

AN ANALYTICAL APPROACH TO COGENERATION UNITS ECONOMIC SIZING, THAT TAKES INTO ACCOUNT THE EVOLUTION OF VARIABLE PARAMETERS OVER LIFETIME

O ABORDARE ANALITICĂ A DIMENSIONĂRII ECONOMICE A UNITĂȚILOR DE COGENERARE, CARE ȚINE CONT DE EVOLUȚIA PARAMETRILOR VARIABILI ÎN TIMP

Valentin ARION¹, Viorica HLUSOV², Calin NEGURA³, Constantin BOROSAN⁴

Abstract: *In this paper the problem of getting formulas for calculating the optimal share of cogeneration within a heat supply system for a consumption zone / node is considered. Optimization criterion - the minimum of the total discounted cost during the study period, related to the considered sources of energy (cogeneration units and hot water boilers). The consumption regime is presented by the annual classified heat load curve, described analytically by Sochinsky-Rossander equation. The applied mathematical model takes into account the evolution over time of a series of parameters such as the selling price of the electricity produced, the purchase price of fuel and other factors. In addition, several approaches to the problem are considered - for different operating regimes of energy sources. The obtained analytical expressions to determine the optimal share of cogeneration were tested, demonstrating a coincidence of the results with those got by applying the method of evaluation and comparison of variants.*

Keywords: annual classified thermal load curve, cogeneration, optimal share of cogeneration, discounted total cost, total revenue.

Rezumat: *În această lucrare este abordată problema obținerii unor formule de calcul a cotei optime a cogenerării prezente în cadrul unui sistem de alimentare cu energie termică a unei zone / nod de consum. Criteriul de optimizare - cheltuielile totale actualizate minime pe durata perioadei de studiu, legate de sursele considerate de energie (instalații de cogenerare și de*

¹ Prof., DSc, Department of Energy, e-mail: valentin.arion@tme.utm.md

² Assoc. Prof., PhD, Department of Energy, e-mail: viorica.hlusov@tme.utm.md

³ PhD Candidate, Department of Energy, e-mail: calin.negura@gmail.com

⁴ PhD Student, Department of Energy, e-mail: constantin.borosan@tme.utm.md

¹⁻⁴ Faculty of Power and Electrical Engineering, Technical University of Moldova

cazane de apă fierbinte). Regimul de consum a căldurii este prezentat prin curba anuală clasată, descrisă analitic de ecuația Sochinsky-Rossander. Modelul matematic aplicat ia în considerare evoluția în timp a unui șir de parametri cum ar fi prețul de comercializare a energiei electrice produse, prețul de achiziție a combustibilului și alți factori. În plus, sunt considerate mai multe abordări ale problemei aferente mai multor regimuri de funcționare a surselor de energie. Expresiile analitice obținute pentru determinarea cotei optime a cogenerării au fost testate, demonstrând o coincidență a rezultatelor cu cele obținute prin aplicarea metodei evaluării și comparării variantelor.

Cuvinte cheie: curba anuală clasată a sarcinii termice, cogenerare, cota optimă a cogenerării, cheltuielile totale actualizate, veniturile totale.

1. Introducere

Cogenerarea este o tehnologie de producere concomitentă și combinată a energiei electrice și termice, atractivă din punct de vedere al eficienței utilizării resurselor energetice primare și respectiv al reducerii emisiilor de gaze cu efect de seră. Promovarea utilizării cogenerării reprezintă o prioritate politică la nivel european și cel național [1-6]. În prezent majoritatea statelor lumii și-au asumat angajamente de valorificare a potențialului cogenerării și trigenerării.

Este cunoscut, că aplicarea cogenerării presupune existența unui nod sau zone de consum a energiei termice, pentru care se caută soluția de acoperire a acestuia. Sursele tradiționale de producere a energiei termice sunt, în principal, instalațiile de cazane, însă în ultimul timp tot mai frecvent se pune problema utilizării și altor tipuri de surse de căldură, bazate fie pe combustibili fosili sau regenerabili, precum sunt instalațiile de cogenerare, pompele de căldură și altele [7-10].

În contextul celor menționate, prezintă interes căutarea soluțiilor optime economice de utilizare combinată a două sau mai multor surse de producere a energiei termice pentru alimentarea unui nod de consum.

2. Formularea problemei

În această lucrare este considerat un nod / zonă de consum a energiei termice, caracterizat de curba de sarcină clasată anuală (Figura. 1), pentru care se caută capacitățile optime ale instalației de cogenerare (C_g) și instalației de cazane (C_z), ce urmează împreună să acopere necesarul anual de căldură. Curba anuală clasată de sarcină $q^{sarc}(\tau)$ este descrisă analitic cu aplicarea funcției putere Sochinsky-Rossander, bazată pe cunoașterea a trei parametri-cheie: sarcinii maxime q_M^{sarc} , sarcinii minime q_{min}^{sarc} și sarcinii medii sau

consumului anual de energie termică Q_{an}^{sarc} (ori duratei anuale de utilizare a sarcinii maxime T_u^{sarc}). Este cunoscut că aria suprafeței de sub curba $q^{sarc}(\tau)$ reprezintă consumul anual de căldură Q_{an}^{sarc} , $Q_{an}^{sarc} = q_M^{sarc} \cdot T_u^{sarc}$.

Soluția optimă cu privire la dimensionarea celor două surse de energie (Cg + Cz) va rezulta în baza aplicării criteriului economic. A găsi soluția optimă înseamnă a determina capacitatea termică nominală a instalației de cogenerare q_{nom}^{Cg} și puterea instalată nominală a cazanelor q_{nom}^{Cz} .

Este știut că pentru o unitate de cogenerare raportul puterii nominale electrice P_{nom}^{Cg} la capacitatea termică nominală a ei q_{nom}^{Cg} definește *indicele nominal de cogenerare* - y_{nom} . $y_{nom} = P_{nom}^{Cg}/q_{nom}^{Cg}$ - mărime cunoscută pentru o unitate de cogenerare dată. În plus, cota parte a cogenerării în acoperirea sarcinii termice maxime anuale, reprezintă *coeficientul nominal de cogenerare* (sau de termoficare), notat aici prin x (ca mărime ce urmează a fi găsită), $x = q_{nom}^{Cg}/q_M^{sarc}$.

Ținând cont de relațiile de bilanț - $q_{nom}^{Cg} + q_{nom}^{Cz} = q_M^{sarc}$ și $Q_{an}^{Cg} + Q_{an}^{Cz} = Q_{an}^{sarc}$, în care sarcina termică maximă anuală și consumul anual de energie sunt mărimi cunoscute, precum și de faptul că pentru oricare nivel x de partajare a curbei de sarcină între zona de bază și zona de vârf ușor pot fi determinate analitic ariile suprafețelor respective [14] - problema formulată mai sus, în esență, se reduce la o problemă de optimizare cu o singură necunoscută x .

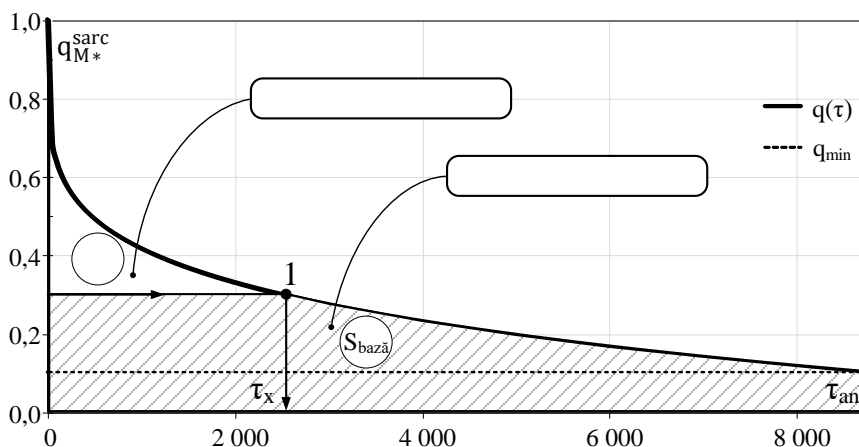


Figura 1 – Curba clasată anuală a sarcinii termice, acoperită de două surse

Cel mai general criteriu de optimizare este Venitul Net Actualizat (VNA) maximum,

$$VNA(x)=VTA-CTA \rightarrow \max, \quad (1)$$

pentru care în problema abordată VTA reprezintă veniturile, ce rezultă din comercializarea energiei electrice produse în instalația de cogenerare, iar CTA - cheltuielile totale actualizate, aferente edificării și funcționării centralei de cogenerare ($C_g + C_z$) pe durata de studiu.

