

Modelare functionala si energetica a unui sistem compus din pompa de caldura, instalatie de incalzire centrala si cladire

Functional and energetic modeling of a system consisting of a heat pump, a central heating installation and a building

prof. dr .ing. Florin Iordache¹, drd. ing. Mugurel Talpiga²

^{1,2}Universitatea Tehnica de Constructii Bucuresti
Facultatea de Inginerie a Instalatiilor
Bdul. Pache Protopopescu, 66, Romania
fliord@yahoo.com

Abstract

This paper review the energetic analyze of two different heat pumps, used to prepare the primary thermal agent of a building heating system. Two types of heat pump with mechanical compression were simulated, the chosen types being water to water and air to water. The building heating system consist of a low temperature.

In brief, the basic mathematical equations are presented, to be used in energetic analyze for cold season when heating is required for inside thermal comfort. The results, functional and energetic, are presented in tables also graphical, to be easy seen the heat-pumps performances. For critical temperatures, also a classical heating system, to cover the entire heating demand in those periods.

Key words : renewable sources, heat pumps, building with energy saving

Rezumat

Lucrarea are ca obiectiv principal efectuarea unei analize energetice privind utilizarea unei pompe de caldura pentru incalzirea agentului termic vehiculat in cadrul instalatiei de incalzire centrala a unei cladiri. S-au considerat 2 tipuri de pompe de caldura cu compresie mecanica si anume una tip apa-apa si alta tip aer-apa. Instalatia de incalzire centrala s-a considerat de tip de joasa temperatura.

In lucrare se prezinta pe scurt relatiile care au stat la baza realizarii analizei energetice pe perioada sezonului rece al anului. Rezultatele energetice si functionale sunt prezentate tabelar si grafic astfel incat sa rezulte destul de usor performantele pompei de caldura. In perioadele de solicitare climatica intense ale cladirii intra in functiune si o centrala termica pe combustibil gazos, acoperindu-se astfel varfurile de sarcina ale consumatorului.

Cuvinte cheie: surse regenerabile, pompe de caldura, casa cu economie de energie

1. Introducere

Lucrarea are ca obiectiv modelarea functionarii in regim de exploatare a unui

sistem termic compus din pompa de caldura ca sursa si instalatia de incalzire si cladire ca si consumator. Pompa de caldura analizata este o pompa de caldura aer- apa sau o pompa de caldura apa-apa. Instalatia de incalzire considerata este o instalatie de incalzire de joasa temperatura.

In cadrul lucrarii se urmaresc atat aspecte functionale precum variatia temperaturilor si a fluxului termic livrat de pompa de caldura cat si aspecte energetice cum ar fi performanta energetica a sistemului si gradul de acoperire energetica al consumatorului.

Se urmareste totodata si identificarea unor repere privind dimensionarea sursei in vederea unei acoperiri energetice rezonabile a consumatorului. Trebuie precizat faptul ca sursa neconventionala avuta in vedere este o pompa de caldura cu compresie mecanica.

2. Schema sistemului. Modelarea proceselor termice specifice

In figura 1 se prezinta schematic sistemul sursa consumator, compus din rezervorul de acumulare a agentului termic vehiculat in instalatia de incalzire centrala a cladirii, in care se pompeaza energie termica prin intermediul condensatorului pompei de caldura cu compresie ca o prima treapta, urmata de o a doua treapta prin care se pompeaza energie termica de la sursa de rezerva – o centrala termica. Instalatia de incalzire centrala trebuie sa fie dimensionata conform unui nivel scazut al temperaturilor agentului termic astfel incat sa ofere posibilitatea pompei de caldura sa lucreze la eficiente cat mai ridicate.

