

MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE
UNIVERSITATEA TEHNICĂ DE CONSTRUCȚII BUCUREȘTI
FACULTATEA DE INGINERIE A INSTALAȚIILOR



Centrul de Cercetare Avansată pentru Calitatea
Ambientală și Fizica Clădirilor
Departamentul Sisteme Termice - Hidraulice și Protecția Atmosferei
Facultatea de Inginerie a Instalațiilor

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Specialitatea: INGINERIE CIVILA SI INSTALATII

Doctorand: Ing. MĂRCUȘ Gabriel

**OPTIMIZAREA SISTEMELOR DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE CA
PRIMĂ SURSĂ, CU APLICABILITATE PE TIPURI DE CLĂDIRI DIN BUCUREȘTI**

Conducător de doctorat:

Prof. univ. dr. ing. Vlad IORDACHE

Comisia de îndrumare:

Prof. univ. dr. ing. Rodica FRUNZULICĂ

Conf. univ. dr. ing. Florin BĂLTĂREȚU

Prof. univ. dr. ing. Florin IORDACHE

București

2021

CUPRINS

1	INTRODUCERE.....	3
1.1	COMPARAȚIE ÎNTRE SISTEMELE GENERATOARE DE ENERGIE	5
1.2	PROFILURI DE CONSUM ÎN CERCETARE	7
2	MODELARE	11
2.1	SCHEMA SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE	11
2.2	MODELAREA SISTEMULUI DE PRODUCȚIE.....	11
2.3	MODELAREA CONSUMATORULUI	14
3	EXPERIMENT.....	14
3.1	DESCRIEREA SISTEMULUI DE COGENERARE.....	14
3.2	PRELUCRAREA BAZEI DE DATE.....	15
3.3	COMPARAȚIA RANDAMENTELOR EXPERIMENTALE CU RANDAMENTELE MENȚIONATE ÎN LITERATURĂ.....	19
3.4	CONCLUZIILE MODELĂRII SISTEMULUI	19
4	ANALIZA FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE.....	20
4.1	CONSUMATOR REZIDENȚIAL.....	20
5	ANALIZA ADAPTABILITĂȚII SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE LA DIFERIȚI CONSUMATORI.....	29
5.1	DESCRIEREA CONSUMATORILOR.....	29
5.2	PARTICULARITĂȚI ALE PROFILURILOR ENERGETICE LA CONSUMATORI REZIDENȚIAL, BIROURI, SPITAL, COMERCIAL.....	30
5.3	PROFILURI DE ENERGII FURNIZATE DIVERȘILOR CONSUMATORI	34
5.4	PROFILURI DE ENERGII PRODUSE ÎN REGIM DE COGENERARE.....	36
5.5	FUNCȚIONARE SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU CAPACITĂȚI TERMICE DIFERITE ALE MOTOARELOR.....	37
5.6	OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI DE TRIGENERARE PENTRU DIFERITE TIPURI DE CONSUMATORI	38
6	CONCLUZII, PERSPECTIVE.....	44

1 INTRODUCERE

Prezenta teză de doctorat este structurată în șase capitole și are trei obiective majore: *analiza funcționării sistemelor de producere a energiei prin tehnologia de trigenerare cu motoare termice, studiul aplicabilității acestor sisteme pe clădiri cu necesități energetice diferite și aportul de noi contribuții la optimizarea funcționării acestor sisteme.*

Studiul bibliografic în vederea realizării proiectului de cercetare științifică propus în teză a cuprins un număr de 107 lucrări științifice (articole, studii de caz, cursuri) parcurse în primul an al ciclului doctoral. Dintre aceste lucrări o parte tratau subiecte care deși nu acopereau exact domeniul temei propuse (exemplu: co/tri generare cu turbine, analize cicluri Rankine, lucrări statistice despre algoritmi, unele modele de optimizare, criterii economice de evaluare a co/tri generării, tehnologii specifice pentru instalații frigorifice) au ajutat la înțelegerea domeniului și la conturarea modului de abordare al temei.

În primul capitol al tezei, după o prezentare generală a sistemelor clasice de producere a energiei termice și electrice și a sistemelor moderne de cogenerare și trigenerare, se face o comparație a randamentelor oferite de literatura de specialitate între aceste tipuri diferite de tehnologii. Tot în acest capitol sunt prezentate diverse sisteme de trigenerare configurate de cercetători și profiluri de predicție a consumului. Este identificat domeniul de cercetare și stabilită metoda de cercetare pe parcursul tezei.

În cel de-al 2-lea capitol al tezei sunt enunțate ecuațiile generale care guvernează procesele din cadrul unei centrale de trigenerare și ecuațiile particulare care au condus la construirea profilurilor energetice orare pentru un consumator de tip rezidențial - bloc de locuințe tip condominiu. Este propus modelul matematic de simulare a 3 moduri de operare a motoarelor termice în cadrul unui sistem de cogenerare realizat în baza variației randamentului termic cu sarcina parțială de funcționare a motoarelor. Este analizat modul de intrare în funcțiune a echipamentelor sursei de bază din cadrul sistemului propus.

Capitolul 3 - Studiul experimental - s-a desfășurat la centrala de cogenerare care deservește rețeaua de distribuție de agent termic și energie electrică a municipiului Buzău. Informațiile din baza de date, prelucrate statistic, au făcut posibilă determinarea unei ecuații de variație liniară a randamentului global al sistemului cu sarcina parțială de funcționare. În urma analizei valorilor de randament obținute din simularea funcționării cu modelul matematic din capitolul precedent, în modul de operare considerat optim, s-au făcut comparații și s-au emis concluzii cu privire la: randamentele centralei reale (10 ani vechime), randamentele precizate în literatura de specialitate și randamentele date de producătorii de echipamente în fișele tehnice.

Pentru a studia aplicabilitatea sistemelor de trigenerare cu motoare termice pe clădiri cu necesități energetice diferite a fost necesară construirea cu o cât mai mare exactitate a profilurilor energetice de consum pentru cele 4 categorii distincte de consumator, propuse. A fost abordat un algoritm de calcul „de jos în sus”, de la consumator către producător. **Capitolul 4** propune o schemă a unui sistem de trigenerare cu motoare termice cu ardere internă și chiller cu absorbție cu soluție H₂O-LiBr în care sunt evidențiate: zona energiilor produse în regim de cogenerare, zona energiilor furnizate și zona energiilor

de consum rezidențial. Sunt construite profiluri energetice orare pentru ziua medie a fiecărei luni calendaristice, profiluri denumite după cele 3 zone menționate ale sistemului de trigenerare, respectiv:

- profiluri energetice de consum;
- profiluri de energii furnizate;
- profiluri de energii produse.

Au fost construite și prezentate grafic, pentru blocul de locuințe, profilurile orare de consum termic de tip căldură pentru preparare apei calde menajere (a.c.m.), încălzire, ventilare prin încălzirea aerului, profilurile orare de consum termic de tip frig pentru climatizare și ventilare prin răcirea aerului și profiluri orare de consum electric pentru utilitățile: a.c.m., încălzire, ventilare, climatizare, iluminat și prize electrocasnice.

Urmărind dimensionarea după necesarul termic, s-au ales motoare de 4 capacități nominale diferite și s-au calculat randamentele globale în fiecare caz cu ecuația liniară determinată în urma studiului experimental.

În capitolul 5 se analizează adaptabilitatea sistemului de trigenerare propus la diferitele categorii de consumatori prin extinderea profilurilor energetice construite în capitolul 4 la alte 3 tipuri de clădiri consumatoare și după îmbunătățirea ecuației de predicție din capitolul 3 a variației randamentului global cu sarcina parțială de funcționare. Au fost construite aceleași profiluri energetice orare urmărind algoritmul de la consumatorul rezidențial tip condominiu dar aplicând particularitățile fiecărui consumator la clădire de birouri, la clădire spital și la un spațiu comercial. În capitolul 5 sunt prezentate analize grafice comparative între profilurile energetice orare ale celor 4 tipuri de consumatori. Sunt comparate consumurile maxime energetice pe fiecare utilitate ale celor 4 categorii de clădiri consumatoare.

Cercetarea s-a finalizat cu selecția optimă a numărului de motoare termice și a sarcinii termice nominale a motorului pentru un sistem de trigenerare în condițiile variației puternice a consumului energetic de la o categorie de consumator la alta. Subcapitolul final 5.6 prezintă o metodă de alegere optimizată a numărului de motoare termice necesar fiecărui tip de consumator și a sarcinii nominale termice optime a motorului, în condiții de dimensionare după necesarul termic.

În finalul tezei, **capitolul 6**, sunt prezentate concluziile, principalele contribuții personale aduse și sunt menționate câteva aspecte privind aplicabilitatea practică a cercetării desfășurate. În perspectiva cercetării se poate avea în vedere analiza sistemelor cu motoare termice în zone climatice diferite, studiul unor echipamente termice de ultimă generație sau influența instalațiilor cu absorbție în două sau trei trepte în combinație cu motoarele termice cu combustie internă.

1.1 COMPARAȚIE ÎNTRE SISTEMELE GENERATOARE DE ENERGIE

În domeniul sistemelor generatoare de energie, tehnologia prin trigenerare reprezintă un pas în față făcut de cogenerare, referindu-se la generarea simultană de energie electrică, căldură utilă și răcire provenite de la o singură sursă de combustibil [1]. Posibilitățile de configurare a unui sistem de trigenerare sunt practic nelimitate, complexitatea sistemelor de acest tip rezultând tocmai din multitudinea echipamentelor de producere, a echipamentelor de transfer și recuperare a căldurii. Avantajul practic al unui sistem de trigenerare față de un sistem de cogenerare este acela că el poate să ofere o utilitate energiei termice sub formă de căldură, produsă pe timpul sezonului de răcire - vara, energie care din căldură reziduală, risipită cel mai adesea în atmosferă, devine căldură utilă în generatorul mașinii frigorifice cu absorbție și asigură climatizarea spațiilor. Căldura în sistemele de trigenerare se recuperează de la sursa primară: motor, turbină, generator de abur, pompă de căldură sau cazan termic, cu ajutorul echipamentelor de tip schimbătoare, recuperatoare de căldură. Cazanele termice sunt utilizate și ca surse de vârf pentru a acoperi vârfurile de sarcină ale consumatorului. Echipamentele de producere a frigului pentru climatizare sunt: mașini frigorifice cu compresor, mașini frigorifice cu absorbție, pompe de căldură, aparate de condiționare a aerului (tip split sau multisplit).

Prezenta teză se va focaliza pe sistemele de trigenerare care au ca sursă primară motorul termic cu combustie internă, în ciclul Otto, alimentat cu gaz natural și ca sursă de producere a frigului instalația frigorifică cu absorbție cu soluție LiBr-H₂O.

Dacă în cazul sistemelor de generare separată prin metode clasice randamentul global al producerii separate a căldurii și a electricității este, conform literaturii de specialitate, de cca. 58 % [2], în cazul cogenerării randamentul global ajunge la cca. 85 % [2]. În cazul trigenerării randamentul global ajunge, conform literaturii de specialitate, la 87÷90 % [3] prin utilizarea căldurii, provenite în principal din gazele de ardere, în chillere cu absorbție.

În **Tabel 1.1** sunt prezentate câteva dintre sistemele generatoare de energie uzual întâlnite, randamentele atinse și tipurile de energii pe care acestea le furnizează.

Tabel 1.1 Randamente și energii furnizate de sistemele generatoare

Sistem generato r de energie	CCA centrala convențio nală cu abur	ITG instala ție de turbine cu gaze	STAG ciclu combi nat abur gaz	CCA cu parame tri supracritici	CT combus tibil gaz	CT combus tibil lichid	CT combus tibil solid	CT abur joasă presiune	CT abur medie presiune	CT gaz cu conde nsare	COGE NERA RE	TRIGE NERA RE
η_{el}	35,3%	39,3%	58%	48,3%							30%	35%
η_{th}					90%	89%	80%	90,5%	91%	94%	55%	55%
η_{global}											85%	90%
Electrică	✓	✓	✓	✓							✓	✓
Căldură					✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Răcire												✓
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	---

În ceea ce privește randamentele sistemelor de cogenerare cu motoare cu ardere internă acestea înregistrează valori ale randamentelor electrice care tind spre 45 % și ale randamentelor termice care pot atinge 48 % [4].

STUDIUL BIBLIOGRAFIC

În domeniul configurării sistemelor de trigenerare, A. Piacentino și colab. [1], în aprilie 2015, studiază 3 configurații: 1 - motor cu ardere internă cu un chiller cu absorbție într-o treaptă și un rezervor de stocare, 2 - motor cu ardere internă cu un chiller cu absorbție în 2 trepte plus chiller electric și un rezervor de stocare, 3 - turbină cu gaze (sau micro turbină cu gaze) cu un chiller cu absorbție în două trepte plus chiller electric și un rezervor presurizat de stocare a apei supraîncălzite.

Viknesh Andiappan și Denny K.S. Ng [5], în aprilie 2016, realizează o schemă analitică de determinare a tipului și dimensiunii echipamentelor necesare sistemului de trigenerare, capabilă să indice unitățile active și în stand-by din cadrul centralei.

K. F. Fong și C. K. Lee [6] în decembrie 2014, analizează performanțele energetice a 3 tipuri de motoare termice în instalație de trigenerare: motor diesel, motor alimentat cu gaz natural și motor alimentat cu benzină, în comparație cu instalația convențională de răcire pe apă răcită.

Mahesh N. Shelar și colab. [7], 2015, relizează analiza energetică și exergetică a unui sistem de trigenerare cu motor diesel și chiller cu absorbție în două sisteme: 1. căldura din circuitul apei de răcire a motorului este transmisă chillerului cu absorbție într-o treaptă iar căldura din gazele de ardere este transmisă chillerului cu absorbție în 2 trepte; 2. căldura din circuitul apei de răcire a motorului împreună cu căldura din circuitul gazelor de ardere sunt transmise prin recuperatorul de căldură într-un singur chiller cu absorbție într-o singură treaptă.

În ceea ce privește motorul termic cu combustie internă, Sepehr Sanaye și colab. [8], în august 2007, fac analiza a 3 tipuri de sisteme de cogenerare având ca sursă primară turbină cu gaze, motor termic diesel și motor termic cu gaz natural. Autorii elaborează mai multe relații matematice privind randamentul termic (în cazul motorului alimentat natural și al celui alimentat prin turbocompresor), debitul masic de combustibil, energia recuperată din apa de răcire pentru motoare și entalpia gazelor de ardere. Una dintre aceste relații matematice și constatările experimentale ale cercetătorilor privind marja abaterilor de la respectiva relație, precum și corelația cu specificațiile date în fișele tehnice ale producătorilor de motoare per puteri nominale, constituie în teza de față baza de pornire și dezvoltare a problematicei randamentelor motoarelor termice funcționând la sarcină parțială, prezentată în cap. 2.2.3 al tezei - *Moduri de operare ale motoarelor termice*.

Denilson Boschiero do Espirito Santo [9] și Xiling Zhao și colab. [10], ambii în februarie 2014, analizează eficiența energetică și exergetică anuală a sistemelor de trigenerare cu motoare cu ardere internă în conexiune cu chiller cu absorbție, respectiv pompă de căldură cu absorbție.

În privința echipamentelor de producere a frigului, Pedro A. Rodriguez-Aumente și colab. [11], în noiembrie 2011, sunt preocupați de asigurarea necesarului de frig pentru un complex mare de birouri (50.000 mp) din Madrid în condițiile dezechilibrului major între sarcina de vară și cea de iarnă.

Valerie Eveloy și colab. [12], în februarie 2014, dezvoltă ideea răcirii cu ajutorul chillerelor cu absorbție a aerului comprimat introdus în camerele de ardere ale turbinelor cu gaze folosite în extracția gazului natural lichefiat în Orientul Mijlociu.

Mahesh Shelar și G. N. Kulkarni [13], în noiembrie 2015, realizează o comparație între două sisteme de trigenerare cu motor diesel, primul cu un chiller cu absorbție și un boiler auxiliar iar al doilea având în plus un chiller cu compresie de vapori.

Optimizarea sistemelor de trigenerare, în cadrul lucrărilor științifice studiate, se realizează simplu obiectiv sau multi-obiectiv și are drept scop îndeplinirea unor criterii de performanță energetică sau a unor criterii economice.

Hoseyn Sayyaadi [14], în octombrie 2008, face optimizare multiobiectiv a unui sistem de cogenerare cu algoritmi evolutivi genetici și găsește setul optimal de soluții Pareto (80/20) pentru îndeplinirea a 3 funcții obiectiv: eficiența energetică, rata totală a costurilor și obiectivul denumit „termoenviromonic” – impactul asupra mediului.

M. A. Lozano și colab. [15], în septembrie 2009, prezintă un model care permite determinarea modului optim de operare corespunzător obținerii costului minim (în €/kWh) al produselor finale ale unui sistem simplu de trigenerare - motor cu combustie internă pe gaz natural, cazan auxiliar, chiller cu absorbție cu o treaptă, chiller electric (cu compresie mecanică de vapori).

Liwei Ju și colab. [16], în iunie 2016, realizează optimizarea multiobiectiv a unui sistem hibrid cu energii regenerabile comandat de un sistem de automatizare (DERs CCHP distributed energy resources).

1.2 PROFILURI DE CONSUM ÎN CERCETARE

În ceea ce privește consumatorul, calculul consumului anual de energie primară al clădirii se realizează folosind relațiile de calcul din metodologia românească Mc 001/2006 - Metodologie de calcul a performanței energetice a clădirilor. În afara metodologiei românești Mc 001/2006 există în articolele științifice din literatura de specialitate diverse metode de predicție a consumului anual de energie al clădirilor. Aceste metode folosesc algoritmi matematici simpli pentru rezolvarea nonliniarității datelor de consum energetic pentru serii mari de date [17], [18], [19] sau algoritmi matematici hibridi pentru predicția rezultatelor problemelor nonlineare de statistică, pentru modelarea relațiilor complexe între intrări și ieșiri sau pentru gestionarea seriilor mari de date [20], [21].

Tehnica de abordare „de jos în sus” sau de la consumator către sursă necesită o multitudine de parametri și valori de intrare. Modelul trebuie calibrat cu date măsurate și pot apărea erori sistematice atunci când se calculează pentru un grup mare de clădiri [22], [23]. „Metoda punctului interior” este

folosită în referința [19] la realizarea unui model pentru predicția temperaturii interioare și a energiei consumate la momentul „t+d” față de momentul „t”.

O altă metodă utilizată în predicția necesarului anual pentru încălzire și răcire este “metoda grade-zile”. La “metoda grade-zile” face referire și Mc 001/2006 care descrie o metodă grafică de stabilire a perioadei de încălzire cu ajutorul “temperaturii de echilibru”, adică temperatura exterioară pentru care aporturile utilizate egalează pierderile de căldură ale clădirii. Metodologia de calcul recomandă, în cazul în care nu sunt disponibile datele climatice, utilizarea valorilor indicate în standardul SR 4839, referitor la “Număr grade – zile” [23]. „Analogia termo-electrică” folosește pentru predicția consumului de energie la consumator relații de bilanț în nodurile de temperatură bazându-se pe similitudinea electric-termic. Intensitatea electrică este mărime similară cu fluxul termic, sursele electrice sunt similare aporturilor, condensatorii electrice sunt similari capacităților termice, rezistențele electrice sunt similare rezistențelor termice iar în nodurile rețelei electrice ne putem imagina temperaturile, diferența de temperaturi fiind similară tensiunii electrice (o diferență de potențial) [24].

Profilul consumatorului este construit și clasificat în literatura științifică pe baza scopului utilizării energiei în profil de consum pentru încălzire, ventilare, climatizare, prepararea a.c.m. și electric.

Analizele sunt conduse pe tipuri de consumator: rezidențial (unifamiliale, case multifamiliale tip, blocuri de locuințe), servicii (birouri, școli, spitale, spații comerciale), industrial (tehnologic), etc.

Un alt tip de clasificare se realizează după cantitatea de energie anuală consumată [25] (de exemplu până în 200 MWh/an electrice), după scenariile de funcționare [26] (funcționarea unui centru de date) sau după momentul de timp al consumului preponderent înregistrat [27] (de zi, dimineață, după-amiază).

Comportamentul consumatorului față de modul de utilizare a energiei a fost criteriul de înființare a profilurilor de consum în referința [28] (profiluri denumite: „familie”, „conștient”, „tehnician”, „confort”), iar în referința [29] se face referire chiar la un profil psiho-social legat de atitudinea consumatorului față de eficiența energetică. În referințele [30], [23], [31] și [32] profilurile de consum sunt stabilite după locația consumatorului (în canion stradal/ casă autonomă; în zone diferite climatice pe teritoriul unui stat sau în zone izolate, în apropierea frontierei).