În urma analizei realizate s-a constatat că în sistemele de termoficare de mică și medie dimensiune, de regulă, $VTA < CTA$, ceea ce face ca indicatorul $VNA(x)$, conform (1), să dețină sens de cheltuieli și nu de venituri! Pentru a evita o asemenea interpretare a lui VNA - criteriul (1) este transformat în criteriul (2) –

$$F(x) = [CTA] - x = CTA - VTA \rightarrow \min. \quad (2)$$

în care funcția obiectiv $F(x) = [CTA] - x$ are sens de cheltuieli totale, din care se deduc veniturile VTA.

Toate componentele funcției obiectiv urmează a fi exprimate în mod expres prin parametrul x (cota parte a cogenerării). Din condiția $-\partial F / \partial x = 0$ pentru $\partial^2 F / \partial x^2 \geq 0$ – va rezulta valoarea optimă x_{opt} .

Determinarea valorii optime x_{opt} reprezintă miezul problemei abordate: odată ce valoarea x_{opt} va fi cunoscută, se va determina valoarea puterii termice nominale a instalațiilor de cogenerare, $q_{nom}^{Cg} = x_{opt} \cdot q_M^{sarc}$, iar mai apoi și valoarea puterii nominale totale a instalațiilor de cazane, $q_{nom}^{Cz} = (1 - x_{opt}) \cdot q_M^{sarc}$.

3. Ipotezele și principiile puse la baza studiului

- a) Sarcina termică maximă anuală precum și consumul anual de căldură al nodului de consum considerat nu se schimbă pe parcursul perioadei de studiu.
- b) Durata calendaristică a perioadei de studiu, T ani, este acceptată la nivelul duratei de viață a surselor de energie.
- c) Curba de sarcină a nodului de consum urmează a fi acoperită de o centrală de cogenerare ce include instalația de cogenerare și instalația de cazane de apă fierbinte.
- d) Studiul realizat este centrat pe tehnologia cogenerării, bazată pe aplicarea motoarelor cu ardere internă, însă, în mod similar, pot fi considerate și alte tehnologii (instalații cu turbine cu abur; ciclul mixt gaze-abur; instalații cu turbine cu gaze, inclusiv microturbine cu gaze; pile de combustie).

- e) Instalația de cogenerare, produce în mod combinat căldură, furnizată consumatorilor locali, și energie electrică care este injectată în sistemul electroenergetic la un preț de achiziție prestabilit, ce crește de la an la an.
 - f) La evaluarea cheltuielilor (anuale și totale pe perioada de studiu) cu operarea și mentenanța (O&M), inclusiv cu combustibilul, aferente surselor de energie, se ia în considerație variația de-a lungul anilor a unui șir de parametri variabili, precum sunt: costul combustibilului, costurile O&M, costul de comercializare a energiei electrice produse în cogenerare și alți factori. În acest scop valorile anuale ale parametrilor evolutivi (z_t) sunt modelate cu utilizarea unor funcții exponențiale de forma: $z_t = z_{t_0} \cdot (1 + r_z)^{t-t_0}$, unde z_{t_0} reprezintă valoarea cunoscută a parametrului z în anul de referință t_0 , iar r_z - rata creșterii / diminuării anuale a valorii acestuia.
 - g) Durata de edificare a celor două surse de energie ($C_g + C_z$) nu depășește un an.
 - h) La baza evaluării producției anuale de căldură realizate de către cele două surse din cadrul centralei de cogenerare ($C_g + C_z$) se află două elemente-cheie: descrierea analitică a curbei clasate anuale a sarcinii termice (CC-ST) și calculul analitic al ariei suprafețelor rezultate în urma partajării CC-ST în: zona de bază și zona de vârf - pentru oricare valoare a cotei x .
 - i) În lucrare sunt prezentate mai multe abordări ale problemei optimizării cotei de cogenerare, care se deosebesc prin modul de partajare a curbei de sarcină între cele două surse (Figura 1 și Figura 6), regimul considerat de funcționare a instalațiilor de cogenerare și instalațiilor de cazane (grafic reglaj termic sau grafic venit maxim), precum și prin modul de exprimare în funcția obiectiv a volumului energiei produse în cogenerare și de calcul a consumului anual de combustibil:
- **Cazul 1.** Instalațiile de cogenerare și de cazane funcționează conform graficului reglaj termic ($C_g + C_z$ - grafic reglaj termic).
 - **Cazul 1.1.** În plus, consumul anual de combustibil la instalația de cogenerare, este exprimat prin volumul total al energiei electrice și termice produse anual și randamentul global mediu anual ($C_g + C_z$ - grafic reglaj termic, $W^{Cg} + Q^{Cg}$ - la randament global).
 - **Cazul 1.2.** La baza modelării consumului de combustibil la C_g stau valoarea volumului energiei electrice produse și randamentul electric mediu anual ($C_g + C_z$ - grafic reglaj termic, W^{Cg} - la randament electric).

- **Cazul 2.** Instalația de cogenerare funcționează conform strategiei venit maxim, iar instalația de cazane - conform graficului reglaj termic (Cg - grafic venit maxim, Cz - grafic reglaj termic). Instalația Cg va funcționa practic anul împrejur ($T_{u,w}^{Cg} = T_{op} \approx 8\,500\text{ h/an}$), energia electrică produsă va fi injectată în sistem spre comercializare, iar căldura produsă va merge parțial la acoperirea necesarului, restul - va fi disipată în mediul ambiant.
 - **Cazul 2.1.** Cg - grafic venit maxim, Cz - grafic reglaj termic, $W^{Cg} + Q^{Cg}$ - la randament global.
 - **Cazul 2.2.** Cg - grafic venit maxim, Cz - grafic reglaj termic, W^{Cg} - la randament electric.
- **Cazul 3.** Instalația de cogenerare acoperă doar parțial baza curbei de sarcină, restul - instalația de cazane.

4. Modelul matematic

Problema de optimizare abordată presupune considerarea unei perioade îndelungate de timp în limitele căreia urmează de a lua în considerație evoluția tuturor parametrilor variabili ce au impact asupra valorilor cheltuielilor și veniturilor anuale și respectiv a valorilor - CTA și VTA.

Modelul matematic al problemei, cărei, în mod firesc, îi corespunde un model dinamic, în cele din urmă, este prezentat prin intermediul unui model static, echivalent celui dinamic [12-13]. Modelul static, față de modelul dinamic, pe lângă faptul că reprezintă o descriere comprimată a evoluției cheltuielilor și veniturilor anuale și simplifică considerabil calculul CTA, permite de a opera cu expresii analitice, asupra cărora ușor se pot realiza transformări echivalente.

În scopul stabilirii funcției obiectiv, conform expresiei (2), urmează de a prezenta descrierea matematică a cheltuielilor și veniturilor totale actualizate (CTA și VTA), aferente edificării și funcționării centralei de cogenerare pe durata de T ani ai perioadei normate de viață (Figura 2).

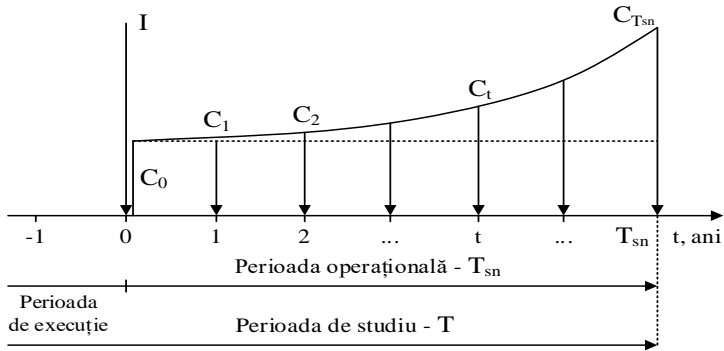


Figura 2 – Fluxul de cheltuieli ale unui proiect, aferent edificării unei centrale de cogenerare

Cheltuielile CTA ce privesc sursele de energie considerate ($C_g + C_z$) includ trei componente - cheltuielile cu investiția CTA_I , cu operarea și mentenanța (fără combustibil) $CTA_{O\&M}$ și cu combustibilul CTA_{comb} :

$$CTA = CTA_I + CTA_{O\&M} + CTA_{comb}. \quad (3)$$

Mai jos vor fi exprimate cheltuielile și veniturile aferente centralei de cogenerare prin mărimile de intrare cunoscute și variabila x . De menționat că modalitatea de calcul a componentelor CTA_I și $CTA_{O\&M}$ pentru toate cazurile menționate mai sus este una și aceeași.