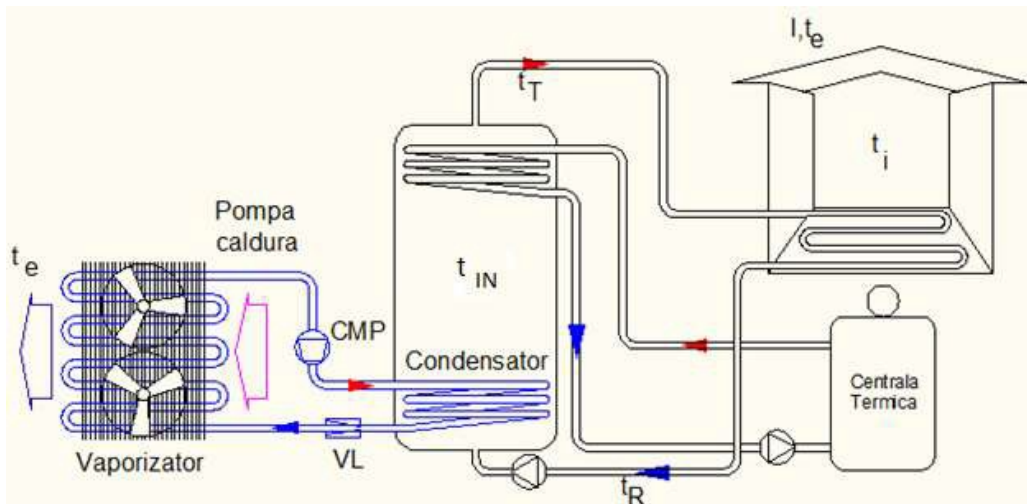


Fig. 1

Puterea termica ceruta de consumator corespunzator unei anumite temperaturi exterioare, t_e , curente, trebuie sa fie acoperita partial de catre sursa neconventionala de caldura, pompa termica, mai precis prin fluxul termic preluat la condensatorul pompei de caldura [1] :

Modelare functionala si energetica a unui sistem compus din pompa de caldura, instalatie de incalzire centrala si cladire

$$P_{CD} = G_{AE} \cdot P_{INC} = G_{AE} \cdot H \cdot (t_{i0} - t_e) \quad (1)$$

Gradul de acoperire energetica oferit consumatorului (incalzirea cladirii), G_{AE} , rezulta ca fiind urmatorul raport de diferente de temperaturi ale agentului termic vehiculat in instalatia de incalzire central :

$$\frac{t_{IN} - t_R}{t_T - t_R} = G_{AE} \quad (2)$$

Unde :

$$t_T = \frac{t_{T0} - t_{e0}}{t_{i0} - t_{e0}} \cdot t_{i0} - \frac{t_{T0} - t_{i0}}{t_{i0} - t_{e0}} \cdot t_e \quad (3)$$

$$t_R = \frac{t_{R0} - t_{e0}}{t_{i0} - t_{e0}} \cdot t_{i0} - \frac{t_{R0} - t_{i0}}{t_{i0} - t_{e0}} \cdot t_e$$

Temperatura θ_{CD} este temperatura medie a agentului termic incalzit de catre condensatorul pompei de caldura, agent incalzit in continuare de catre sursa clasica de rezerva, pana la temperatura necesara conforma cu graficul de reglaj termic calitativ asociat marimii suprafetei de instalatiei de incalzire centrala a consumatorului. Astfel definim :

$$\theta_{CD} = \frac{1}{2} \cdot (t_{in} + t_R) \quad (4)$$

Rezulta in final dupa cateva prelucrari pentru θ_{CD} expresia :

$$\theta_{CD} = t_R + \frac{1}{2} \cdot G_{AE} \cdot \frac{t_{T0} - t_{R0}}{t_{i0} - t_{e0}} \cdot (t_{i0} - t_e) \quad (5)$$

Pe de alta parte, daca ne referim la pompa de caldura, conform [2] s-a stabilit expresia :

$$COP_{CD} = \frac{P_{CD}}{P_{EL}} = \eta_{EL} \cdot \frac{\theta_{CD} + \Delta_{CD} + 273.15}{\theta_{CD} - \theta_{VP} + \Delta_{CD} + \Delta_{VP}} \quad (6)$$

Considerand $\Delta_{CD} = \Delta_{VD} = \Delta$ si $\theta_{VP} = t_0$ si $\eta_{EL} = 0,7$, in cazul pompei de caldura aer-apa, si relatia (6) devine :

$$COP_{CD} = \frac{P_{CD}}{P_{EL}} = \eta_{EL} \cdot \frac{\theta_{CD} + \Delta + 273.15}{\theta_{CD} - t_0 + 2 \cdot \Delta} \quad (7)$$

De asemenea sunt cunoscute relatiile :

$$P_{EL} = \frac{P_{CD}}{COP_{CD}} \quad (8)$$

$$\eta_{EL} \cdot P_{EL} = P_{CD} - P_{VP}$$

Si

$$(9)$$

$$P_{EL} = \frac{P_{CD} - P_{VP}}{\eta_{EL}}$$

In ceea ce priveste implicatia energetica a centralei termice ca sursa de rezerva avem:

$$P_{CT} = (1 - G_{AE}) \cdot H \cdot (t_{i0} - t_e) \quad (10)$$

Si :

$$P_{TH} = \frac{P_{CT}}{\eta_{CT}} \quad (11)$$

cu $\eta_{CT} = 0,9$.