Se mai regăsesc în literatura de specialitate clasificări ale profilurilor de consum în funcție de furnizorul de energie [33] (furnizorul rețelei termice orașenești, furnizorul rețelei electrice, al energiei hidraulice la locul de consum), în funcție de procentul de utilizare al echipamentelor consumatoare [26] (utilizare servere 25%, 50%, 75% și 100%), în funcție de regimul de funcționare al instalațiilor [34], [35], [31], [36], (continuu/intermitent, zi lucrătoare/week-end, vacanța de iarnă/sezonul de vară) sau după regimul juridic al utilizatorului [37] (clădiri publice; casnic/noncasnic în reglementările ANRE).

Ceea ce nu există în literatura de specialitate sau este greu de întâlnit este o “unealtă” complexă care să integreze toate tipurile de consumuri energetice particularizate pe mai multe categorii de consumatori. Nu se găsesc studii care să trateze modul cum se transferă aceste consumuri energetice de la consumatorul final către sursa de bază a unui sistem de trigenerare. Profilurile întâlnite sunt în general

la scară mică sau nu cumulează absolut toate tipurile de utilități, fiind mai degrabă specializate pe una sau două dintre acestea, sau tratează un anumit tip de clădiri fără a atinge diversitatea tipologiilor de clădiri consumatoare. Elaborarea unor astfel de profiluri complete și complexe reprezintă o misiune dificilă și greoaie care se face prin măsurători în situ, prin aplicarea metodologiilor de calcul sau prin accesarea bazelor de date atunci când sunt disponibile facturile de consum. Amplitudinea caracteristicilor de profil energetic depinde de o multitudine de factori cum ar fi condițiile climatice exterioare, condițiile de confort interior, comportamentul consumatorului, anvelopa clădirii, sistemele de instalații și tehnologiile utilizate la producerea utilităților, etc. Elaborarea cu o cât mai mare exactitate a unor profiluri de consum energetic pentru diferitele tipuri de consumatori este foarte utilă furnizorilor de energie la prognoza consumului în zona deservită. Profilurile energetice de consum ajută investitorii la momentul deciziei de implementare a unui sistem de trigenerare. De asemenea, corecta cunoaștere a profilurilor de consum, atât ca nivel cantitativ cât și ca proporții între cele două cerințe energetice: termică și electrică, este utilă la momentul dimensionării și alegerii efective a echipamentului sursei de bază și a celorlalte echipamente componente ale sistemului.

Studiu experimental a avut loc în două etape.

Prima etapă s-a desfășurat la centrala de trigenerare ce deservește sediul central al unui operator economic. În această etapă s-a realizat vizualizare și înțelegerea funcționării unui sistem de trigenerare, cu particularitățile motoarelor termice și ale celorlalte echipamente componente din cadrul centralei. S-au obținut informații și clarificări importante de la personalul specializat ce manageriază funcționarea centralei.

A doua etapă s-a desfășurat la centrala de cogenerare a unui operator economic ce deservește rețeaua de alimentare cu agent termic a unui oraș din România, cu 129.368 locuitori. În această locație, după vizualizarea și înțelegerea obiectivului, a schemei de funcționare și a informațiilor primite de la operatorul sistemului, s-au obținut și analizat valorile contorizate din baza de date zilnice pentru anul 2012

Scopul studiului experimental a fost de a simula funcționarea și de a deduce experimental randamentul de funcționare al unui sistem de co/trigenerare. Randamentele termic, electric și global deduse se vor dovedi a fi diferite de valorile indicate în cataloagele și fișele tehnice și ușor diferite de valorile indicate în literatura de specialitate (în sens descrescător).

Modelarea funcționării sistemului a fost etapa imediat următoare studiului experimental. S-a realizat mai întâi un model numeric bazat pe ecuația randamentului termic la sarcină parțială a lui Sanaye S. și colab. [8], pe ecuația variației randamentului generatorului electric ASHRAE, 2008 [38] și pe metoda de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor de cogenerare din SR EN 15316 [39]. Modelul numeric a fost construit pentru stabilirea modului optim de operare al motoarelor termice din cadrul centralei, conform cu indicațiile operatorilor în cele două etape experimentale. Modul 3 de

operare pentru motoare a fost indicat ca fiind optim, respectiv funcționare „simultană” la aceleași sarcini de încărcare fără intervenția cazanului termic.

Acest prim model matematic a fost calibrat prin aplicarea valorilor din baza de date (valori contorizate) și îmbunătățit prin metode de analiză statistică. În final a fost elaborată o ecuație de variație liniară care determină caracteristica randamentului global al sistemului în funcție de modul de funcționare la sarcini parțiale sau nominale a motoarelor sursei de bază. În încercarea de îmbunătățire a modelului de predicție a randamentului global și observând caracterul exponențial al ecuațiilor emise de alți cercetători s-a obținut a 2-a ecuație de tip exponențial din valorile norului de puncte modelat în urma datelor experimentale.

Analiza funcționării cuplate consumator - sistem de producție s-a putut face prin studierea aprofundată a cererii de consum, respectiv a profilurilor de consum energetic.

Profilurile energetice orare construite pe baza temperaturilor exterioare medii orare pentru București și pe baza specificațiilor din reglementările tehnice (manuale, normative, metodologii) pentru o clădire consumatoare de tip rezidențial, a fost următorul pas important în căutarea răspunsurilor la întrebările puse la începutul cercetării. S-au determinat consumurile orare termice sub formă de căldură și sub formă de frig și consumurile orare de energie electrică pentru utilitățile consumatorului. Calculul, denumit de unii cercetători „de jos în sus”, a continuat cu elaborarea profilurilor energetice orare ale energiilor furnizate între sistemul de producție - centrala de trigenerare - și consumator, după care a fost condus în centrală la sursa de bază - motorul termic cu ardere internă. Profilurile energetice ajunse la sursă în centrală au fost denumite profiluri energetice produse în regim de cogenerare. Calculul s-a făcut urmărind necesarul termic, necesarul electric urmând a fi asigurat ca o consecință a dimensionării după necesarul termic, conform cu indicațiile din fișa tehnică a producătorului motoarelor alese.

Analiza adaptabilității a constat în construirea profilurilor energetice orare pentru alte 3 tipuri de clădiri consumatoare diferite: birouri, spital și complex comercial. A fost urmărit algoritmul de calcul de la consumatorul rezidențial dar cu aplicarea particularităților fiecărui tip de consumator (debite, temperaturi specifice, număr de persoane, orar de funcționare, caracteristicile dimensionale ale clădirilor, factori și coeficienți diferiți menționați de metodologia de calcul, etc.). S-au realizat comparații grafice și comparații sub formă tabelară între cele 4 tipuri de consumatori. S-au emis concluzii și dedus recomandări vis-a-vis de modul de adaptare al tehnologiei de trigenerare cu motoare termice cu ardere internă și chillere cu absorbție la cele 4 tipuri de consumatori studiate.

Selectia optimă a avut drept scop maximalizarea funcțiilor randamentului global al sistemului urmărind criteriul selecția echipamentelor sursei de bază în ceea ce privește:

- sarcină termică nominală optimă pentru profilul energiei produse în regim de cogenerare;
- număr optim de motoare termice pentru satisfacerea profilului energiei produse în regim de cogenerare.

Funcția obiectiv stabilită a fost maximalizarea randamentului global al sistemului în condițiile unei sarcini termice variabile la consumator.

2 MODELARE

Modelarea proceselor ce au loc într-un sistem de trigenerare comportă două aspecte: modelarea sistemului de producție și modelarea consumatorului.

2.1 SCHEMA SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE

În **Fig. 2.1** este prezentată schema unui sistem de trigenerare cu 3 motoare termice cu combustie internă prevăzute cu module de generare a energiei electrice (G1, G2, G3). Sursa de vârf (sau generatorul de căldură suplimentar), utilizată pentru a răspunde vârfurilor de sarcină, este alcătuită din două cazane de apă caldă (Cz1, Cz2). Combustibilul de alimentare pentru arzătoarele cazanelor de apă caldă și pentru camerele de ardere ale motoarelor termice este gazul natural. Recuperarea căldurii din motorul cu combustie internă se face cu ajutorul schimbătoarelor de căldură în plăci montate pe două circuite: circuitul apei de răcire a carcasei motorului, cu un regim de temperatură $90 \div 80$ °C și circuitul gazelor de evacuare arse, cu un regim de temperatură $560 \div 120$ °C.

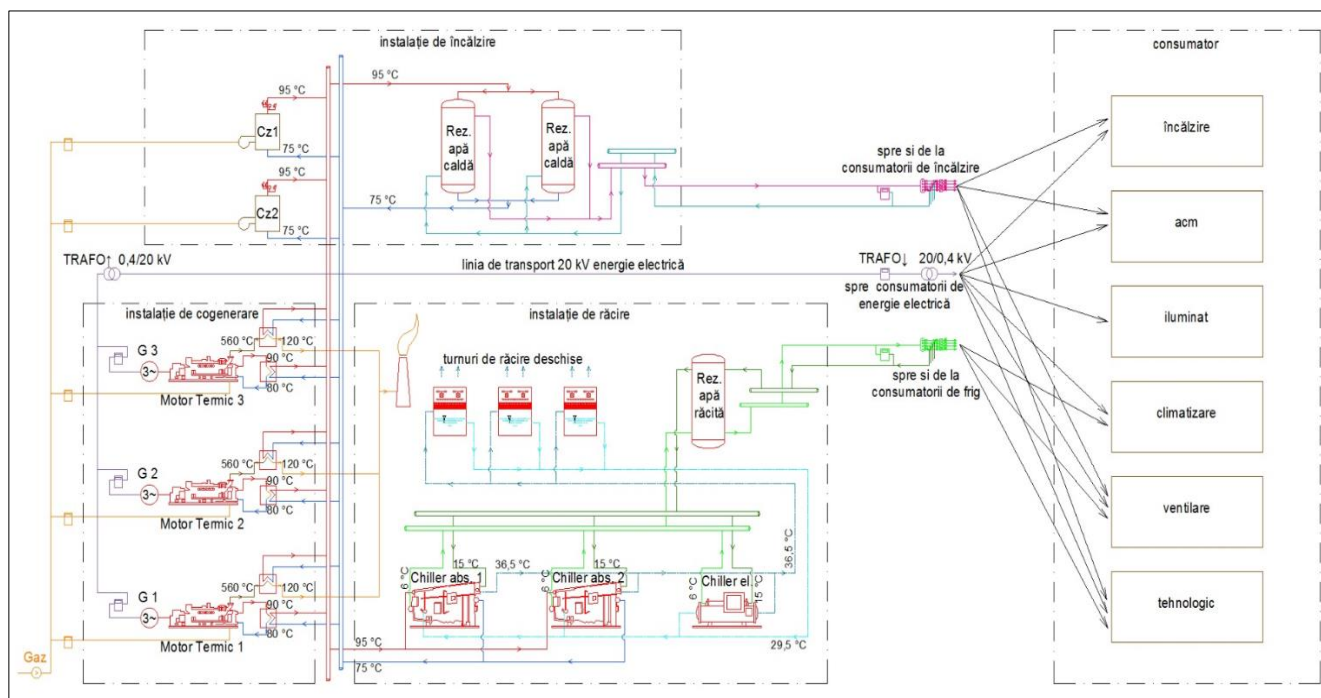


Fig. 2.1. Schema generală a unui sistem de trigenerare cu motoare termice și chillere cu absorbție

2.2 MODELAREA SISTEMULUI DE PRODUCȚIE

Capitolul 2.2.2 prezintă, pentru un sistem de cogenerare general și pentru un sistem de trigenerare, ecuațiile de bilanț energetic pe contur, cunoscute din literatura de specialitate. Tot în capitolul 2.2.2 sunt

prezentate ecuațiile de bilanț al fluxurilor energetice pentru: motorul termic, generatorul electric, cazanul termic, schimbătorul de căldură în plăci, rezervorul de acumulare apă caldă/răcită și chillerul cu absorbție.

Motoarele termice cu ardere internă au marele avantaj că pot funcționa la încărcări parțiale care pot coborâ până la 50 % din capacitatea lor nominală, fără a le fi afectat semnificativ randamentul. La sarcini sub 50 % din capacitatea nominală, producătorii de motoare termice recomandă oprirea motorului din considerente de eficiență și înlocuirea lui cu un cazan termic de capacitate mai mică sau cu o altă sursă generatoare de energie. Pentru a studia flexibilitatea acestei tehnologii eficiente, pornind de la modalitățile de intrare în funcțiune a motoarelor și urmărind ca scop obținerea randamentului global maxim (termic+electric), se propune o schemă simplă de cogenerare cu 5 motoare termice cu ardere internă, Fig. 2.2 [40].

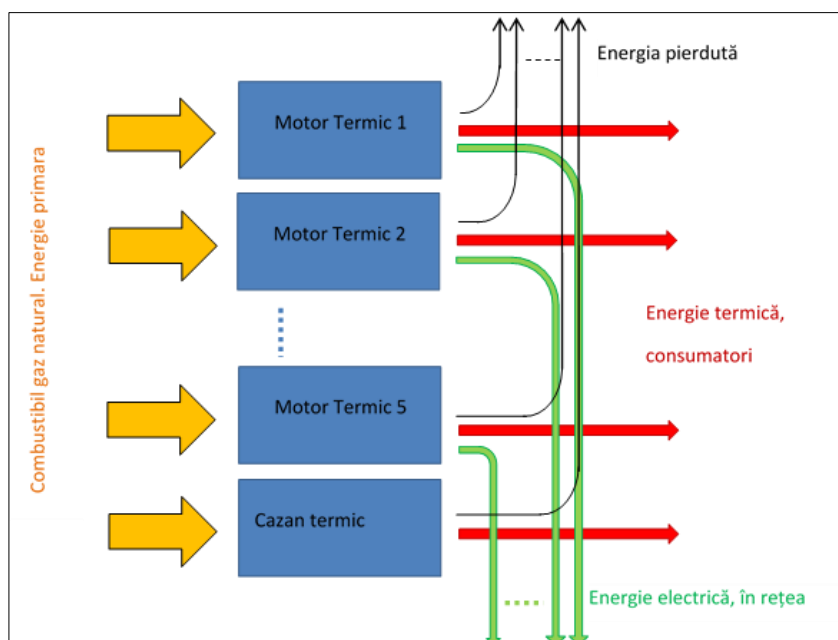


Fig. 2.2. Schema fluxurilor energetice într-o centrală de cogenerare (sursa G. Mărcuș și colab. [40])

Există mai multe moduri posibile de operare ale motoarelor termice în cadrul unui sistem de cogenerare/trigenerare. Dintre aceste posibilități de operare au fost alese și analizate în cadrul cercetării, [40], 3 moduri de operare, pentru centrala de cogenerare prezentată schematic în Fig. 2.2:

- modul 1 de operare, la care motoarele termice M1, M2, M3, M4, M5 intră în funcțiune **în cascadă**, consecutiv și fiecare motor continuă să funcționeze la sarcina sa nominală, 100%, odată ce este atinsă această sarcină sa nominală. Cazanul termic preia secvențele de sarcini după ce este depășită capacitatea de 100 % a motorului precedent până la îndeplinirea cerinței minime de 50 % pentru motorul următor programat să intre în funcțiune;
- modul 2 de operare, la care motoarele termice intră în funcțiune în mod **alternant** împreună cu cazanul termic egalizându-și între ele sarcina de încărcare, la fiecare nouă intrare a unui motor;

practic la momentul intrării celui de-al doilea motor vor începe a funcționa atât M1 cât și M2 la sarcină parțială de 75%;

- modul 3 de operare, la care motoarele termice funcționează **simultan**, împărțind în mod egal orice valoare a sarcinii termice care trece de 50% din capacitatea nominală a motorului, fără să fie nevoie de intervenția cazanului termic; practic după ce M1 ajunge la 100 % iar consumatorul ar solicita un consum egal ca valoare cu 1,01 din sarcina nominală, ambele motoare M1 și M2 vor începe să funcționeze la sarcină parțială de 50,5%. Cazanul termic este utilizat doar la sarcini foarte mici (până în 50 %) și la sarcini de vârf ce depășesc capacitățile însumate ale motoarelor.

Pentru cele 3 moduri de operare au fost stabilite ecuații pentru calculul sarcinii parțiale de funcționare. Au fost determinate deasemenea ecuațiile pentru determinarea sarcinii parțiale a cazanului termic în modurile 1, 2 și 3 de funcționare.

Randamentul termic al motorului "i" se calculează cu ecuația Sanaye S. și colab. [8] privind variația randamentului termic la sarcină parțială. Randamentul generatorului electric se calculează cu ecuația ASHRAE, 2008 [38] privind variația randamentului generatorului electric cu sarcina parțială. Puterea electrică utilă se calculează cu metoda de interpolare liniară din metodologia de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor din SR EN 15316 [39].

Analiza s-a făcut pe 5 motoare tip MWM TCG 2020, alimentate cu gaz natural, cu capacitate termică nominală de 1675 kW, cu randament termic nominal de 45,7 %, conform fișei tehnice a producătorului. Puterea electrică nominală a motorului este 1500 kW, având un randament electric nominal de 40,9 %. Randamentul global al motorului MWM TCG 2020 (electric+termic) este 86,6 %.

Concluzii:

1. În ceea ce privește randamentul termic total al motoarelor considerat fără sursa de vârf, modul 3 de operare simultană oferă randamentul termic total maxim, 45,79 %, funcționând la sarcini parțiale între 85,77% și 91,47%, pe mai multe intervale de sarcină față de modul 1 sau pe intervale mai largi de sarcină față de modul 2 [40];
2. Randamentul global (electric+termic) al cogenerării, considerat fără intervalul de sarcini în care funcționează doar sarcina de vârf și nu se generează putere electrică, înregistrează valori cuprinse între 82,08% și 88,19% pentru modurile de operare în cascadă și alternant (mod 1 și mod 2) și între 82,08% și 87,14% pentru modul de operare simultană (mod 3) cu randamente mai bune pe intervalele de pornire pentru modul 2 [40];
3. La o analiză mai atentă modul de operare simultană (mod 3) oferă un avantaj suplimentar prin cantitatea de energie electrică utilă furnizată. Dacă, de exemplu, în modurile cascadă și alternant (mod 1 și mod 2) la o sarcină egală ca valoare cu de 1,4 ori capacitatea nominală a motorului se generează o putere electrică utilă dată doar de primul motor funcționând la sarcina nominală (100%, restul de 0,4 din sarcină fiind preluată de cazanul termic), adică 1500 kW electrici, în modul 3 se vor genera 2100 kW electrici utili, furnizați de motoarele primul și al 2-lea funcționând fiecare la sarcini parțiale de 70%, [40].

2.3 MODELAREA CONSUMATORULUI

Alcătuirea profilelor de consum pentru 4 tipuri diferite de consumatori din București, împărțirea consumurilor pe categorii de energie consumată (termică, electrică, frigorifică) și transmiterea energiilor către sursă, dimensionarea unui sistem de trigenerare în funcție de necesarul termic și analiza adaptabilității acestor tipuri de sisteme tehnologice au fost principalele preocupări ale tezei de cercetare.

În calculul consumului de energie primară al clădirii s-au utilizat ecuațiile de calcul din metodologia în vigoare, Mc 001/2-2006 - Metodologie de calcul a performanței energetice a clădirilor, Partea a II-a - Performanța energetică a instalațiilor din clădiri [41] .

Capitolul 2.3.1 prezintă ecuațiile generale de calcul al consumului energetic pentru satisfacerea utilităților din clădirea consumatorului, conform metodologiei Mc 001, respectiv pentru calculul următoarelor consumuri:

- Consumul de energie termică pentru prepararea apei calde menajere (a.c.m.);
- Consumul de energie electrică necesară pompelor de circulație din instalația de preparare a.c.m.;
- Consumul de energie termică pentru încălzire clădirii;
- Consumului de energie electrică pentru distribuția în clădire a agentului termic de încălzire;
- Consumul de energie electrică pentru iluminat;
- Consumul de energie termică pentru climatizarea spațiilor clădirii;
- Consumul de energie electrică pentru vehicularea aerului în sistemul de climatizare;
- Consumul de energie electrică pentru vehicularea aerului în instalația de ventilare;
- Consumul de energie termică necesar încălzirii aerului ventilat, iarna;
- Consumul de energie termică necesar răcirii aerului ventilat, vara;

3 EXPERIMENT

3.1 DESCRIEREA SISTEMULUI DE COGENERARE

Procesul de cercetare științifică din cadrul tezei de doctorat a continuat în ianuarie 2018 cu partea experimentală desfășurată la centrala de cogenerare a unui operator economic din municipiul Buzău. Sistemul de cogenerare al operatorului economic alimentează rețeaua orășenească cu agent termic pentru încălzire și pentru prepararea apei calde de consum menajer și cu energie electrică. Sistemul a fost pus în funcțiune în iunie 2008. Schema funcțională cuprinzând principalele echipamente ale sistemului de cogenerare din municipiul Buzău este prezentată în Fig. 3.1.