4.1. Cheltuielile cu investiția

Valoarea investiției într-o sursă de energie adesea este exprimată prin investiția specifică și puterea instalată a sursei. Astfel, cheltuielile totale cu investiția în instalația de cogenerare sunt:

$$CTA_I^{Cg} = I^{Cg} = P_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} \quad (4)$$

și în instalația de cazane:

$$CTA_I^{Cz} = I^{Cz} = q_{nom}^{Cz} \cdot i_s^{Cz} \quad (5)$$

unde P_{nom}^{Cg} și q_{nom}^{Cz} reprezintă puterile nominale ale celor două surse, iar i_s^{Cg} și i_s^{Cz} - investițiile specifice ale acestora.

Ținând cont de relațiile:

$$P_{nom}^{Cg} = \gamma_{nom}^{Cg} \cdot q_{nom}^{Cg} \quad (6)$$

și

$$q_{nom}^{Cg} = x \cdot q_M^{sarc} \quad (7)$$

pentru P_{nom}^{Cg} se poate scrie:

$$P_{nom}^{Cg} = x \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot q_M^{sarc}. \quad (8)$$

Acum revenind la (4) cu expresia (8) se va obține:

$$CTA_I^{Cg} = I^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot x \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg}. \quad (9)$$

Puterea termică nominală a unității de cazane se determină cu relația:

$$q_{nom}^{Cz} = q_M^{sarc} - q_{nom}^{Cg}, \quad (10)$$

iar ținând cont de relația (7), se obține:

$$q_{nom}^{Cz} = q_M^{sarc} \cdot (1 - x). \quad (11)$$

Dacă cu expresia (11) de revenit în formula (5) - pentru CTA_I^{Cz} , în final, se obține:

$$CTA_I^{Cz} = I^{Cz} = q_M^{sarc} \cdot (1 - x) \cdot i_s^{Cz}. \quad (12)$$

Astfel, pentru cheltuielile totale cu investiția în cele două surse de energie, cu care este echipată centrala de cogenerare, rezultă:

$$CTA_I^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [x \cdot (y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} - i_s^{Cz}) + i_s^{Cz}]. \quad (13)$$

Aici se va nota:

$$A_I = y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} - i_s^{Cz}, \quad (14)$$

ca în final, pentru cheltuielile totale cu investiția la cele două surse să se poată fi scris:

$$CTA_I^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [x \cdot A_I + i_s^{Cz}]. \quad (15)$$

4.2. Cheltuielile O&M

Există mai multe posibilități de evaluare a cheltuielilor anuale O&M $C_{O\&M,t}$. În această lucrare se va utiliza cea mai simplă și cea mai răspândită modalitate de exprimare a cheltuielilor anuale $C_{O\&M,t}$ - bazată pe folosirea unui coeficient $k_{O\&M}$, aplicat la valoarea investiției totale aferente sursei respective:

$$C_{O\&M,t} = I \cdot k_{O\&M}. \quad (16)$$

În plus, se va admite că cheltuielile anuale O&M cresc de la an la an, conform unei funcții exponențiale la o rată $r_{O\&M}$:

$$C_{O\&M,t} = C_{O\&M,t_0} \cdot (1 + r_{O\&M})^{t-t_0}. \quad (17)$$

În aceste condiții cheltuielile totale actualizate, aferente lucrărilor O&M, pe durata perioadei de viață se determină cu expresia:

$$CTA_{O\&M} = \sum_{t=1}^{T_{sn}} C_{O\&M,t} \cdot (1 + r_{O\&M})^{\theta-t}. \quad (18)$$

Dacă în (18) variabila $C_{O\&M,t}$ va fi înlocuită cu expresia (17), modelul dinamic de calcul al $CTA_{O\&M}$ ce va rezulta, în cele din urmă, poate fi transformat într-un model static-echivalent, cu o formă generică [12-13]:

$$CTA_{O\&M} = C_{O\&M,0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}, \quad (19)$$

unde $C_{O\&M,0}$ reprezintă valoarea de calcul a cheltuielilor anuale O&M:

$$C_{O\&M,0} = C_{O\&M,t_0} \cdot (1 + r_{O\&M})^{-t_0}; \quad (20)$$

$C_{O\&M,t_0}$ - valoarea cheltuielilor anuale O&M în anul de referință t_0 :

$$C_{O\&M,t_0} = I \cdot k_{O\&M,t_0}; \quad (21)$$

\bar{T}_{T,x_1} - durata recalculată a perioadei de studiu:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{T,x_1} &= \sum_{t=1}^{T_{sn}} (1 + r_{O\&M})^t \cdot (1 + i)^{-t} \\ &= \sum_{t=1}^{T_{sn}} \left(\frac{1 + i}{1 + r_{O\&M}} \right)^{-t} = \sum_{t=1}^{T_{sn}} (1 + x_1)^{-t} \end{aligned} \quad (22)$$

\bar{T}_{T,x_1} este determinată la o rată echivalentă de actualizare x_1 . Valoarea duratei poate fi determinată printr-un calcul direct cu formula:

$$\bar{T}_{T,x_1} = [1 - (1 + x_1)^{-T_{sn}}] / x_1; \quad (23)$$

x_1 - rată echivalentă de actualizare, determinată cu formula:

$$x_1 = (1 + i) / (1 + r_{O\&M}) - 1, \quad (24)$$

unde i reprezintă rata de actualizare, iar T_{sn} - durata calendaristică a perioadei de viață.

Astfel, pentru cheltuielile O&M la cele două tipuri de surse poate fi scris: la cogenerare -

$$CTA_{O\&M}^{cg} = C_{O\&M,0}^{cg} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{cg} = I^{cg} \cdot k_{O\&M}^{cg} \cdot (1 + r_{O\&M}^{cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{cg}, \quad (25)$$

la cazane -

$$CTA_{O\&M}^{Cz} = C_{O\&M,0}^{Cz} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cz} = I^{Cz} \cdot k_{O\&M}^{Cz} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cz}. \quad (26)$$

În cazul în care în (25)-(26) pentru valorile investițiilor de venit cu expresiile (9) și (12), rezultă:

$$CTA_{O\&M}^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot x \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} \cdot k_{O\&M}^{Cg} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cg} \quad (27)$$

și

$$CTA_{O\&M}^{Cz} = q_M^{sarc} \cdot (1 - x) \cdot i_s^{Cz} \cdot k_{O\&M}^{Cz} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cz}. \quad (28)$$

Aici se va nota:

$$a_1 = k_{O\&M}^{Cg} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cg} \quad (29)$$

și

$$a_2 = k_{O\&M}^{Cz} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cz}, \quad (30)$$

respectiv

$$A_{O\&M} = a_1 \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} - a_2 \cdot i_s^{Cz}, \quad (31)$$

ca pentru cheltuielile totale O&M la cele două surse, în final, să se poată fi scris:

$$CTA_{O\&M}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [x \cdot A_{O\&M} + a_2 \cdot i_s^{Cz}]. \quad (32)$$

4.3. Cheltuielile cu combustibilul

Cheltuielile totale cu combustibilul la centrala de cogenerare pe perioada de studiu, aferente unei surse de energie, pot fi prezentate prin utilizarea modelului static-echivalent [12]:

$$CTA_{comb} = C_{comb,0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}, \quad (33)$$

unde $C_{comb,0}$ reprezintă valoarea de calcul a cheltuielilor anuale cu combustibilul:

$$C_{comb,0} = B_{comb,t_0} \cdot c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb})^{-t_0}; \quad (34)$$

B_{comb,t_0} - valoarea consumului de combustibil (exprimat în unități de energie) la anul de referință t_0 :

$$B_{comb,t_0} = E_{t_0} / \eta_{med}; \quad (35)$$

\bar{T}_{T,x_2} - durata recalculată a perioadei de studiu, determinată la rata echivalentă x_2 :

$$\bar{T}_{T,x_2} = [1 - (1 + x_2)^{-T}]/x_2; \quad (36)$$

x_2 - rată echivalentă de actualizare:

$$x_2 = (1 + i)/(1 + r_{comb}) - 1; \quad (37)$$

c_{comb,t_0} - prețul combustibilului (pe unitate energie înglobată) în anul de referință t_0 ;

r_{comb} - rata anuală de creștere a prețului combustibilului pe anii perioadei de studiu;

η_{med} - valoarea medie anuală a randamentului sursei respective.

Cazul 1.1. (Cg + Cz) - grafic reglaj termic, ($W^{Cg} + Q^{Cg}$) - la randament global.