In cazul unei pompe de caldura aer-apa $t_0 = t_e$, iar in cazul pompei apa-apa t_0 este temperatura sursei reci utilizate efectiv.

Scenariul de functionare pe care il propunem este compus din 2 etape si anume: prima etapa este cea a temperaturilor exterioare pana la -5°C inclusiv si a doua etapa cea a temperaturilor exterioare de -10°C si -15°C . In prima etapa se va merge pe un grad acoperire energetica $G_{AE} = 1$, iar in a doua etapa pe mentinerea puterii electrice care rezulta pentru temperatura exterioara de -5°C si vor rezulta $P_{CD} < P_{INC}$ si deci un $G_{AE} < 1$. Pentru prima etapa procedura de lucru este :

1. Se propun temperaturile nominale ale agentului termic, t_{T0} si t_{R0} ;
2. Se stabilesc temperaturile de reglaj termic calitativ conform (3);
3. Se propune t_e si G_{AE} ;
4. Se calculeaza θ_{CD} cu (5);
5. Se calculeaza P_{CD} conform (1);
6. Se calculeaza COP_{CD} cu (7);
7. Se calculeaza P_{EL} cu (8);
8. Se calculeaza P_{CT} cu (10);
9. Se calculeaza P_{TH} cu (11);

Pentru a doua etapa procedura de lucru va trebui sa inceapa printr-un calcul iterativ :

Modelare functionala si energetica a unui sistem compus din pompa de caldura, instalatie de incalzire centrala si cladire

1. Se propune o valoare initiala pentru P_{CD_0} ;
2. Se stabileste G_{AE} conform (1);
3. Se calculeaza θ_{CD} cu (5);
4. Se calculeaza COP_{CD} cu (7);
5. Si tot cu (7) se calculeaza P_{CD_1} ;
6. Se reia calculul pana cand diferenta dintre P_{CD_1} si P_{CD_0} este mai mica decat 1W;
7. In continuare se calculeaza G_{AE} si θ_{CD} , pentru valoarea stabilita la lui P_{CD} ;
8. Se calculeaza COP_{CD} cu (7);
9. Se calculeaza P_{EL} cu (8);
10. Se calculeaza P_{CT} cu (10);
11. Se calculeaza P_{TH} cu (11);

In continuare urmeaza calculul energiilor lunare termice si electrice.

In acest fel se poate urmarii evolutia coeficientului de performanta al pompei de caldura alese la diverse temperaturi exterioare din cadrul sezonului rece si totodata evolutia puterii electrice absorbite din retea de motorul compresorului si implicit a puterii termice absorbite la vaporizatorul pompei de caldura.

Din punct de vedere energetic necesarul cladirii in zona temperaturii exterioare de calcul, t_{e0} este destul de scazut, cca. 2%. Consumul energetic mai substantial apare in zona temperaturilor superioare valorii de cca. $-5^{\circ}C$, fapt datorat in principal duratei semnificative de aparitie a acestor valori de temperatura exterioara pe durata sezonului rece de cca. 182 zile.

Tinand seama de acest aspect se considera ca nu este oportuna alegerea unei pompe termice care sa acopere puterea termica necesara a consumatorului la solicitari climatice sub $-5^{\circ}C$. Si acest aspect devine mai evident in situatia utilizarii unei pompe termice de tip aer-aer cand diferenta dintre temperaturile la condensator si vaporizator devin destul de mari. In fig. 2 se prezinta distributia frecventei de aparitie a temperaturilor exterioare intr-o iarna medie, caracteristica pentru zona 2 din Romania.