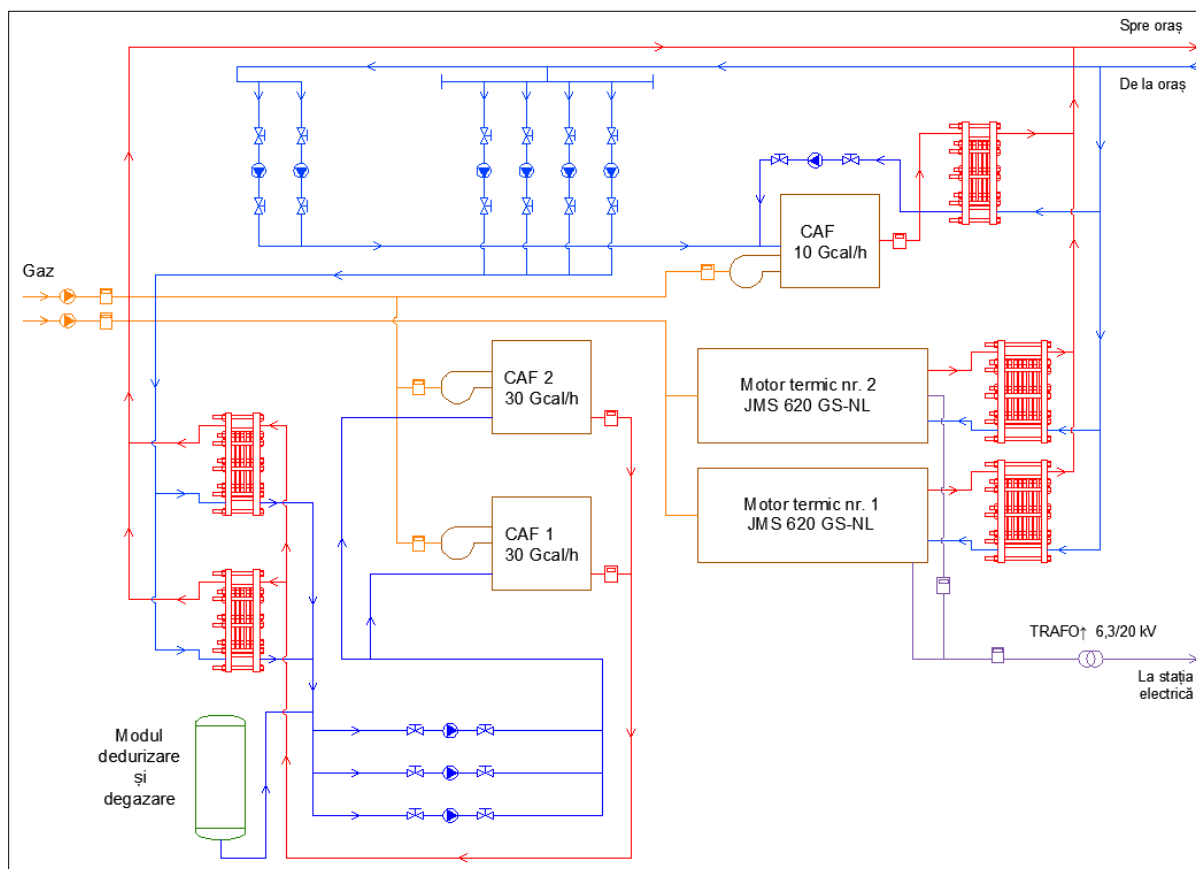


Fig. 3.1. Schema sistemului de cogenerare Buzău

Sistemul de cogenerare este compus din:

- două motoare termice cu ardere internă;
- două generatoare electrice;
- 5 schimbătoare de căldură în plăci;
- două cazane termice (CAF-uri)

3.2 PRELUCRAREA BAZEI DE DATE

Pe perioada desfășurării experimentului s-a primit accesul la baza de date a sistemului de cogenerare din municipiul Buzău și am primit informațiile și datele necesare continuării cercetării științifice. Au fost procurate două tipuri de date: situațiile lunare pentru 6 ani, 2012÷2017 și situațiile zilnice pentru întreg anul 2012.

Situațiile zilnice din anul 2012, utilizate în teză, cuprind orele de funcționare zilnice a fiecăruia dintre cele 2 motoare, cantitățile zilnice de gaze naturale în m^3 consumate de sistem, cantitățile zilnice și orare de energie electrică în MWh produse de fiecare generator electric, cantitățile zilnice de energie termică în MWh produse cumulativ de cele 2 motoare și randamentele globale ale sistemului.

Modelul numeric configurat în cadrul lucrării [40] în modul 3 de operare **simultană** la aceleași sarcini de încărcare fără intervenția cazanului termic, este aplicat motoarelor din sistemul de cogenerare

Buzău. Modelul utilizează pasul de timp zilnic pe perioada anului 2012. Din baza de date Buzău au fost preluate datele contorizate pentru: producția de energie termică cumulată a celor două motoare (M1 și M2) în MWh/zi și orele de funcționare zilnică ale fiecărui motor, producția de energie electrică individuală a fiecărui motor în MWh/zi și randamentul global zilnic. În modul de operare simultan, la aceeași sarcină parțială, M1 și M2 împart producția de energie termică orară în mod egal pe timpul orelor de funcționare din zi. La împărțirea producției de energie termică am introdus condiția de nedepășire a puterii nominale termice a motorului din fișa tehnică - 3070 kW. Se observă că în lunile oct., nov. și dec. intră în funcțiune și cazanul termic (CAF) pentru a asigura vârfurile de necesar termic solicitate de consumatori. Pentru fiecare motor a fost calculată, după împărțirea producției termice, sarcina parțială de funcționare (PL), randamentul termic individual la sarcină parțială și randamentul electric individual la sarcină parțială, energiile utile: termică, electrică, totală. Modelul numeric a mai calculat energia pierdută de sistem și energia combustibilului de alimentare a sistemului de cogenerare. În final au fost calculate randamentul termic total și randamentul global (termic+electric) ale sistemului, randamente denumite **modelate**. Randamentele din baza de date (BDB) mai sunt denumite și randamente **reale**.

VARIAȚIA LINIARĂ A RANDAMENTELOR

Cu ajutorul funcției "*trendline*", *Excel*, au fost trasate curbele cele mai apropiate de valorile ce reprezintă norul de puncte al randamentelor zilnice (termice, electrice sau globale) definite la diferitele sarcini parțiale de funcționare ale sistemului de cogenerare. S-a observat astfel tendința pe care o are mulțimea valorilor randamentului termic, electric sau global în cazul creșterii sarcinii de încărcare (parțiale) a motoarelor termice cu ardere internă.

Ipoteză de calcul

S-a calculat sarcina parțială zilnică de funcționare a centralei de cogenerare, PL_{COG} (2MT+CAF), în ipoteza unei dimensionări optime a centralei, adică s-a presupus că sarcina nominală termică zilnică a centralei (la capacitate 100 %) este egală cu însumarea puterilor nominale termice a celor 2 motoare pe parcursul unei zile (24 de ore) plus puterea unui cazan termic care ar trebui să acopere $\frac{1}{2}$ din sarcina unui motor, 1,535 MW, (centrala reală are, într-un mod supradimensionat, două CAF-uri de 35 MW).

Au fost reprezentate grafic variațiile **randamentului termic modelat, randamentului electric modelat și al randamentului global modelat** (termic+electric) în funcție de sarcina parțială de funcționare a sistemului de cogenerare. Au fost trasate linia de tendință a norului de puncte (*trendline*) și au rezultat ecuațiile liniare ale dreptelor de regresie pentru fiecare variație grafică.

În Fig. 3.2 este reprezentat graficul de variație al **randamentului global modelat** al centralei de cogenerare în funcție de sarcina parțială de funcționare a sistemului de cogenerare. A fost trasată linia de tendință a norului de puncte și a rezultat ecuația liniară a dreptei de regresie, ecuația 3.1.

$$\eta_{gl} = 0,1553 \cdot PL_{COG} + 0,6708 \quad (-) \quad 3.1$$

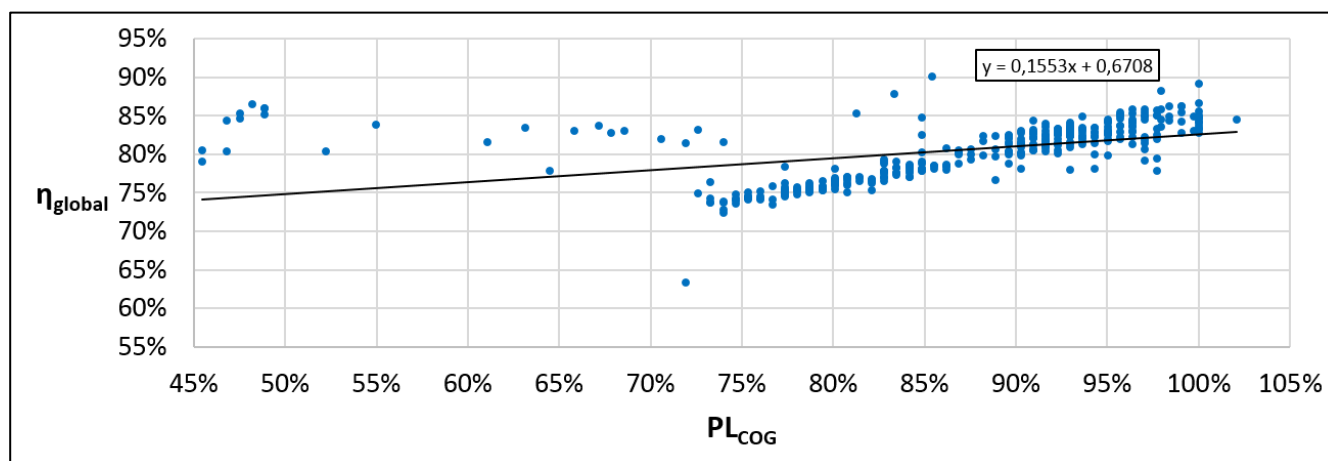


Fig. 3.2. Variația zilnică randamentului global modelat cu sarcina parțială a sistemului

În scopul prelucrării în sensul unei repartiții a norului de puncte cât mai aproape de repartiția normală, au fost înlăturate „manual” din graficul de valori ale randamentului termic modelat punctele care apăreau dispersate (punctele roșii au fost denumite „răzleți termici”, „răzleți electrici” și „răzleți globali”) și s-au trasat noile grafice ale valorilor rămase. Au fost determinate ecuațiile liniare ale dreptelor de regresie pentru **randamentul termic modelat, fără „răzleți termici”, randamentul electric modelat, fără „răzleți electrici” și randamentul global modelat, fără „răzleți globali”**.

Fig. 3.3 prezintă graficul variației cu sarcina parțială a randamentului global modelat din care au fost înlăturați „răzleți globali”.

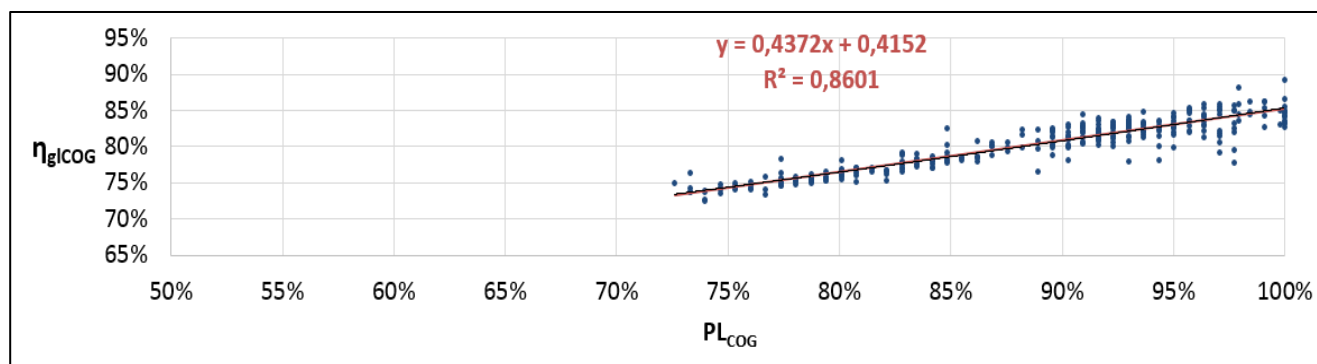


Fig. 3.3. Valorile de randament global modelat fără „răzleți globali”

Ecuția variației cu sarcina parțială a **randamentului global modelat, fără „răzleți globali”**, este:

$$\eta_{glCOG} = 0,4372 \cdot PL_{COG} + 0,4152 \quad (-) \quad 3.2$$

VARIATIA EXPONENTIALĂ A RANDAMENTELOR

Ecuția obținută în cap. 3.2.2 al tezei reprezintă o variație liniară a randamentului cu sarcina parțială. Pe parcursul studiului bibliografic s-a găsit în lucrarea lui Sepehr Sanaye și colab. [8], ecuația care descrie variația randamentului termic la sarcină parțială în funcție de randamentul termic nominal și sarcina parțială. Ecuția este aplicabilă motoarelor termice cu supraalimentare (turbo) cu sarcini nominale între 50 și 6000 kW. Autorii menționează că ecuația a demonstrat o abatere de maxim 10 % față de valorile

din bazele de date obținute experimental. S-a observat că respectiva ecuație este de tip exponențial, cu variabila sarcină parțială (PL) la exponentul puterii numărului “e”. În încercarea de îmbunătățire a modelului statistic de predicție s-a cercetat posibilitatea obținerii unei ecuații de tip exponențial cu valorile norului de puncte de randament global modelat, după eliminarea „răzleților globali”, trasat în urma datelor experimentale. Cu solverul Excel a fost construită o a doua ecuație, 3.3:

$$\eta_{glCOG} = 0,4926 \cdot e^{0,5498 \cdot PL_{COG}} \quad (-) \quad 3.3$$

Graficul din Fig. 3.4 prezintă variația zilnică a randamentului global modelat cu sarcina parțială a sistemului format din două motoare, cu linia de tendință în cazul variației de tip exponențial.

Ecuația 3.3 are un coeficientul de determinare ușor îmbunătățit, $R^2=0,8642$ față de cel al ecuației liniare, $R^2=0,8601$. 86,42 % dintre valorile sarcinii parțiale, PL_{COG} , determină valorile randamentului global, η_{glCOG} . Prognoza șirului de valori ale randamentului global se îmbunătățește puțin în sensul apropierii valorilor prezise de valorile modelate. Se observă apropierea de valorile modelate din ambele direcții, adică atunci când valorile primei ecuații sunt mai mici decât valorile randamentului modelat valoarea obținută cu a 2-a ecuație (de tip exponențial) e mai mare/mai apropiată (ex: valoare prima zi) iar atunci când valorile primei ecuații sunt mai mari decât valorile randamentului modelat valoarea obținută cu a 2-a ecuație e mai mică/mai apropiată (ex: valoare ultima zi, valoare maximă).

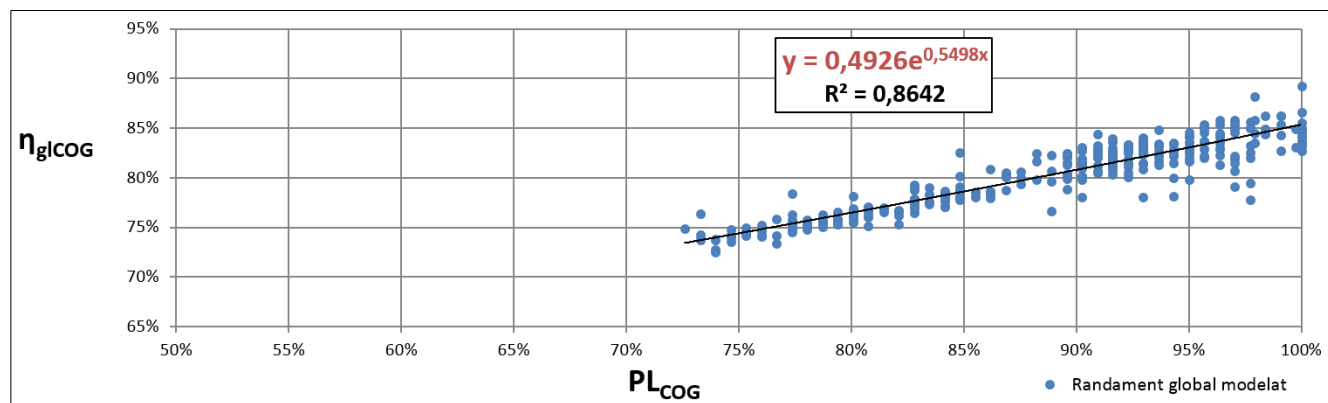


Fig. 3.4. Variația de tip exponențial a randamentului global modelat cu sarcina parțială

3.3 COMPARAȚIA RANDAMENTELOR EXPERIMENTALE CU RANDAMENTELE MENȚIONATE ÎN LITERATURĂ

În continuare, s-a făcut comparația modului de variație a randamentului global zilnic din baza de date Buzău, η_{BDB} , (denumit și randament real) cu randamentul global modelat, η_{glCOG} , prin regresie multiplă (randament modelat). Graficul comparativ între valorile randamentului global modelat și valorile randamentului global din baza de date Buzău (randament real) este prezentat în Fig. 3.5.

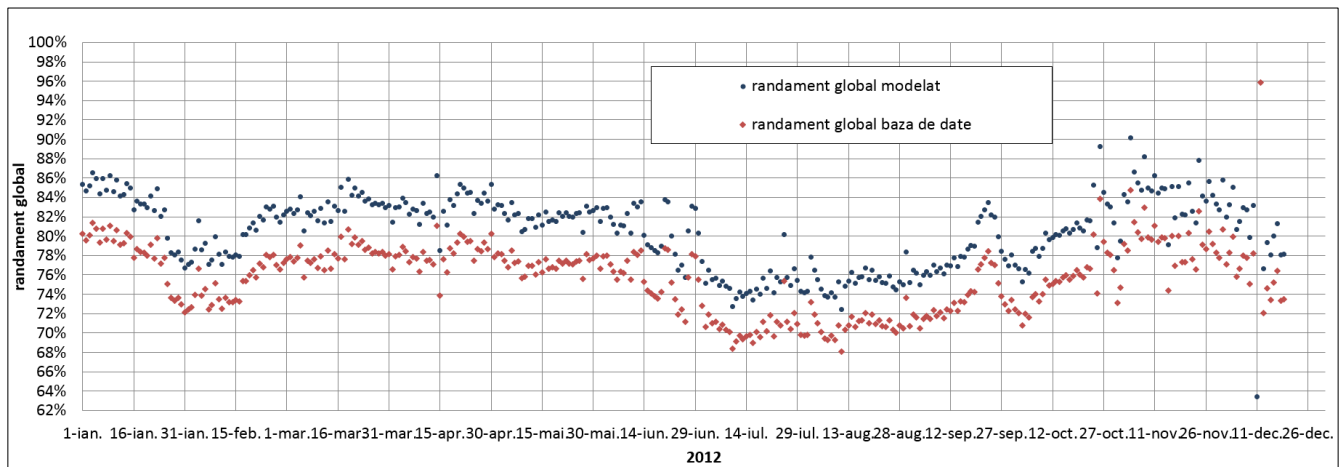


Fig. 3.5. Variația comparativă între randamentul global zilnic modelat vs. experiment

S-a observat că, în general, caracteristica randamentului global modelat urmărește în mod fidel traseul caracteristicii randamentului global din baza de date dar cu variație uniformizată și **valori mai mari cu 4,34 ÷ 5,40 %**.

