

Drd. Ing. Răzvan Silviu ȘTEFAN

Contribuții la eficientizarea energetică a circuitelor de alimentare cu agent termic dintr-un sistem geotermal de mare capacitate de suprafață

Teză de doctorat- rezumat

Conducător științific prof.em.dr.ing. Radu-Mircea Damian

Universitatea Tehnică de Construcții București

Domeniul Inginerie Civilă și Instalații – Hidraulică și Mecanica Fluidelor

CUVÂNT ÎNAINTE

Prezenta teză de doctorat a fost realizată în cadrul Departamentului de Hidraulică, Edilitate și Protecția Mediului din cadrul Universității Tehnice de Construcții București având la bază experiența de operare a autorului privind sistemul geotermal din cadrul Infrastructurii de Cercetare ELI-NP, premiat în anul 2022 cu Energy Globe Award la nivel național. Lucrarea tratează principiile de operare din punct de vedere cantitativ (prin modularea debitelor de agent termic), asigurând premisele de bază pentru cercetări ulterioare și din punct de vedere calitativ (prin modularea temperaturilor buclelor de agent).

Doresc să mulțumesc, în primul rând, conducătorului de doctorat, domnului prof. em. dr. ing. Radu Mircea DAMIAN pentru sprijinul științific acordat nu doar în cadrul elaborării prezentei teze de doctorat, ci de-a lungul întregii mele cariere, precum și pentru susținerea de care am beneficiat din partea domniei sale prin indicațiile cu o certă valoare științifică pe care mi le-a acordat de fiecare dată când m-am aflat în fața unei provocări tehnice pe care am întâlnit-o în viața de inginer de instalații. Totodată, îi mulțumesc pentru încrederea acordată de-a lungul colaborării universitare și, ulterior, prin preluarea sarcinii de operare a sistemului geotermal de la ELI-NP, începând cu anul 2016, perioadă în care mi-a fost mereu alături.

Adresez mulțumiri colegei mele, dna ing. Delia TINCA, pentru sprijinul acordat la elaborarea prezentei teze de doctorat, precum și de-a lungul celor șapte ani de colaborare neîntreruptă în operarea sistemului geotermal de la ELI-NP.

Îmi exprim considerația și recunoștința pentru colegul meu, dl. prof. dr. ing. Călin Alexandru UR – directorul proiectului ELI-NP, pentru oportunitatea pe care mi-a oferit-o încredințându-mi operarea acestui sistem, remarcând de fiecare dată aprecierile pozitive de care am beneficiat de-a lungul activității de operare și subliniind lipsa aprecierilor negative, chiar dacă, în anumite cazuri, probabil că se impuneau.

Mulțumiri speciale, de asemenea, membrilor comisiei de doctorat, prof. dr. ing. Ilinca NĂSTASE, prof. dr. ing. Carmen Sanda GEORGESCU, conf. dr. ing. Alexandru Nicolae DIMACHE pentru disponibilitatea și implicarea în analiza tezei de doctorat, precum și pentru indicațiile oferite, care au condus la finalizarea acesteia.

București, noiembrie 2023

Ing. Răzvan Silviu ȘTEFAN

CUPRINS

1. Introducere.....	4
1.1. Considerații generale.....	4
1.2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul sistemelor geotermale cu pompe de căldură...	5
1.3. Conținut și obiectiv	6
2. Sisteme geotermale cu pompe de căldură.....	7
2.1. Premise care au condus la utilizarea sistemelor IVC geotermale cu pompe de căldură ..	7
2.2. Sistemul geotermal IVC cu pompe de căldură. Scurtă descriere	8
3. Sisteme de reglaj automatizat a rețelelor de transport a agentului termic	9
3.1. Scurta trecere în revista a sistemelor de reglaj automatizat pentru instalațiile de încălzire, ventilare și climatizare (IVC). Istoric.....	9
3.2. Bucla de control	10
3.3. Logică de control.....	11
3.4. Factorul de amplificare și reglajul buclei	15
3.5. Mod de acțiune. Poziție.....	16
3.6. Domeniu de control. Secvențiere	16
3.7. Dispozitivul controlat. Senzori. Sisteme de control automatizat	16
3.8. Diagrame și secvențe de control.....	19
3.9. Sistemul DDC	20
4. Modelare matematică și instrumente software aplicate unui sistem geotermal de mare capacitate.....	23
4.1. Strategii de control optimal. Modelarea matematică a sistemelor IVC geotermale în vederea optimizării, studii de caz.....	23
4.1.1. Controlul optimal al sistemelor IVC.....	23
4.1.2. Efecte energetice ale reglajului automatizat în funcționarea optimizată	25
4.2. Strategie de control optimal pentru sisteme IVC geotermale, bazată pe modele. Studiu de caz: sistem IVC combinat geotermal – aer la Centrul de Cercetare a Clădirilor Sustenabile din cadrul University of Wollongong (Australia) [10].....	26
4.2.1. Scurta prezentare.....	26
4.2.2. Descrierea modelelor	28
4.2.3. Rezultate	28

4.3. Metodologie de control optimal integrat a sistemelor geotermale cu pompe de căldură apă-apă cuplate la sol. Studiu de caz: sistem experimental, instalat la „Universitat Politècnica de València” (Spania).....	29
4.3.1. Scurta prezentare [13]	29
4.3.2. Metodologia	31
4.3.3. Rezultate	34
4.4. Studiu de caz – Sistemul IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP	35
4.4.1. Prezentare a sistemului IVC geotermal care deservește infrastructura de cercetare ELI-NP	35
4.4.2. Prezentare a sistemului de reglaj automatizat – DDC	38
4.4.3. Funcționarea sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP de la darea în folosință până în prezent	39
4.4.4. Mărimile fizice și parametrii de funcționare determinate în funcționarea sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP, descrierea echipamentelor de măsură, modul de măsură.....	41
4.4.5. Indicatori de performanță.....	43
4.5. Rezultate obținute la ELI-NP. Rezultatele determinărilor experimentale- prelucrare ...	44
5. Concluzii și direcții viitoare de cercetare	52

1. Introducere

1.1. Considerații generale

Ponderea mai mare a energiei din surse regenerabile contribuie la consolidarea securității energetice a Europei și în cea mai mare parte a statelor membre sunt necesare eforturi suplimentare pentru a se garanta că energia din surse regenerabile este mai bine integrată în piață și în special pentru a asigura consecvența dintre schemele de sprijin și funcționarea piețelor energiei electrice [2]. În contextul actual, odată cu tendința globală de a trece la utilizarea surselor de energie regenerabile și aliniere la Green Deal, utilizarea energiei geotermale a devenit foarte populară.

Cadrul de reglementare actual privind eficiența energetică constă într-o serie de directive a căror revizuire fie este în curs, fie este programată.

Eficiența energetică este o prioritate strategică pentru uniunea energetică, iar UE promovează principiul „eficiența energetică pe primul loc” [3]. Cadrul de politici viitor pentru perioada de după 2030 este în curs de dezbateră.

Pentru stimularea utilizării fiecărei surse regenerabile sunt prevăzute diferite strategii.

Programul Orizont 2020 s-a desfășurat în perioada 2014-2020 și a constituit principalul instrument al UE de promovare a cercetării în domeniul energiei. **Au fost alocate fonduri în valoare de 5,9 miliarde EUR pentru a sprijini producerea unei energii curate,** sigure și eficiente, precum și dezvoltarea sustenabilă. Planul strategic european privind tehnologiile energetice (Planul SET), adoptat de Comisie la 22 noiembrie 2007, își propune să accelereze introducerea pe piață și adoptarea unui sistem energetic neutru din punct de vedere climatic prin adoptarea unor tehnologii cu emisii reduse de CO₂.

Acesta identifică zece acțiuni pentru cercetare și inovare (**tehnologiile regenerabile, reducerea costurilor tehnologiilor, noi tehnologii și servicii pentru consumatori,** reziliența și securitatea sistemelor energetice, **noile materiale și tehnologii pentru clădiri,** eficiența energetică pentru industrie, competitivitatea în sectorul global al bateriilor și e-mobilitatea, combustibili regenerabili și bioenergia, captarea și stocarea dioxidului de carbon și securitatea nucleară), cuprinde întregul lanț al inovării, inclusiv finanțarea și cadrul de reglementare, și are o structură de guvernare generală.

Progresul tehnologic permite realizarea unor instalații IVC foarte performante, cu răspuns bun în ceea ce privește acuratețea parametrilor și a vitezei cu care aceștia sunt livrați către clădiri. Controlul automat al instalațiilor IVC permite optimizarea acestora. Scopul final este, de fapt, eficientizarea energetică și reducerea costurilor de exploatare, în condițiile livrării parametrilor de funcționare optimi.

Dacă pentru clădirile rezidențiale și pentru cele în care se desfășoară activități obișnuite performanța din punctul de vedere al asigurării parametrilor se reduce la asigurarea confortului utilizatorilor, pentru clădirile cu utilizare specifică (spitale, clădiri industriale, laboratoare) parametrii care trebuie asigurați sunt o cerință care depinde de procesele care se desfășoară în aceste clădiri. De cele mai multe ori se cere o stabilitate ridicată a parametrilor. Totodată, asigurarea parametrilor presupune consumuri energetice ridicate. Optimizarea în condițiile operării manuale este consumatoare de timp și de resurse și este greu de realizat. Sistemele de operare și control automat asigură condiții pentru optimizare. Se poate spune că optimizarea are sens în corelare cu automatizarea instalațiilor.

În contextul precizat mai sus, subiectul tezei de doctorat se înscrie în politica Uniunii Europene de utilizare a surselor regenerabile de energie și de reducere a consumurilor energetice, punând accent pe evoluțiile actuale în domeniul eficienței energetice, având în vedere în mod special obiectivele strategice ale Uniunii Europene și măsurile preconizate pentru atingerea acestora. Sistemul IVC geotermal de la ELI-NP este un sistem foarte complex, de mari dimensiuni a cărui monitorizare oferă informație cu privire la comportamentul și performanța în exploatare, permițând totodată modelarea multor procese. Printre rezultatele estimate a fi obținute ar fi identificarea efectelor energetice ale reglajului automatizat, identificarea unor metode de control optimal, dar și realizarea de predicții pe termen mediu și lung cu privire la eficiență, beneficii și costuri de operare, impact asupra mediului înconjurător.

1.2. Stadiul actual al cunoașterii în domeniul sistemelor geotermale cu pompe de căldură

În ultimii 30 de ani s-au dezvoltat foarte multe sisteme geotermale atât în Europa cât și în Statele Unite ale Americii. Sursele geotermale de energie sunt tot mai mult utilizate, atât pentru consumatorii locali, cât și în instalații de dimensiuni mari, pentru care eficiența și reducerea consumurilor de exploatare sunt elemente prioritare.

În Europa exista o preocupare constantă pentru utilizarea pe scară largă a sistemelor geotermale cu pompe de căldură, acordându-se deja un interes deosebit optimizării acestora în vederea creșterii eficienței energetice a clădirilor.

La nivelul anului 2019 cea mai utilizată tehnologie pentru exploatarea energiei geotermice este reprezentată de pompele de căldură, existând circa 2 milioane de sisteme instalate (jumătate în Suedia și Germania). Cel mai mare segment din piața energiei geotermale este reprezentat de pompele de căldură, respectiv o capacitate instalată de 22.8 GWth. Dintr-o piață totală care la nivelul anului 2016 era de 13 miliarde EUR, cu previziune de creștere la 23 miliarde de EUR la nivelul anului 2021, 57% din utilizatorii finali sunt reprezentați de sectorul rezidențial și 47% de sectorul non-rezidențial.