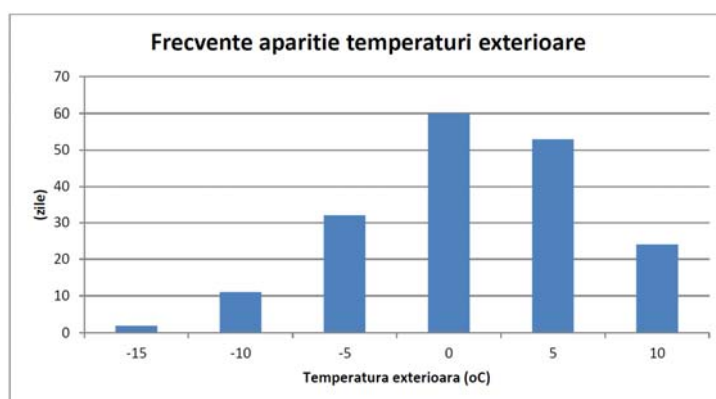


Fig. 2

Asa cum s-a mentionat in cazul pompei de caldura apa-apa alegerea se va face pentru o putere termica maxima de acoperit corespunzatoare unei temperaturi exterioare de -5°C , iar in cazul pompei de caldura aer-apa alegerea se poate face tot pentru o putere termica maxima de acoperit corespunzatoare unei temperaturi exterioare de -5°C . Optiunea pentru acoperirea necesarului de caldura al casei la o temperatura exterioara de -5°C se datoreaza faptului ca sub aceasta temperatura exterioara chiar daca necesarul termic este mai mare, consumul energetic nu este mare dat fiind frecventa de aparitie a acestor temperaturi care este relativ scazuta. Alegerea pompei de caldura se face pentru puterea maxima si valoarea COP corespunzatoare ei. Asta presupune ca pompa nu va lucra peste aceasta putere inasa va lucra la puteri inferioare ei si cu valori COP eventual mai mari.

3. Studiu de caz

Analiza energetica se va efectua pe 2 situatii in care o cladire caracterizata de un coeficient de transmitanta termica $H = 1000 \text{ W/K}$. De asemenea se va considera un coeficient global de transfer termic al instalatiei de incalzire constant: $k = 1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. In tabelul 1 se prezinta o situatie des intalnita in zona 2 de temperaturi exterioare din Romania.

Tabel 1

t_{i0} (°C)	t_e (°C)	dt_e (°C)	$t_{i0} - t_e$ (°C)	$(t_{i0} - t_e)$ %	Nr. Zile zile	nr.zile %	Q_n (kwh)	Energie %	t_T (°C)	t_R (°C)
20	-15	(-17.5/-12.5)	35	100.00	2	1.10	1680	2.04	50.00	30.00
20	-10	(-12.5/-7.5)	30	85.71	11	6.04	7920	9.61	45.71	28.57
20	-5	(-7.5/-2.5)	25	71.43	32	17.58	19200	23.29	41.43	27.14
20	0	(-2.5/+2.5)	20	57.14	60	32.97	28800	34.93	37.14	25.71
20	5	(+2.5/+7.5)	15	42.86	53	29.12	19080	23.14	32.86	24.29
20	10	(+7.5/+12.5)	10	28.57	24	13.19	5760	6.99	28.57	22.86
					182	100	82440	100		

Din tabelul 1 este de retinut faptul ca daca dimensionarea pompei de caldura se face corespunzator acoperirii necesarului de caldura pentru temperatura exterioara de -5°C , insemna ca din punct de vedere energetic se impune acoperirea necesarului de caldura de calcul in proportie de 71,43 %. Puteri superioare putand fi acoperite pe baza utilizarii ca sursa a unei centrale termice.

In fig. 3 se prezinta distributia consumurilor energetice ale cladirii pentru incalzire spatiilor in perioada sezonului rece.

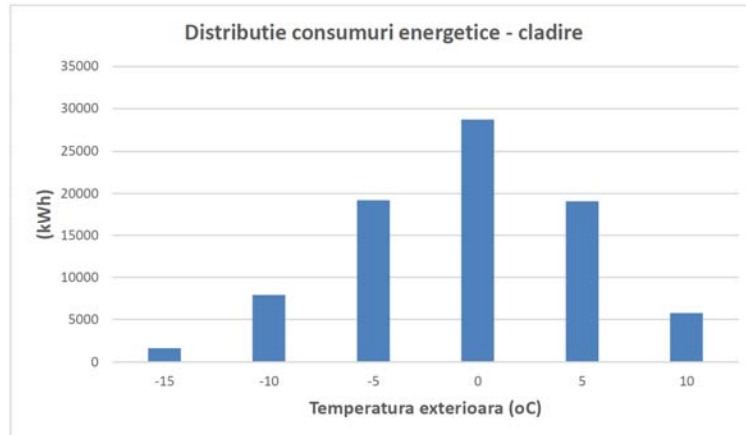


Fig. 3

In fig. 4 se prezinta alura considerata a curbelor de reglaj termic calitativ ale instalatiei de incalzire centrala a cladirii.