3.4 CONCLUZIILE MODELĂRII SISTEMULUI

Modelul numeric construit în cadrul analizei randamentelor sistemului de cogenerare având sursă primară motoarele cu combustie internă a necesitat luarea în calcul a mai multor posibilități de operare a motoarelor, apărute progresiv în discuție pe parcursul derulării studiului. Au rezultat mai multe rânduri de calcule și de încercări, unele soldate cu rezultate greșite ce au trebuit corectate. Modelul deși nu se ocupă în amănunt de aspectele legate de randamentul electric al motoarelor termice (cea de a doua componentă a randamentului global) a trebuit îmbunătățit prin aplicarea interpolării liniare în metoda de calcul a puterii utile electrice, așa cum stipulează Standardul EN 15316 [39].

În cazul aspectelor legate de randamentul cazanelor termice s-au făcut cercetări asupra datelor tehnice furnizate de 7 producători de astfel de echipamente care au demontat percepția eronată conform căreia randamentul cazanelor ar crește cu sarcina de încărcare. În datele tehnice furnizate la diferite încărcări (sarcini parțiale), în general între 40% și 100%, valorile de randament al cazanelor sunt mai

mari la încărcarea mai mică. Randamentul maxim al unui echipament termic nu echivalează automat cu funcționarea lui în sarcină nominală. S-a observat că în cazul motoarelor termice cu combustie internă acest lucru se obține la o sarcină parțială (PL) situată în jurul intervalului $85\% \div 91\%$. Analizele grafice și studiul rezultatelor obținute au condus la concluzia potrivit căreia modul 3 de operare - **funcționare simultană a motoarelor la aceleași sarcini de încărcare, fără intervenția cazanului termic - este modul de operare cel mai avantajos**, cu valori ridicate ale randamentului global pe intervale mai întinse de sarcină și cu producție electrică superioară, determinantă în cazul urmăririi unui necesar electric important alături de cel termic.

Acest mod 3 de operare a fost aplicat centralei de cogenerare din municipiul Buzău și bazei de date culese de la operatorul economic. Comparăția între randamentele globale obținute în model și randamentele globale rezultate în urma măsurărilor și contorizărilor în teren a condus la o analiză grafică, la obținerea ecuațiilor de variație a randamentelor și la o serie de concluzii importante, prezentate în cadrul articolului [42]. O analiză a comportării randamentului global în condițiile variației parametrilor instalației de răcire cu absorbție a fost desfășurată în cadrul articolului [43]. **S-a observat că, în general, caracteristica randamentului global din model urmărește traseul caracteristicii randamentului global din teren dar cu variație uniformizată și valori mai mari cu $4,34 \div 5,40\%$.** A rezultat din analiza valorilor de randament global și de energie termică livrată consumatorului un comportament mai puțin eficient pe perioada lunilor de vară față de perioada de iarnă. Acest fapt reprezintă un argument puternic în favoarea implementării tehnologiei de trigenerare.

Modelul numeric construit pentru analiza randamentelor sistemului de cogenerare reprezintă o metodă preferabilă utilizării unor valori aproximative sau a unor valori estimate. Modelul matematic va fi extins, îmbunătățit și calibrat pe un sistem de trigenerare, în capitolele următoare, după care se vor analiza în final posibilitățile de optimizare pentru 4 tipuri diverse de clădiri consumatoare din București.

4 ANALIZA FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE

4.1 CONSUMATOR REZIDENȚIAL

Blocul de locuințe analizat este situat în str. Cernăuți nr. 50, bl. D8, sc. 1, Sect. 2, București. Blocul de locuințe este o clădire cu regim de înălțime S+P+4E, având forma regulată în plan, alcătuit dintr-un singur tronson de scară, separat prin rost seismic de scara învecinată. Tronsonul de scară are lungimea de 27,00 m și lățimea de 16,00 m. Blocul de locuințe are un număr de 19 de apartamente, acestea fiind considerate apartamente mediu convenționale (a.p.m.c.), în suprafață de 60 m^2 și cu număr de 2,8 persoane per apartament.

I. PROFILURI ENERGETICE LA CONSUMATOR

Pentru consumatorul de tip rezidențial au fost identificate profilurile de consum (termic și electric) orar zilnic pentru ziua medie a fiecărei luni pe utilități:

- 1) profil de consum a.c.m. termic – reprezintă consumul de energie termică orară pentru încălzirea apei menajere;
- 2) profil de consum a.c.m. electric – reprezintă consumul de energie electrică orară necesară pompelor de circulație din instalația de distribuție a a.c.m.;
- 3) profil de consum încălzire termic – reprezintă consumul de energie termică orară pentru încălzirea spațiilor;
- 4) profil de consum încălzire electric – reprezintă consumul de energie electrică orară necesară pompelor de circulație din instalația de încălzire;
- 5) profil de consum electric pentru iluminat și electrocasnice;
- 6) profil de consum termic pentru climatizare, pentru răcirea spațiilor consumatorului de tip rezidențial;
- 7) profil de consum electric climatizare – reprezintă consumul de energie electrică orară pentru vehicularea aerului din sistemul de climatizare;
- 8) profil de consum termic de ventilare pentru încălzirea aerului din sistemul de ventilare, iarna;
- 9) profil de consum termic de ventilare pentru răcirea aerului din sistemul de ventilare, vara;
- 10) profil de consum electric de ventilare – reprezintă consumul de energie electrică orară pentru vehicularea aerului din sistemul de ventilare;

Fiecare profil de consum pentru consumatorul de tip rezidențial implică la rândul său una, două sau trei categorii de energii consumate: energie electrică, energie termică pentru încălzire, energie termică pentru răcire (frig), furnizate de către sistemul de trigenerare consumatorului, Fig. 4.1. Eticheta albastră indică tipul profilurilor elaborate în fiecare etapă.

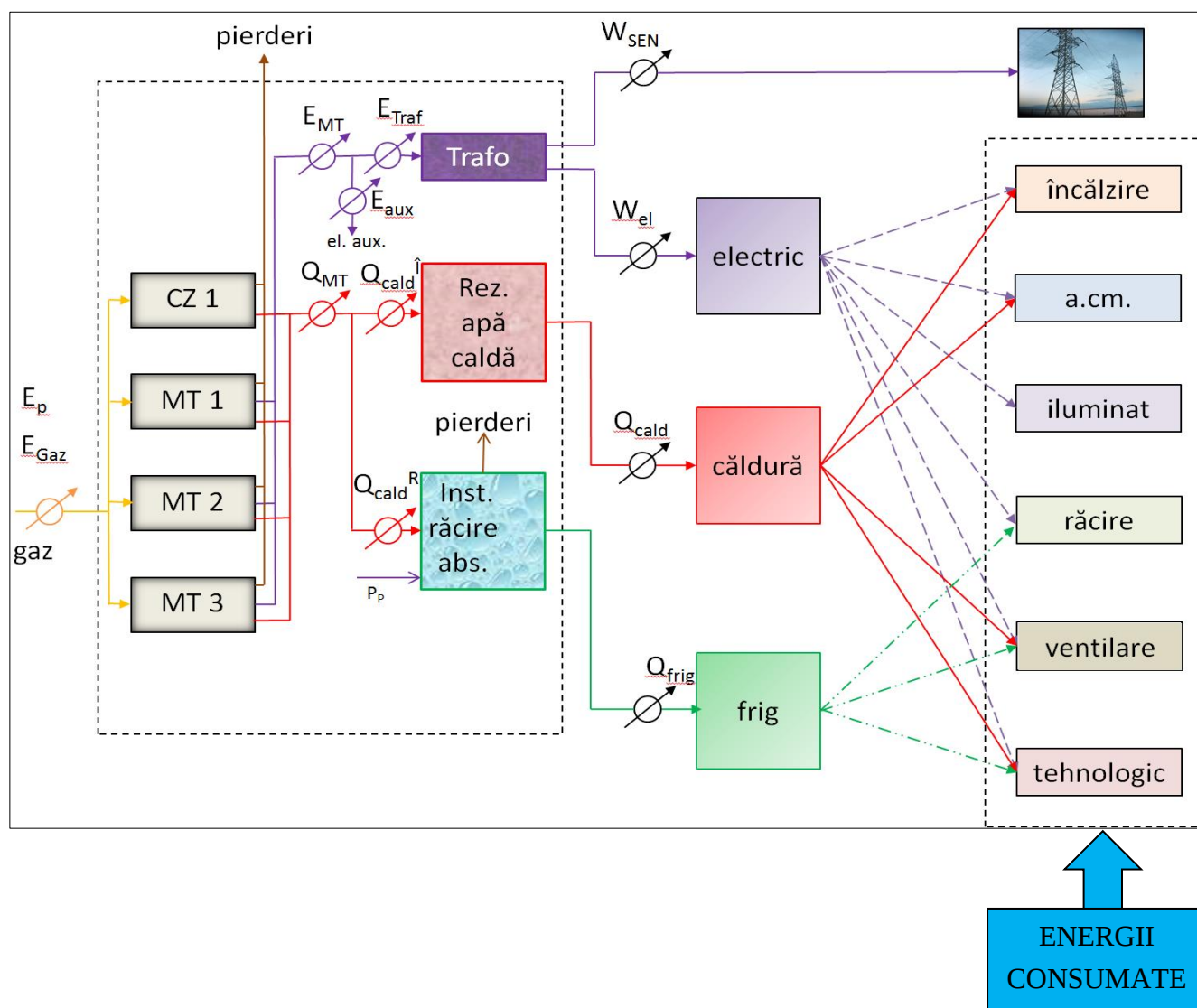


Fig. 4.1. Schema sistemului de trigenerare, evidențiere energii consumate

II. PROFILURI DE ENERGII FURNIZATE CONSUMATORULUI

Sistemul de trigenerare va produce și va transfera consumatorului rezidențial 3 tipuri de energii: energie electrică, energie termică sub formă de căldură pentru încălzire și energie termică sub formă de frig pentru răcire. Cele trei profiluri ale energiilor furnizate au rezultat din însumarea consumurilor orare calculate și prezentate în subcapitolul precedent. Au fost construite:

- 1) Profil orar de energie furnizată sub formă de căldură;
- 2) Profil orar de energie furnizată sub formă de frig;
- 3) Profil orar de energie electrică furnizată .

Schema din Fig. 4.2 evidențiază energiile furnizate de centrala de producție către consumator. Eticheta albastră indică tipul profilurilor elaborate în fiecare etapă.

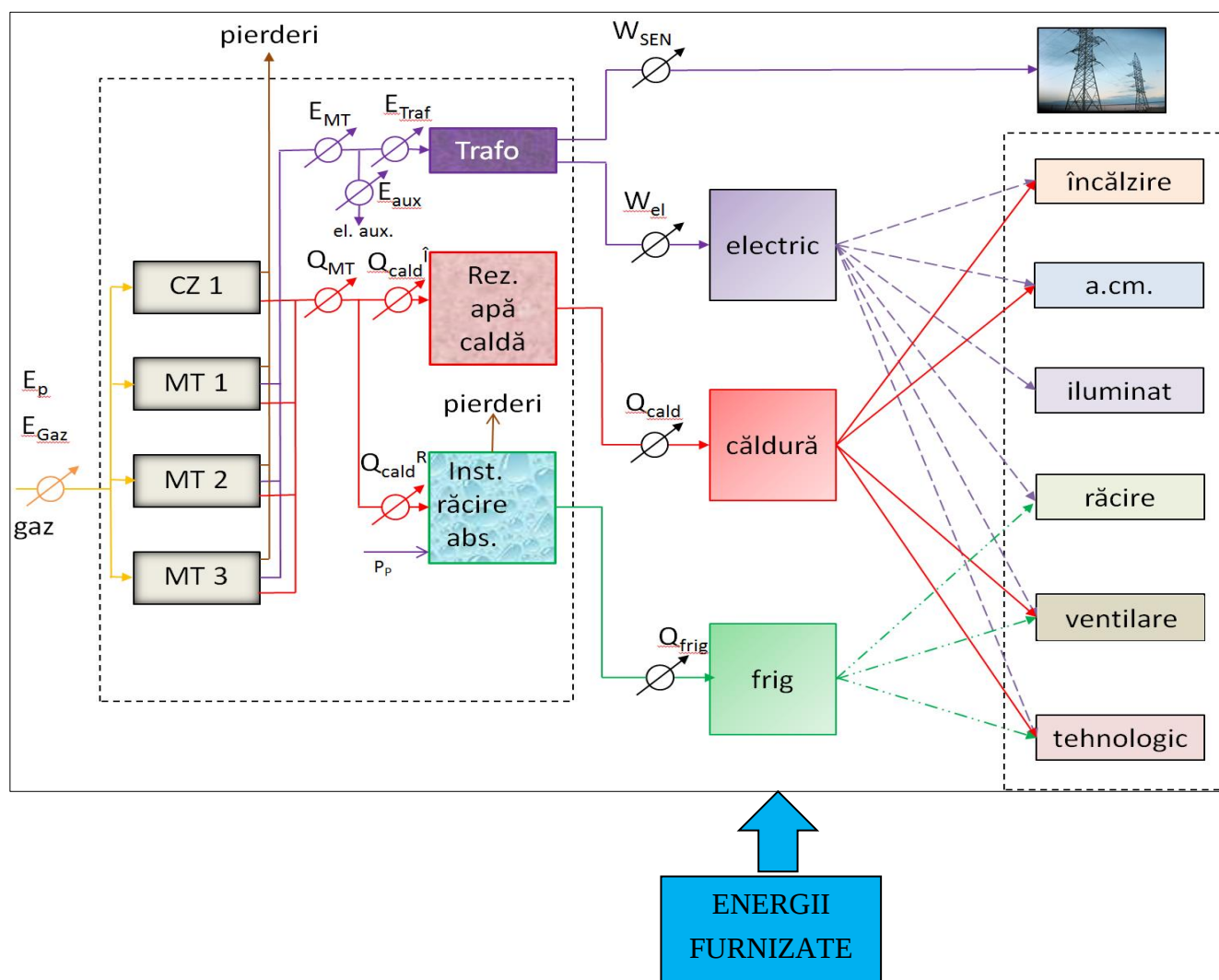


Fig. 4.2. Schema sistemului de trigenerare, evidențiere energii furnizate

III. PROFILURI ENERGETICE PRODUSE ÎN REGIM DE COGENERARE

Sursa de bază a sistemului de trigenerare - motoarele termice - va produce și va transfera consumatorului rezidențial 2 tipuri de energii produse în regim de cogenerare: energie electrică și căldură.

Căldura produsă de către motoarele termice, Q_{MT} , se divide pe timpul perioadei de răcire - vara - în căldura necesară producerii frigului pentru climatizare, Q_{Chill} , în instalația cu absorbție - chiller - și căldura acumulată în rezervorul de apă caldă, Q_{Rez} , necesară preparării apei calde de consum. Pe timpul perioadei de încălzire - iarna - căldura produsă de către motoarele termice, Q_{MT} , se distribuie către rezervorul de agent termic - apa caldă - sub formă de căldură acumulată, Q_{Rez} , la o temperatură de 95 °C, necesară atât încălzirii spațiilor cât și preparării apei calde de consum.

Energia electrică produsă de către generatoarele electrice, E_{MT} , ale motoarelor termice are două componente energia electrică auxiliară, E_{aux} , și energia electrică care se transformă în transformatorul de tensiune electrică, E_{Traf} . Energia electrică auxiliară reprezintă consumul intern propriu al sistemului de trigenerare pentru funcționarea pompelor, ventilatoarelor, electrovanelor, echipamentelor electrice de automatizare, etc. Energia electrică a transformatorului iese din conturul sistemului de producție și este

transportată către consumatorul bloc de locuințe, W_{el} , iar surplusul produs, W_{SEN} , este livrat către rețeaua electrică a Sistemului Energetic Național (SEN), în funcție de raportul în care se află producția și necesarul cerut de consumator. Schema din Fig. 4.3 evidențiază energiile produse în regim de cogenerare Q_{MT} și E_{MT} din conturul centralei de producție. Quantumul energiilor orare produse în regim de cogenerare se va afla prin continuarea sensului de calcul “de jos în sus”. Dimensionarea sistemului a urmărit necesarul termic al consumatorului. Necesarul termic la motoare va rezulta din însumarea căldurii necesară chillerului cu căldura necesară rezervorului de acumulare apă caldă. În funcție de capacitățile termice ale motoarelor cu ardere internă selectate conform nevoii termice a consumatorului și conform specificațiilor fișei tehnice a producătorului va rezulta ca o consecință producția de energie electrică a centralei de trigenerare. Ulterior, printr-un calcul invers (dinspre producător către consumator) se va stabili energia electrică în surplus ce va fi livrată în SEN, W_{SEN} .

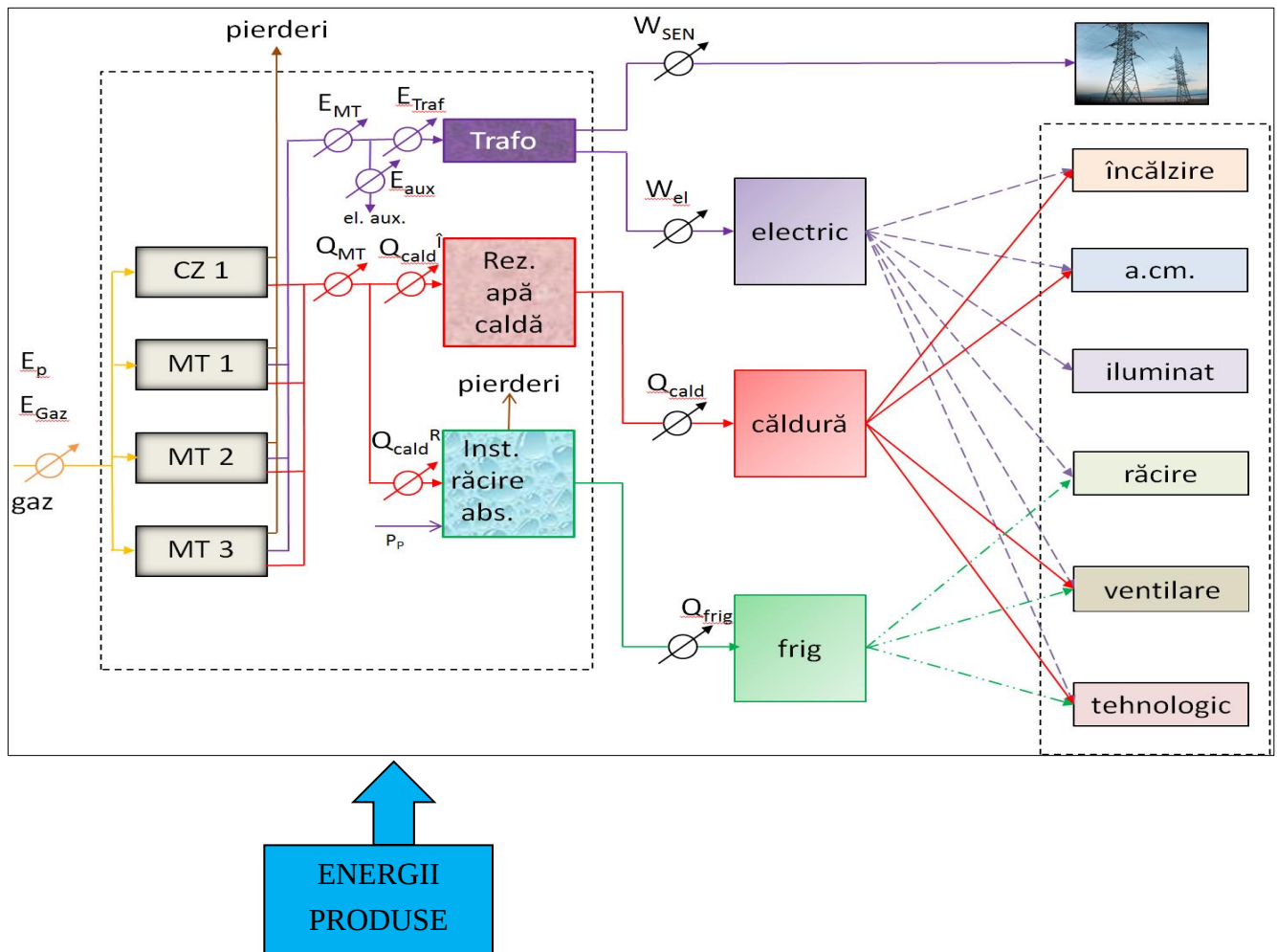


Fig. 4.3. Schema sistemului de trigenerare, evidențiere energii producție

Au fost construite:

- 1) Profil de energie orară produsă în regim de cogenerare pentru chiller cu absorbție;
- 2) Profil de energie orară produsă în regim de cogenerare pentru rezervorul de apă caldă;
- 3) Profil de energie orară totală termică produsă în regim de cogenerare, Fig. 4.4.