În România sistemele geotermale cu pompe de căldură au câștigat o oarecare popularitate abia în ultimii 10 ani, dezvoltându-se sisteme de mici dimensiuni.

La ora actuală, pe plan național, evoluția surselor geotermale este într-o continuă ascensiune dată fiind stimularea utilizării acestora prin programe naționale și internaționale. Cu toate acestea, la nivelul surselor de căldură, piața echipamentelor concentrează sursele convenționale ca principal element de piață, acest fapt datorându-se, în continuare, reținerii beneficiarilor în ceea ce privește amortizarea investiției în zona pompelor de căldură. În cazul sistemelor care folosesc energia geotermală, o componentă semnificativă din consumul energetic este consumată pentru sistemul de transport al agentului termic, energia astfel consumată fiind și una dintre principalele surse de latență în recuperarea investiției.

La momentul actual, sistemul geotermal din cadrul Infrastructurii de Cercetare ELI-NP reprezintă un pionierat la nivelul echipării cu sisteme termotehnice din surse non-convenționale utilizate pentru a furniza agent termic într-o infrastructura de cercetare atât prin prisma lungimii buclei geotermale închise (138 km de conductă) cât și prin constrângerile de proiectare impuse de necesitatea climatizării unor încăperi de mari dimensiuni, cu atmosfera strict controlată.

Soluția adoptată la ELI-NP, impusă de cerințele speciale ale proiectului a condus la un salt în ceea ce privește dezvoltarea domeniului în țara noastră. Deși sistemul este realizat să răspundă nevoilor unei infrastructuri de cercetare științifică de vârf, acesta are potențial foarte mare de replicare, cu atât mai mult cu cât România va trebui să se alinieze tendințelor actuale de utilizare pe scara largă a energiilor regenerabile și a reducerii emisiilor de dioxid carbon.

1.3. Conținut și obiectiv

Programul de cercetare doctorală, în ansamblul său, are ca obiectiv principal optimizarea funcțional – energetică a sistemelor IVC geotermale de mare capacitate prin achiziția și valorificarea datelor disponibile ca urmare a monitorizării în exploatare a sistemului IVC unic de la ELI-NP, aflat în exploatare.

Lucrarea de cercetare elaborată în cadrul tezei de doctorat își propune să realizeze modelare matematică pentru sistemele IVC geotermale de mare capacitate, să identifice care dintre instrumentele software existente sunt cele mai adecvate pentru realizarea unor modele utile / relevante pentru optimizarea funcționării acestor sisteme și deschiderea către noi soluții de proiectare. Pentru atingerea acestor obiective, construirea și punerea în exploatare a sistemului IVC geotermal de la ELI-NP oferă o oportunitate unică.

Strict pentru cazul ELI-NP, modelarea matematică va urmări realizarea, în final, a unei scheme optime de distribuție a agentului termic care să permită o exploatare judicioasă a elementelor de transport, cu furnizarea parametrilor necesari la punctele de consum, dar și realizarea de predicții pe termen mediu și lung cu privire la eficiență, beneficii și costuri de operare, impact asupra mediului înconjurător.

Studiul va urmări, în același timp, și posibilitatea de a realiza un model valid pentru orice sistem IVC geotermal de mare capacitate, probând practic potențialul de replicare teoretic pe care îl are sistemul IVC geotermal ELI-NP.

Proiectul de cercetare propus urmărește stabilirea unor regimuri de funcționare pentru sistemul de distribuție al agentului termic, ce folosește ca sursă primară un sistem geotermal de foraje de suprafață (125 m). Scopul final este optimizarea consumurilor de energie electrică pe sistemul de pompare.

Obiectivele generale ale lucrării sunt cele legate de eficientizarea funcționării balansate a câmpului de foraje precum și a instalațiilor de transport prin pompare a agentului termic în întreg sistemul de distribuție. De asemenea, pentru conformarea la cerințele funcționale ale sistemelor de transport pentru agentul termic precum și pentru asigurarea parametrilor de confort și tehnologici necesari, se va avea în vedere utilizarea unor grafice de funcționare în acord cu instalațiile respective ce sunt deservite de către respectivul sistem de transport.

Obiectivele specifice ale proiectului sunt cele legate de obținerea unor parametrii de comandă și control pentru sistemul geotermal respectiv, astfel încât să fie permisă modularitatea funcționării sistemelor respective în condiții de eficientizare energetică. Pentru a atinge aceste obiective, lucrarea va cuprinde trei componente: modelarea numerică a câmpurilor de parametrii pentru obținerea unor strategii de comandă și control adecvate, simularea fizică a diferitelor regimuri de funcționare și realizarea unei strategii de exploatare în acord cu premisele de optimizare obținute pe baza celor două componente anterior stabilite.

Prezenta propunere are la baza necesitatea gestionarii eficiente energetic a unui sistem termohidraulic de mare capacitate având la bază resursa geotermală. În forma sa actuală, circuitul hidraulic respectiv este utilizat la aproximativ 90% din capacitate și generează cheltuieli de exploatare semnificative cauzate, în principal, de transportul agentului termic în întreaga rețea a obiectivului.

Provocarea majoră a acestui tip de sisteme de transport de agent termic este necesitatea de a furniza, simultan, agent termic de răcire în scopul de a satisface necesarul de răcire tehnologica dar și agent termic de încălzire pentru necesitățile de confort zonal ale diferitelor spații din cadrul facilității ELI-NP. Astfel, soluția implementată la ora actuală presupune funcționarea tuturor câmpurilor de foraj geotermal și utilizarea unui grafic de secvențiere hidraulică și termică a diferitelor bucle pentru a încălca în mod cât mai uniform pământul din punct de vedere termic. Aceasta schema asigură o funcționare coerentă din punctul de vedere al furnizării parametrilor hidraulici și termici, dar generează un cost crescut al exploatarei prin utilizarea unei energii de pompare semnificativă. În baza studiilor realizate pe alte sisteme geotermale de capacitate mai mică *realizarea unei scheme de reglaj care să țină cont atât de necesitatea conservării potențialului termic al solului cât și de gestionarea eficientă a resurselor este un deziderat fără de care orice calcul de eficiență energetică este discutabil.*

Abordarea subiectelor ce fac obiectul cercetării doctorale începe cu o prezentare succintă, în Capitolul 2 al lucrării, a sistemelor geotermale cu pompe de căldură pentru ca următorul capitol să fie dedicat unei sinteze documentare privind evoluția sistemelor de control automat și stadiul de dezvoltare al acestora în prezent, cu accent pe sistemul Digital Direct Control (DDC). Capitolul 4 al lucrării este dedicat investigării stadiului actual al modelării matematice realizate până în prezent pentru sisteme geotermale IVC în vederea optimizării, cu scopul de a determina în ce măsură aceste modele pot fi extinse pentru un sistem de mari dimensiuni, având în vedere faptul că sistemul IVC geotermal ELI-NP, deja funcțional la 90% din capacitate, permite comparații ale datelor reale cu modele matematice, inclusiv cu cele ce urmează a se realiza ulterior, precum și validarea acestora. Astfel, sunt prezentate modele și studii de caz realizate până în prezent pentru sisteme geotermale IVC, identificate în literatura de specialitate, pentru ca mai apoi să fie prezentat studiul de caz ELI-NP și modul în care s-a abordat practic studiul efectelor energetice în cazul sistemelor automate, în vederea atingerii scopului final al cercetării doctorale, respectiv eficientizarea energetică a sistemelor IVC geotermale de mare capacitate. Capitolul prezintă atât direcțiile viitoare ale cercetării experimentale, precum și rezultatele obținute până în prezent, în cadrul lucrării doctorale.

2. Sisteme geotermale cu pompe de căldură

2.1. Premise care au condus la utilizarea sistemelor IVC geotermale cu pompe de căldură

Utilizarea sistemelor geotermale cu pompe de căldură (denumite și sisteme GeoExchange), ca sursă alternativă de energie de încălzire și răcire a spațiilor, a devenit în ultimele decenii de mare interes.

Evenimentele meteorologice extreme, lipsa apei și alte consecințe ale schimbărilor climatice au provocat și au compromis infrastructura energetică din întreaga lume. Consumul crescut de energie amenință longevitatea unei surse de energie și sunt necesare reduceri

semnificative ale consumului colectiv de energie pentru a atenua efectele continue ale unui climat în încălzire [4].

În Uniunea Europeană în mod specific, **clădirile sunt responsabile pentru aproximativ 40% din consumul de energie și 36% din emisiile de dioxid de carbon**. Deoarece aproape trei sferturi din clădirile sale sunt considerate inefficiente din punct de vedere energetic, UE și-a actualizat recent Directiva privind performanța energetică a clădirilor pentru a impune ca toate clădirile nou construite, începând cu anul 2021, să fie clădiri cu consum de energie aproape zero (Nearly zero-energy buildings, Nzeb).

Pompa de căldură cuplată la sol obține aproximativ trei sferturi din energia necesară pentru încălzire/răcire din sol, iar pentru restul utilizează curentul electric ca energie de acționare. Această pompă de căldură oferă posibilitatea utilizării căldurii ecologice (energie solară acumulată în sol) pentru o încălzire economică și ecologică.

Sistemele geotermale cu pompe de căldură reprezintă una dintre cele trei categorii de resurse de energie geotermală conform definiției date de ASHRAE (1995). Aplicațiile sistemelor geotermale cu pompe de căldură sunt deosebite de celelalte prin faptul că operează la temperaturi relativ scăzute.

Termenul „sistem geotermal cu pompă de căldură” a devenit un termen generic pentru toate sistemele care utilizează ca sursă de căldură/energie pământul, apa freatică sau apa de suprafață.

În prezenta lucrare **se va face referire numai la sistemele cu pompe de căldură apă-apă cuplate la un schimbător de căldură geotermal cu foraje verticale echipate cu țevi în formă de U**, având în vedere că sistemul de la ELI-NP se încadrează în această categorie.

2.2. Sistemul geotermal IVC cu pompe de căldură. Scurtă descriere

Sistemul geotermal cu pompă de căldură consta în trei bucle (vezi Figura 1 Schema de funcționare a sistemului geotermal cu pompa de căldură [5]).

Prima buclă este „bucula de sarcina termică” (I) și în funcție de aplicație este fie o buclă aer/apă, fie o buclă apă/apă.

A doua buclă (II) este bucla de agent frigorific din interiorul pompei de căldură. Termodinamic, nu există nicio diferență între ciclul de refrigerare prin compresie de vapori și ciclul pompei de căldură; ambele sisteme absorb căldura la un nivel de temperatură scăzut pe care o eliberează la un nivel de temperatură mai ridicat. Cel mult diferența între cele două sisteme o reprezintă faptul că o aplicație pentru răcire implică numai efectul produs la nivelul evaporatorului în vreme ce pompa de căldură poate valorifica atât efectul de răcire produs la nivelul evaporatorului cât și efectul de încălzire produs la nivelul condensatorului.

A treia buclă (III) este cea de schimb de căldură cu pământul, realizat prin intermediul unui agent termic (apă sau o soluție frigorifică). În general eficiența pompelor de căldură utilizate în sisteme geotermale este mai ridicată decât a sistemelor convenționale aer-aer. Se pot obține coeficienți de performanță mai buni în cazul sistemelor geotermale datorită faptului că prin comparație cu temperatura aerului, temperatura solului este relativ constantă, începând de la anumite adâncimi. În plus căldura este absorbită și cedată prin intermediul apei, care este un mediu de transfer termic mai bun [5].