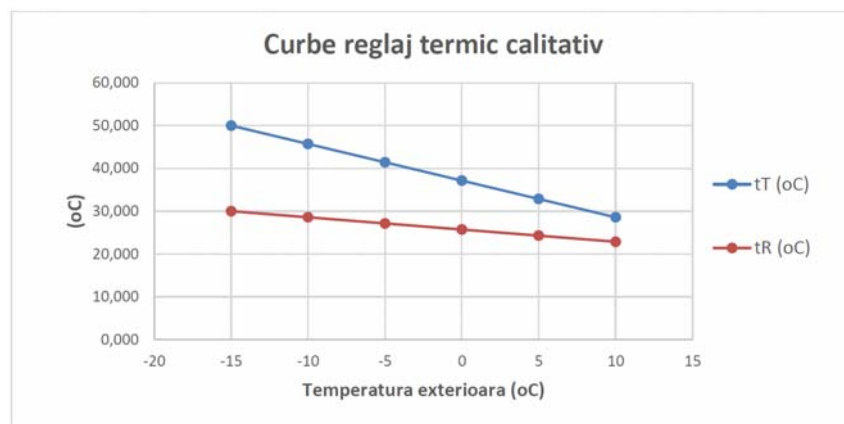


Fig. 4

Primul caz analizat a fost cel al utilizarii unei pompe de caldura tip apa-apa in care temperatura sursei reci este de $+10^{\circ}\text{C}$. In tabelul 2 se prezinta rezultatele obtinute. Primele 2 linii corespunzatoare temperaturilor exterioare -15°C si -10°C se asociaza cu acoperirea energetica partial de catre pompa de caldura si partial de centrala termica care lucreaza cu un randament de 90%, iar urmatoarele 4 linii corespunzatoare temperaturilor exterioare -5°C , 0°C , $+5^{\circ}\text{C}$, $+10^{\circ}\text{C}$ se asociaza cu acoperirea energetica integral de pompa de caldura. In ceea ce priveste evaluarea acoperiri energetice

realizate de pompa de caldura in domeniul temperaturilor exterioare reprezentate prin mediile de -10°C si -15°C , s-a considerat ca motorul compresorului pompei nu poate absorbi din retea electrica o putere mai mare decat cea nominala (corespunzatoare zonei de temperaturi exterioare reprezentate de media de -5°C , pentru care dupa cum se vede din tabelul 2 este in valoare de 3920 W. Temperatura medie a agentului termic incalzit de catre condensatorul pompei de caldura se ridica la o valoare de cca. $35,5^{\circ}\text{C}$.

Tabel 2

t_e	P_{INC}	G_{AE}	θ_{CD}	P_{CD}	COP_C	P_{EL}	P_{CT}	P_{TH}	E_{INC}	E_{CD}	E_{EL}	E_{CT}	E_{TH}
$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	kW		kW	kW	kW	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
-15	35	0.671	36.714	23.5	6.003	3.919	11.5	12.778	1.68	1.13	0.19	0.55	0.61
-10	30	0.808	35.497	24.24	6.185	3.920	5.76	6.400	7.92	6.40	1.03	1.52	1.69
-5	25	1	34.286	25	6.379	3.919	0	0	19.2	19.20	3.01	0	0
0	20	1	31.429	20	6.895	2.901	0	0	28.8	28.80	4.18	0	0
5	15	1	28.571	15	7.515	1.996	0	0	19.08	19.08	2.54	0	0
10	10	1	25.714	10	8.272	1.209	0	0	5.76	5.76	0.70	0	0
									82.44	80.37	11.65	2.07	2.30