Instalația de cogenerare

Aici se va considera cazul când consumul anual de combustibil la instalația Cg este exprimat prin volumul total anual al energiei electrice și termice produse $E_{t_0}^{Cg}$ și randamentul global mediu anual al Cg $\eta_{gl,med}^{Cg}$. Se va începe de la expresia generică (33), ca mai apoi să fie scris:

$$CTA_{comb}^{Cg} = E_{t_0}^{Cg} \cdot c_{comb,gl}^{Cg}, \quad (38)$$

unde $E_{t_0}^{Cg}$ - volumul anual al energiei produse în cogenerare în anul de referință t_0 :

$$E_{t_0}^{Cg} = W_{t_0}^{Cg} + Q_{t_0}^{Cg}; \quad (39)$$

$W_{t_0}^{Cg}$ - volumul anual al energiei electrice produse în anul de referință t_0 :

$$W_{t_0}^{Cg} = P_{nom}^{Cg} \cdot T_{u,W}^{Cg} = x \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot q_M^{sarc} \cdot T_{u,W}^{Cg}; \quad (40)$$

$Q_{t_0}^{Cg}$ - volumul anual al energiei termice produse în anul de referință t_0 :

$$Q_{t_0}^{Cg} = q_{nom}^{Cg} \cdot T_{u,Q}^{Cg} = x \cdot q_M^{sarc} \cdot T_{u,Q}^{Cg}(x); \quad (41)$$

$c_{comb,gl}^{Cg}$ - un parametru generalizat:

$$c_{comb,gl}^{Cg} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}^{Cg} \cdot (1 + y_{nom}^{Cg}) / \eta_{med,gl}^{Cg}; \quad (42)$$

$T_{u,W}^{Cg}$ și $T_{u,Q}^{Cg}$ - duratele anuale de utilizate a puterii maxime electrice și respectiv termice a Cg.

De menționat, că indiferent de tipul echipamentului de cogenerare, valoarea medie anuală a randamentului global $\eta_{med,gl}^{Cg}$ poate fi găsită prin valoarea nominală $\eta_{nom,gl}^{Cg}$, cu aplicarea unui coeficient de corecție $k_{\eta,cor}^{Cg}$ în funcție de gradul de încărcare al Cg [11].

În ipoteza că regimul de funcționare al instalației de cogenerare este determinat în totalitate de forma curbei de sarcină termică ($T_{u,W}^{Cg} = T_{u,Q}^{Cg}$), ecuația (38), în final, se transformă în (43):

$$CTA_{comb}^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot x \cdot T_{u,Q}^{Cg}(x) \cdot c_{comb,gl}^{Cg}, \quad (43)$$

unde pentru durata $T_{u,Q}^{Cg}(x)$ a fost obținută expresia [14]:

$$T_{u,Q}^{Cg}(x) = [T_u^{sarc} - T_{u,v}^{Cz}(x) \cdot (1 - x)]/x. \quad (44)$$

În (44) $T_{u,v}^{Cz}(x)$ reprezintă durata de utilizare a puterii nominale a cazanelor de vârf, care ușor se determină cu formula (48).

Instalația de cazane

Se va începe de la expresia generică (33), ca mai apoi să fie scris:

$$CTA_{comb}^{Cz} = Q_{t_0}^{Cz} \cdot c_{comb}^{Cz}. \quad (45)$$

Aici volumul anual al energiei termice produse $Q_{t_0}^{Cz}$ la anul t_0 poate fi prezentat în forma:

$$Q^{Cz} = q_{nom}^{Cz} \cdot T_u^{Cz}(x), \quad (46)$$

iar ținând cont de relația (11) se obține:

$$Q_{t_0}^{Cz} = q_M^{sarc} \cdot (1 - x) \cdot T_{u,v}^{Cz}(x). \quad (47)$$

În lucrarea [14] pentru durata $T_{u,v}^{Cz}(x)$ a zonei de vârf a curbei de sarcină a fost obținută o simplă expresie de calcul:

$$T_{u,v}^{Cz}(x) = \tau_x \cdot f_{vârf}, \quad (48)$$

unde

$$\tau_x = \tau_{an} \cdot [(1 - x)/(1 - q_{min*})]^{1/\beta}, \quad (49)$$

iar

$$f_{vârf} = \beta/(1 + \beta) \quad (50)$$

și

$$q_{min*} = q_{min}^{sarc}/q_M^{sarc}, \quad (51)$$

iar β este exponentul putere în descrierea analitică a curbei de sarcină.

Durata τ_x poate fi exprimată și în forma:

$$\tau_x = \tau_0 \cdot \tau_{an} \cdot (1 - x)^{1/\beta}, \quad (52)$$

unde

$$\tau_0 = (1 - q_{min*})^{-1/\beta}. \quad (53)$$

Pentru parametrul c_{comb}^{Cz} din ecuația (45) rezultă următoarea expresie de calcul:

$$c_{comb}^{Cz} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_3}^{Cz} / \eta_{med}^{Cz}. \quad (54)$$

Revenind la (45) pentru a integra (47)-(54), ca în final pentru componenta CTA_{comb}^{Cz} să fie obținută următoarea expresie de calcul:

$$CTA_{comb}^{Cz} = q_M^{sarc} \cdot (1 - x) \cdot T_{u,v}^{Cz}(x) \cdot c_{comb}^{Cz}. \quad (55)$$

Centrala de cogenerare (Cg + Cz)

Astfel, pentru cheltuielile totale, aferente consumului de combustibil la cele două surse de energie pe perioada de studiu de T ani, se poate scrie:

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = CTA_{comb}^{Cg} + CTA_{comb}^{Cz}, \quad (56)$$

iar după integrarea celor două componente (40) și (47) și unele transformări, în final, rezultă:

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [T_u^{sarc} \cdot c_{comb,gl}^{Cg} - (1 - x)^{(1+\beta)/\beta} \cdot f_v \cdot \Delta C_{comb,gl}^{Cg-Gz}], \quad (57)$$

unde $\Delta C_{comb,gl}^{Cg-Gz}$ reprezintă un alt parametru generalizat:

$$\Delta C_{comb,gl}^{Cg-Gz} = T_0 \cdot (c_{comb,gl}^{Cg} - c_{comb}^{Cz}), \quad (58)$$

iar

$$T_0 = \tau_0 \cdot \tau_{an}. \quad (59)$$

Pentru celelalte cazuri considerate mai jos se vor prezenta doar expresiile finale de calcul a costului cu combustibilul:

Cazul 1.2.

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [T_u^{sarc} \cdot c_{comb,W}^{Cg} - (1 - x)^{(1+\beta)/\beta} \cdot f_v \cdot \Delta C_{comb,W}^{Cg-Gz}], \quad (60)$$

unde

$$\Delta C_{comb,W}^{Cg-Gz} = T_0 \cdot (c_{comb,W}^{Cg} - c_{comb}^{Cz}). \quad (61)$$

Cazul 2.1.

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [x \cdot T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,gl}^{Cg} + (1-x)^{1/\beta+1} \cdot f_v \cdot T_0 \cdot c_{comb}^{Cz}]. \quad (62)$$

Cazul 2.2.

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [x \cdot T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,W}^{Cg} + (1-x)^{1/\beta+1} \cdot f_v \cdot T_0 \cdot c_{comb}^{Cz}]. \quad (63)$$

În Figura 3 pentru ilustrare sunt prezentate curbele cheltuielilor totale, aferente celor două surse, precum și centralei de cogenerare în ansamblu pentru un nod de consum a energiei termice cu sarcina maximă de 1 000 kW.

Figura 3 ilustrează faptul că cheltuielile CTA^{Cg} sunt, de regulă, mult mai mari decât CTA^{Cz} , iar atractivitatea implicării cogenerării în acoperirea sarcinii termice este determinată de veniturile obținute în urma comercializării energiei electrice produse.

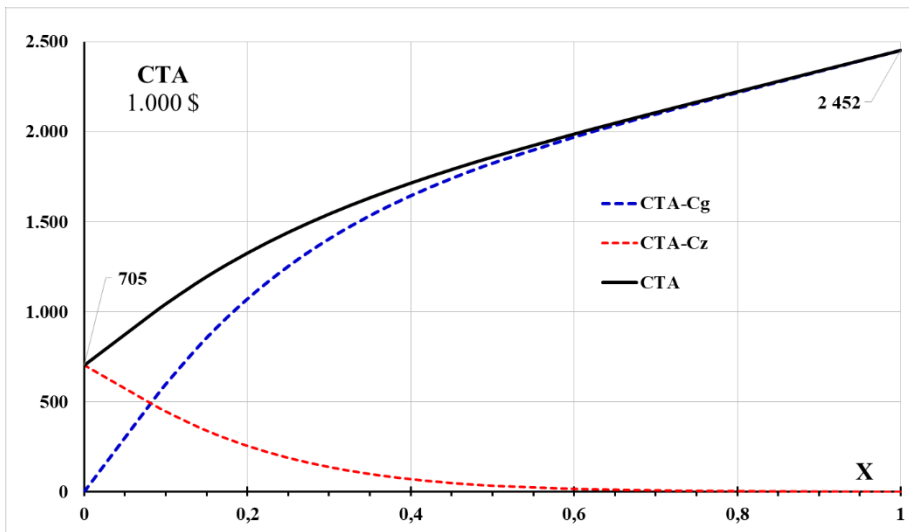


Figura 3 – Dependența cheltuielilor totale CTA de valoarea cotei de cogenerare x (sursele $Cg + Cz$ funcționează conform graficului reglaj termic)

4.4. Veniturile asociate comercializării energiei electrice

În funcția obiectiv a problemei se va include doar veniturile VTA_W^{Cg} ce rezultă în urma comercializării energiei electrice, produse în instalația de cogenerare pe durata de studiu.