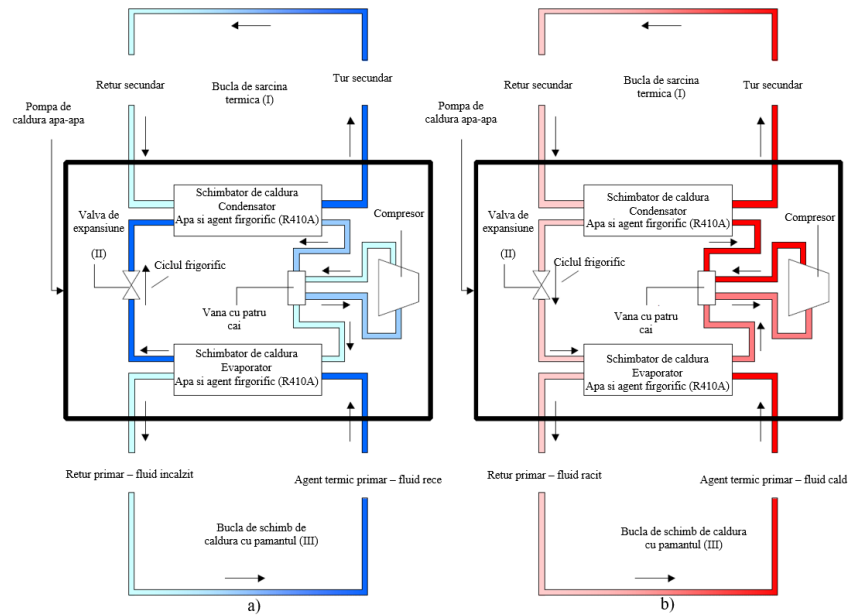


Figura 1 Schema de funcționare a sistemului geotermal cu pompa de căldură
(a) ciclul de răcire și (b) ciclul de încălzire

3. Sisteme de reglaj automatizat a rețelelor de transport a agentului termic

3.1. Scurta trecere în revistă a sistemelor de reglaj automatizat pentru instalațiile de încălzire, ventilare și climatizare (IVC). Istoric

Acest capitol prezintă o sinteză a sistemelor de reglaj automat și evoluția acestora în timp, cu accent pe sistemele de reglaj automat utilizate pentru instalațiile de încălzire, ventilare și climatizare (IVC). În esență capitolul încearcă să răspundă problematichilor sintetizate în schema de mai jos.



Sistemele moderne de control pot gestiona consumul de energie al sistemelor IVC, asigurând funcțiunile instalației IVC la cel mai bun nivel de eficiență energetică.

Siguranța este o altă funcție importantă pe care sistemele automate de control o conferă instalațiilor IVC. Pe de o parte acestea contribuie la protejarea siguranței și sănătății ocupanților, dar și la protecția echipamentelor și a dispozitivelor din componența instalației IVC. Sistemele de control pot, spre exemplu, limita temperaturile ridicate și scăzute (supraîncălzire, îngheț), presiunile înalte și joase sau pot asigura protecție la supracurent / suprasarcină.

Evoluția în timp a sistemelor de control a fost marcată de următoarele cinci categorii principale de sisteme [6], cele mai multe din sistemele disponibile în prezent fiind combinații ale acestora:

- Sisteme de control acționate de procesul controlat
- Sisteme de control electrice
- Sisteme de control pneumatice
- Sisteme de control analogice (electronice)
- Sisteme de control digitale

3.2. Bucla de control

Figura 2 prezintă schematic schimbul de informație care are loc într-o buclă de control, precum și componentele unei bucle de control tipice pentru sistemele IVC, succesiunea de acțiuni desfășurate într-o buclă de control IVC fiind prezentată succint în Tabelul 1.

Componentele / elementele conectate între ele stau la baza oricărei bucle de control. Se numește buclă de control deoarece informațiile circulă în cerc de la senzor, care măsoară variabila controlată, la controler, care compară valoarea curentă a variabilei cu valoarea de referință. Controlerul ia o decizie de control și o transmite către dispozitivul controlat / elementul de execuție și către echipamentul de proces care modifică valoarea curentă a variabilei controlate, cu scopul de a o apropia de valoarea de referință. Toate buclele de control includ aceste elemente esențiale.

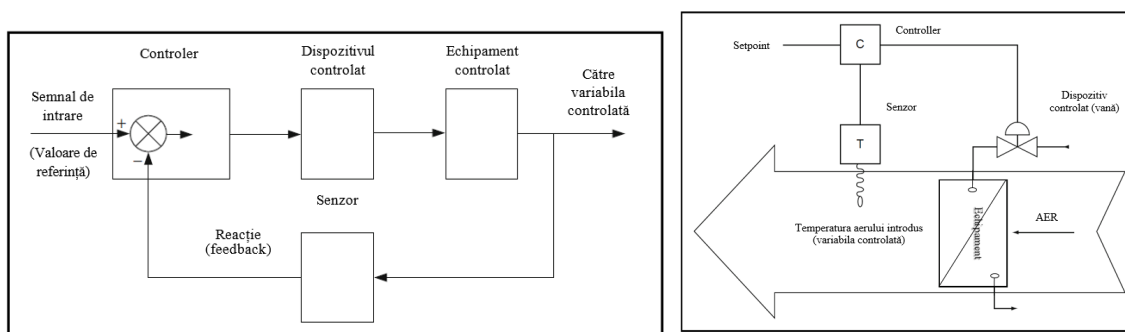


Figura 2. Schimb de informație într-o buclă de control, Buclă de control tipică pentru instalațiile IVC [6]

Tabel 1. Buclă de control tipică pentru sisteme IVC [6]

Element	Descriere element (dispozitiv sau mărime)	Funcția îndeplinită - Definiție
Controler	Dispozitiv care transmite semnalul către vană	Dispozitivul care furnizează semnal / informație către dispozitivul controlat, urmare reacției senzorului
Senzor	Senzor de temperatura	Dispozitivul care măsoară valoarea curentă a variabilei controlate

Dispozitivul controlat / comandat (elementul de execuție)	Vana	Dispozitivul care acționează echipamentul de proces în urma semnalului primit / informației primite de la controler
Variabila controlată	Temperatura aerului furnizat	Mărimea fizică înregistrată de senzor
Echipamentul de proces	Echipamentul	Echipamentul care produce modificarea valorii variabilei controlate
Date de intrare – Valoarea de referință (setpoint)	Valoarea dorită a temperaturii aerului furnizat în încăpere	Valoare de referință, la care se raportează variabila controlată

3.3. Logică de control

Scopul unui controler într-o buclă închisă este de a menține variabila controlată la valoarea de referință dorită. Toate controlerele sunt proiectate astfel încât să acționeze printr-un semnal de ieșire asupra dispozitivului controlat / comandat. Semnalul de ieșire este o funcție de semnalul eroare. Eroarea reprezintă diferența dintre valoarea de referință și valoarea curentă a variabilei controlate. Acțiunea pe care o realizează controlerul în vederea îndeplinirii scopului său se numește mod de control (sau logică de control). Există trei categorii de logică /moduri de control:

- control cu doua poziții
- control flotant
- control modulant

În aplicațiile reale există defazaj (întârziere) între momentul acțiunii controlerului și răspunsului senzorilor.

Efectul tuturor acestor întârzieri se numește constanta de timp a sistemului de control. Dacă constanta de timp are o valoare mare, sistemul va executa lent modificările dispozitivelor controlate (elementelor de execuție), iar dacă aceasta are o valoare mică sistemul va avea o reacție rapidă la schimbările de stare ale dispozitivelor controlate (elementelor de execuție) și echipamentului de proces.

Factorul de amplificare al sistemului descrie relația dintre valoarea semnalului de intrare și valoarea semnalului de ieșire, iar factorul de amplificare al controlerului reprezintă capacitatea de răspuns a acestuia în raport cu deviația semnalului de ieșire față de semnalul de intrare (de a acționa la un anumit punct sub sau peste valoarea de referință).

Tabel 2. Dependența între factorul de amplificare al controlerului și starea dispozitivului controlat [6]

Setare controler	Factor de amplificare	Acțiune
Deschide vana de la zero la 100% la o schimbare a variabilei controlate cu 1°C	Ridicat	O schimbare mică a variabilei măsurate generează o schimbare mare a rezultatului. 1°C indică controler-ului să ceară deschiderea completă (100%) a vanei.
Deschide vana de la zero la 100% la o schimbare a variabilei controlate cu 5°C	Scăzut	Pentru a realiza o schimbare semnificativă a rezultatului este necesară o schimbare mare a variabilei măsurate. 1°C indică controler-ului să ceară deschiderea la 20% a vanei.

Factorul de amplificare al sistemului este influențat și de capacitatea de răspuns / performanța dispozitivului controlat. Dacă rezultatul dorit la ieșire este obținut la deschiderea maximă a dispozitivului controlat (deschiderea completă a dispozitivului conduce la îndeplinirea cerinței), factorul de amplificare al controlerului este același cu factorul de amplificare al sistemului. Dacă rezultatul dorit, este obținut atunci când dispozitivul controlat este jumătate deschis, capacitatea sistemului de control este de două ori mai mare decât este necesar. Astfel,

factorul de amplificare al sistemului este funcție de factorul de amplificare al controlerului și descrie ce capacitate are sistemul de control la diferite încărcări (deschideri ale dispozitivului controlat).

a. Controlul cu două poziții

Controlul cu două poziții este cea mai simplă logică de control și se aplică sistemelor care au doar două stări – ON / OFF (Pornit / Oprit). Sistemele care au numai două stări de funcționare (Pornit – Oprit) folosesc aproape întotdeauna controlul cu două poziții. Este utilizat pentru instalațiile IVC de dimensiuni mici din locuințe. [6]

Figura 3 prezintă acțiunea unui control cu două poziții pentru un termostat al unui sistem de încălzire, iar în Figura 4 este prezentat răspunsul controlerului dintr-o schema de control pentru

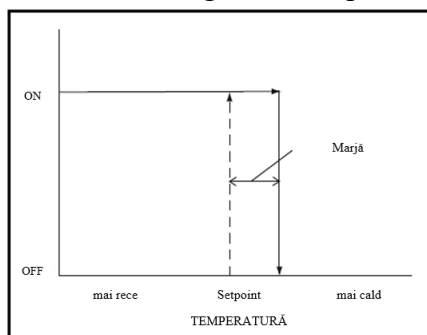


Figura 3. Control cu două poziții [6]

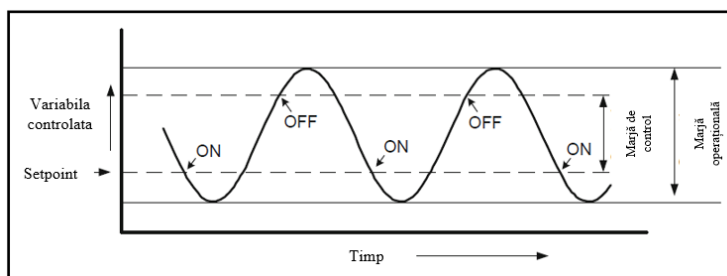


Figura 4. Răspunsul unui controler pentru aer introdus cu 50% mai rece decât Setpoint [6]

situația în care aerul introdus este mai rece cu 50% decât valoarea de referință a temperaturii.

b. Controlul flotant

Controlul flotant (numit și „control cu trei stări”) este similar cu controlul în două poziții, dar instalația pe care o controlează are mai mult de două stări. Instalația trebuie să aibă în componență un element de execuție modulant (cu închidere continuă), de obicei clapetă sau vana acționată printr-un actuator (motor) bidirecțional. Controlerul are, în această situație, trei moduri de funcționare: Deschis, Inactiv sau Închis.[6]

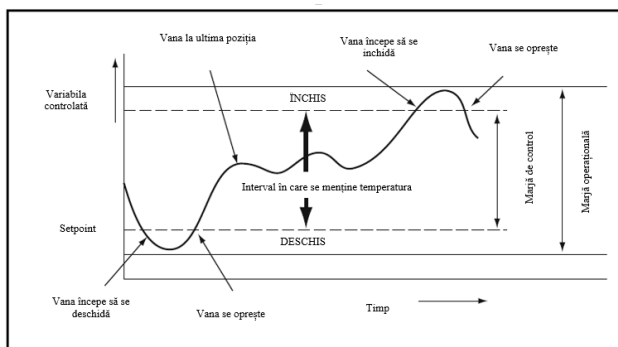


Figura 5. Control flotant [6]

b. Control modulant

Multe sisteme IVC se confruntă cu sarcini termice foarte variate, sunt dotate cu echipamente care au funcționare continuă sau aproape continuă. Precizia de a le controla se poate

îmbunătăți semnificativ prin utilizarea logicii de control modulante, prezentată în paragrafele următoare.