Pana la temperatura exterioara in zona -5°C pompa de caldura are capacitatea de a acoperi necesarul de caldura al consumatorului, urmand ca la temperaturi mai scazute sa intervina si centrala termica pentru completarea surplusului de putere termica care lucreaza cu un randament de 90%. Se observa ca se poate vorbi de un coeficient de performanta glogal anual - SPF, valoarea acestuia fiind 5,91. Stabilirea lui s-a facut raportand energia totala anuala necesara la consumator la energia electrica si termica anuala utilizata. Energia utilizata la nivelul cladirii este in marea majoritate energie electrica (83,5%) si doar in mica masura energie termica (16,5%). O imagine mai clara o putem obtine grafic din figurile 5 si 6.

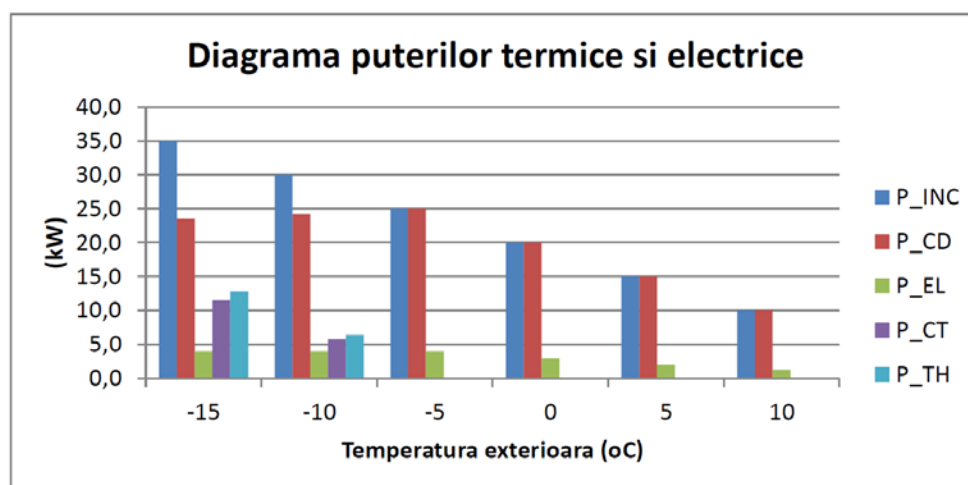


Fig. 5

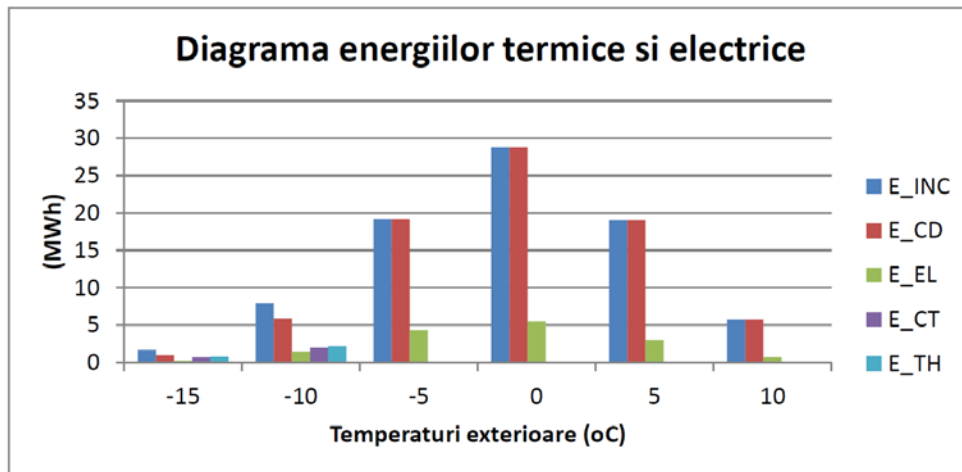


Fig. 6

Al doilea caz analizat a fost cel al utilizarii unei pompe de caldura tip aer-apa in care temperatura sursei reci este temperatura aerului exterior, variabila pe parcursul sezonului rece. In tabelul 3 se prezinta rezultatele obtinute. Primele 2 linii corespunzatoare temperaturilor exterioare -15°C si -10°C se asociaza cu acoperirea energetica partial de pompa de caldura si partial de centrala termica care lucreaza cu un randament de 90%, iar urmatoarele 4 linii corespunzatoare temperaturilor exterioare -5°C , 0°C , $+5^{\circ}\text{C}$, $+10^{\circ}\text{C}$ se asociaza cu acoperirea energetica integral de pompa de caldura. La fel ca in situatia anterioara evaluarea acoperiri energetice realizate de pompa de caldura in domeniul temperaturilor exterioare reprezentate prin mediile de -10°C si -15°C , s-a considerat ca motorul compresorului pompei nu poate absorbi din retea electrica o putere mai mare decat cea nominala (corespunzatoare zonei de temperaturi exterioare