Veniturile/câștigurile, aferente producției totale de căldură utilă, aici sunt neglijate, întru-cât ele sunt unele și aceleași pentru oricare valoare a necunoscutei x și, astfel, ele nu afectează alegerea soluției optime.

Veniturile totale actualizate VTA_W^{Cg} , menționate mai sus, se determină cu formula:

$$VTA_W^{Cg} = V_{W,0}^{Cg} \cdot \bar{T}_{T,x_4}^{Cg}, \quad (64)$$

unde $V_{W,0}^{Cg}$ reprezintă valoarea de calcul a venitului anual:

$$V_{W,0}^{Cg} = W_{t_0}^{Cg} \cdot c_{W,t_0} \cdot (1 + r_W^{Cg})^{-t_0}; \quad (65)$$

$W_{t_0}^{Cg}$ - volumul energiei electrice produse anual:

$$W_{t_0}^{Cg} = P_{nom}^{Cg} \cdot T_{u,W}^{Cg}; \quad (66)$$

\bar{T}_{T,x_4}^{Cg} - durata recalculată a perioadei de studiu:

$$\bar{T}_{T,x_4} = [1 - (1 + x_4)^{-T}]/x_4; \quad (67)$$

x_4 - rată sintetică de actualizare, calculată cu formula:

$$x_4 = (1 + i)/(1 + r_W) - 1; \quad (68)$$

P_{nom}^{Cg} - puterea nominală electrică a instalației de cogenerare;

c_{W,t_0} - prețul de achiziție a energiei electrice în anul t_0 ;

r_W - rata creșterii anuale a prețului de achiziție.

Cazul 1.1 + 1.2: Cg + Cz - grafic reglaj termic

Plecând de la expresia (64) și ținând cont de (65) și (66), în ipoteza funcționării Cg conform graficului termic ($T_{u,W}^{Cg} = T_{u,Q}^{Cg}(x)$), în final, pentru VTA_W^{Cg} poate fi scris:

$$VTA_W^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot x \cdot T_{u,Q}^{Cg}(x) \cdot wta; \quad (69)$$

unde

$$wta = c_{W,t_0} \cdot (1 + r_W^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_4}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg}. \quad (70)$$

Cazul 2.1 + 2.2: Cg - grafic reglaj venit maxim, Cz - grafic reglaj termic

$$VTA_W^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot x \cdot T_{op}^{Cg} \cdot wta, \quad (71)$$

unde wta se determină cu formula (70).

Pentru cazul considerat, în Figura 4 este ilustrat graficul dependenței venitului brut de variabila x , rezultat pentru diferite valori ale prețului de comercializare a energiei electrice, produse în cogenerare (4-10 c\$/kWh).

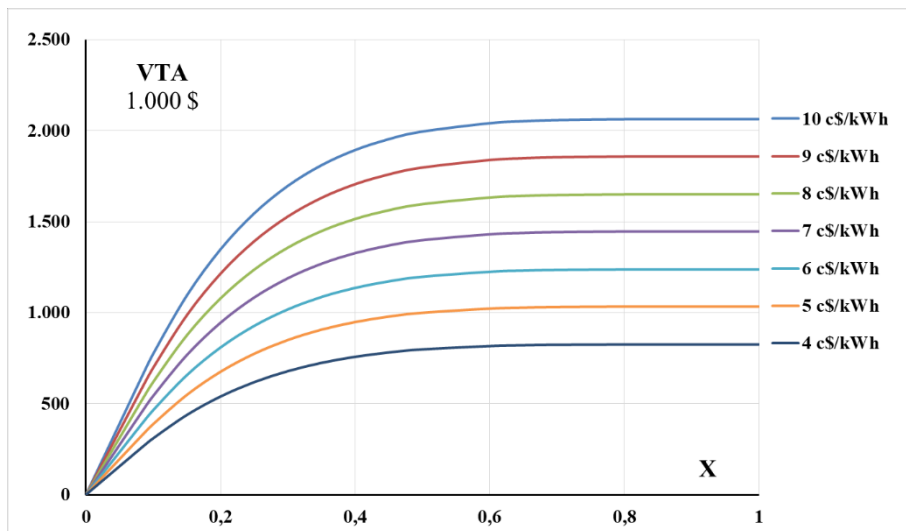


Figura 4 – Funcția $VTA(x)$ pentru diferite prețuri de livrare a energiei electrice în sistem (instalațiile $C_g + C_z$ funcționează conform graficului reglaj termic)

Saturația curbelor $VTA(x)$ din Figura 4 este determinată de forma CC-ST și regimul acceptat de funcționare a centralei; cu creșterea lui x , la fiecare Δx în zona de vârf a CC-ST se produce tot mai puțină energie electrică. În exemplul dat ușor de observat că la cote mai mari de 0,35-0,40 creșterea veniturilor este nesemnificativă, ceea ce indică și asupra faptului că valoarea optimă a cotei cogenerării este mai puțin probabil să aparțină acestei zone.

5. Soluția analitică pentru cota optimă a cogenerării

Valoarea optimă a cotei de cogenerare x_{opt} poate fi obținută din condiția - $\partial F / \partial x = 0$, prezentată sub forma sumei derivatelor parțiale ale celor patru componente ale funcției $F(x)$:

$$u(x) = D_I + D_{O\&M} + D_{comb} - D_{VTA} = 0. \quad (72)$$

Derivatele D_I și $D_{O\&M}$ pentru toate cazurile considerate se determină în același mod:

$$D_I = q_M^{sarc} \cdot A_I \quad (73)$$

și

$$D_{O\&M} = q_M^{sarc} \cdot A_{O\&M}. \quad (74)$$

Cazul 1.1. Cg + Cz - grafic reglaj termic, $(W^{Cg} + Q^{Cg})$ - la randament global
Pentru derivatele D_{comb} și D_{VTA} în acest caz este:

$$D_{comb} = q_M^{sarc} \cdot \Delta C_{comb,gl}^{Cg+Cz} \cdot (1-x)^{1/\beta} \quad (75)$$

și

$$D_{VTA} = q_M^{sarc} \cdot V_{VTA} \cdot (1-x)^{1/\beta}, \quad (76)$$

unde

$$V_{VTA} = T_0 \cdot wta, \quad (77)$$

iar

$$wta = c_{W,t_0} \cdot (1+r_W)^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_4}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg} \quad (78)$$

și

$$T_0 = \tau_0 \cdot \tau_{an}, \quad (79)$$

iar condiția de optimalitate (72) obține forma:

$$u(x) = A_I + A_{O\&M} + (1-x)^{1/\beta} \cdot \Delta C_{comb,gl}^{Cg+Cz} - (1-x)^{1/\beta} \cdot V_{VTA} = 0. \quad (80)$$

Vor fi introduse notațiile:

$$A = A_I + A_{O\&M} \quad (81)$$

și

$$B_{gl} = V_{VTA} - \Delta C_{comb,gl}^{Cg+Cz} \quad (82)$$

pentru a transforma (80) în (83):

$$A - (1-x)^{1/\beta} \cdot B_{gl} = 0, \quad (83)$$

din care, în final, se obține formula de calcul a cotei optime pentru cazul considerat:

$$x_{opt,1.1} = 1 - (A/B_{gl})^\beta. \quad (84)$$

De menționat că A_I , $A_{O\&M}$ și $\Delta C_{comb,gl}^{Cg+Cz}$ se determină cu formulele (14), (31) și (58).

În Figura 5 pentru o centrală de cogenerare cu sarcina maximă termică de 1.000 kW este ilustrată forma grafică a funcției obiectiv $CTA'(x)$ și modul cum ea se transformă odată cu creșterea prețului de comercializare a energiei electrice și respectiv a venitului $VTA(x)$.