Având variabilă de ieșire continuă, sistemele de control modulante moderne utilizează algoritmi sofisticati, care depășesc logică de control proporțională.

Modelul matematic aproximativ pentru procesul care are loc în cazul controlului modulant este descris de ecuația:

$$V = V_0 + V_p + V_i + V_d = V_0 + K_p \cdot e + K_i \cdot \int e \, dt + K_d \cdot \frac{de}{dt} \quad (1)$$

unde,

V este ieșirea controlerului

V_0 este abaterea de reglaj, compensare

V_p , se numește termenul proporțional și este proporțional cu eroarea e , prin eroare înțelegându-se diferența dintre valoarea curentă a variabilei controlate și setpoint

V_i se numește termenul integral și este proporțional cu integrala din eroare în funcție de timp, media ponderată în timp a erorii

V_d se numește termen derivativ și este proporțional cu derivata erorii în raport cu timpul, rata de modificare a erorii

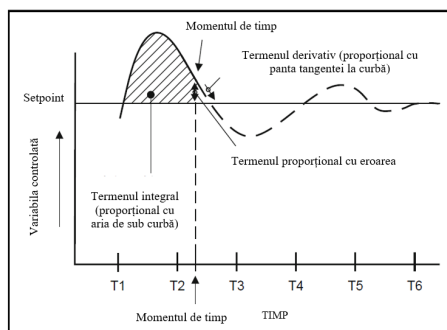


Figura 6. Control modulant [6]

Semnificația acestor termeni se poate vedea în Figura 6. Termenul proporțional variază proporțional cu eroarea și arată cât de departe este variabila controlată de valoarea de referință la momentul de timp în discuție. Termenul integral este proporțional cu media ponderată în timp a erorii (aria de sub curbă, zona hașurată din figură) și arată cât de departe și cât timp până la momentul de timp în discuție s-a situat variabila controlată față de valoarea de referință. Termenul derivativ este proporțional cu panta tangentei la grafic la momentul de timp în discuție și arată viteza cu care variabila controlată se apropie de valoarea de referință (cât de repede se apropie sau sau îndepărtează de valoarea de referință).

Dacă se elimină termenul integral și termenul derivativ din ecuația 1 se obține modelul matematic pentru *logica de control proporțională*.

$$V = V_0 + K_p \cdot e \quad (2)$$

Controlul proporțional reprezintă cea mai simplă logică de control modulant. Practic, este utilizată în toate termostatele pneumatice, majoritatea controlerelor pneumatice și majoritatea controlerelor electronice analogice. Figura 7 arată răspunsul unui sistem proporțional la pornire sau la modificarea valorii de referință.

Variabila controlată de sistem se va apropia de valoarea de referință și apoi o va depăși, din cauza întârzierilor și a defazajului termic menționate. Deviația variabilei controlate față de valoarea de referință va scădea în timp până când, la sarcini termice stabile, va fi aproximativ

constantă și sub valoarea de referință; se numește eroare/abatere/deviație sau offset (termen larg utilizat în literatura de specialitate). Caracteristica definitorie a controlului proporțional este abaterea continuă / aproximativ constantă, în condiții staționare (sarcină constantă). Controlul proporțional păstrează variabila controlată exact la valoarea de referință pentru o singură valoare a sarcinii termice; pentru toate celelalte, va exista offset. Valoarea offset-ului este o funcție de constanta K_p (factorul de amplificare proporțional al controlerului). Cu cât factorul de amplificare proporțional este mai mare, cu atât offset-ul este mai mic. Zona de proporționalitate a sistemului de control înseamnă cu cât se modifică valoarea variabilei controlate pentru a determina o cursă completă a elementului de execuție (vană), de la complet închis, la complet deschis. Minimizarea sau eliminarea offset-ului se poate realiza prin aplicarea împreună cu logica de control proporțională a logicii de control integral.

Logica de control proporțională și integrală (PI), se exprimată matematic prin următoarea ecuație:

$$V = V_0 + K_p \cdot e + K_i \cdot \int e dt \quad (3)$$

Cu cât eroarea/abaterea persistă mai mult, cu atât termenul integral devine mai mare, astfel încât efectul este, întotdeauna, de a conduce valoarea variabilei controlate către valoarea de referință și eliminarea offset-ului. Acest lucru este prezentat în Figura 8.

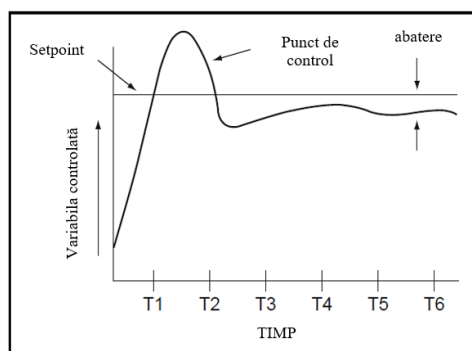


Figura 7. Control proporțional [6]

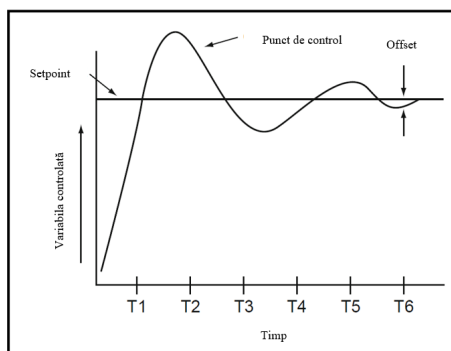


Figura 8. Control PI [6]

Senzitivitatea logicii de control este, în acest caz, funcție de factorul de amplificare proporțional K_p și factorul de amplificare integral K_i . La fel ca și în cazul controlului proporțional, controlul PI poate fi instabil dacă factorii de amplificare sunt prea mari.

Logica de control proporțional, integral, derivativă (PID) este modelată matematic de toți cei trei termeni ai ecuației (1).

Termenul care conține derivata semnifică reducerea deviației, prin atenuarea reacției descrise de termenul integral. Controlul derivativ are un răspuns foarte rapid, ceea ce îl face foarte util în aplicații precum procesele industriale cu acțiuni rapide. Deoarece majoritatea răspunsurilor sistemului IVC sunt relativ lente, controlului derivativ nu este des utilizat în aplicațiile IVC.

Termenul diferențial poate complica procesul de reglare / control și poate conduce la instabilitate în răspunsuri. (Deși bucla de control generică, este adesea denumită buclă PID, funcția derivată este de obicei neutilizată.)

Modularea impulsurilor în lățime și modularea în durată

Un alt tip de logică de control modulant aplicată unei ieșiri de tip pornit-oprit este modularea impulsului în lățime (PWM). Ieșirea se bazează pe o serie de pași discreți, care simulează modularea reală. Ieșirea controlerului constă într-o serie de impulsuri de lățime variabilă care conduc/deplasează/comandă elementul de execuție.

Semnalul de ieșire din bucla de control (V) definește mai degrabă lățimea impulsurilor decât poziția dispozitivului controlat așa cum se întâmplă în cazul controlului modulant real. O variație a logicii PWM este modularea în durată. La fel ca și la logica PWM, ieșirea constă într-o serie de impulsuri pornit/oprit, având aceeași perioadă. Variabile în cadrul unei perioade sunt durata stării pornit/ON și durata stării oprit/OFF (duratele stărilor ON/OFF sunt diferite pentru perioade diferite).

3.4. Factorul de amplificare și reglajul buclei

Reglajul buclelor de control pentru instalații IVC se realizează diferit în funcție de aplicația pentru care este utilizat. Același controler se poate folosi pentru a controla o baterie de încălzire care deservește o cameră de hotel sau un depozit foarte mare, fiind astfel necesar reglajul acestuia în concordanță cu aplicația pentru care este utilizat.

Efectele reglajului buclei de control se pot observa în Figurile 9, 10 pentru bucle de control proporțional, proporțional-integral și proporțional-integral-derivativ cu diverși factori de amplificare, unde se poate observa răspunsul controlerului pentru diverse valori ale setpoint-ului (valorii de referință) care se modifică în pași. Așa cum rezultă din curbe, precizia și stabilitatea buclei de control poate fi optimizată prin alegerea corectă a factorului de amplificare respectiv proporțional, proporțional-integral sau proporțional-integral-derivativ. Reglajul este o acțiune complicată, care de cele mai multe ori se realizează empiric, prin încercări. Tehnica constă în ajustarea factorului de amplificare proporțional și apoi a factorului de amplificare integral pentru eliminarea offset-ului. Uzual, componenta derivativă nu este utilizată deoarece complică procesul de reglaj.

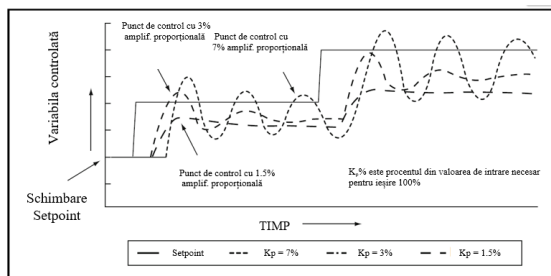


Figura 9. Control proporțional [6]

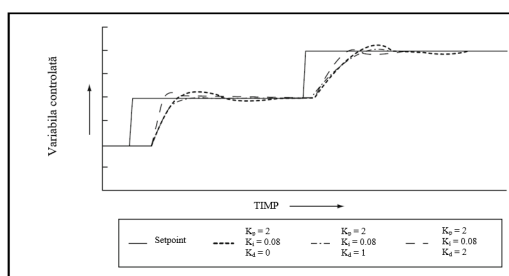


Figura 10. Control proporțional – integral [6]

Factorii de amplificare PID sunt setați inițial empiric la valori recomandate de producător sau la valori întâlnite la aplicații similare. Se va observa apoi instalația în funcționare și se va crește valoarea factorului de amplificare până la apariția oscilației. Apoi factorul de amplificare va fi redus la jumătate. Deși nu este optimă, această procedură are rezultate rezonabile. Se pot utiliza tehnici mai precise de reglare a buclei, dar procesul este complicat, dificil de realizat manual. Unele sisteme de control digital includ software care aplică aceste tehnici de reglare automat fără intervenție din partea tehnicianului.