Fig. 4.4. Profiluri orare de energie termică totală produse în regim de cogenerare, rezidențial

În urma calculării valorilor de energie termică totală ce este nevoie a fi produsă în regim de cogenerare (căldură) pentru consumatorul de tip rezidențial și a dimensionării sistemului în funcție de necesarul termic pe baza coeficientului de cogenerare orar recomandat, $\alpha_{\text{cog}}=0,5$ [3], s-au ales două motoare termice MAN E2676 E, cu putere nominală termică de 86 kW și putere nominală electrică de 140 kW. Sistemul operează în modul 3 de operare **simultan**, la aceeași sarcină fără intervenția cazanului, conform [40]. În baza modelului matematic construit în lucrarea [40], aplicat sistemului de trigenerare destinat consumatorului de tip rezidențial și cu ajutorul datelor din fișa tehnică a motorului se calculează energia electrică totală orară produsă de cele două motoare termice, E_{MT} .

Analiză și concluzii

Diferențele procentuale de randament global la funcționarea între aceste încărcări parțiale se situează în jurul a **8 procente**. În cazul de față, cererea de agent termic pe anumite intervale orare **impune oprirea motoarelor** pentru a nu funcționa sub capacitatea recomandată. Pe aceste intervale orare va funcționa doar a cazanului termic. Pe intervalele orare în care va funcționa numai cazanul termic, nu se va produce energie electrică și nu putem vorbi de cogenerare. Funcționarea sistemului va fi similară funcționării unui sistem clasic de producere separată, randamentul va fi doar randamentul termic al cazanului și nu putem pune problema unui randament global așa cum este definit în cap. 2.2.1 al tezei - *INDICI SPECIFICI*, neexistând un randament electric. Valorile randamentului global ale sistemului de trigenerare configurat pentru consumatorul rezidențial, având sursă de bază două motoare termice MAN E2676 E de câte 86 kW termici sunt cuprinse între un minim de 52,50 % și un maxim de 72,20 %. Randamente globale maxime, mai mari de 75 %, se obțin în lunile de vară la orele amiezii, când sarcina de frig pentru climatizare este mare spre maximă. Se observă că randamentul global al sistemului de trigenerare crește atunci când sarcina solicitată de consumator este mai mare.

Pentru construirea profilurilor de energie electrică furnizate rețelei S.E.N. s-a procesat un calcul invers dinspre motoarele sistemului de producție către consumator. A rezultat din calcule energia electrică auxiliară în ipoteza că energie electrică consumată în interiorul sistemului (hala de producție) la pompele care vehiculează agentul termic spre Rezervorul de apă caldă și spre chiller, E_{aux} , este egală cu suma energiilor electrice calculate la profilurile de la consumator pentru pompele de circulație ale sistemului de încălzire, pompele sistemului de preparare a.c.m. și a pompelor chillerului, pe perioada când acesta funcționează. Profilurile energetice orare pentru energia electrică transformată în Transformator, E_{Traf} , s-a obținut prin scăderea energiei electrice auxiliare, E_{aux} , din energia electrică totală orară produsă de cele două motoare termice, E_{MT} . Energia electrică orară produsă de generatoarele electrice ale celor două motoare termice MAN E2676 E de câte 140 kW electrice din sistemului de trigenerare configurat pentru consumatorul rezidențial, după ce se scade consumul auxiliar (intern) al centralei de producție, rezultă mai mare decât necesarul orar de energie electrică solicitat de blocul de locuințe, respectiv decât W_{el} , calculat la capitolul 4.1.3.3 din teză - Profil orar de energie electrică furnizată. Prin urmare, surplusul producției va fi livrat în Sistemului Energetic Național și vor rezulta

din calcule profilurile energetice orare ale zilei medii lunare, pentru energia electrică furnizată Sistemului Energetic Național.

IV. PROFILURI DE ENERGIE PRIMARĂ

Energia combustibilului

Motorul termic cu combustie internă MAN E2676 E este alimentat cu gaz natural. Pentru București gazul natural provenit din zăcămintele bazinului județului Prahova are puterea calorifică inferioară: $PC_i = 9,1667 \text{ kWh/Nm}^3$. Alcătuirea profilului orar energetic al combustibilului – gaz metan – consumat de sistemul de trigenerare a fost construit prin adaptarea ecuației variației randamentului global modelat ecuația 3.12 stabilită în cap. 3.2.2, la sistemul format din două motoare termice. Cu relația de calcul a variabilei sarcină parțială de funcționare s-a calculat randamentul global al sistemului de trigenerare și a rezultat apoi energia orară a combustibilului consumat. În modelul matematic s-a observat că perioadele de activare a cazanului termic corespund în modul de operare cu perioade de oprire a ambelor motoare termice, corespunzând unor sarcini termice cerute de consumator foarte mici (sub 40 de kW termici ceea ce reprezintă mai puțin de 50 % din sarcina nominală termică a unui motor, $40 \text{ kW} < 0,5 \cdot 86 \text{ kW}$).

Energia primară

Calculul energiei primare consumată de sistemul de trigenerare se face prin multiplicarea energiei combustibilului cu factorul de conversie în energie primară, conform Mc 001, [34]. Pentru sistemului de trigenerare cu două motoare termice MAN E2676 E, configurat pentru consumatorul rezidențial, în Fig. 4.5 sunt reprezentate profilurile energetice orare ale zilei medii lunare, pentru energiile produse în regim de cogenerare: termică Q_{MT} și electrică E_{MT} , pentru pierderile de energie P și pentru energia primară E_p .

Concluzii

Pe baza profilurilor energetice de consum, furnizate și produse a fost analizată funcționarea tehnologiei de trigenerare cu motoare termice ca sursă de bază și instalație frigorifică cu absorbție pe un consumator de mici dimensiuni, de tip rezidențial, prin alegerea unui tip de motor de mică capacitate, cu o putere nominală termică de 86 kW și o putere nominală electrică de 140 kW. Funcționarea a fost simulată în modul simultan la aceeași sarcină, fără intervenția cazanului. Randamentul global orar al sistemului atinge valori care tind spre un maxim de 78,55 %, net superior producerii separate a energiilor prin metoda clasică, 58 % [2]. Randamentul global orar minim obținut în simulare este mic, 52,50 %, sub randamentul soluției clasice. Media randamentului global orar, pentru orele în care a funcționat cel puțin unul dintre motoarele termice, este 62,86 %. Orele de funcționare la capacitate redusă, pe timpul nopții în lunile mai, iunie, iulie, august și septembrie, precum și orele din mijlocul zilei în lunile de tranziție: aprilie și octombrie determină oprirea motoarelor termice și funcționarea doar a cazanului termic. Cazanul termic nu produce energie electrică și prin urmare nu au fost considerate valorile de randament pe aceste intervale orare, nefiind vorba de co/trigenerare; pe aceste intervale orare analiza ar deveni doar despre randamentul unei surse clasice (cazan termic). Pe parcursul funcționării, cererea consumatorului a impus perioade în care a operat doar unul dintre cele două motoare.

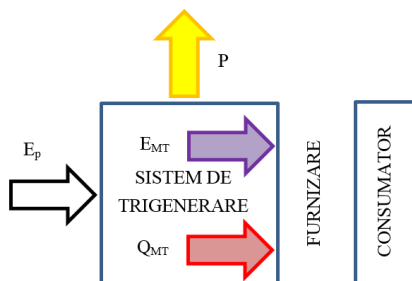
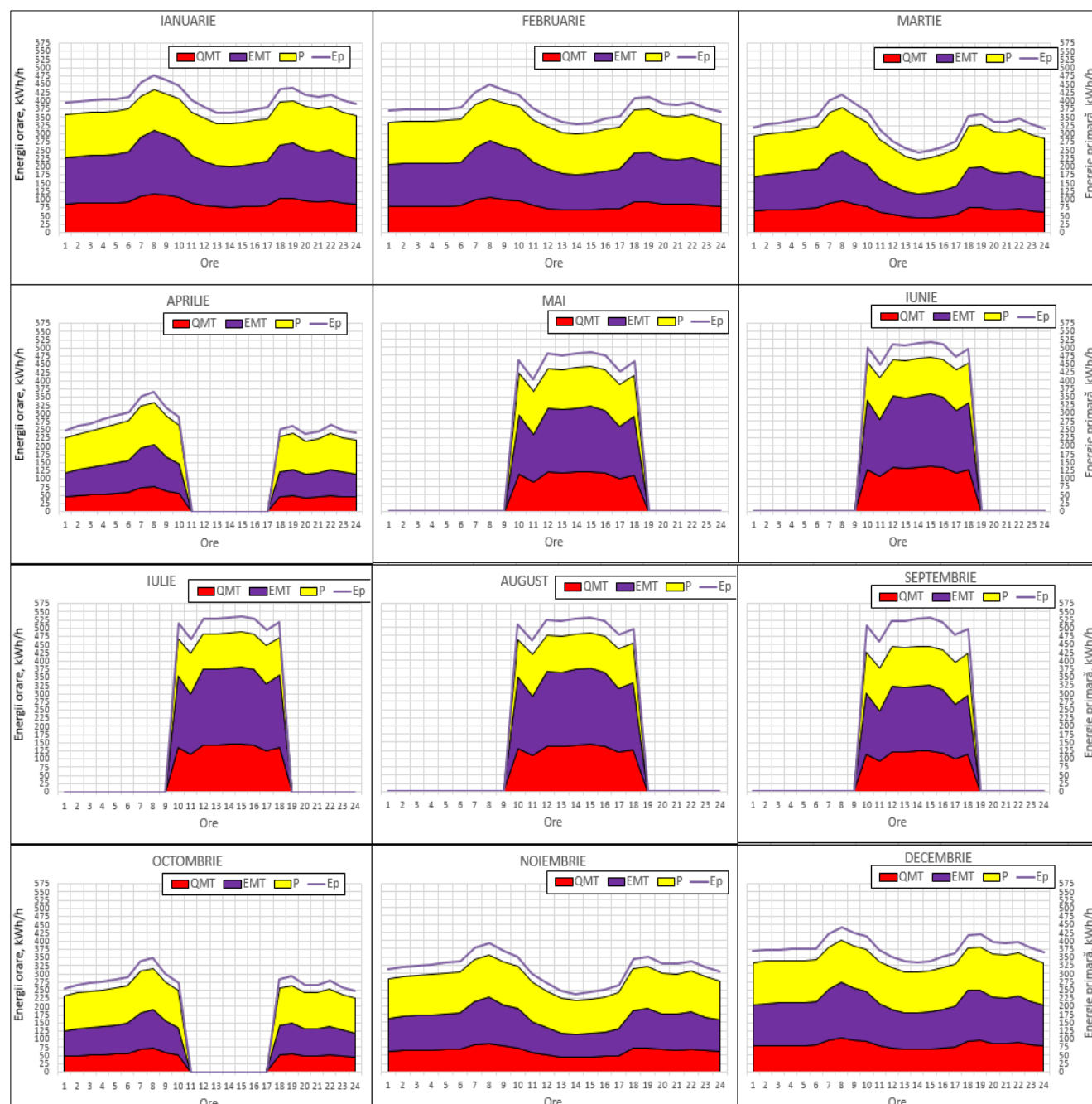


Fig. 4.5. Profiluri orare energii produse în regim de cogenerare, pierderi și energie primară

5 ANALIZA ADAPTABILITĂȚII SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU MOTOARE TERMICE LA DIFERIȚI CONSUMATORI

5.1 DESCRIEREA CONSUMATORILOR

În scopul îndeplinirii obiectivelor fixate și urmărite în teză s-a continuat construirea altor 3 tipuri de profiluri energetice pentru consumatori complet diferiți față de cel rezidențial. Diferențele au constat nu doar în dimensiuni diferite ale clădirii consumatoare ci și în domenii de activitate diferite desfășurate cu debite specifice diferite, număr diferit de ocupanți, regimuri de temperaturi diferite. Varietatea tipologiei consumatorilor analizați va conduce la aprecierea adaptabilității tehnologiei de trigenerare cu motoare termice și la demonstrarea flexibilității acesteia. Au fost analizați în capitolul 5, alături de consumatorul rezidențial:

- consumator birouri;
- consumator spital;
- consumator comercial.

Consumatorul de tip birouri este o clădire administrativă de birouri din orașul Otopeni, str. Aurel Vlaicu, nr. 11. Clădirea are regim de înălțime P+2E și a fost construită în anul 2007.

Din punct de vedere constructiv clădirea se caracterizează prin:

- destinația clădirii: birouri;
- regim de înălțime: P+2E;
- volumul total al clădirii: 38403 m³;
- aria utilă: 4416,9 m²;
- zona climatică II –reprezentată prin temperatura exterioară de calcul $\theta_e = -15$ °C;
- zona eoliană II, caracterizată de viteza de calcul a vântului 0,20 m/s.

Consumatorul de tip spital este clădirea Spitalului Clinic Județean de Urgență Craiova - Corp C2, din Strada Tabaci nr. 1, Craiova, județul Dolj, imobil aflat în proprietatea Consiliului Județean Dolj.

Din punct de vedere al tipologiei clădirilor civile, clădirea expertizată se caracterizează prin:

- zona teritorial – urbană;
- conformarea și amplasarea pe lot - clădire independentă, fără clădiri alipite la calcan;
- regim înălțime-mediu: S+P+4E;
- zona climatică II –reprezentată prin temperatura exterioară de calcul $\theta_e = -15$ °C;
- zona eoliană II (prin ipoteză teoretică) , caracterizată de viteza de calcul a vântului 0,20 m/s.

Pentru modelarea consumatorului de tip spital s-a creat ipoteza teoretică conform căreia clădirea reală fizic (dimensiuni, instalații, orientări geografice, ocupare și funcțiuni, număr de paturi/angajați, etc.) este

amplastă în municipiul București, adică zona eoliană II și nu în zona eoliană III (caracteristică orașului Craiova).

Consumatorul de tip spațiu comercial este imobilul Le Fontane din Str. Traian Popovici nr. 79-91, Sector 3, București, imobil având destinație mixtă (rezidențial, birouri și comercial). Clădirea este prevăzută la parter cu 7 spații comerciale, o zonă cu contoare și două zone pentru depozitarea bicicletelor, suprafața planșeului peste subsol fiind de 881,0 m². La parter, spațiile comerciale au înălțimea de 5,30 m + 0,90 m (format din tavan fals, placă și pardoseală superioară izolată fonic). Clădirea a fost construită în anul 2011.

5.2 PARTICULARITĂȚI ALE PROFILURILOR ENERGETICE LA CONSUMATORI REZIDENȚIAL, BIROURI, SPITAL, COMERCIAL

Pentru construirea profilurilor energetice de consum orar pentru cele 5 utilități la consumatorii de tip clădire de birouri, spital și spații comerciale s-a utilizat aceeași metodologie și s-a folosit același algoritm de calcul, cu aceleași ecuații ca pentru consumatorul de tip rezidențial, cu particularizările impuse de reglementările tehnice.

Tabel 5.1 prezintă principalii parametri ai profilului energetic orar pentru a.c.m. utilizați pentru fiecare tip de consumator.

Tabel 5.1. Parametri a.c.m. pe tipuri de consumatori

Consumator	N _p	q _c	t _{ac}	Δθ ac - ar
	(pers)	(l/zi,pers)	(h/h)	(K)
rezidențial	53	70	0,6	50
birouri	260	5	0,2	
spital	100	115	0,6	
	84	5	0,2	
comercial	134	10	0,2	

Tabel 5.2 prezintă principalii parametri de încălzire utilizați pentru fiecare tip de consumator.

Tabel 5.2. Parametri încălzire pe tipuri de consumatori

Consumator	θ _i	H	t _H	f _{Sch}	f _{Abgl}	b	C _{p1}	C _{p2}
	(K)	(W/K)	(h/h)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
rezidențial	20	2637,12	1	1	1	2	0,9	0,1
birouri	20	2994,68				2		
spital	22	1666,35				2		
comercial	18	2222,70				1		

În Fig. 5.1 sunt prezentate comparativ, pe luna ianuarie, consumurile termice pentru încălzire ale celor 4 categorii de consumatori studiați.

Tabel 5.3 prezintă principalii parametri electrici calculați și utilizați pentru fiecare tip de consumator.

Tabel 5.3. Parametri electrici pe tipuri de consumatori

Consumator	P_{sp}	S_u	k_u	P_i	P_a	t_u
	(kW)	(m ²)	(-)	(kW)	(kW)	(h)
rezidențial					107,25	
birouri	0,160	1812,30	0,90	289,968	260,971	2047,5
spital		2253,80	0,66	206,880	136,541	4700
comercial	0,0875	881,00	0,80	77,087	61,670	4230

În Fig. 5.2 sunt prezentate comparativ, pe luna iulie, consumurile de electricitate pentru iluminat și prize (electrocasnice, echipamente după caz) ale celor 4 categorii de consumatori studiați.

Tabel 5.4 prezintă principalii parametri de climatizare utilizați pentru fiecare tip de consumator.

Tabel 5.4. Parametri climatizare pe tipuri de consumatori

Consumator	H_T	H_v	θ_i	θ_e	θ_{intr}	P_{sp}	n	N_h
	(W/K)	(W/K)	(K)	(K)	(K)	(W/m ³ ,h)	(h ⁻¹)	(h)
rezidențial	1984,55	652,57	25,5	variabilă	23,5	0,42	5	0,3÷0,6
birouri	2844,42	1139,94	26		24	0,56	6	
spital	1064,12	10794,9	25,5		23,5	0,56	8	
comercial	851,82	4728,38	25		23	0,35	7	

Tabel 5.5 prezintă principalii parametri de ventilare utilizați pentru fiecare tip de consumator.