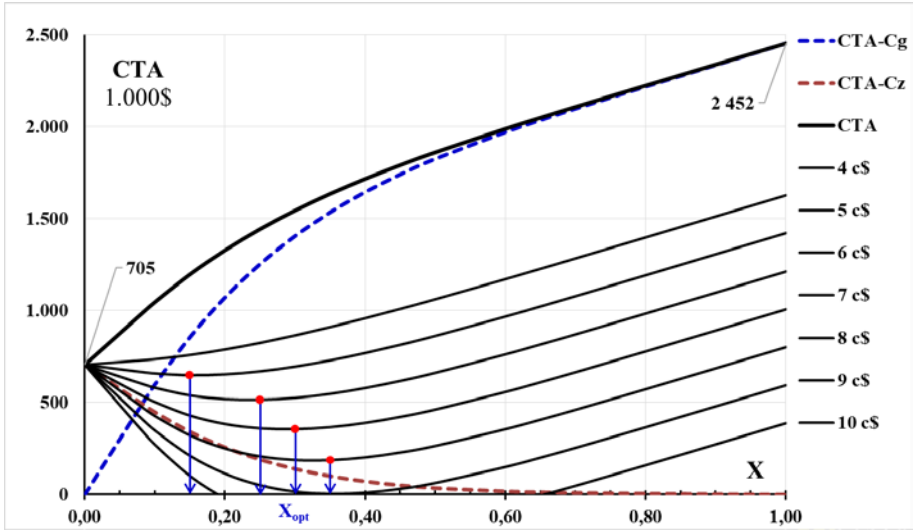


Figura 5 – Funcția obiectiv $CTA'(x) = CTA(x) - VTA(x)$ și componentele sale (Cg + Cz - grafic reglaj termic). Ilustrarea soluției optime

Cazul 1.2. Cg + Cz - grafic reglaj termic, W^{Cg} - la randament electric
Derivatele D_I , $D_{O\&M}$ și D_{VTA} în acest caz rămân ca și mai sus, iar pentru D_{comb} a fost obținut:

$$D_{comb} = q_M^{sarc} \cdot \Delta C_{comb,W}^{Cg+Cz} \cdot (1-x)^{1/\beta}, \quad (85)$$

unde

$$\Delta C_{comb,W}^{Cg+Cz} = T_0 \cdot (c_{comb,W}^{Cg} - c_{comb}^{Cz}) \quad (86)$$

și

$$c_{comb,W}^{Cg} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg} / \eta_{med,W}^{Cg}, \quad (87)$$

iar c_{comb}^{Cz} se determină cu formula (54).

Se va nota:

$$B_W = V_{VTA} - \Delta C_{comb,W}^{Cg+Cz} \quad (88)$$

pentru a prezenta condiția de optimalitate într-un mod mai compact:

$$A - (1-x)^{1/\beta} \cdot B_W = 0, \quad (89)$$

de unde rezultă formula de calcul a cotei optime a cogenerării:

$$x_{opt,1.2} = 1 - (A/B_W)^\beta. \quad (90)$$

În baza echivalenței cazurilor 1.1 și 1.2 se poate scrie:

$$x_{opt,1.1} = x_{opt,1.2} = x_{opt,1} = 1 - (A/B)^\beta. \quad (91)$$

Cazul 2.1. Cg - grafic reglaj venit maxim, Cz - grafic reglaj termic, ($W^{Cg} + Q^{Cg}$) - la randament global

Expresiile de calcul ale derivatelor D_{comb} și D_{VTA} în acest caz sunt:

$$D_{comb} = q_M^{sarc} \cdot [G_{gl} - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H] \quad (92)$$

și

$$D_{VTA} = q_M^{sarc} \cdot wta', \quad (93)$$

unde

$$G_{gl} = T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,gl}^{Cg}, \quad (94)$$

iar

$$H = T_0 \cdot c_{comb}^{Cz} \quad (95)$$

și

$$wta' = T_{op}^{Cg} \cdot wta, \quad (96)$$

respectiv

$$wta = c_{W,t_0} \cdot (1 + r_W^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_4}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg}. \quad (97)$$

Astfel, condiția de optimalitate (72) se transformă în următoarea ecuație:

$$A + G_{gl} - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H - wta' = 0. \quad (98)$$

Se va nota:

$$C_{gl} = G_{gl} - wta' \quad (99)$$

pentru a transforma (98) în (100):

$$A + C_{gl} - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H = 0, \quad (100)$$

de unde rezultă formula de calcul a lui x_{opt} :

$$x_{opt,2.1} = 1 - \left((A + C_{gl})/H \right)^\beta. \quad (101)$$

Cazul 2.2. Cg - grafic reglaj venit maxim, Cz - grafic reglaj termic, W^{Cg} - la randament electric

Expresia de calcul a derivatei D_{comb} în acest caz este:

$$D_{comb} = q_M^{sarc} \cdot [G_W - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H], \quad (102)$$

unde

$$G_W = T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,W}^{Cg}, \quad (103)$$

iar D_{VTA} , H și wta' se calculează conform expresiilor (93), (95) și respectiv (96) de mai sus.

În acest caz condiția de optimalitate (72) obține forma:

$$A + G_W - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H - wta' = 0. \quad (104)$$

Se va nota:

$$C_W = G_W - wta' \quad (105)$$

ca expresia (104), în final, să se transforme în ecuația:

$$A + C_W - (1 - x)^{1/\beta} \cdot H = 0, \quad (106)$$

din care rezultă o nouă expresie de calcul a cotei optime a cogenerării:

$$x_{opt,2.2} = 1 - ((A + C_W)/H)^\beta. \quad (107)$$

Similar cazurilor 1.1 și 1.2, în baza echivalenței soluțiilor 2.1 și 2.2 se poate scrie:

$$x_{opt,2.1} = x_{opt,2.2} = x_{opt,2} = 1 - ((A + C)/H)^\beta. \quad (108)$$

Formulele de calcul ale cotei optime a cogenerării, obținute pentru cele două regimuri de funcționare a Cg (reglaj termic și venit maxim) sunt prezentate în sumar în Tabelul 1.

Tabelul 1 – Expresiile de calcul ale cotei optime a cogenerării în acoperirea sarcinii termice maxime anuale

Cazul în studiu	Expresii intermediare
Cazul 1. Instalația de cogenerare și instalația de cazane funcționează conform graficului de reglaj termic	
Cazul 1.1: $(W^{Cg} + Q^{Cg})$ și $\eta_{gl,med}^{Cg}$ $x_{opt} = 1 - \left(\frac{A}{B_{gl}}\right)^\beta \quad (84)$	$A = A_I + A_{O\&M} \quad (81)$ $A_I = y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} - i_s^{Cz} \quad (14)$ și $A_{O\&M} = a_1 \cdot y_{nom}^{Cg} \cdot i_s^{Cg} - a_2 \cdot i_s^{Cz} \quad (31)$ $B_{gl} = V_{VTA} - \Delta C_{comb,gl}^{Cg+Cz} \quad (82), \Delta C_{comb,gl}^{Cg-Gz} = T_0 \cdot (c_{comb,gl}^{Cg} - c_{comb}^{Cz}) \quad (58)$
Cazul 1.2: W^{Cg} și $\eta_{W,med}^{Cg}$ $x_{opt} = 1 - \left(\frac{A}{B_W}\right)^\beta \quad (90)$	$B_W = V_{VTA} - \Delta C_{comb,W}^{Cg+Cz} \quad (88), \Delta C_{comb,W}^{Cg-Gz} = T_0 \cdot (c_{comb,W}^{Cg} - c_{comb}^{Cz}) \quad (61)$ $\tau_0 = (1 - q_{min*})^{-1/\beta} \quad (53), T_0 = \tau_0 \cdot \tau_{an} \quad (59), V_{VTA} = T_0 \cdot wta \quad (77)$

	$a_1 = k_{O\&M}^{Cg} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cg} \quad (29)$ $a_2 = k_{O\&M}^{Cz} \cdot (1 + r_{O\&M}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_1}^{Cz} \quad (30)$ $wta = c_{W,t_0} \cdot (1 + r_W^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_4}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg} \quad (70)$ $c_{comb,gl}^{Cg} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}^{Cg} \cdot (1 + y_{nom}^{Cg}) / \eta_{med,gl}^{Cg} \quad (42)$ $c_{comb,W}^{Cg} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cg})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_2}^{Cg} \cdot y_{nom}^{Cg} / \eta_{med,W}^{Cg} \quad (87)$ $c_{comb}^{Cz} = c_{comb,t_0} \cdot (1 + r_{comb}^{Cz})^{-t_0} \cdot \bar{T}_{T,x_3}^{Cz} / \eta_{med}^{Cz} \quad (54)$
<p>Cazul 2. Instalația de cogenerare funcționează conform <i>strategiei venit maxim</i>, iar Cz - conform <i>graficului reglaj termic</i></p>	
<p>Cazul 2.1:</p> $x_{opt} = 1 - \left(\frac{A+C_{gl}}{H} \right)^\beta \quad (101)$	$C_{gl} = G_{gl} - wta' \quad (99), G_{gl} = T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,gl}^{Cg} \quad (94)$ $C_W = G_W - wta' \quad (105), G_W = T_{op}^{Cg} \cdot c_{comb,W}^{Cg} \quad (103)$
<p>Cazul 2.2:</p> $x_{opt} = 1 - \left(\frac{A+C_W}{H} \right)^\beta \quad (107)$	$H = T_0 \cdot c_{comb}^{Cz} \quad (95), wta' = T_{op}^{Cg} \cdot wta \quad (96)$ $c_{comb,gl}^{Cg}, c_{comb,W}^{Cg} \text{ și } \tau_0 \text{ în conformitate cu expresiile de mai sus.}$
<p>Expresii utile: $q_{nom}^{Cg} = x \cdot q_M^{sarc} \quad (7), P_{nom}^{Cg} = y_{nom}^{Cg} \cdot q_{nom}^{Cg} \quad (6), q_{nom}^{Cz} = q_M^{sarc} - q_{nom}^{Cg} \quad (10)$</p>	