Logica de control proporțional sau P presupune că procesele sunt liniare; funcția care descrie eroarea are aceleași caracteristici, independent de condițiile de operare. Cele mai multe

procesele reale sunt neliniare și, prin urmare, logica de control PID este dificil de configurat astfel încât eroarea să fie menținută zero în toate condițiile.

Pentru atenuarea acestei probleme, buclele de control ar putea fi auto-ajustate dinamic, adică factorii de amplificare ar putea fi ajustați automat și continuu pentru a menține precizia de control indiferent de condițiile de funcționare. Unele sisteme de control digital au această capacitate și este de așteptat să fie dezvoltate alte sisteme de control „robuste”, cu răspuns rapid, pe măsură ce se dezvoltă tehnici noi de autoreglare (self-tuning). Logica “fuzzy”, care este o alternativă relativ nouă la logica de control PID este un alt mijloc prin care se vor putea corecta neliniaritățile.

3.5. Mod de acțiune. Poziție

Controlerul poate fi cu acțiune directă sau cu acțiune inversă. Acești termeni exprimă dependența dintre sensul de variație a semnalului de ieșire al controlerului și sensul de variație a valorii variabilei controlate.

Acțiunea directă înseamnă că semnalul la ieșirea controlerului crește pe măsură ce valoarea variabilei controlate crește, iar acțiunea inversă înseamnă că semnalul la ieșirea controlerului descrește pe măsură ce valoarea variabilei controlate crește.

3.6. Domeniu de control. Secvențiere

Ieșirea dintr-o buclă de control, V în ecuațiile 1, 2, 3 poate fi scalată pentru a genera valori într-un interval dat, prin ajustarea factorilor de amplificare în raport cu eroarea. Se va exemplifica pentru situația în care se dorește ca o ieșire a buclei de control să varieze de la 0% la 100%, cu 0% corespunzând stării “complet închis” a elementului de execuție, cu bucla având acțiune directă (sau stare “complet deschis”, cu bucla având acțiune inversă) și 100% corespunzând deschiderii complete (închiderii complete pentru acțiune inversă).

Pentru ca elementul de execuție (dispozitivul controlat) să funcționeze împreună cu un controler dat este necesar ca cel puțin un interval inclus în domeniul de control al elementului de execuție să coincidă cu ieșirea controlerului. Domeniul de control este intervalul în interiorul căruia un semnal poate controla elementul de execuție. La capetele domeniului / intervalului de control, elementul de execuție este într-una din stările extreme (complet deschis sau complet închis pentru o vană sau pentru o clapetă). Mărimea intervalului de control este diferența dintre mărimea semnalelor corespunzătoare acționării elementului de execuție de la o extremă la cealaltă.

Prin alegerea corectă a elementelor de execuție, mai exact prin alegerea corectă a domeniului de control și a poziției normale, acestea pot fi secvențiate folosind un singur controler. *Secvențierea* înseamnă acționarea într-o ordine prestabilită, cu acoperirea integrală a domeniului de control a fiecărui dispozitiv dintr-o buclă de control.

3.7. Dispozitivul controlat. Senzori. Sisteme de control automatizat

Dispozitivul Controlat (Elementul de execuție)

Vanele și clapetele de reglaj sunt cele două dispozitive principale de control pentru circulația agentului termic și a aerului în instalațiile IVC. Se va realiza, în cele ce urmează, o scurtă trecere în revistă a acestor dispozitive precum și a principiului lor de funcționare.

Vana cu două și trei căi

În instalațiile IVC, vanele de control sunt utilizate în principal pentru a controla debitul apei de răcire, apei calde și a condensului. Vanele de control pot fi cu două căi (o intrare și o ieșire)

și acționează ca o rezistență hidraulică variabilă sau vane cu trei căi (două intrări și o ieșire pentru vanele de amestec / o intrare și două ieșiri pentru vanele de deviație/derivație).

În cazul vanelor de amestec cu trei căi, două fluxuri de curgere se combină într-unul singur, iar în cazul vanelor de deviație/derivație un singur flux de curgere este separat în două fluxuri. Toate cele trei configurații prezentate în figură modulează curgerea agentului termic prin bateria de răcire sau încălzire pentru a varia capacitatea/sarcina acesteia. Schema cu vană cu două căi, caz în care debitul prin rețeaua hidraulică este variabil, funcționează bine pentru instalațiile de încălzire (de obicei cu cazan). În cazul configurațiilor cu vane cu trei căi, debitul rămâne relativ constant prin bucla care conține pompa și variabil în bucla care conține bateria. Aceste scheme sunt folosite frecvent în sistemele de răcire cu apă, unde chiller-ul necesită adesea un debit constant.

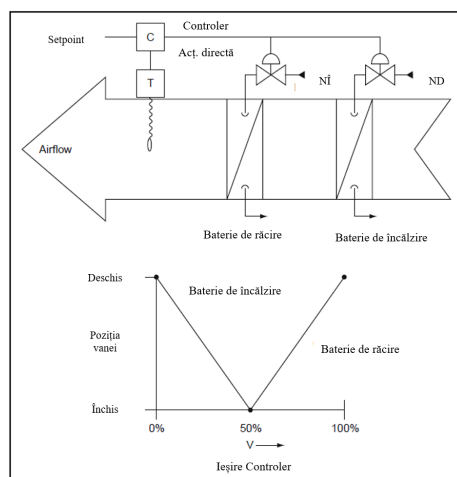


Figura 11. Secvențiere [6]

Clapete

Clapetele sunt un mijloc de control al fluxului de aer. Acestea sunt utilizate pentru a direcționa sau a modula fluxul de aer. Ele pot fi circulare, dreptunghiulare, sau ovale, potrivite cu secțiunea conductei de ventilație.

Multe dintre principiile de proiectare și selecție sunt aceleași atât pentru vane cât și pentru clapete.

Cele mai utilizate sunt clapetele dreptunghiulare, pentru aplicații IVC fiind în mod normal realizate din oțel galvanizat sau aluminiu extrudat. Aluminiul este preferat pentru clapetele de admisie a aerului exterior datorită rezistenței sale la oxidare.

Constructiv, clapetele sunt realizate din lamele care se suprapun pentru a realiza o închidere cât mai bună a clapetei, astfel încât pierderile de aer să fie minime. Pierderile de aer admise pentru clapeta standard pot fi de până la 250 l/s pe m^2 la o presiune de 250 Pa. Pierderile de aer în cazul clapetelor cu pierderi scăzute de aer sunt de până la 50 l/s pe m^2 la presiune de 1000 Pa. În aplicațiile HVAC sunt utilizate clapete de închidere cu pierdere scăzută de aer, în jur de 10 l/s pe m^2 la 250 Pa.

Există trei aplicații de bază ale clapetelor:

- Clapete cu două poziții (utilizate pentru închiderea prizelor de aer exterior, izolarea ventilatorului etc.)
- Clapete pentru controlul sarcinii (clapete pentru echilibrarea fluxurilor de aer și clapete pentru exhaustare în sisteme cu volum de aer variabil)
- Clapete pentru amestec (clapete economizoare).

Senzori

Senzorii sunt utilizați pentru măsurarea variabilei controlate. Fără măsurare, nu poate exista control. Senzori utilizați în mod obișnuit în aplicațiile IVC sunt senzorii de temperatură, umiditate relativă, presiune, nivel de dioxid de carbon (CO₂), monoxid de carbon (CO) și de viteză/debit.

Tehnologia de detecție este un domeniu în continuă schimbare. Se dezvoltă permanent dispozitive noi cu fiabilitate mai ridicată și costuri rezonabile.

Câteva din caracteristicile importante ale senzorilor sunt prezentate în cele ce urmează.

a. Acuratețea poate fi definită ca și:

- Conformitate a valorii indicate cu o valoare reală
- Grad de libertate față de eroare, adică gradul de conformitate cu realitatea sau cu o valoare stabilită print-o regulă.
- Capacitatea unui instrument de a indica valoarea reală a mărimii fizice măsurate, cantitativ

Acuratețea, așa cum este folosită pentru această definiție nu trebuie confundată cu precizia de măsurare, acuratețea exprimând “cât de adevărată este valoarea măsurată”.

b. Domeniul de măsură poate fi definit ca și:

- Diferența dintre cea mai mare și cea mai mică valoare pe care o poate măsura dispozitivul
- Intervalul dintre limitele în care o cantitate poate fi măsurată, transmisă sau înregistrată

c. Fiabilitatea poate fi definită ca și:

- Probabilitatea matematică ca un dispozitiv să-și îndeplinească adecvat scopul pentru o perioadă de timp și în condițiile de funcționare specificate.
- Probabilitatea ca un dispozitiv să funcționeze fără defecțiuni peste o anumită perioadă de timp

Fiabilitatea indică dacă un dispozitiv va continua să funcționeze (care este durata de viață a unui dispozitiv?) și în același timp indică dacă va continua să păstreze aceleași caracteristici de funcționare de-a lungul timpului.

d. Repetabilitate, precizie

- Concordanța valorilor variabilei măsurate între măsurători repetate, în aceleași condiții de măsurare.
- Concordanța între măsurători consecutive ale ieșirii, pentru aceeași valoare de intrare.

Repetabilitatea se refera la faptul ca în aceleași circumstanțe se obțin aceleași citiri.

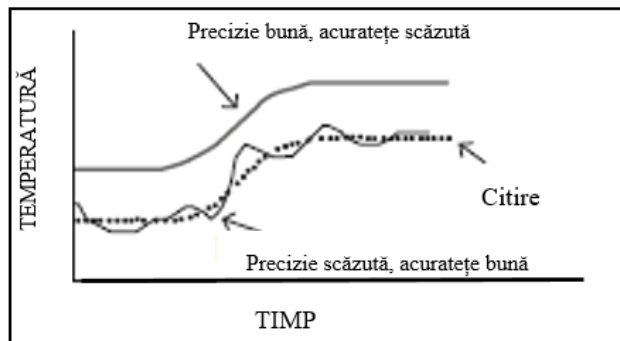


Figura 12. Acuratețe și precizie [6]

Figura 12 prezintă diferența între un senzor cu precizie ridicată și un senzor cu acuratețe ridicată.

Producătorii de senzori iau în considerare, din ce în ce mai frecvent, asigurarea interschimbabilității și interoperabilității senzorilor cu diferite sistemele de control, existând o tendință de standardizare.

3.8. Diagrame și secvențe de control

Secvența de control are rolul de a transpune fără ambiguități viziunea proiectantului asupra sistemului de control a instalației IVC.

O specificație tehnică corectă și completă va prezenta sistemul, atât la modul general, prin descrierea caracteristicilor și a performanței sale, prin parametrii pe care îi livrează, dar și o descriere detaliată a componentelor sale și modului în care acestea interacționează. („Sistemul de control asigură o temperatură de $22 \pm 1^\circ\text{C}$ ” este o specificație de performanță, în vreme ce „Sistemul se compune dintr-un senzor ... și un controler ...” este o specificație detaliată).

În continuare secvențe de control uzuale, din perspectiva inginerului proiectant de instalații IVC, pentru o înțelegere mai bună a direcțiilor de urmat pentru scrierea unei secvențe de control.

Sistem mono-zonă

Figura 13 prezintă un sistem mono-zonă cu baterii de încălzire și răcire, pentru care se va dezvolta / realiza o secvență de control.