reprezentate de media de -5°C , pentru care dupa cum se vede din tabelul 3 este in valoare de 5634 W. Temperatura medie a agentului termic incalzit de catre condensatorul pompei de caldura se mentine pe valoarea de cca. $35,5^{\circ}\text{C}$. Puterea livrata la condensatorul pompei de caldura la temperaturi exterioare de -10°C si -15°C scade fata de valoarea corespunzatoare temperaturii exterioare de -5°C datorita scaderii temperaturii aerului exterior.

Tabel 3

t_e	P_{INC}	G_{AE}	θ_{CD}	P_{CD}	COP_{CD}	P_{EL}	P_{CT}	P_{TH}	E_{INC}	E_{CD}	E_{EL}	E_{CT}	E_{TH}
$^{\circ}\text{C}$	kW		$^{\circ}\text{C}$	kW		kW	kW	kW	MWh	MWh	MWh	MWh	MWh
-15	35	0.581	35.814	20.35	3.614	5.634	14.65	16.278	1.68	0.98	0.27	0.70	0.78
-10	30	0.749	34.989	22.46	3.986	5.634	7.54	8.378	7.92	5.93	1.49	1.99	2.21
-5	25	1	34.286	25	4.437	5.634	0	0	19.2	19.20	4.33	0	0
0	20	1	31.429	20	5.231	3.823	0	0	28.8	28.80	5.51	0	0
5	15	1	28.571	15	6.395	2.345	0	0	19.08	19.08	2.98	0	0
10	10	1	25.714	10	8.272	1.209	0	0	5.76	5.76	0.70	0	0
									82.44	79.75	15.27	2.69	2.99

La fel ca in cazul anterior, pana la temperatura exterioara in zona -5°C pompa de caldura are capacitatea de a acoperi necesarul de caldura al consumatorului, urmand ca la temperaturi mai scazute sa intervina si centrala termica pentru completarea surplusului de putere termica. Pompa de caldura lucreaza inasa cu un COP aferent temperaturii exterioare de -5°C iar acoperirea surplusului de catre centrala termica facandu-se cu un randament de 90%. Se observa ca se poate vorbi de un coeficient de performanta glogal anual - SPF, valoarea acestuia fiind de data aceasta 4,51. Energia utilizata la nivelul cladirii este in majoritate energie electrica (83,6%) si doar in mica masura energie termica (16,4%). O imagine mai clara o putem obtine grafic din figurile 7 si 8.