Tabel 5.5. Parametri ventilare pe tipuri de consumatori

Consumator	θ_{intr}		θ_e	CAI	G_p	G_s	τ	η_{vent}
	(K)		(K)	(-)	(m ³ /h,pers)	(m ³ /h,m ²)	(h/h)	(-)
rezidențial	răcire	24	variabilă	2	25	2,52	0,4	0,7
	încălzire	22						
birouri	răcire	24		2	25	2,52	0,4	
	încălzire	22						
spital	răcire	23,5		1	36	1,8	0,4	
	încălzire	24						
comercial	răcire	23		2	25	2,52	0,5	
	încălzire	20						

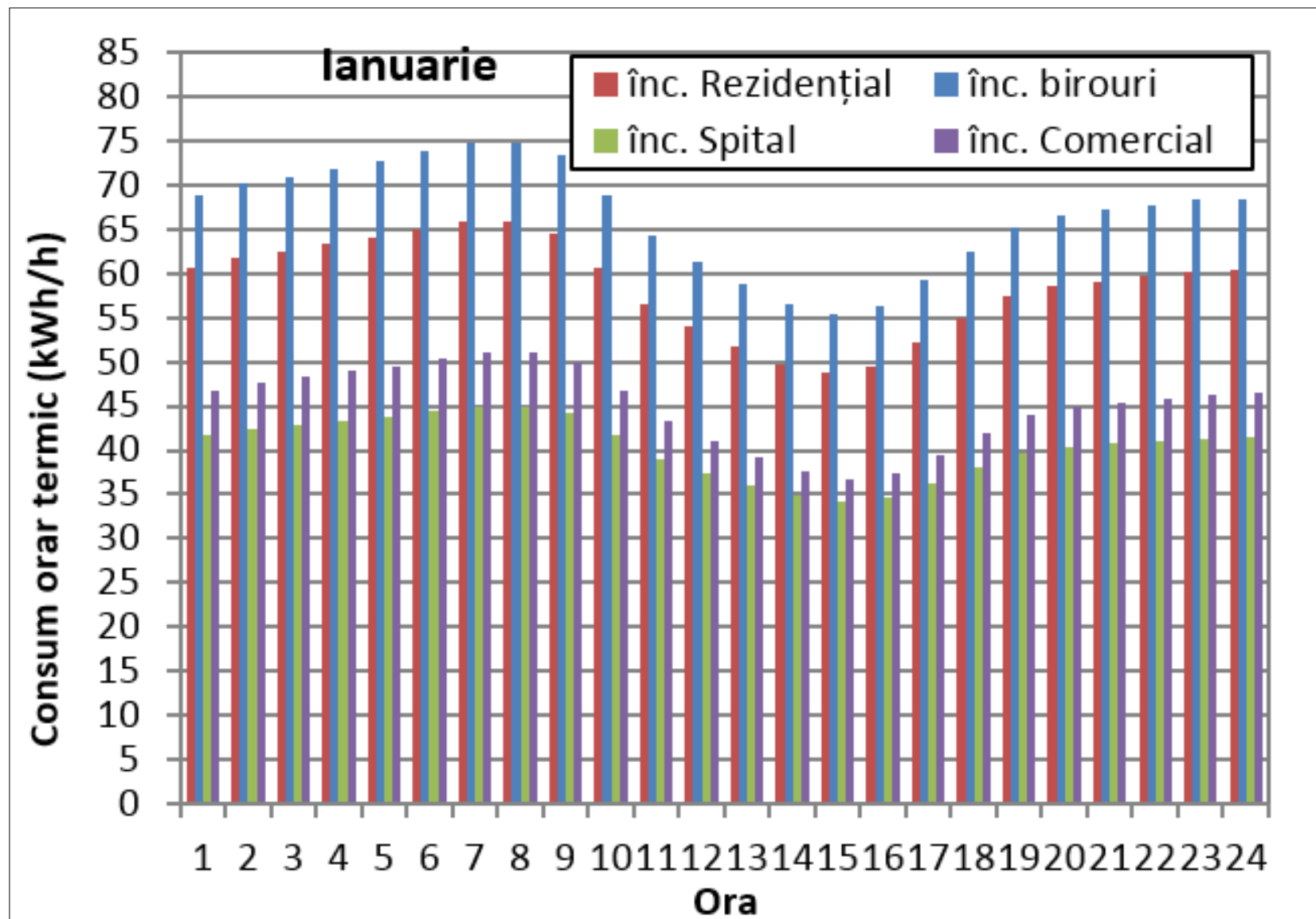


Fig. 5.1. Consum comparativ energie termică pentru încălzire

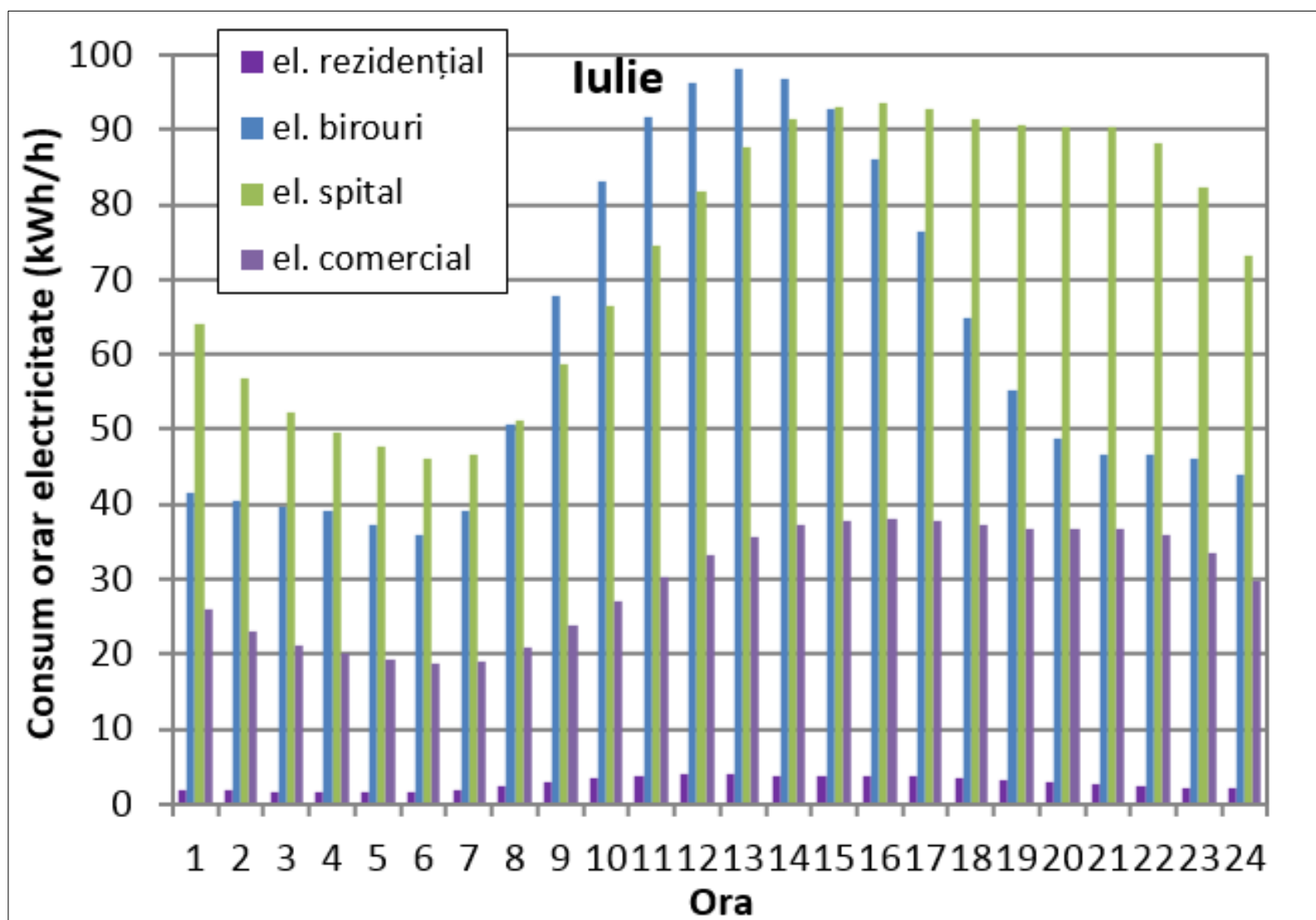


Fig. 5.2. Consum comparativ de electricitate (iluminat+prize)

5.3 PROFILURI DE ENERGII FURNIZATE DIVERȘILOR CONSUMATORI

PROFIL DE ENERGIE ORARĂ FURNIZATĂ SUB FORMĂ DE CĂLDURĂ

Prin însumarea cosumului orar de energie termică sub formă de căldură pentru prepararea a.c.m., pentru încălzirea spațiilor și pentru ventilarea prin încălzirea aerului, au fost realizate profilurile orare, medii lunare, ale energiei furnizate sub formă de căldură, Q_{cald} , pentru consumatorii birou, spital și comercial. În **Tabel 5.6** sunt prezentate valorile maxime ale consumurilor orare pe fiecare utilitate consumatoare de energie sub formă de căldură și valorile maxime orare ale energiei furnizate sub formă de căldură, în kWh/h, pentru fiecare tip de consumator. Fig. 5.3 prezintă comparativ consumurile orare de energie pentru utilitățile ce folosesc energie sub formă de căldură.

Tabel 5.6. Tabel comparativ consumuri maxime de căldură pe utilități și căldură furnizată

Consumator	$Q_{acm,ora}$	$Q_{inc,ora}$	$Q_{vent,inc,ora}$	Q_{cald}
	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)
rezidențial	24,683	65,928	25,172	115,783
birouri	17,265	74,867	100,418	192,550
spital	112,020	44,991	71,742	228,753
comercial	10,531	51,122	46,798	108,450

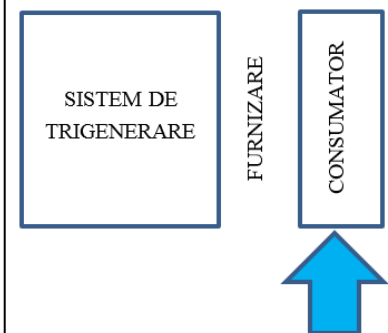
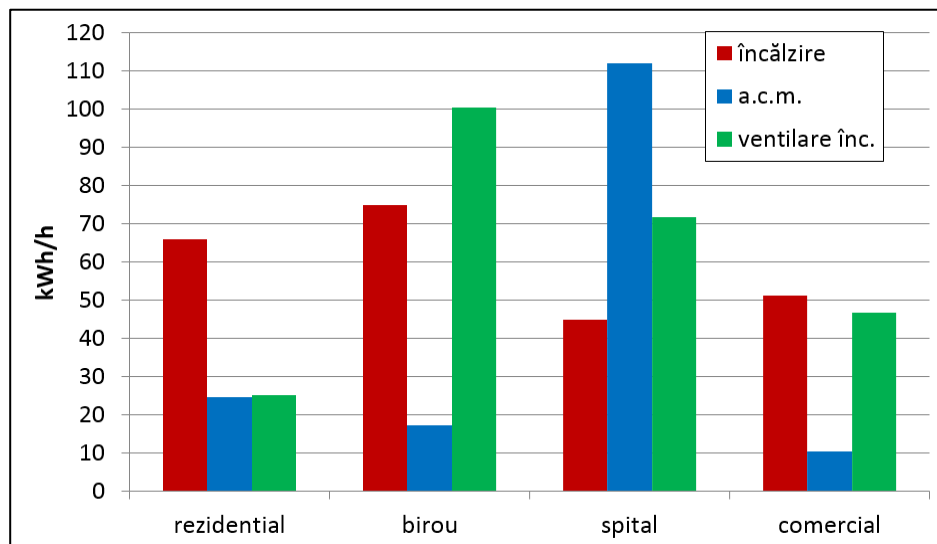


Fig. 5.3. Comparație consumuri orare maxime de căldură pe utilități

PROFIL DE ENERGIE ORARĂ FURNIZATĂ SUB FORMĂ DE FRIG

Prin însumarea cosumului orar de energie termică sub formă de frig pentru climatizarea spațiilor și pentru ventilarea prin răcirea aerului, au fost realizate profilurile orare, medii lunare, ale energiei furnizate sub formă de frig, Q_{frig} , pentru consumatorii birou, spital și comercial. În **Tabel 5.7** sunt

prezentate valorile maxime ale consumurilor orare pe fiecare utilitate consumatoare de energie sub formă de frig și valorile maxime orare ale energiei furnizate sub formă de frig, în kWh/h, pentru fiecare tip de consumator. Fig. 5.4 prezintă comparativ frigul furnizat orar, pe tipuri de consumatori.

Tabel 5.7. Tabel comparativ consumuri maxime de frig pe utilități și frig furnizat

Consumator	$Q_{\text{clim,oră}}$	$Q_{\text{vent,rac,oră}}$	Q_{frig}
	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)
rezidențial	81,055	3,776	84,831
birouri	361,586	15,065	376,651
spital	268,945	11,257	280,202
comercial	352,355	9,454	361,809

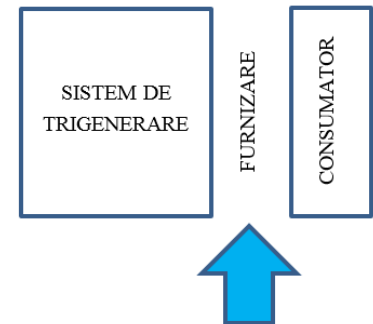
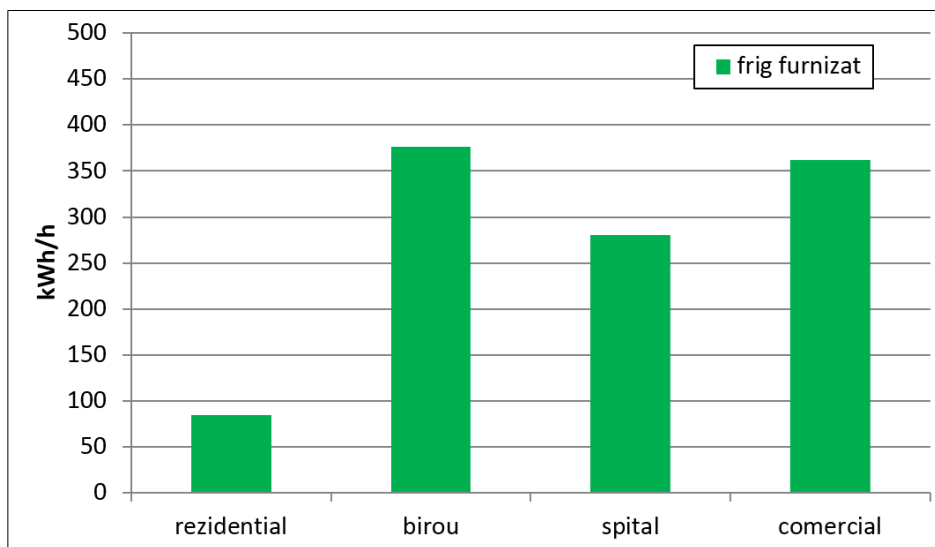


Fig. 5.4. Comparație frig maxim furnizat orar

PROFIL DE ENERGIE ORARĂ ELECTRICĂ FURNIZATĂ

Prin însumarea cosumului orar de energie electrică pentru sistemul de preparare a.c.m., pentru încălzire, iluminat și electrocasnice, climatizarea spațiilor și ventilare, au fost realizate profilurile orare, medii lunare, ale energiei electrice furnizate, W_{el} , pentru consumatorii birou, spital și comercial. În **Tabel 5.8** sunt prezentate valorile maxime ale consumurilor orare pe fiecare utilitate consumatoare de energie electrică și valorile maxime orare ale energiei electrice furnizate, în kWh/h, pentru fiecare tip de consumator. Fig. 5.5 prezintă comparativ consumurile orare de energie pentru utilitățile ce folosesc energie electrică.

Tabel 5.8. Tabel comparativ consumuri maxime electrice pe utilități și electric furnizat

Consumator	$W_{\text{inc,oră}}$	$W_{\text{acm,oră}}$	$W_{\text{il,oră}}$	$W_{\text{clim,oră}}$	$W_{\text{vent,oră}}$	W_{el}
	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)
rezidențial	0,212	10,846	3,972	2,022	1,013	18,019
birouri	0,238	1,892	98,096	13,519	4,040	117,786

spital	0,105	53,782	95,570	10,793	2,687	162,937
comercial	0,129	1,315	38,818	2,955	2,542	45,759

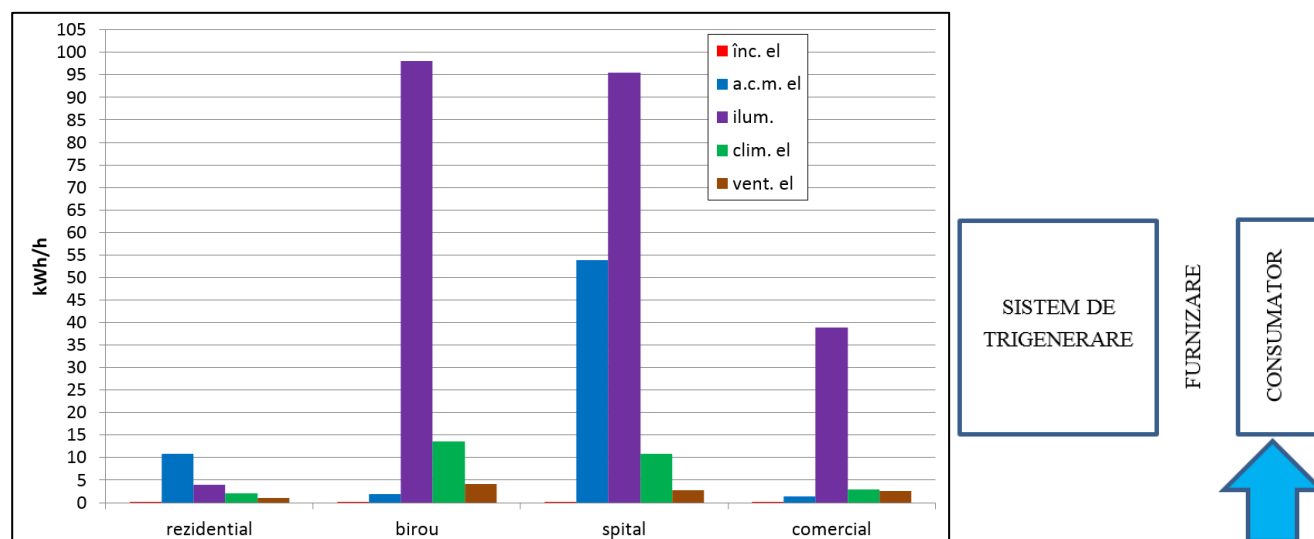


Fig. 5.5. Comparație consumuri orare maxime de electricitate pe utilități

5.4 PROFILURI DE ENERGII PRODUSE ÎN REGIM DE COGENERARE

PROFIL DE ENERGIE ORARĂ PRODUSĂ ÎN REGIM DE COGENERARE PENTRU CHILLER CU ABSORBȚIE ȘI REZERVORUL DE APĂ CALDĂ

Au fost calculate și realizate profilurile orare, medii lunare, ale energiei orare sub formă de căldură, Q_{cald}^R , ce trebuie produsă pentru alimentarea fierbătorului chillerului cu absorbție în cazul consumatorilor birou, spital și comercial. Au fost calculate și realizate profilurile orare, medii lunare, ale energiei orare sub formă de căldură, Q_{cald}^I , ce trebuie produsă pentru alimentarea rezervorului de apă caldă pentru consumatorii birou, spital și comercial. În **Tabel 5.9** sunt prezentate valorile maxime orare de energie sub formă de căldură necesare a fi produse pentru alimentarea chillerului și rezervorului de apă caldă ale consumatorilor și valorile maxime orare ale energiei termice produse în regim de cogenerare, în kWh/h, pentru fiecare tip de consumator. Fig. 5.6 prezintă comparativ căldura orară produsă în regim de cogenerare necesară chillerului și rezervorului de apă caldă ale fiecărui consumator.

Tabel 5.9. Tabel comparativ cu valori maxime de căldură necesare chillerului și rezervorului de apă caldă și căldură totală produsă în regim de cogenerare

Consumator	Q_{cald}^R	Q_{cald}^I	Q_{MT}
	(kWh/h)	(kWh/h)	(kWh/h)
rezidențial	114,767	118,146	232,913
birouri	530,965	187,932	718,897

spital	396,589	233,422	630,011
comercial	512,379	100,793	613,171

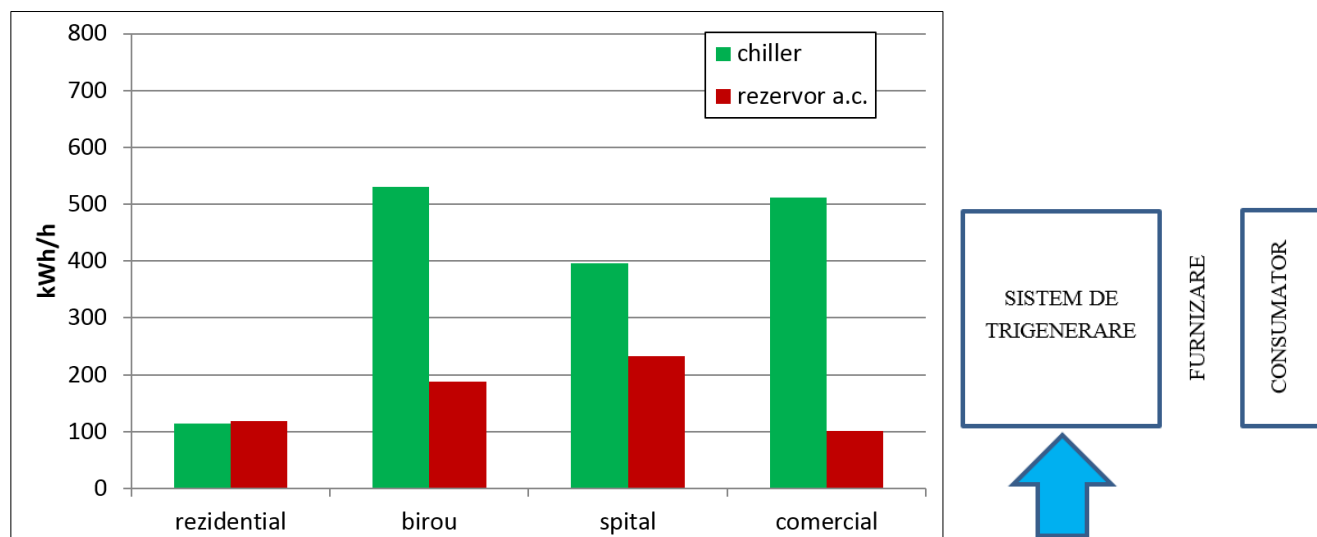


Fig. 5.6. Comparație căldură orară maximă produsă în regim de cogenerare, necesară rezervorului de apă caldă și chillerului

5.5 FUNCȚIONARE SISTEMULUI DE TRIGENERARE CU CAPACITĂȚI TERMICE DIFERITE ALE MOTOARELOR

În cap. 4.1.4.4 din teză, în urma calculării valorilor de energie termică totală produsă în regim de cogenerare pentru consumatorul de tip rezidențial, pe baza profilelor de consum orare pentru ziua medie a fiecărei luni, s-a dimensionat un sistem de trigenerare alcătuit din două motoare termice identice, MAN E2676 E, cu putere nominală termică de 86 kW și putere nominală electrică de 140 kW. În încercarea de a găsi capacitățile nominale termice optime în condițiile date au fost selectate pentru consumatorul de tip rezidențial alte 3 tipuri de motoare termice cu ardere internă și simulată funcționarea în același mod 3 de operare simultană:

- Motorul termic MAN E3262 E;
- Motorul termic MAN E2676 LE;
- Motorul termic MAN E0836 E.