- Identificarea elementelor de execuție (Dispozitivelor controlate):
 - Motorul ventilatorului;
 - Vana de control a apei calde;
 - Vana de control a apei răcite;
 - Clapeta introducere aer exterior.
- Variabila controlată: temperatura
- Controlerul: termostatul de camera (controler și senzor încorporate în același dispozitiv)
- Dispozitive de siguranță: un detector de fum în conducta de ventilație; detector de îngheț.

Detectorul de fum în conducta de ventilație este cerut de majoritatea standardelor, având rolul de a opri ventilatorul pentru a preveni recircularea fumului în spațiile ocupate.

Detectorul de îngheț asigură oprirea ventilatorului și/sau închiderea clapetei de introducere a aerului exterior în zonele cu climă rece pentru a preveni înghețarea bateriei. Secvența pentru sistemul descris mai sus este:

- Pornire/oprire.
 - Sistemul va porni și se va opri în baza programului prestabilit și setat pe timer-ul sistemului. (Pentru funcționarea în afara programului, poate fi prevăzut și adăugat în digramă un comutator de anulare a comenzii - „override sau bypass”)
- Controlul încălzirii/răcirii.
 - Încălzirea și răcirea trebuie controlate pentru a menține temperatura camerei la valoarea de referință. În acest scop, se setează o singură valoare de referință pe un termostat de cameră, care funcționează în logică proporțională și care modulează vane de reglare cu două căi. La solicitare de răcire, vana care comandă bateria de răcire se va deschide. La solicitare de încălzire vana care

comandă bateria de încălzire se va deschide. Când ventilatorul este oprit, vanele pentru apă de încălzire și de răcire se vor închide.

- Clapeta de introducere a aerului exterior
 - Clapeta se va deschide ori de câte ori ventilatorul este pornit și se închide când ventilatorul este oprit.

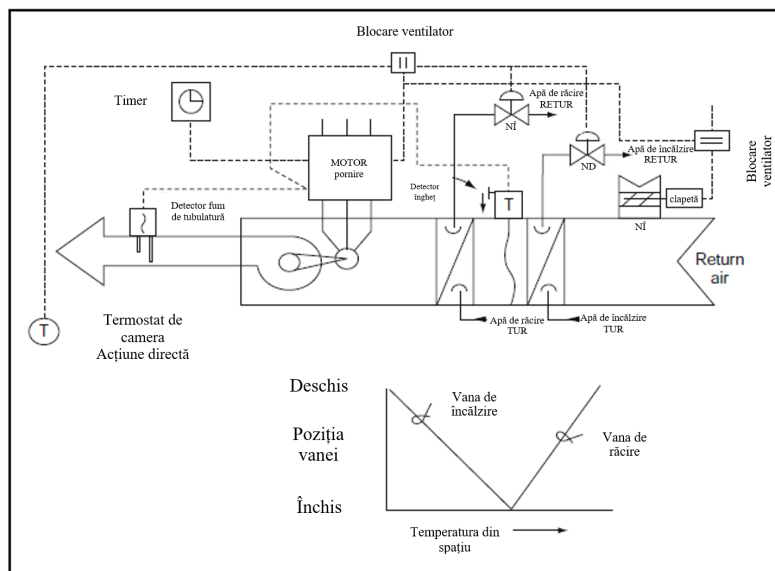


Figura 13. Sistem mono-zonă cu baterii de încălzire și răcire – Secvență de control [6]

3.9. Sistemul DDC

Descrierea sistemelor DDC

DDC înseamnă Digital Direct Control și aceste sisteme sunt sisteme de control operate de microprocesoare digitale. „Digital” are semnificația că sistemele operează prin intermediul unor serii de impulsuri, la fel ca și computerele. Figura 14 este o schemă simplă de control a unei baterii de încălzire controlată prin buclă de RESET.

Prin comparație cu schema din Figura 14, schema din Figura 15 unde aceeași cerință de control este procesată de DDC, funcțiile de control și logica aferentă sunt executate de software (program). Intrările și ieșirile sunt exact aceleași, dar sunt înglobate în logica DDC.

Cele patru tipuri principale de intrări și ieșiri dintr-un sistem de control, prezentate în termenii unui sistem DDC, sunt:

- Intrare ON/OFF (pornit/oprit). Un comutator, un releu sau alt dispozitiv se închide, închizând un circuit. Acest comportament de ON/OFF se numește tradițional „digital”. Prin urmare, în termeni DDC, intrarea se numește „intrare digitală”. Din punct de vedere tehnic, termenul „digital” nu este utilizat corect deoarece în proces nu este implicată o serie de impulsuri, există o singură acțiune de „pornit” sau „oprit”. Termenii „binar” și „intrare binară” sunt mai corecți.
- Ieșire ON/OFF (pornit/oprit). Ieșirea pornit/oprit fie furnizează alimentare / semnal, fie nu. (Indicatorul luminos este fie alimentat, „pornit”, fie nealimentat, „stins”). Este binară, similar cu intrarea ON/OFF.

- Intrarea variabilă. Este un semnal variabil, cum ar fi temperatura, umiditatea sau presiunea. Este un semnal „analogic”. În termeni DDC, se numește „intrare analogică” sau variabilă.
- Ieșire variabilă. Similar, semnalul variabil (care conduce la închiderea sau deschiderea unei vane, sau la reglarea unei clapete, de exemplu) este o ieșire variabilă.

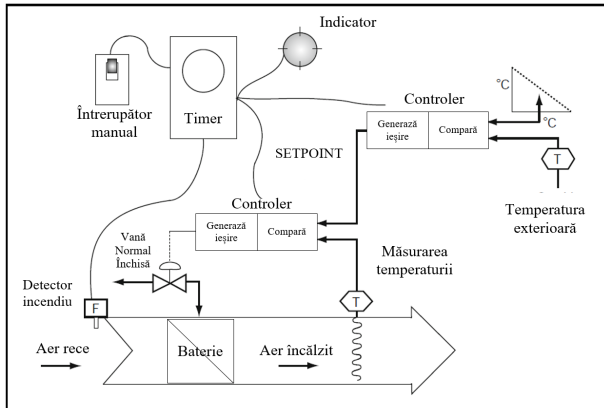


Figura 14. Diagramă de control pentru buclă de încălzire [6]

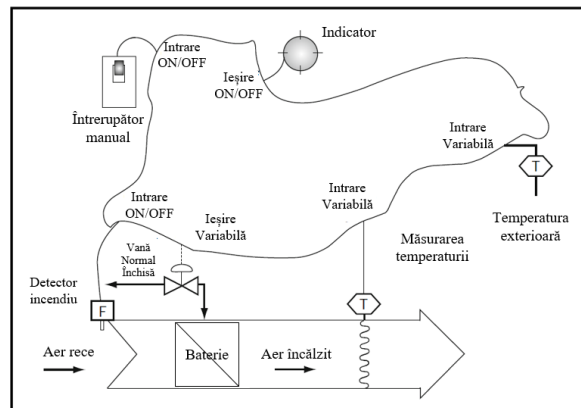


Figura 15. Intrări și ieșiri în bucla de control [6]

Componentele minime pe care trebuie să le conțină un controler DDC sunt:

- Alimentare electrică
- Placa de bază (computer / procesor) – pentru a rula software-ul de control
- Placă / Hardware pentru Intrări/Ieșiri (I/O) – pentru conversie A/D și conversie D/A
- Port de comunicații – o conexiune pentru încărcarea software-ului în procesor.

Diferențele principale între sistemele de control DDC și toate sisteme de control clasice sunt:

- Procesorul / placa computerului – toată logica de este realizată de microprocesoare
- Semnale mai degrabă digitale decât semnale analogice – ridicând probleme de precizie și sincronizare
- Portul de comunicații – oferind controlerelor posibilitatea de a comunica între ele și de a comunica cu operatorul.

Microprocesorul prelucrează informația în secvențe și nu continuu, spre deosebire de alte sisteme de control acesta este rapid, dar (încă) citește intrările discret (una câte una).

Portul de comunicații oferă posibilitatea modificărilor de la distanță a comportamentului / acțiunilor controlerului.

Pe scurt pașii pentru elaborarea unei secvențe de control sunt enumerați mai jos. Precizia și viteza de răspuns a sistemului de control depinde de claritatea logică a secvențelor control.

- Pasul 1. Întocmirea schiței sistemului. Împărțirea sistemului în subsisteme.
- Pasul 2. Identificarea elementelor controlate în fiecare subsistem și a variabilei principale a procesului
- Pasul 3. Stabilirea relației de control între variabila de proces și echipamentul controlat.
- Pasul 4. Identificarea factorilor externi care vor afecta fiecare buclă de control.
- Pasul 5. Stabilirea modului în care sunt generați factorii din Pasul 4.

-
- Pasul 6. Elaborarea logicii de control.
 - Pasul 7. Evaluarea limitelor aplicabile a momentului și modului în care urmează să fie aplicate.

Despre specificația tehnică a sistemelor DDC

La implementarea unui sistem DDC, este utilă înțelegerea clară a avantajelor, dar și a provocărilor pe care acesta le presupune. Mai jos este prezentat un set de nouă avantaje ale sistemelor DDC în conformitate cu ASHRAE GPC-13-2007 Guideline to Specifying DDC Systems (Ghid pentru specificații ale sistemelor DDC).

1. Sistemele DDC pot reduce costurile cu energia, făcând posibilă funcționarea sistemelor mecanice la randament maxim. Echipamentele pot fi programate să funcționeze numai atunci când este necesar și, prin urmare, să genereze în orice moment numai capacitatea necesară. O abordare de finețe a sistemelor DDC, (dincolo de funcționarea sistemelor de control convenționale) poate aduce economii suplimentare de energie.
2. Sistemele DDC au foarte multe funcțiuni, astfel încât pot fi utilizate în aplicații diverse, cum ar fi sisteme HVAC pentru clădiri comerciale, pentru ansambluri rezidențiale, laboratoare de cercetare, spitale, camere curate de laborator. Spre exemplu, Sistemele DDC pot cuantifica debitul de aer furnizat în fiecare zonă a unei clădiri, pot să îl compare cu nevoile de ventilație ale clădirii și apoi să varieze cantitatea de aer exterior introdus pentru a îndeplini cerințele de ventilație. Acest nivel de control nu este posibil cu sisteme de control pneumatice sau electronice.
3. Prin controlul instalațiilor IVC din clădiri, sistemele DDC asigură un control mai bun pentru construcția în sine și pentru toate sistemele aferente acesteia. Temperaturile pot fi controlate mai precis, iar anomaliile instalației pot fi identificate și corectate înainte ca acestea să devină grave.
4. Sistemele DDC pot fi utilizate pentru a controla, în afara instalației IVC și alte echipamente și instalații din clădiri (ascensoare, instalația de detecție incendiu, sistemele de securitate). Astfel, capacitatea personalului de întreținere și operare a clădiri sporește. Producătorii de sisteme de control pentru instalații IVC furnizează, în prezent, soluții integrate pentru controlul sistemelor care deservește o clădire.
5. Sistemele DDC permit utilizatorului să realizeze o programare complicată, să realizeze o bază de date cu alarme și date despre tendințe de funcționare, ceea ce conduce la mărirea capacității de identificare, localizare și stabilire a cauzelor defectelor. Operativul va cunoaște tiparul de funcționare pe termen lung a instalației. Observarea comportării sistemelor mecanice componente, în diferite condiții de încărcare, conduce la posibilitatea reglării fine pe de o parte și, pe de altă parte la posibilitatea anticipării problemelor / disfuncționalităților instalației.
6. Multe sisteme DDC oferă posibilitatea de programare grafică, ceea ce permite realizarea și păstrarea documentațiilor de construcție ale clădirii.
7. Sistemele DDC necesită mult mai puțină întreținere decât alte sisteme de control (ex. sistemul de control pneumatic). Utilizarea unui sistem DDC are ca rezultat costuri de întreținere și reparații mai reduse. De asemenea, posibilitatea de detectare automată a defecțiunilor este deosebit de valoroasă, deoarece la rândul ei conduce la scăderea semnificativă a costurilor.
8. Sistemele DDC reduc costurile cu forța de muncă prin monitorizare și depanare de la distanță. În multe cazuri, operațiunile la fața locului / on-site pot fi eliminate sau reduse. Monitorizarea se poate realiza de la distanță, de oriunde serviciul de internet este disponibil.
9. Sistemele DDC sunt dispozitive programabile. Dacă nevoile unei clădiri se schimbă, sistemul poate fi reprogramat pentru a satisface noile cerințe. Un alt avantaj major al unui sistemul

DDC pus în funcțiune este că există o definiție clară a modului în care a funcționat la momentul instalării.

