 - \frac{\eta_{sep}^Q \cdot \eta_{sep}^P}{\eta_{CG}^Q \cdot \eta_{sep}^P + \eta_{sep}^Q \cdot \eta_{CG}^P} \quad (11)$$

În cazul în care puterea și fluxul de căldura sunt produse în totalitate de sistemul de cogenerare $\dot{Q}_{total}^{Ch} = \dot{Q}_{CG}^{Ch}$ și atunci relația între FESR și ψ este simplă:

$$FESR = \frac{\dot{Q}_{ref}^{Ch} - \dot{Q}_{CG}^{Ch}}{\dot{Q}_{ref}^{Ch}} = 1 - \frac{\dot{Q}_{CG}^{Ch}}{\dot{Q}_{ref}^{Ch}} = 1 - \psi \quad (12)$$

În alegerea soluției optime a oricărui sistem termodinamic complex aflat în fază de proiect, în majoritatea a cazurilor cele care decid sunt criteriile economice.

Costul energetic unitar al fiecărui dintre cei doi produși:

$$c_e = \frac{C_{ch}}{|\dot{Q}| + P} \quad \left[\frac{\text{EURO}}{\text{kWh}} \right]$$

$$C_p = c_e \cdot P \quad [\text{EURO/h}]$$

$$C_Q = c_e \cdot |\dot{Q}| \quad [\text{EURO/h}]$$

Costul exergetic unitar al fiecărui dintre cei doi produși se obține cu relația:

$$c_{ex} = \frac{C_{cb}}{|E_0| + P} \left[\frac{\text{EURO}}{\text{kWh exergie}} \right],$$

unde C_{cb} [EURO] reprezintă costul combustibilului, E_0 energia energiei obținute (abur), iar P [kW] puterea obținută în sistemul de cogenerare.

4. ANALIZA PERFORMANȚELOR

Toate aceste opțiuni au fost comparate cu boilerul convențional ilustrat în figura 6. Analiza numerică s-a realizat cu pachetul software EES (Engineering Equation Solver). În tabelul 1 sunt prezentate rezultatele.

Se vor prezenta în tabel următorii parametri: fluxul de căldură și putere produse, consumul de combustibil, randamentul termic și electric, raportul flux de căldură/putere, randamentele exergetice, raportul economiei de combustibil și coeficientul consumului relativ de combustibil. Ultimii doi parametrii au fost calculați pentru 3 nivele ale randamentului η_{sep}^P (0,4; 0,5 și 0,6).

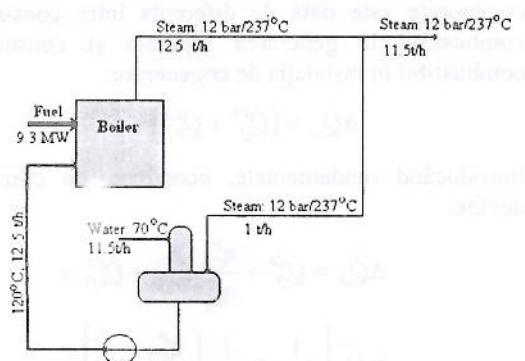


Fig. 6. Boilerul convențional, cazul de referință.

Tabelul 1. Principalele rezultate ale simulării

	BC	BC-TA	TG/B	TG/B/T A	MD/B
Flux căldură kW.th	8943	8943	8943	8943	8943
Putere MW.cl	-	1200	4700	7170	12700
Comb.kW	9384	10600	16700	21600	31000
η^Q	0.953	0.843	0.536	0.414	0.288
η^P	-	0.113	0.281	0.332	0.409
λ_{CG}	-	6.476	1.902	1.247	0.704
η_e	0.953	0.957	0.823	0.775	0.694
η_{ex}	0.303	0.382	0.453	0.471	0.494
FESR					
0,4	-	0.143	0.209	0.209	0.245
η_{sep}^P 0,5	-	0.100	0.110	0.132	0.191
0,6	-	0.068	0.029	-0.012	-0.016
$\psi \lambda_c=5$	-	0.858	0.678	0.587	0.271
0,4	-	0.902	0.837	0.836	0.711
η_{sep}^P 0,5	-	0.934	0.956	1.021	1.04
0,6	-				
$\psi \lambda_c=0,5$	-	0.964	0.917	0.894	0.813
0,4	-	0.972	0.953	0.952	0.917
η_{sep}^P 0,5	-	0.979	0.986	1.007	1.013
0,6	-				

Schemele prezentate în figurile 7 și 8 pun în evidență sistemul de cogenerare care prezintă cel mai bun raport al economiei de combustibil (FESR), cel mai scăzut factor al consumului relativ de combustibil (ψ) la diferite nivele ale lui η_{sep}^P cu cea mai bună (ridicată) valoare a randamentului exergetic.