Tabel 5.10 prezintă comparativ randamentele globale minime, maxime și medii pentru cele 4 tipuri de motoare cu capacități (sarcinile nominale) termice și electrice corespunzătoare.

Tabel 5.10. Tabel comparativ randamente globale minime, maxime, medii per capacități motor

Motor	$q_{th,nom}$	$q_{el,nom}$	$\eta_{gl,ora} \text{ min.}$	$\eta_{gl,ora} \text{ max.}$	$\eta_{gl,ora} \text{ med.}$
	(kW)	(kW)	(%)	(%)	(%)
MAN E2676 E	86	145	52,50	72,20	61,81
MAN E3262 E	157	275	52,53	58,33	55,02

MAN E2676 LE	121	220	52,63	63,33	57,41
MAN E0836 E	37	56	52,65	85,24	78,10

Concluzii

Se observă că în cazul sarcinii solicitată de consumatorul de tip rezidențial, sarcină puternic variabilă pe parcursul lunilor anului (luni considerate conform profilurilor energetice orare ale zilei medii a lunii), motorul cu eficiența cea mai bună este cel cu sarcina nominală termică cea mai mică. Explicația este că o sarcină termică nominală mică împarte mai eficient intervalul valorilor energetice solicitate, respectiv sarcina este cuprinsă de mai multe ori în intervalul energetic solicitat. Efectul este că motoarele prezintă mai multe intervale de funcționare la sarcini parțiale mari, conform modului de operare descris (modul simultan). Se deduce din calcule că în cazul unui sistem de trigenerare cu două motoare termice, pentru o energie orară maximă necesară a fi produsă de 120,8 kWh/h - în cazul consumatorului rezidențial, sarcina termică nominală optimă a unui motor trebuie să fie 30,2 kW, în condițiile unui coeficient de cogenerare $\alpha=0,5$.

5.6 OPTIMIZAREA FUNCȚIONĂRII SISTEMULUI DE TRIGENERARE PENTRU DIFERITE TIPURI DE CONSUMATORI

ALEGEREA SARCINII NOMINALE OPTIME ȘI A NUMĂRULUI OPTIM DE MOTOARE PENTRU 4 TIPURI DE CONSUMATORI

S-a pus problema găsirii numărului de motoare optim și a sarcinii nominale optime, în concordanță cu particularitățile profilurilor energetice ale fiecăruia dintre consumatori. Acest lucru s-a realizat cu solverul Excel din Data Analysis pentru fiecare tip de consumator și pentru fiecare din cele două ecuații de variație elaborate, liniară și exponențială.

Pașii de calcul au fost următorii:

1. fixarea funcției obiectiv;
2. stabilirea variabilelor dependente;
3. impunerea condițiilor la limită;
4. alegerea algoritmului de calcul;
5. obținerea datelor de ieșire;
6. interpretarea rezultatelor.

I. Metoda cu ecuație liniară

1. Fixarea funcției obiectiv

Un obiectiv comune de optimizare a funcționării sistemului de trigenerare este maximalizarea randamentului global al sistemului în condițiile unei sarcini termice variabile la consumator și în condițiile unui număr maxim prestabilit de motoare. Numărul maxim dat de motoare termice, evident de

capacitate nominală identică, este 10 buc. motoare. Funcția obiectiv o reprezintă maximalizarea valorilor de randament global descrise de ecuația 3.2 în cap. 3.2.2 și reluată în 5.2 :

$$f1 = \max\{\eta_{gl} | Q_{MT} = 120,7 \text{ kWh/h}\} \quad 5.1$$

$$\eta_{gl} = 0,4372 \cdot PL + 0,4152 \quad 5.2$$

$$PL = \frac{Q_{MT}}{n \cdot q_{th,nom}} \quad 5.3$$

2. Stabilirea variabilelor dependente

Variabilele dependente sunt:

- numărul de motoare, n ;
- sarcina termică nominală a motorului, $q_{th,nom}$;
- sarcina termică maximă cerută, Q_{MT} .

3. Impunerea condițiilor la limită

Condițiile la limită sau constrângerile sistemului sunt:

- numărul de motoare să fie număr întreg, $n \in \mathbb{Z}$;
- numărul de motoare să fie număr mai mic sau egal decât 10, $n \leq 10$;
- numărul de motoare multiplicat cu sarcina nominală termică să acopere sarcina termică maximă cerută, $n \cdot q_{th,nom} \geq Q_{MT}$;
- sarcina parțială de funcționare să fie de minim 50 %, $PL \geq 0,5$;
- sarcina nominală termică a unui motor să nu depășească sarcina termică maximă cerută (condiția de limită superioară s-a dovedit obligatorie), $q_{th,nom} \leq Q_{MT}$;
- sarcina termică maximă cerută să fie un număr pozitiv, $Q_{MT} \geq 0$;
- sarcina termică maximă cerută să fie cel mult egală cu valoarea maximă de energie termică orară determinată în profilul energiei produse în regim de cogenerare, $Q_{MT} \leq Q_{MT}^{profil}$.

4. Alegerea algoritmului de calcul

Algoritmul Simplex LP (Simplex Linear Programming) este un algoritm pentru programarea fenomenelor cu dependență liniară. Programarea liniară (denumită și optimizare liniară) este o metodă pentru a obține cel mai bun rezultat (cum ar fi randamentul maxim, costul minim, etc.) într-un model matematic ale cărui cerințe sunt reprezentate de ecuații liniare. Programarea liniară este un caz special al programării matematice, cunoscut și sub denumirea de optimizare matematică.

Algoritmul Simplex LP este o tehnică pentru optimizarea unei funcții obiective liniare, sub rezerva egalității liniare și a condițiilor la limită liniare de inegalitate. Algoritmul de programare liniară găsește un punct după mai multe iterații în care funcția are cea mai mică sau cea mai mare valoare, funcție de obiectivul ales, minimizare sau maximalizare.

5. Obținerea datelor de ieșire

După alegerea funcției obiectiv, stabilirea variabilelor de decizie, impunerea constrângerilor și alegerea algoritmului de calcul potrivit se bifează caseta de validare pentru ca toate variabilele de decizie

fără limită inferioară explicită să aibă limita inferioară zero. Solverul va rezolva maximalizarea ecuației liniare și va afișa rezultatele, Fig. 5.7 pentru consumator rezidențial în acest caz.

6. Interpretarea rezultatelor

În cazul în care nu au fost urmați pașii corecți de calcul, nu au fost impuse suficiente condiții la limită sau apare un conflict între operațiile executate, solverul va afișa un mesaj de eroare anunțând că a întâlnit o valoare eronată în celula obiectiv sau o într-o celulă de constrângere. Dacă procedura a fost corect îndeplinită se vor afișa:

- numărul optim de motoare, n ;
- valoarea sarcinii termice nominale optime a motorului, $q_{th,nom}$;
- sarcina termică maximă optimă a fi cerută, Q_{MT} ;
- valoarea randamentului global optim, η_{gl} .

Termic MAXIM	Termic MINIM	$PL_{TRI}^{2E} = \frac{Q_{MT}}{n \cdot q_{th,nom}}$	$\eta_{global}^{2E} = 0,4372 \cdot PL_{COG} + 0,4152$			
120,706	0,294					
TERMIC REVISED Q_{MT}	"n" număr de motoare (MAXIM 10)		x=	5		
kWh/h	"q _{th,nom} " sarcina termica nominala (kW)		y=	29,133		
86,293	"Q _{MT} " sarcina th maximă ceruta, PUTERNIC VARIABILA		a=	145,667		
88,078	obiectiv: maximizare randamentului trigenerarii " η_{global}^{NE} "		obiectiv MAX	85,24%		
88,983	nr motoare să fie nr intreg		constraint 1	5	equals	integer
89,539	nr maxim de motoare să fie 10 (se poate schimba)		constraint 2	5	<=	10
90,571	nr MT x sarcina nominală să acopere maximul cerut		constraint 3	145,667	>=	120,706
92,744	Partial Load sa fie >= 50%		constraint 4	1	>=	0,5
109,281	sarcina nominala a unui motor să nu fie peste maximul th cerut din profilurile de consum construite-SUPRADIMENSIONARE		constraint 5	29,133	<=	120,706
118,146	sarcina th maxima cerută să fie între un MAX și un MIN		constraint 6	145,667	>=	0,294
112,007	determinate in profilurile de consum (de productie - STRIGEN)		constraint 7	145,667	<=	120,706
105,748	Interpretarea Rezultatului Optimizării: Randamentul global optimal al trigenerării, de 85,24%, se obține pentru energia termică maximă orară cerută de 145,667 kWh/h (iulie, ora 15, consumator rezidențial) cu 5 motoare termice cu sarcina termică nominală (de capacitate) 29,133 kW Observație: La o dimensionare în funcție de „termic” rezultă ca o cerință obligatorie, ca valoarea capacității termice instalate (în echipamentele de cogenerare și surse de vârf) să fie cel puțin egală cu cererea maximă de căldură.					
89,056						
82,162						
77,023						
76,239						
77,407						
79,874						
81,905						
101,317						
102,994						
95,057						
92,823						
95,105						
89,396						
85,233						

Fig. 5.7. Optimizarea funcționării sistemului pentru consumator rezidențial, cu ecuația liniară

Rezidențial

Fig. 5.7 prezintă optimizarea funcționării sistemului pentru consumatorul de tip birouri cu ecuația liniară. Valoarea randamentului global optimal al sistemului de trigenerare pentru consumatorul de tip rezidențial, respectiv 85,24 %, s-ar obține pentru o valoare a energiei termice maxime orare cerută de

145,667 kWh/h (maximul real se înregistrează în iulie, ora 15, 120,706 kWh/h) cu 5 motoare termice cu sarcina termică nominală (de capacitate) 29,133 kW.

II. Metoda cu ecuație exponențială

1. Fixarea funcției obiectiv

Funcția obiectiv o reprezintă maximalizarea valorilor de randament global descrise de ecuația 3.3 și reluată în 5.5:

$$f2 = \max\{\eta_{gl} | Q_{MT} = 120,7 \text{ kWh/h}\} \quad 5.4$$

$$\eta_{gl} = 0,4926 \cdot e^{0,5498 \cdot PL} \quad 5.5$$

$$PL = \frac{Q_{MT}}{n \cdot q_{th,nom}} \quad 5.6$$

Numărul maxim dat de motoare termice, de capacitate nominală identică, este 10 buc. motoare. Sarcina termică variabilă cerută la consumator impune valori ale energiei termice orare conform profilurilor calculate în capitolele precedente.

2. Stabilirea variabilelor dependente

Variabilele dependente sunt:

- numărul de motoare, n ;
- sarcina termică nominală a motorului, $q_{th,nom}$;
- sarcina termică maximă cerută, Q_{MT} .

3. Impunerea condițiilor la limită

Condițiile la limită sau constrângerile sistemului sunt:

- numărul de motoare să fie număr întreg, $n \in \mathbb{Z}$;
- numărul de motoare să fie număr mai mic sau egal decât 10, $n \leq 10$;
- numărul de motoare multiplicat cu sarcina nominală termică să acopere sarcina termică maximă cerută, $n \cdot q_{th,nom} \geq Q_{MT}$;
- sarcina parțială de funcționare să fie de minim 50 %, $PL \geq 0,5$;
- sarcina nominală termică a unui motor să nu depășească sarcina termică maximă cerută (condiția de limită superioară s-a dovedit obligatorie), $q_{th,nom} \leq Q_{MT}$;
- sarcina termică maximă cerută să fie un număr pozitiv, $Q_{MT} \geq 0$;
- sarcina termică maximă cerută să fie cel mult egală cu valoarea maximă de energie termică orară determinată în profilul energiei produse în regim de cogenerare, $Q_{MT} \leq Q_{MT\text{profil}}$.

4. Alegerea algoritmului de calcul

Algoritmul GRG Neliniar înseamnă „Gradient redus generalizat”. În forma sa cea mai de bază, această metodă de rezolvare privește gradientul sau panta funcției obiective pe măsură ce valorile de intrare (sau variabilele de decizie) se schimbă și determină că a ajuns la o soluție optimă atunci când derivatele parțiale se anulează.

5. Obținerea datelor de ieșire

După alegerea funcției obiectiv, stabilirea variabilelor de decizie, impunerea constrângerilor și alegerea algoritmului de calcul potrivit se bifează caseta de validare pentru ca toate variabilele de decizie fără limită inferioară explicită să aibă limita inferioară zero. Solverul va rezolva maximalizarea și va afișa rezultatele optimizării.

6. Interpretarea rezultatelor

În cazul în care nu au fost urmați pașii corecți de calcul, nu au fost impuse suficiente condiții la limită sau apare un conflict între operațiile executate, solverul va afișa un mesaj de eroare anunțând că a întâlnit o valoare eronată în celula obiectiv sau o într-o celulă de constrângere. Dacă procedura a fost corect îndeplinită se vor afișa:

- numărul optim de motoare, n ;
- valoarea sarcinii termice nominale optime a motorului, $q_{th,nom}$;
- sarcina termică maximă optimă a fi cerută, Q_{MT} ;
- valoarea randamentului global optim, η_{gl} .

Fig. 5.8 prezintă optimizarea funcționării sistemului pentru consumatorul de tip birouri cu ecuația exponențială.

$PL_{TRI}^{2E} = \frac{Q_{MT}}{n \cdot q_{th,nom}} \quad \eta_{global}^{2E} = 0,4926 \cdot e^{0,5498 \cdot PL_{COG}}$				
"n" număr de motoare (MAXIM 10)	x=	8		
"q _{th,nom} " sarcina termica nominala (kW)	y=	66,782		
"Q _{MT} " sarcina th maximă ceruta, PUTERNIC VARIABILA	a=	534,254		
obiectiv: maximizare randamentului trigenerării " η_{global}^{nE} "	obiectiv MAX	85,36%		
nr motoare să fie nr intreg	constraint 1	8	equals	integer
nr maxim de motoare să fie 10 (se poate schimba)	constraint 2	8	<=	10
nr MT x sarcina nominală să acopere maximul cerut	constraint 3	534,254	>=	534,254
Partial Load sa fie >= 50%	constraint 4	1	>=	0,5
sarcina nominala a unui motor să nu fie peste maximul th cerut din profilurile de consum construite-SUPRADIMENSIONARE	constraint 5	66,782	<=	534,254
sarcina th maxima cerută să fie între un MAX si un MIN	constraint 6	534,254	>=	0,000
determinate în profilurile de consum (de productie - STRIGEN)	constraint 7	534,254	<=	534,254
Interpretarea Rezultatului Optimizării: Randamentul global optimal al trigenerării, de 85,36%, se obține pentru energia termică maximă orară cerută de 534,254 kWh/h (iulie, ora 14, consumator birouri) cu 8 motoare termice cu sarcina termică nominală (de capacitate) 66,782 kW				
Observație: La o dimensionare în funcție de „termic” rezultă ca o cerință obligatorie, ca valoarea capacității termice instalate (în echipamentele de cogenerare și surse de vârf) să fie cel puțin egală cu cererea maximă de căldură.				

Fig. 5.8. Optimizarea funcționării sistemului pentru consumator birouri, cu ecuația exponențială

Birouri

Fig. 5.8 prezintă optimizarea funcționării sistemului pentru consumator birouri, cu ecuația exponențială. Metoda utilizată este aceeași ca la consumatorul de tip rezidențial: funcția obiectiv este aceeași - ecuația exponențială 5.5, variabilele de decizie sunt aceleași, condițiile la limită sunt aceleași cu valorile corespunzătoare profilului energetic orar birouri, algoritmul de calcul GRG Neliniar.

Valoarea randamentului global optimal al sistemului de trigenerare pentru consumatorul de tip birouri, respectiv 85,36 %, s-ar obține pentru o valoare a energiei termice maxime orare cerută de 534,254 kWh/h, maxim care se și obține în iulie, ora 14, cu 8 motoare termice cu sarcina termică nominală (de capacitate) 66,782 kW.

Tabel 5.11 prezintă centralizat rezultatele optimizării funcționării sistemului de trigenerare, pentru cei 4 consumatori, cu ecuație liniară și cu ecuație exponențială.

Tabel 5.11. Tabel comparativ rezultate ale optimizării funcționării, pe consumatori, cu ecuație liniară și cu ecuație exponențială

Consumator	Ecuația 1 liniară (ec. 3.12)				Ecuația 2 exponențială (ec. 3.13)			
	număr optim motoare	sarcina termică nominală optimă	energia termică solicitată optimă	randament global optim	număr optim motoare	sarcina termică nominală optimă	sarcină termică solicitată optimă	randament global optim
	n	$q_{th,nom}$	Q_{MT}	η_{gl}	n	$q_{th,nom}$	Q_{MT}	η_{gl}
	(-)	(kW)	(kWh/h)	(%)	(-)	(kW)	(kWh/h)	(%)
rezidențial	5	29,133	145,667	85,24	5	29,133	145,667	85,36
birouri	8	66,782	534,254	85,24	8	66,782	534,254	85,36
spital	8	29,178	233,422	85,24	7	33,346	233,422	85,36
comercial	10	51,803	518,031	85,24	10	51,803	518,031	85,36

6 CONCLUZII, PERSPECTIVE

Tehnologiile de trigenerare cu surse de bază motoare termice beneficiază de marele avantaj de a funcționa la sarcini diferite fără diminuarea semnificativă a randamentelor. Motoarele își pot modula funcționarea prin intermediul automatizării până la o funcționare la jumătate din capacitatea lor nominală. O diminuare la 50 % a funcționării, cauzată de cererea consumatorului, determină o diminuare a randamentului global de cca. 10 %.

Randamentul maxim al unui echipament termic nu echivalează automat cu funcționarea lui în sarcină nominală (la 100 %). S-a observat pe parcursul cercetării că în cazul motoarelor termice cu combustie internă acest lucru se obține la o sarcină parțială (PL) situată în jurul intervalului $85\% \div 91\%$. O altă observație importantă este aceea că pentru motoarele termice de capacitate mai mare intervalul de obținere a randamentului termic maxim se lărgeste.

Randamentele globale obținute în urma cercetării și a studiilor conduse, real măsurate sau deduse prin calcule elaborate, au rezultat, în general, ușor mai scăzute decât valorile precizate în literatura de specialitate. Acest fapt este o consecință a vechimii sistemului de cogenerare, 10 ani în cazul studiat. Nu se poate însă prezenta o statistică exactă de comparație deoarece există o multitudine de factori de influență (condiții de funcționare particulare, ipoteze de calcul, condiții la limită impuse, precizia măsurării și erorile aparatelor, etc.) și analiza ar fi extrem de largă și complexă pe acest subiect.

Ecuatiile obținute au fost analizate statistic și au fost formulate concluzii asupra semnificațiilor termenilor și coeficienților. Aceste ecuații oferă metoda de abreviere a randamentului calculat conform formulelor cunoscute astfel încât rezultatul final să fie cât mai fidel condițiilor reale obținute în practică în funcționarea unui astfel de sistem.

În cazul experimental modelarea funcționării sistemului și ecuația liniară elaborată în cap. 3.2.2 al tezei au condus la diferențe de valori între randamentul global modelat și randamentul real contorizat (din baza de date) cuprinse între 5,96 % și 9,58 %.

Cea de a 2-a ecuație construită, de tip exponențial, cap. 3.2.3 din teză, a îmbunătățit modelul de predicție al valorilor randamentului global modelat în funcție de variația sarcinii parțiale a sistemului de trigenerare.