4. Modelare matematică și instrumente software aplicate unui sistem geotermal de mare capacitate

4.1. Strategii de control optimal. Modelarea matematică a sistemelor IVC geotermale în vederea optimizării, studii de caz.

4.1.1. Controlul optimal al sistemelor IVC

În ultimele decenii, s-au făcut numeroase eforturi pentru proiectarea adecvată și dimensionarea optimă a sistemelor IVC geotermale. Totodată, de mai mulți ani se desfășoară activități intense de cercetare ale sistemelor IVC vizând operarea și controlul acestora cu consum de energie minim, dar cu satisfacerea condițiilor de calitate și confort a mediului din interiorul clădirilor. Strategiile de control pot fi încadrate în două categorii, de *control local* și respectiv de *control optimal*. Domeniile abordate de studiile referitoare la sistemele IVC sunt prezentate în diagrama din Figura 16. Se observa din diagramă că ponderea studiilor asociate controlului optimal este încă mică în comparație cu cercetările realizate în legătură cu controlul local al sistemelor. Acest fapt este datorat implementării mai facile a strategiilor de control local și inconvenientelor legate de dificultatea de a colecta o cantitate mare de date necesare în cazul strategiilor de control optimal.

Controlul optimal al sistemelor IVC are scopul de a determina soluția optimă (mod de operare și valori de referință, denumite și „set-points”) care minimizează cererea de energie a sistemului (implicit și costul de operare), în condițiile în care se respectă parametrii de confort interior și luând în considerare modificarea inerentă și continuă a cerințelor de mediu interioare și a condițiilor exterioare și, în unele cazuri, chiar a caracteristicilor sistemului IVC.

Cu toate acestea multe din strategiile de control optimal dezvoltate până în prezent nu au fost implementate din cauza unor impedimente constatate, cum sunt necesitatea utilizării unui aparat matematic complex, posibilitățile reduse de generalizare cauzate de constrângerile impuse de particularitățile fiecărei aplicații practice etc. În practică, operarea adecvată, cu eficiență energetică ridicată a sistemelor IVC este o temă inginerască dificilă, atât pentru proiectanți cât și în exploatarea acestora.

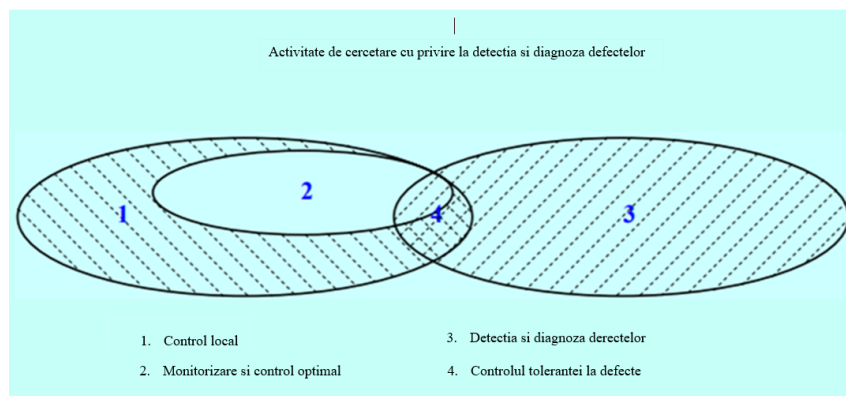


Figura 16. Studii și cercetări legate de domeniul controlului sistemelor IVC [8]

Alegerea metodei potrivite de control optimal pentru o anumită aplicație dată, respectiv pentru un anumit sistem IVC, are un rol important în dezvoltarea unei strategii de optimizare, având în vedere avantajele și limitările diferitelor metode disponibile.

Optimizarea oricărui sistem necesită studiul în detaliu al comportamentului său, printr-o analiză aprofundată a tuturor variabilelor și parametrilor implicați asupra performanței sale.

Strategiile vizează optimizarea performanței energetice a sistemului care funcționează ca un întreg, păstrând în același timp cerințele de confort interior al clădirii și nu trebuie să se concentreze pe optimizarea performanței fiecărei componente individuale a sistemului.

Totuși, pentru a optimiza performanța energetică globală a unui sistem IVC cu pompe de căldură cuplate la sol, trebuie acordată o atenție deosebită și echipamentelor auxiliare, deoarece acestea realizează o parte considerabilă din consumul total de energie.

Criterii pentru evaluarea performanței sistemelor IVC geotermale cu pompe de căldură

Indicatorii luați în considerare pentru evaluarea performanței sistemelor IVC geotermale cu pompe de căldură sunt:

- Coeficientul de performanță pentru încălzire (COP) = raportul dintre energia termică de încălzire generată și energia electrică consumată.
- Coeficientul general de performanță al sistemului (COP_{sys}) = raportul dintre energia totală transferată și energia totală consumată.
- Rata de eficiență energetică (EER) = raportul dintre energia de răcire generată (BTU) și energia electrică consumată în Watt-oră. EER este egal cu produsul dintre COP și factorul de conversie de la BTU/h la wați. (ANSI / AHRI 2008).
- Rata de eficiență energetică sezonieră (SEER) = raportul dintre energia totală sezonieră de încălzire / răcire generată pe parcursul unei perioade de utilizare (în BTU) și energia electrică consumată (în Watt-oră) în același interval de timp. Poate fi folosită pentru a determina eficiența energetică sezonieră a pompelor de căldură în timpul sezoanelor calde și rece. [9]

Astfel, s-a arătat [9] că, în comparație cu sistemele tradiționale de încălzire, sistemele IVC geotermale au avantaje considerabile în ceea ce privește coeficientul de performanță, rezultate detaliate fiind prezentate în Tabelul 7.

Tabel 3. Avantaje ale sistemelor IVC geotermale au avantaje considerabile în ceea ce privește coeficientul de performanță

Sistem IVC	Coeficient de performanță pentru încălzire (COP)
Geotermal	3-5
Aer	2.3-3.5
Sisteme electrice	1
Sistem cu gaze naturale cu eficiența medie	0.78-0.82
Sistem cu gaze natural cu eficiența ridicată	0.88-0.97

Performanța unui sistem IVC geotermal este afectată simultan de condițiile climatice, de sistemul de distribuție a agentului termic, de condițiile de încărcare a clădirii și de caracteristicile solului etc.

Pentru a înțelege mai bine conceptul de control, se ia în considerare funcționarea sistemului IVC geotermal la nivelul fiecăreia din cele trei componente ale sale, respectiv la nivelul clădirii, la nivelul pompei de căldură și la nivelul buclei la sol. [9]

În cele ce urmează vor fi tratate modele și studii de caz din literatura de specialitate pentru sisteme geotermale IVC.

4.1.2. Efecte energetice ale reglajului automatizat în funcționarea optimizată

Utilizarea unui sistem de control automatizat DDC pentru o instalație IVC complexă aduce cu sine numeroase avantaje, desigur și provocări pe măsură. Optimizarea unei instalații IVC ar trebui înțeleasă mai degrabă în conexiune directă cu un sistem de reglaj automat. Optimizarea pentru o instalație neautomatizată este consumatoare de timp și foarte greu de realizat. Resursele pe care le oferă automatizarea creează premise pentru optimizare.

Abordarea eficientizării energetice a unei instalații IVC ca identificare și valorificare a oportunităților oferite de automatizare și optimizare privitye ca întreg, în strânsă legătură, este astăzi cea mai bună opțiune pentru obținerea unor soluții sustenabile de utilizare responsabilă a resurselor. Eficientizarea este înțeleasă ca menținere a parametrilor de operare la valorile cerute, cu cel mai mic consum energetic posibil. Termenul consacrat, în prezent, pentru o astfel de abordare este operarea/ exploatarea și controlul inteligente ale clădirilor.

Astfel, ca efecte ale reglajului automatizat se precizează următoarele:

- Reducerea costurilor cu energia, automatizarea și optimizarea fac posibilă funcționarea sistemelor mecanice la randament maxim.
- Echipamentele pot fi programate să funcționeze numai atunci când este necesar și, prin urmare, vor genera în orice moment numai sarcina necesară.
- Nivel de control ridicat pentru construcția în sine și pentru toate sistemele aferente acesteia este ridicat.
- Poate asigura detectarea automată a defecțiunilor instalației IVC.
- Poate asigura control asupra acțiunilor ocupanților.
- Facilitează raportarea performanței echipamentelor și problemelor apărute în timpul exploatarei.
- Creează posibilitatea de reajustare a parametrilor odată cu schimbarea condițiilor de lucru.
- Asigură cunoașterea tiparului de funcționare pe termen lung a instalației, în diferite condiții de exploatare

-
- Interfețele grafice sofisticate ale aplicațiilor de control automat permit realizarea, păstrarea, ierarhizarea documentațiilor de construcție ale clădirii cu posibilitatea accesului facil la datele de interes.
 - Instalațiile necesită mai puțină întreținere, având ca rezultat costuri mai reduse de întreținere.
 - Face posibilă reducerea costurilor cu forța de muncă prin monitorizare și depanare de la distanță.
 - Sistemele de control automatizat moderne (mai ales cele digitale) sunt programabile; dacă nevoile unei clădiri se schimbă, sistemul poate fi reprogramat pentru a satisface noile cerințe.

4.2. Strategie de control optimal pentru sisteme IVC geotermale, bazată pe modele. Studiu de caz: sistem IVC combinat geotermal – aer la Centrul de Cercetare a Clădirilor Sustenabile din cadrul University of Wollongong (Australia) [10]

4.2.1. Scurta prezentare

Acest paragraf este dedicat unui studiu de caz în cadrul căruia se dorește dezvoltarea unei strategii de control optimal pentru sistemele IVC combinate, având ca sursă de energie solul sau aerul, care folosesc pompe de căldură.

În Figura 17 [10] este prezentată o schemă a strategiei.

Sistemul analizat este compus dintr-o pompă de căldură aer-apă și două pompe de căldură apă-apă identice utilizate pentru a acoperi cererea de încălzire / răcire a clădirilor. Cele două pompe de căldură sunt cuplate la un schimbător de căldură cu pământul alcătuit din 3 foraje verticale și 12 schimbătoare de căldură orizontale. Capacitatea pompelor de căldură apă-apă la operarea în modul “răcire” este 32.8 kW, iar la operarea în modul “încălzire” este 40.8 kW. În partea dinspre sursa termică a sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură, pentru fiecare din pompele de căldură sunt prevăzute pompe de circulație cu turație fixă, iar în bucla de schimb de căldură este prevăzută o pompă de circulație cu turație variabilă, pentru a asigura capacitatea necesară vehiculării agentului termic prin schimbătorul de căldură cu pământul. Diametrul și adâncimea fiecărui foraj sunt respectiv, 150 mm și 91 m, iar conductivitatea termică a solului este 2 W/mK, apropiată de cea identificată pentru sistemul ELI- NP.