Influența eficienței fluxului de căldură generat asupra consumului relativ de combustibil este prezentată în figura 7 pentru două condiții. La o valoare tipică pentru un raport căldură/putere $\lambda_c = 5$ se observă un avantaj clar al sistemului cu motor Diesel, în special la valori scăzute ale lui η_{sep}^P .

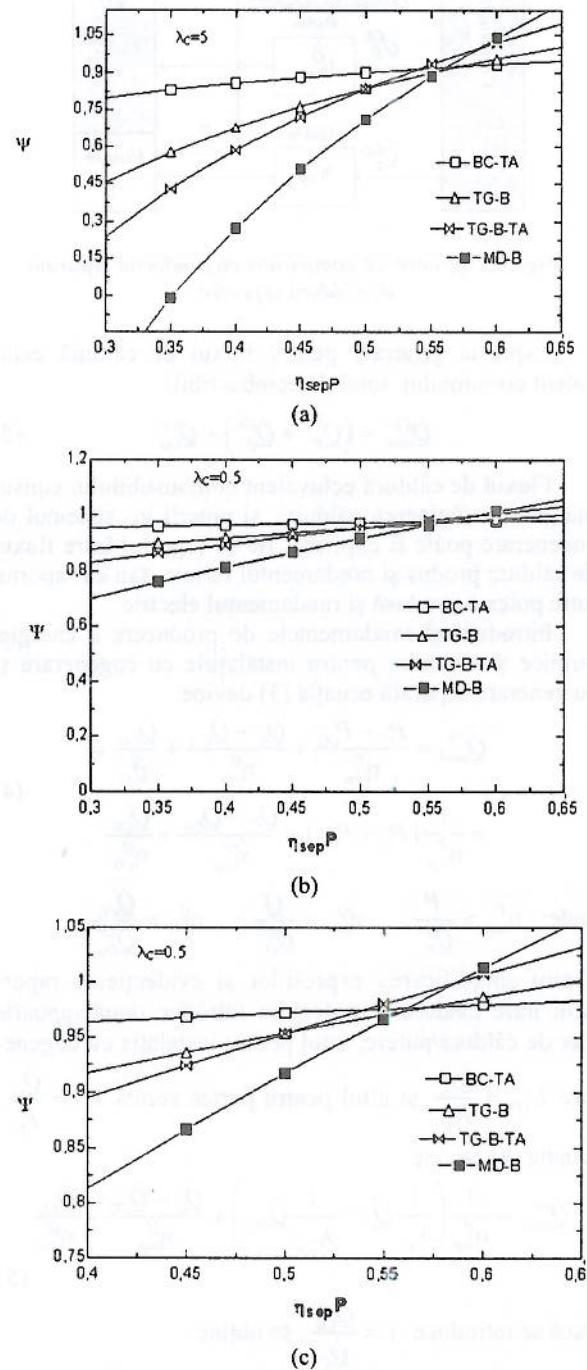


Fig. 7. Influența eficienței fluxului de căldură generat asupra consumului relativ de combustibil pentru un raport căldură/putere (a) $\lambda_c = 5$; (b) $\lambda_c = 0,5$ și (c) $\lambda_c = 0,5$.

Pentru două valori limită ale parametrului λ_C cuprins între 5 și 0,5 rezultă că valoarea consumului relativ de combustibil (ψ) în funcție de η_{SEP}^P (randamentul de producere separată a puterii) prezintă o variație importantă pentru motorul Diesel fiind cvasiindependent în cazul instalației de turbină cu abur. Aceeași tendință se constată și pentru o valoare de 10 ori mai mică a parametrului λ_C dar diferențele între consumurile de combustibil corespunzătoare celor 4 soluții sunt nesemnificative.

În figura 8 dependența lui η_{CG}^P în funcție de η_{CG}^Q corespunde unei drepte cu pantă negativă. În aceeași diagramă s-a prezentat și dependența parametrilor λ_{CG} de η_{CG}^P și η_{CG}^Q care permite stabilirea parametrilor de funcționare ai instalațiilor de cogenerare la funcționarea în regim nenominal (pentru valori distincte ale puterii și fluxului de căldură solicitate de utilizator).

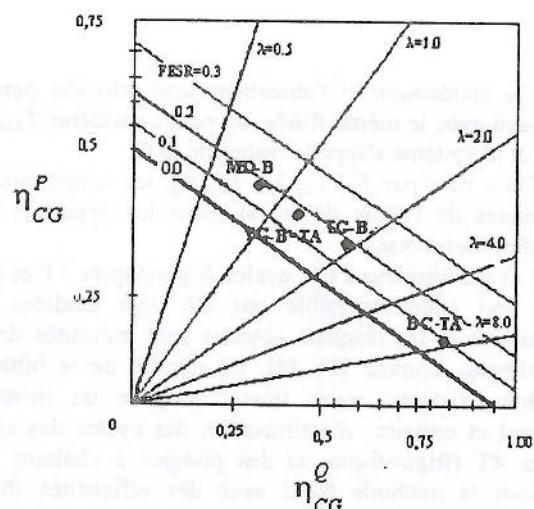


Fig. 8. FESR pentru opțiunile cogenerării.