Prelucrarea informațiilor din baza de date și ecuațiile elaborate pentru valorile randamentului global, urmate de optimizarea matematică au condus la îmbunătățirea modului de funcționare al sistemelor de trigenerare în ceea ce privește alegerea unor sarcini termice nominale optime pentru sursa de bază (în cazul dimensionării urmărind necesarul termic al consumatorului) și alegerea numărului precis de motoare care să satisfacă respectivul necesar. Aspectul a fost rezolvat în respectivele subcapitole din punct de vedere strict matematic, în practică urmând a fi alese evident sarcinile nominale apropiate existente pe piață.

S-a observat o bună adaptabilitate a tehnologiei de trigenerare cu motoare termice cu ardere internă pentru fiecare tip de consumator. Acest avantaj derivă și din gama largă de puteri nominale existentă pe piață, de la cele mai mici, de 50 kW, până la cele mai mari, 12 MW. Wärtsilä 31SG, motor cu 20 cilindri în ciclu Otto, alimentat cu gaz pur, de turație medie produce o putere de 12 MW. Puterile nominale ale motoarelor termice pentru cogenerare date în declarațiile producătorilor sunt puteri nominale electrice (conform ISO 3046-1/2002).

O altă concluzie rezultată în urma studiilor și cercetărilor de pe parcursul tezei, în argumentarea unei ușoare adaptabilități, este aceea că în cazul variației puternice a caracteristicii consumului este de preferat o dimensionare și o alegere de capacități nominale mai fragmentate, adică mai multe motoare cu sarcini nominale mai mici care să acopere sarcina cerută (la un indice de cogenerare minim $\alpha=0,5$ și minim 4500 de ore de funcționare). Astfel se înmulțesc intervalele de funcționare simultană la sarcini parțiale în jurul a $PL=88\%$, când randamentele ating maximum.

CONTRIBUȚII PERSONALE

Principalele contribuții personale aduse prin intermediul acestei teze de doctorat sunt:

- analiza modurilor de operare ale motoarelor termice cu ardere internă în cadrul unui sistem de cogenerare și realizarea unui modelul matematic pentru simularea funcționării;
- realizarea studiului de caz pe centrala de cogenerare reală din municipiul Buzău, având motoare termice ca sursă de bază;
- obținerea, în baza informațiilor din baza de date, a ecuațiilor de variație a randamentelor termic, electric și global cu sarcina de funcționare parțială a motoarelor;
- obținerea unei ecuații exponențiale pentru variația randamentului global al sistemului de cogenerare cu sarcina parțială de funcționare;
- construcția profilelor energetice orare pentru toate tipurile de utilități consumate de 4 categorii de consumatori: rezidențial, birouri, spital și comercial;
- construirea unei metode de selecție optimă a numărului de motoare termice și a sarcinii termice nominale a motorului pentru satisfacerea cererii puternic variabile a consumului orar, al zilei medii a fiecărei luni, pentru 4 categorii diferite de consumator.

APLICABILITATEA PRACTICĂ

Valorile de randament global din studiul experimental, mai mici cu cca. 5 procente decât valorile din fișele tehnice și decât valorile prezentate în studii teoretice din literatură, sunt valorile indicate a se considera în practică la momentul deciziei de implementare a unui sistem de co/trigenerare.

Modelul matematic construit pentru simularea funcționării motoarelor și valorile de predicție a randamentelor oferite de modelele de regresie reprezintă o metodă preferabilă utilizării unor valori aproximative sau a unor valori estimate.

Analiza randamentelor sistemelor de co/trigenerare și aprecierile din prezenta lucrare oferă argumente suficiente pentru a afirma că tehnologiile cu surse de bază motoare termice au o mare adaptabilitate la sarcini puternic variabile.

Profilurile energetice construite în teză se pot aplica cu succes și se pot armoniza, din perspectiva consumatorului, pe clădiri asemănătoare, cu rezultate foarte fidele realității din teren. Pe cale de consecință, rezultatele obținute în final în sfera energiilor produse în regim de cogenerare, urmând procedura indicată în lucrare, vor contura o imagine aproape exactă a modului în care trebuie configurat sistemul propus spre implementare.

PERSPECTIVE

În perspectiva cercetării se va avea în vedere:

- analiza funcționării sistemelor de trigenerare cu motoare termice pe zone climatice diferite;
- studiul funcționării motoarelor de nouă generație, cu cele mai noi nivele de referință în materie de eficiență și de reducere a emisiilor de gaze cu efect de seră;
- analiza influenței cuplării motoarelor termice cu instalații frigorifice de absorbție în două sau trei trepte, cu valori ale EER de 1, respectiv 1,4÷1,6, conform literaturii științifice.

BIBLIOGRAFIE TEZĂ

- [1] A. Piacentino, R. Gallea, F. Cardona, V. Lo Brano, G. Ciulla, P. Catrini,, "Optimization of trigeneration system by Mathematical Programming: Influence of plant scheme and boundary conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 104, pp. 100-114, 2015.
- [2] Ramsay, Bruce, "The European Educational Tool on Cogeneration," in *EDUCOGEN*, vol. Second Edition, European Commission, December 2001, p. 8.
- [3] Frunzulică Rodica, Țoropoc Sanda Mirela, Uță Laurențiu, "Modalitatea optima si exemplu de selectie a solutiei de cogenerare de mica putere pentru consumatorii de tip condominiu," in *Conferinta Eficienta, confort, conservarea energiei si protectia mediului (editia a XIV-a)*, București, 2010.
- [4] Toropoc Sanda Mirela, Frunzulica Rodica, "Considerente tehnice si economice ale trigenerarii," in *Volumul cu lucrarile Conferintei - Eficienta, confort, conservarea energiei si protectia mediului (editia a XIV-a)*, București, 2008.
- [5] Viknesh Andiappan, Denny K. S. Ng, "Synthesis of tri-generation systems: Technology selection, sizing and redundancy allocation based on operational strategy," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 91, pp. 380-391, 2016.
- [6] K. F. Fong, C. K. Lee, "Performance analysis of internal-combustion-engine primed trigeneration system for use in high-rise buildings in Hong Kong," *Applied Energy*, vol. 160, pp. 793-801, 2015.
- [7] Mahesh N. Shelar, S. D. Bagade, G. N. Kulkarni, "Energy and Exergy analysis of diesel engine powered trigeneration systems," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 27-37, 2016.
- [8] Sepehr Sanaye, Mehdi Aghaei Meybodi, Shahabeddin Shokrollahi, "Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 1177-1188, 2008.
- [9] Santo, Denilson Boschiero do Espirito, "An energy and exergy analysis of a high-efficiency engine trigeneration system for a hospital: A case study methodology based on annual energy demand profiles," *Energy and Buildings*, vol. 76, pp. 185-198, 2014.

- [10] Xiling Zhao, Lin Fu, Feng Li, Hua Liu, "Design and operation of a tri-generation system for a station in China," *Energy Conversion and Management*, vol. 80, pp. 391-397, 2014.
- [11] Pedro A. Rodriguez-Aumente, Pedro A. Rodriguez-Aumente, Maria del Carmen Rodriguez-Hidalgo, Jose I. Nogueira, Antonio Lecuona, Maria del Carmen Venegas, "District heating and cooling for business buildings in Madrid," *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, pp. 1496-1503, 2013.
- [12] Valerie Eveloy, Peter Rodgers, Sahil Popli, "Trigeneration scheme for a natural gas liquids extraction plant in Middle East," *Energy Conversion and Management*, vol. 78, pp. 204-218, 2014.
- [13] Mahesh Shelar, G. N. Kulkarni, "Thermodynamic and economic analysis of diesel engine based trigeneration systems for an Indian hotel," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 13, pp. 60-67, 2016.
- [14] Sayyaadi, Hoseyn, "Multi-objective approach in thermoenviromonic optimization of a benchmark cogeneration system," *Applied Energy*, vol. 86, pp. 867-879, 2009.
- [15] M. A. Lozano, M. Carvalho, L. M. Serra, "Operational strategy and marginal costs in simple trigeneration systems," *Energy*, vol. 34, pp. 2001-2008, 2009.
- [16] Liwei Ju, Zhongfu Tan, Huanhuan Li, Qingkun Tan, Xiaobao Yu, Xiaohua Song, "Multi-objective operation optimization and evaluation model for CCHP and renewable energy based hybrid energy system driven by distributed energy resources in China," *Energy*, vol. 111, pp. 322-340, 2016.
- [17] C. Deb, F. Zhang, J. Yang, S. Eang Lee, K. Wei Shah, "A review on time series forecasting techniques for building energy consumption," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 902-924, 2017.
- [18] M.A. Rafe Biswas, M.D. Robinson, N. Fumo, "Prediction of residential building energy consumption: A neural network approach," *Energy*, vol. 117, pp. 84-92, 2016.
- [19] Andrew Kusiak, Guanglin Xu, Zijun Zhang, "Minimization of energy consumption in HVAC systems with data- driven models and an interior point-method," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 146-153, 2014.
- [20] S. Banihashemi, G. Ding, J.Wang, "Developing a hybrid model of prediction and classification algorithms for building energy consumption'," *Energy Procedia*, vol. 110, pp. 371-376, 2017.
- [21] Muhammad Waseem Ahmad, Monjur Mourshed, Yacine Rezgui, "Trees vs Neurons: Comparison between random forest and ANN for high-resolution prediction of building energy consumption," *Energy and Buildings*, vol. 147, pp. 77-89, 2017.
- [22] Peter Boehme, Matthias Berger, Tobias Massier, "Estimating the building based energy consumption as an anthropogenic contribution to urban heat island," *Sustainable Cities and Society*, vol. 19, pp. 373-384, 2015.
- [23] R. Ghedamsi, N. Settou, A. Gouareh, A. Khamouli, N. Saiifi, B. Reciou, B. Dokkar, "Modeling and forecasting energy consumption for residential buildings in Algeria using bottom-up approach," *Energy and Buildings*, vol. 121, pp. 309-317, 2016.
- [24] Kassas, Mahmoud, "Modeling and Simulation of Residential HVAC Systems Energy Consumption," *Procedia Computer Science*, vol. 52, pp. 754-763, 2015.
- [25] "www.delgaz-grid.ro - Energie electrică - Profiluri de consum," Delgaz Grid SA, 2000. [Online]. [Accessed 22 septembrie 2017].

- [26] Jingru Zhang, Yogesh Jaluria, "Steady and transient behavior of data centers with variations in thermal load and environmental conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 374-385, 2017.
- [27] T. Bouhal, Y. Agrouaz, A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraouli, "Impact of load profile and collector technology on the fractional savings of solar domestic water heaters under various climatic conditions," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, pp. 3245-3258, 2017.
- [28] M. Bedir, E.C. Kara, "Behavioral patterns and profiles of electricity consumption in dutch dwellings," *Energy and Buildings*, vol. 150, pp. 339-352, 2017.
- [29] Rui Gaspar, Dalila Antunes, Ana Faria, Andreas Meiszner, "Sufficiency before efficiency: Consumers' profiling and barriers/facilitators of energy efficient behaviours," *Journal of Cleaner Production*, vol. 165, pp. 134-142, 2017.
- [30] A. Vallati, S. Grignaffini, M. Romagna, L. Mauri, C. Colucci, "Influence of street canyon's microclimate on the energy demand for space cooling and heating of buildings," *Energy Procedia*, vol. 101, pp. 941-947, 2016.
- [31] K. Ahmed, P. Pylsy, J. Kurnitski, "Hourly consumption profiles of domestic hot water for different occupant groups in dwellings," *Solar Energy*, vol. 137, pp. 516-530, 2016.
- [32] Paula Angheliță, Mihaela Chefneux, Mihaela Scorțescu, Loren Trocan, Relu Baraban, "Conceptia sistemelor de producere/distributie a energiei electrice în clădirile rezidențiale independente energetic," *Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 2, p. 58, 2010.
- [33] A. Kipping, E. Tromborg, "Modeling hourly consumption of electricity and district heat in non-residential buildings," *Energy*, vol. 123, pp. 473-486, 2017.
- [34] "Partea II-1, Performanța energetică a instalațiilor din clădiri," in *Metodologia de calcul al performanței energetice a clădirilor*, București, MDRAP, 2006, pp. Partea II-1 încălziri.
- [35] "Partea II-2, Performanța energetică a instalațiilor din clădiri," in *Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor*, București, MDRAP, 2006, pp. Partea II-2 ventilații.
- [36] P. Arcuri, G. Florio, P. Fragiaco, "A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex," *Energy*, vol. 32, pp. 1430-1447, 2007.
- [37] Li Yuan, Yingjun Ruan, Guang Yang, Fan Feng, Zhengwei Li, "Analysis of Factors Influencing the Energy Consumption of Government Office Buildings in Qingdao," *Energy Procedia*, vol. 104, pp. 263-268, 2016.
- [38] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "Handbook - Heating, Ventilating, and Air-Conditioning Systems and Equipment," in *I-P Edition*, 2008.
- [39] Asociația de Standardizare din România, SR EN 15316-4-4, Performanța energetică a clădirilor. Metodă de calcul a cerințelor energetice și a randamentelor sistemelor. Partea 4-4: Sisteme de producere a căldurii: instalații de cogenerare integrate în clădiri, Modulele M8-3-4, M8-8-4, M8-11-4, Bucuresti, 2017.
- [40] G. Mărcuș, V. Iordache, R. Frunzulică, F. Iordache, "Efficiency analysis of a CHP plant, based on reciprocating engines as prime movers and a hot water boiler as peak source," *Revista Română de Inginerie Civilă*, vol. 9, no. 3, pp. 278-291, 2018.
- [41] Metodologie de calcul a performanței energetice a clădirilor, Partea a II-a - Performanța energetică a instalațiilor din clădiri, București: MDRAP, 2006.

- [42] G. Mărcuș, V. Iordache, F. Iordache, A. Ilie, "Energy analysis of a CHP plant with internal combustion engines, for a district heating system, based on the information from the annual database," in *1st Conference of the UTCB Doctoral School*, București, 2018.
- [43] G. Mărcuș, C. I. Lungu, "Partial load efficiency analysis of a CCHP plant with RICE and H₂O-LiBr absorption chiller," in *REHVA 13th HVAC World Congress CLIMA 2019*, Bucharest, 2019.
- [44] "Enciclopedie Tehnică de Instalații," in *Manualul de Instalații - Instalații de Ventilare și Climatizare*, București, ARTECNO, 2010, p. 14.
- [45] "https://www.e-distributie.com," Enel, Operator de rețea Muntenia, [Online]. Available: <https://www.e-distributie.com/ro-RO/Pagini/muntenia.aspx>. [Accessed 16 03 2019].
- [46] V. I. Iolanda Colda, Writer, *Consum energetic al instalațiilor de ventilare*. [Performance]. FII_UTCB, 2013.
- [47] Indian Institute of Technology Kharagpur, "Lesson 15 Vapour Absorption Refrigeration Systems Based On WaterLithium Bromide Pair," in *Version I*, Kharagpur, 2008, p. 8.
- [48] "Computer_consumption_electrical_LP_ELECTRICAL," ECOVOLT ROMANIA Ltd, [Online]. Available: <http://www.ecovolt.ro>. [Accessed 09 December 2019].
- [49] Natural Resources Canada, "RETScreen Expert (free version) download for PC," 19 September 2016. [Online]. Available: <https://en.freedownloadmanager.org/.../RETScreen-Expert.ht...> [Accessed 26 February 2019].
- [50] "Directiva 2004/8/CE A Parlamentului European și a Consiliului Uniunii Europene," 11 februarie 2004. [Online]. Available: <http://publications.europa.eu/>. [Accessed 09 martie 2020].
- [51] Wang, Suqing, "Tri-Generation A Sustainable Solution for Industry," BLACK & VEATCH Employee-Owned, 01 ianuarie 2017. [Online]. Available: www.bv.com. [Accessed 20 februarie 2020].
- [52] "Enciclopedie Tehnică de Instalații," in *Manualul de Instalații, Instalații de Încălzire*, București, ARTECNO, 2010, p. 66.
- [53] I5 - Normativ pentru proiectarea, executarea și exploatarea instalațiilor de ventilare și climatizare, București, 2010.
- [54] A. Piacentino, R. Gallea, F. Cardona, V. Lo Brano, G. Ciulla, P. Catrini, "Optimization of trigeneration system by Mathematical Programming: Influence of plant scheme and boundary conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 104, pp. 100-114, 2015.
- [55] Normativ privind proiectarea, execuția și exploatarea instalațiilor electrice aferente clădirilor, I7-2011, București: MDRT, 2011.
- [56] Tîrcă-Dragomirescu, Georgiana, Optimizarea exergoeconomică a sistemelor de trigenerare a energiei, București: Ministerul Educației și Cercetării, 2012.
- [57] System, RIMA Heating, "http://www.calor.ro/documents/products/32660/Cazane%20fonta%20Rima%20RS%20-%20Manual%20date%20tehnice%20limba%20engleza.pdf," Rima Heating Systems, [Online]. Available: www.calor.ro. [Accessed 08 IUNIE 2019].
- [58] Stefano Briola, Paolo Di Marco, Roberto Gabbrielli, "Thermodynamic sensitivity analysis of a novel trigeneration thermodynamic cycle with two-phase expanders and two-phase compressors," 2017.

- [59] Simin Anvari, Rahim Khoshbakhti Saray, Keyvan Bahloul, "Employing a new optimization strategy based on advanced exergy concept for improvement of tri-generation system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 1452-1463, 2017.
- [60] Sergio Sibilio, Antonio Rosato, Giovanni Ciampi, Michelangelo Scorpio, Atsushi Akisawa, "Building-integrated trigeneration system: Energy, environmental and economic dynamic performance assessment for Italian residential applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 920-933, 2017.
- [61] SANYO, CARRIER, "acare.eu/CarrierCD/Litt/11615_PSD_11_05.pdf," CARRIER SANYO, [Online]. Available: www.carrier.com. [Accessed 15 DECEMBRIE 2018].
- [62] Roxana Patrașcu, Cristian Răducanu, Ion Sotir Dumitrescu, "Utilizarea Energiei Partea I," in *Cursuri Universitare*, București, Universul Energiei, 2004.
- [63] P. Arcuri, P. Beraldi, G. Florio, P. Fragiaco, "Optimal design of a small size trigeneration plant in civil users: A MINLP (Mixed Integer Non Linear Programming Model)," *ELSEVIER*, vol. Energy 80 (2015), p. 631, 2014.
- [64] N. Negurescu, Ctin. Pană, M. G. Popa, Motoare cu aprindere internă, Procese, București: Matrix Rom, 1996.
- [65] Mehdi Mehrpooya, Shahrard Sayyad, Masood Jalali Zonouz, "Energy, exergy and sensitivity analyses of a hibrid combined cooling, heating and power (CCHP) plant with molten carbonate fuel cell (MCFC) and Stirling engine," *Journal of Cleaner Production*, vol. 148, pp. 283-294, 2017.
- [66] E. Jannelli, M. Minutillo, R. Cozzolino, G. Falcucci, "Thermodynamic performance assessment of a small size CCHP (combined cooling heating and power) system with numerical models," *Energy*, vol. 65, pp. 240-249, 2014.
- [67] E. Fuentes, L. Arce, J. Salom, "A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis," *Renewable and Sustainable Energz Reviews*, no. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.229>, 2017.
- [68] D. Enache, A. Damian, I. Coldă, "Îndrumător de proiectare vol. I," in *Instalații de Ventilare și Climatizare*, București, MATRIX ROM, 2005.
- [69] Ali Nadi Unal, Ibrahim Ersoz, Gulgun Kayakutlu, "Operational optimization in simple tri-generation systems," *Applied Thermal Engineering*, vol. 107, pp. 175-183, 2016.
- [70] AG, MAN Truck & Bus, "MAN Gas Engines for Power Generation," MAN, [Online]. Available: www.man-engines.com. [Accessed 26 mart. 2019].
- [71] Șt. Vintilă, L. Dumitrescu, I. Crăciun, R. Damian, T. Cruceru, Ghe. Badea, Th. Mateescu, L. Dumitrescu jr., A. Reteyan, D. Teodorescu, M. Sandu, V. Popescu, V. Voicu, V. Voinescu, "Enciclopedie Tehnică de Instalații," in *Manualul de Instalații Sanitare*, București, ARTECNO, 2010, pp. 43, 46, 47, 51, 52.
- [72] "PARTEA II - 4 electrice," in *Metodologie de calcul a performanței energetice a cladirilor Mc 001*, Bucuresti, ARTECNO, 2006.
- [73] "Partea II-3, Performanța energetică a instalațiilor din clădiri," in *Metodologie de calcul al performanței energetice a clădirilor*, București, MDRAP, 2006, pp. Partea II-3 apa caldă.