De observat, că în expresia (91) de calcul a cotei optime a cogenerării - $x_{opt} = 1 - (A/B)^\beta$, parametrii A și B au următoarea semnificație:

- Parametrul A arată care sunt cheltuielile suplimentare (totale actualizate) cu investiția și O&M la instalația de cogenerare față de instalația de cazane pe întreaga perioadă de viață, pe 1 kW putere instalată.
- Parametrul B , calculat cu expresia - $B = V_{VTA} - \Delta C_{comb}^{Cg-Cz}$, arată cu cât veniturile V_{VTA} , obținute de la comercializarea energiei electrice produse de instalația de cogenerare, depășesc cheltuielile suplimentare cu combustibilul ΔC_{comb}^{Cg-Cz} la această instalație, pe întreaga perioadă de viață, pe 1 kW putere instalată.

6. Instalația de cogenerare acoperă doar parțial zona de bază a CC-ST

Mai sus a fost abordată problema determinării cotei optime a cogenerării în baza criteriului economic în ipoteza că instalația Cg acoperă întreaga zonă de bază a curbei de sarcină (Figura 1).

Însă plecând de la necesitatea menținerii unor randamente suficient de înalte la producerea energiei în cogenerare, se va considera și o altă schemă de partajare a curbei de sarcină între cele două surse de energie (Figura 6).

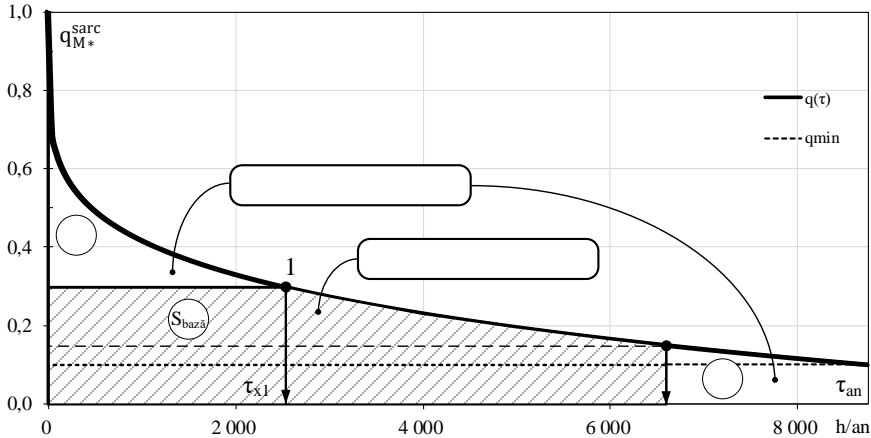


Figura 6 – Instalația de cogenerare acoperă parțial zona de bază a CC-ST

Din Figura 6 se poate de observat, că pe întreg intervalul de timp $0 - \tau_{x_1}$ (până la punctul 1), instalația de cogenerare va funcționa la o putere maximă, ce corespunde capacității ei termice, în regim de înaltă eficiență, iar în intervalul $\tau_{x_1} - \tau_{x_2}$, odată cu micșorarea sarcinii, evident, eficiența cogenerării se va diminua treptat. În punctul 2 instalația Cg atinge cel mai mic grad de încărcare admis, după care ea va fi deconectată din considerente de ineficiență și/sau instabilitate în funcționare. Chiar dacă instalația Cg ar include mai multe unități de cogenerare, care ar putea fi deconectate pe măsura diminuării sarcinii în timp, în caz general, se va admite existența unei asemenea situații când în zona sarcinilor mici ale curbei clasate vor opera instalațiile de cazane (aria S_{mici} , Figura 6).

Poziția punctului 2 pe curba de sarcină (Figura 6) este determinată de valoarea cotei de cogenerare x și nivelul minim admisibil de încărcare a Cg la faza de operare. Acest nivel, fie notat prin x' , poate fi exprimat prin valoarea x , spre ex.: $x' = x \cdot k$, $k < 1$.

În cele ce urmează se va căuta expresia de calcul a valorii cotei optime a cogenerării x_{opt} pentru situația nouă considerată; în acest exercițiu se va limita doar la cazul în care instalațiile de cogenerare și de cazane funcționează conform graficului reglaj termic (Cazul 1.1). În plus, nu se va repeta întreg parcursul, de la stabilirea componentelor funcției obiectiv și până la condiția de optimalitate, ci se vor prezenta doar câteva elemente cheie.

Expresiile de calcul ale cheltuielilor CTA_{comb}^{Cg+Cz} și veniturilor VTA pentru acest caz sunt:

$$CTA_{comb}^{Cg+Cz} = q_M^{sarc} \cdot [T_u^{sarc} \cdot c_{comb}^{Cz} + T_{u,Q5}^{sarc} \cdot (c_{comb,gl}^{Cg} - c_{comb}^{Cz})] \quad (109)$$

și

$$VTA_W^{Cg} = q_M^{sarc} \cdot wta \cdot T_{u,Q5}^{sarc}. \quad (110)$$

În expresiile (109)-(110) $T_{u,Q5}^{sarc}$ reprezintă durata anuală de utilizare a puterii termice nominale a Cg, aferentă zonei de lucru (hașurat, Figura 6). Pentru acest indicator, conform [12], este:

$$T_{u,Q5}^{sarc} = [T_{u,\tau_{x2}}^{sarc} - T_{u,vârf}^{Cz} \cdot (1 - x)], \quad (111)$$

unde

$$T_{u,\tau_{x2}}^{sarc} = \tau_{x2} \cdot f_2 \quad (112)$$

și

$$T_{u,vârf}^{Cz} = \tau_x \cdot f_{vârf}, \quad (113)$$

iar

$$f_{vârf} = \beta / (1 + \beta) \quad (114)$$

și

$$f_2 = (kx + \beta) / (1 + \beta), \quad (115)$$

respectiv

$$\tau_x = \tau_{an} \cdot [(1 - x) / (1 - q_{min*})]^{1/\beta} \quad (116)$$

și

$$\tau_{x2} = \tau_{an} \cdot [(1 - kx) / (1 - q_{min*})]^{1/\beta}. \quad (117)$$

Revenind la condiția de optimalitate (72) - $u(x) = D_I + D_{O\&M} + D_{comb} - D_{VTA} = 0$, în care derivatele D_I și $D_{O\&M}$ se determină în același mod pentru toate cazurile considerate (a se vedea (73) și (74)), iar pentru diferența ($D_{comb} - D_{VTA}$) se poate obține următoarea expresie:

$$D_{comb-VTA} = q_M^{sarc} \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot [k \cdot (1 - kx)^{1/\beta} - k \cdot (1 - kx)^{1/\beta-1} \cdot (kx + \beta) / \beta + (1 - x)^{1/\beta} \cdot (1 + \beta)]. \quad (118)$$

În final, funcția $u(x)$ obține forma:

$$u(x) = A + F_1 \cdot F_2 \cdot [k \cdot (1 - kx)^{1/\beta} - k \cdot (1 - kx)^{1/\beta-1} \cdot (kx + \beta)/\beta + (1 - x)^{1/\beta} \cdot (1 + \beta)]. \quad (119)$$

unde pentru parametrul A este $A = A_I + A_{O\&M}$ (a se vedea (14) și (31)), iar pentru F_1 și F_2 a fost obținut:

$$F_1 = c_{comb,gl}^{cg} - c_{comb}^{cz} - wta \quad (120)$$

și

$$F_2 = \tau_0 \cdot \tau_{an}/(1 + \beta). \quad (121)$$

Rezolvarea ecuației (119) față de necunoscuta x permite de a găsi valoarea cotei optime a cogenerării x_{opt} .