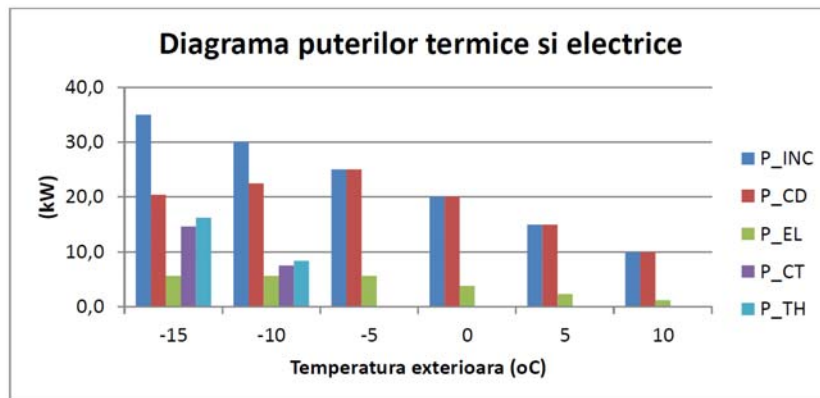


Fig. 7

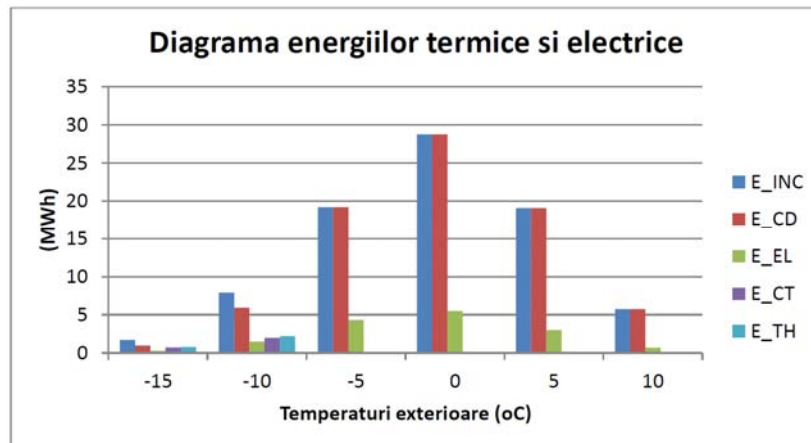


Fig. 8

4. Concluzii

O prima concluzie care rezulta dupa analiza energetica asupra celor 2 variante de utilizare a unei pompe termice tip apa-apa si tip aer-apa este ca pompa tip apa-apa conduce la performante energetice superioare 5,90 fata de 4,5 in cazul pompei de caldura tip aer-apa. Justificarea firesca, cunoscuta, rezulta din temperatura mai ridicata a sursei reci in cazul pompei de caldura de tip apa-apa fata de cazul pompei de caldura de tip aer-apa.

O a doua concluzie importanta consta in ponderea energiilor electrice si termice implicate in acoperirea necesarului energetic anual al consumatorului. In cazul utilizarii pompei de caldura tip apa-apa si chiar de tip aer-apa ponderea electric/termic este 84% / 14%, In valoare absoluta insa consumul de energie fosila este de cca. 13 MWh in cazul pompei de caldura tip apa-apa fata de 18 MWh in cazul pompei de caldura tip aer-apa.

Lista de Notatii

t_{i0} - temperatura interioara normata, °C;
 t_{e0} - temperatura exterioara de calcul, °C;
 t_{T0} - temperatura agent termic nominala la intrare, °C;
 t_{R0} - temperatura agent termic nominala la iesire, °C;
 t_e - temperatura exterioara, °C;
 t_T - temperatura agent termic la intrare, °C;
 t_R - temperatura agent termic la iesire, °C;
 t_{IN} - temperatura agentului termic realizata dupa condensatorul pompei de caldura, °C;
 θ_{CD} - temperatura medie agent incalzit la condensator, °C;
 θ_{VP} - temperatura medie agent incalzit la vaporizator, °C;
 $\Delta_{CD} = \Delta_{VP}$ - diferente medii de temperatura la condensator si vaporizator, °C;
 k - coeficient termic global instalatie incalzire, W/m².K;
 S - suprafata instalatiei de incalzire centrala, m²;
 H - capacitatea de transfer termic a cladirii incalzite, W/K;
 P_{INC} - puterea termica necesara la consumator, kW;
 P_{CD} - puterea termica livrata la condensator; kW;
 P_{VP} - puterea termica captata la vaporizator, kW;
 P_{EL} - puterea electrica absorbita de motorul compresorului, kW;
 P_{CT} - puterea termica livrata de centrala termica, kW;
 P_{TH} - puterea combustibilului utilizat de centrala termica, kW;
 E_{INC} - energia necesara aferenta consumatorului, MWh;
 E_{CD} - energia livrata de pompa de caldura, kWh;
 E_{EL} - energia livrata electric, MWh;
 E^{CT} - energia livrata de central termica, MWh;
 E_{TH} - energia aferenta combustibilului utilizat de central termica, MWh;
 η_{EL} - randamentul compresorului, - ;
 G_{AE} - gradul de acoperire energetica, - ;
 COP_{CD} - coeficientul de performanta al pompei termice, - ;

Bibliografie

1. Florin Iordache - Energetica echipamentelor si sistemelor termice din instalatii – Editura Conspreess, Bucuresti, 2010;
2. Florin Iordache – Echipamente si sisteme termice. Metode de evaluare energetica si functionala – Editura Matrixrom, Bucuresti 2017, pag. 99-110;