În figura 9 se observă o diferență remarcabilă între randamentele energetice și exergetice, sistemul de cogenerare cu turbină cu abur are cel mai mare randament energetic dar cel mai mic randament exergetic; se observă o tendință și anume ca sistemele care au cel mai mare randament energetic au cel mai mic randament exergetic.

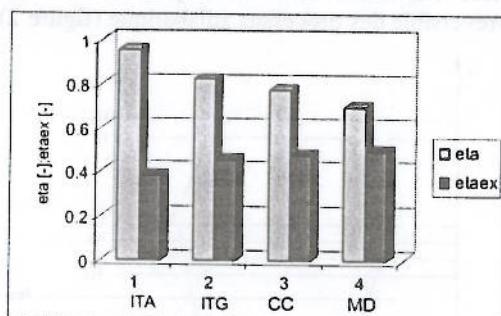


Fig. 9. Randamentele energetice și exergetice pentru fiecare opțiune.

Figurile 10 și 11 arată că sistemul de cogenerare bazat pe motorul Diesel are cel mai scăzut cost exergetic pentru abur, iar sistemul cu turbină cu abur are cel mai scăzut cost exergetic pentru putere.

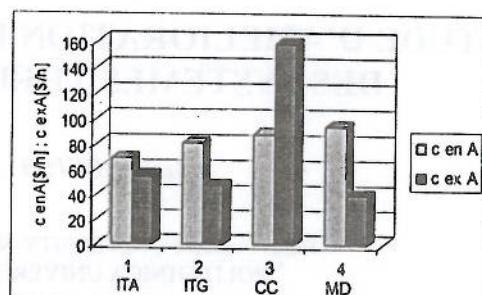


Fig. 10. Costurile energetic și exergetic ale aburului.

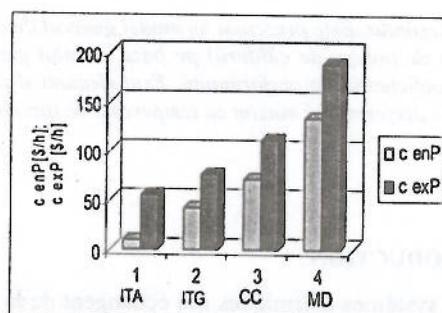


Fig. 11. Costurile energetic și exergetic ale puterii.

5. CONCLUZII

Din analiza prezentată rezultă că sistemul de cogenerare cu motor Diesel, precum și ciclul combinat sunt cele mai eficiente în ceea ce privește economia de combustibil și randamentul exergetic.

Pentru două valori limită ale parametrului λ_C cuprins între 5 și 0,5 rezultă că valoarea consumului relativ de combustibil (ψ) în funcție de η_{SEP}^P (randamentul de producere separată a puterii) prezintă o variație importantă pentru sistemul cu motor Diesel, fiind cvasiindependent în cazul sistemului cu turbină cu abur.

Aceeași tendință se constată și pentru o valoare de 10 ori mai mică a parametrului λ_C dar diferențele între consumurile de combustibil corespunzătoare celor 4 soluții sunt nesemnificative.

Opțiunea finală privind utilizarea cogenerării trebuie făcută completând metoda termodinamică cu una exergoeconomică care evidențiază eficiența de funcționare și costurile echipamentelor aferente.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Korobitsyn, M.A., *Analysis of Cogeneration, Combined and Integrated Cycles*, Fcboedruk BV, Amsterdam, 1998.
- [2] Dobrovicescu, A., *Metode de contabilizare exergoeconomică și de optimizare a construcției și operării sistemelor energetice complexe (Exergoeconomic methods and optimization of design of complex energetic systems)* – review Termotehnica, nr. 2/2002.
- [3] Valero, A., Lozano, M., Tsatsaronis, Frangopoulos, G. C., *CGAM PROBLEM: Definition and Conventional Solution*, Energy, 1994.
- [4] Dobrovicescu, A. *Considerații exergoeconomice asupra sistemelor energetice complexe, (Exergoeconomic considerations of complex energetic systems)* – review Termotehnica, VI, nr.1/2002.
- [5] Dobrovicescu, A., *Analiza exergetică și termoeconomică a sistemelor frigorifice și criogenice, (Exergetic analysis of the refrigeration and cryogenics systems)*, Ed. AGIR, București, 2000.