7. Validarea expresiilor analitice de calcul ale cotei optime a cogenerării

Cel mai simplu și riguros instrument de fundamentare a soluției optime sunt calculele tehnico-economice comparative, care presupun identificarea unui șir de variante/soluții, cu evaluarea ulterioară a acestora și alegerea soluției finale din mulțimea considerată. Cu cât mai multe soluții sunt analizate cu atât mai precisă va fi alegerea finală.

În scopul validării expresiilor de calcul ale cotei optime a cogenerării - pentru un nod de consum a fost analizată o serie de soluții de alternativă ($Cg + Cz$), caracterizate de diferite valori ale cotei x , pentru care s-a determinat valoarea funcției obiectiv (Tabelul 2). În plus, au fost considerate mai multe valori ale prețului c_W de comercializare a energiei electrice produse în regim de cogenerare (4-10 c\$/kWh). Astfel, pentru fiecare valoare a prețului c_W a rezultat o soluție optimă comparativă, care servește în calitate de *soluție de referință* în efortul de validare a metodei analitice de optimizare a cotei cogenerării (Tabelul 2). În final, pentru fiecare valoare considerată a prețului c_W a fost determinată în mod analitic cota optimă x_{opt} , comparată cu *valoarea de referință*.

Calcululele menționate au fost realizate pentru un nod de consum climatic de căldură, caracterizat de un factor de sarcină - $FS = 0,262$ (durata de utilizare a sarcinii maxime - $T_u = 2\ 300\ h/an$) precum și pentru un alt caz - cu $FS = 0,285$ ($T_u = 2\ 500\ h/an$).

Tabloul 2 – Valorile funcției obiectiv ($F(x) = CTA' = CTA - VTA$), în dependență de valoarea cotei cogenerării x și a prețului de comercializare a energiei electrice ($c\$/kWh$)

Soluții alternative		CTA, ($c_w=0$)	Valorile prețului de comercializare a energiei electrice produse c_w						
nr.	Cota x		4 c\$	5 c\$	6 c\$	7 c\$	8 c\$	9 c\$	10 c\$
1	0	704,9	704,9	704,9	704,9	704,9	704,9	704,9	704,9
2	0,08	979,2	729,0	666,4	603,9	541,3	478,8	416,2	353,7
3	0,10	1 045,8	735,7	658,2	580,7	503,1	425,6	348,1	270,6
4	0,15	1 196,6	758,3	648,8	539,2	429,6	320,1	210,5	100,9
5	0,20	1 327,8	788,2	653,3	518,4	383,5	248,6	113,8	-21,1
6	0,25	1 442,6	824,1	669,5	514,9	360,3	205,7	51,0	-103,6
7	0,30	1 544,0	865,0	695,3	525,6	355,8	186,1	16,4	-153,4
8	0,35	1 634,3	910,0	728,9	547,8	366,7	185,6	4,5	-176,6
9	0,40	1 715,9	958,1	768,7	579,2	389,8	200,3	10,9	-178,6
10	0,45	1 790,6	1 008,8	813,4	618,0	422,5	227,1	31,7	-163,8
11	0,50	1 859,9	1 061,5	861,9	662,3	462,7	263,1	63,5	-136,1
12	0,60	1 987,7	1 171,0	966,8	762,6	558,4	354,2	150,0	-54,2
13	0,65	2 048,1	1 227,0	1 021,7	816,4	611,1	405,9	200,6	-4,7
14	0,70	2 107,0	1 283,5	1 077,6	871,7	665,8	459,9	254,0	48,1
15	0,80	2 222,7	1 397,3	1 191,0	984,6	778,3	571,9	365,6	159,2
16	0,90	2 337,3	1 511,6	1 305,2	1 098,8	892,4	685,9	479,5	273,1
17	1,00	2 451,7	1 626,0	1 419,6	1 213,1	1 006,7	800,3	593,9	387,5
Soluția optimă	de referință	-	0,00	0,15	0,25	0,30	0,35	0,35	0,40
	analitică	-	0,01	0,16	0,24	0,29	0,33	0,36	0,38

Din analiza rezultatelor obținute se desprind următoarele observații și concluzii:

- soluția optimă analitică practic coincide cu soluția de referință (compararea variantelor), ceea ce demonstrează viabilitatea abordării analitice;

- în cazurile vânzării energiei electrice la prețuri mici utilizarea cogenerării ar putea să nu se justifice și în acest caz formula (91) nu oferă o soluție; pentru asemenea situații trebuie de acceptat - $x_{opt} = 0$;
- pentru prețuri de vânzare înalte - formula (108) ar putea să nu ofere soluție - în acest caz trebuie de acceptat - $x_{opt} = 1$.

8. Concluzii

1. În lucrare este soluționată problema determinării în mod analitic a cotei optime a cogenerării implicate în acoperirea sarcinii termice maxime anuale ale unei zone / nod de consum. La bază acestui studiu a fost pus criteriul economic și așa numitele modele statice-echivalente celor dinamice.

2. Pentru o centrală de cogenerare, dotată cu instalații de cogenerare și cu cazane de apă fierbinte, ce funcționează conform „reglajului termic” (variației sarcinii termice), indiferent de modul de exprimare a consumului de combustibil la instalația de cogenerare (prin producția de energie electrică și randamentul electric sau prin producția globală de energie electrică și termică și randamentul global) formula de calcul a cotei optime a cogenerării este - $x_{opt} = 1 - (A/B)^\beta$,

unde A și B sunt doi parametri generalizați, iar β este exponentul funcției putere, utilizate la descrierea analitică a curbei clasate a sarcinii termice.

3. Pentru cazul când instalația de cogenerare este operată în baza principiul „venituri maxime” expresia de calcul a cotei optime x_{opt} este asemănătoare celei de mai sus. Dotarea centralei cu un acumulator de căldură va contribui la majorarea profitabilității investiției.

REFERENCES

- [1] Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 Oct. 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC.
- [2] Decision of the Ministerial Council of the Energy Community D/2015/08/MC-EnC on the implementation of the Directive 2012/27/EU.
- [3] Guidance note on Directive 2012/27/EU on energy efficiency. Art. 14: Promotion of efficiency in heating and cooling. SWD(2013) 449 final, Brussels, 2013, 24 p.
- [4] Commission delegated regulation (EU) 2019/826 of 4 March 2019 amending Annexes VIII and IX to Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of

the Council on the contents of comprehensive assessments of the potential for efficient heating and cooling, Official Journal of the European Union, L 137/3, 23.5.2019.

- [5] An EU Strategy on Heating and Cooling. COM (2016) 51 final, Brussels, 16.2.2016.
- [6] Heating systems in buildings - Method for calculation of system energy requirements and system efficiencies - Part 4-4 Space heating generation systems, the performance and quality of CHP electricity and heat, Doc. CEN/TC 228 N541, 2006.
- [7] *V. Athanasovici, I. Dumitrescu., R. Pătrașcu, I. Biti., E. Minciuc, F. Alexe, V. Cenușe* „Tratat de inginerie termică. Alimentări cu căldură. Cogenerare”. Editura AGIR, București, 2010, 1939 p.
- [8] Modernizarea sistemelor de alimentare cu energie termică produsă centralizat prin utilizarea cogenerării de mică / medie putere. Ghid. 2004, ASA, ARCE, București. 73 p.
- [9] Cogenerarea de mică și medie capacitate - o tehnologie generatoare de profit și ecologică în același timp. Centrul ENERO pentru promovarea energiei curate și eficiente în România. Mai 2002, București. 16 p.
- [10] *V. Athanasovici* „Utilizarea căldurii în industrie”, Vol. I, Editura Tehnică, București, 1995, 391 p.
- [11] *E. Minciuc, I-S. Dumitrescu* „Alimentarea cu căldură a unui oraș. Îndrumar de proiect”. Editura Politehnica Press, București, 2016, ISBN 978-606-515-674-6, 67 p.
- [12] *V. Arion, V. Hlusuov, C. Gherman* „Modelarea economică a obiectivelor și sistemelor energetice pe termen lung: modelele statice-echivalente și aplicabilitatea acestora”. EMERG 3, Editura AGIR, București, 2016, p. 26-63.
- [13] *V. Arion, V. Hlusuov, C. Gherman, O. Șveț* „Ghid privind evaluarea economică a proiectelor din domeniile eficienței energetice și energiilor regenerabile”. Chișinău, Editura Sirius, 2014.
- [14] *V. Arion, C. Negura, C. Borosan* „The Load Duration Curve Surface Sharing Between the Possible Energy Sources”. International Conference on Electromechanical and Energy Systems (SIELMEN), 2019, DOI: 10.1109/SIELMEN47310.2019.