Problema de optimizare este formulată ca strategie bazată pe modele. Cu ajutorul modelelor pentru componentele principale ale sistemului se va estima performanța acestuia pentru diferite setări. Apoi se va utiliza, ca tehnică de optimizare, o metodă de verificare exhaustivă a tuturor cazurilor în vederea identificării setărilor optime în intervalele de căutare definite.

Variabila optimizată este temperatura agentului primar la ieșirea din schimbătorul de căldură cu pământul, care poate fi utilizată ca punct de referință pentru operarea pompelor de circulație cu turație variabilă, obiectivul optimizării fiind minimizarea consumului de energie electrică, în condițiile asigurării necesarului de încălzire și răcire a clădirilor (și parametri constanți).

Eficiența strategiei este testată prin simulări. Strategia poate fi utilă pentru controlul și optimizarea oricărui tip de sistem geotermal cu pompe de căldură.

Pentru sisteme complexe se pot genera diagrame de performanță în baza acestei metode și apoi aceste digrame pot fi utilizate pentru controlul propriu zis și optimizarea sistemului.

Se pornește de la premisa că sistemul IVC geotermal utilizează în bucla de schimb de căldură cu pământul pompe de circulație cu turație variabilă pentru a modula debitul agentului termic primar. Procesul de optimizare se realizează în doi pași.

La primul pas / prima etapă, prin utilizarea de controlere secvențiale, se determină numărul de pompe de căldură necesar pentru operare, în baza cererii de încălzire/răcire a clădirii, a capacității pompelor de căldură și a constrângerilor impuse de parametrii proceselor care se desfășoară în clădire.

La al doilea pas / a doua etapa se determină combinația optimă între temperatura agentului primar la ieșirea din schimbătorul de căldură cu pământul (adică temperatura de intrare a agentului termic primar în pompa de căldură) și debitul acestuia, cu scopul de a minimiza consumul de energie electrică a pompelor de circulație și a pompelor de căldură. Pentru a obține acest lucru se abordează o tehnică bazată pe modele.

Strategia presupune realizarea de modele simplificate pentru componentele sistemului IVC implicate, respectiv pentru:

- pompele de căldură;
- pompele de circulație;
- schimbătorul de căldură cu pământul.

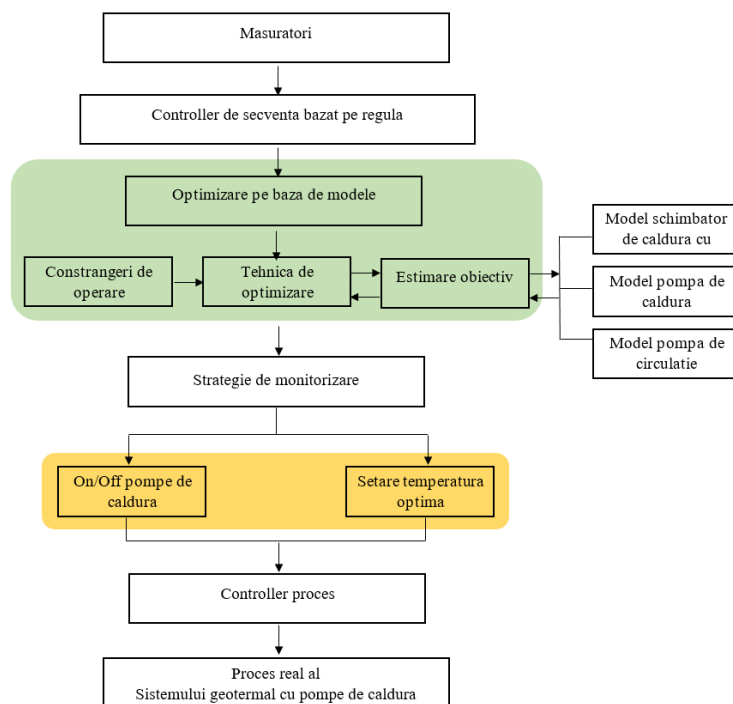


Figura 17. Schema pentru strategie de optimizare bazată pe model [10]

Scopul este de a realiza predicții asupra comportării / performanței sistemului IVC geotermal prin setarea variabilelor de optimizat la diferite valori și apoi alegerea / determinarea soluțiilor optime printr-o metodă exhaustivă de verificare.

4.2.2. Descrierea modelelor

Problema formulării unei strategii de control optimal bazată pe modele se reduce la alegerea și dezvoltarea modelelor simplificate adecvate pentru componentele principale ale sistemelor centralizate de răcire [8]. Modelarea matematică a funcționării sistemelor este numită în literatură și simulare, care implică modificări ale parametrilor și/sau condițiilor de funcționare în diferite variante de calcul.

Modelul pentru pompa de căldură apă-apă [10]

În prezentul material se abordează o metoda de interpolare / „Curve fitting Method” pentru pompa de căldură apă-apă. Modelul este descris în detaliu în lucrarea [11], unde diagrama modelului prezintă datele de intrare, condițiile de referință, coeficienții modelului și valorile de ieșire, iar în ecuațiile care descriu matematic funcționarea (atât în modul răcire cât și în modul încălzire) se raportează variabilele care influențează performanța pompei de căldură la variabile de referință.

Modelul pentru pompele de circulație

Randamentul pompei de circulație cu turație variabilă este randamentul cumulat al pompei propriu-zise, motorului electric și convertizorului de frecvență.

Comportarea pompelor de circulație, atât a celor cu turație variabilă cât și a celor cu turație fixă, a fost modelată / descrisă matematic prin aproximări polinomiale în baza datelor de performanță furnizate de producători. Înălțimea de pompare și randamentul pompelor sunt exprimate în funcție de turație și debit. În baza legilor de proporționalitate, datele de fabricație pentru înălțimea de pompare și randament se pot extrapola spre condițiile de exploatare a pompei de circulație.

Modelul pentru schimbătorul de căldură cu pământul

În general, parametrul urmărit / „de interes” la evaluarea efectelor/proceselor care au loc într-un schimbător de căldură cu pământul, alcătuit din foraje cu tuburi în ”U”, este temperatura agentului termic. Aceasta descrie comportarea sistemului IVC fiind o măsură a răspunsului acestuia. Totodată permite evaluarea impactului asupra mediului înconjurător (mai exact asupra solului și apei freactice), precum și asupra consumului de energie electrică a clădirilor.

Temperatura la peretele forajului la al n-lea moment de timp este determinată cu ajutorul funcției g (Eskilson). Variația temperaturii la nivelul peretelui forajului în funcție de timp pentru o valoare instantanee dată a conductivității solului este simulată utilizând modele numerice. Apoi se determină rezistența termică pe lungimea forajului

Din relația rezistenței termice a forajului se poate obține temperatura agentului termic la ieșirea din schimbătorul de căldură cu pământul.

4.2.3. Rezultate

Strategia propusă a fost testată și evaluată în modul „răcire”. Sistemul a fost monitorizat timp de trei zile (în condițiile meteorologice din Sydney, în perioada cu cerința de răcire a clădirii relativ scăzută. Scopul a fost de a verifica strategia în sensul de a determina răspunsul pompei de căldură apă-apă la schimbarea condițiilor de lucru (a valorii sarcinii termice). Testul a fost realizat cu o singură pompă de căldură apă-apă cuplată cu trei foraje verticale, la sarcină termică de răcire mai mică decât capacitatea de răcire nominală. A doua pompă de căldură a fost pornită atunci când

cererea de răcire a clădirii a depășit capacitatea de răcire a unei singure pompe de căldură. La momentul de timp la care cererea de răcire a clădirii a devenit mai mare decât capacitatea de răcire a celor două pompe de căldură apă-apă a fost pornita și pompa de căldură aer-apa.

În Tabelul 4 este prezentată comparația între:

- consumul energetic al pompelor de căldură apă-apă și al pompelor de circulație din bucla de schimb de căldură cu pământul a sistemului ca urmare a aplicării strategiei de optimizare propuse;
- consumul energetic al pompelor de căldură apă-apă și a pompelor de circulație din bucla de schimb de căldură cu pământul a sistemului și operarea prin control cu controler secvențial (bazată pe regulă).

Controlul cu controler secvențial s-a realizat utilizând două stări, corespunzătoare a două setări pentru frecvența de operare a pompelor de circulație cu turație variabilă / convertizoarelor de frecvență. Pentru funcționarea unei singure pompe de căldură frecvența a fost setată la 25Hz. Altfel, frecvența a fost setată la 50 Hz.

Tabel 4. Comparație între consumul de energie al pompelor de circulație înainte și după aplicarea strategiei de optimizare

Strategia de control	Consum energie pompe de căldură apă-apă (kWh)	Consum energie pompe de circulație (kWh)	Consum total de energie (kWh)	Diferență / economie (%)
Control cu controler secvențial	230	60.6	290.6	-
Strategia de optimizare propusă	236.2	42.3	278.5	4.2%

4.3. Metodologie de control optimal integrat a sistemelor geotermale cu pompe de căldură apă-apă cuplate la sol. Studiu de caz: sistem experimental, instalat la „Universitat Politècnica de València” (Spania)

În cele ce urmează s-a realizat o documentare cu privire la o succesiune de cercetări experimentale realizate cu scopul elaborării unei metodologii de control optimal a sistemelor geotermale cu pompe de căldură apă-apă cuplate la sol, în vederea eficientizării energetice cu respectarea cerințelor de confort interior ale clădirii. Într-o primă etapă s-a realizat o metodologie de optimizare pentru pompele de circulație, apoi s-a analizat metodologia propusă în cazul funcționării împreună cu pompe de căldură cu mai multe compresoare și ulterior s-a realizat o îmbunătățire a metodei în vederea îmbunătățirii microclimatului interior.

Rezultatele experimentale din prezentul studiu de caz, pentru o perioadă de funcționare de un an, demonstrează că se pot realiza economii importante de energie, până la 35% pentru sezonul de vară și 53% pentru sezonul de iarnă [13].

4.3.1. Scurta prezentare [13]

Sistemul experimental prezentat deservește spațiile din clădirea ocupată de “Department of Applied Thermodynamics”, având o suprafață totală de aproximativ 250 m². Clădirea este compartimentată în nouă birouri, un coridor, o sală de calculatoare și o sală de servicii cu echipamente de birou. În fiecare din birouri există câte un ventilconvector. Coridorul nu este climatizat, iar sala calculatoarelor este deservită de două ventilconvectoroare.

Fiecare ventilconvector poate fi reglat individual prin intermediul unui termostat, temperatura și treapta de viteză a ventilatorului pot fi selectate manual de către utilizator. Controlul pentru fiecare

ventiloconvector este realizat printr-o vană cu trei căi, care permite modularea agentului termic de încălzire / răcire, controlată cu termostatul din încăpere. Ventiloconvectoarele sunt alimentate de o pompă de căldură apă-apă, reversibilă, cuplata la un schimbător de căldură cu pământul. Pompa de căldură apă-apă folosește R410A ca agent frigorific și lucrează în contracurent.

Sistemul este prezentat schematic în Figura 18,

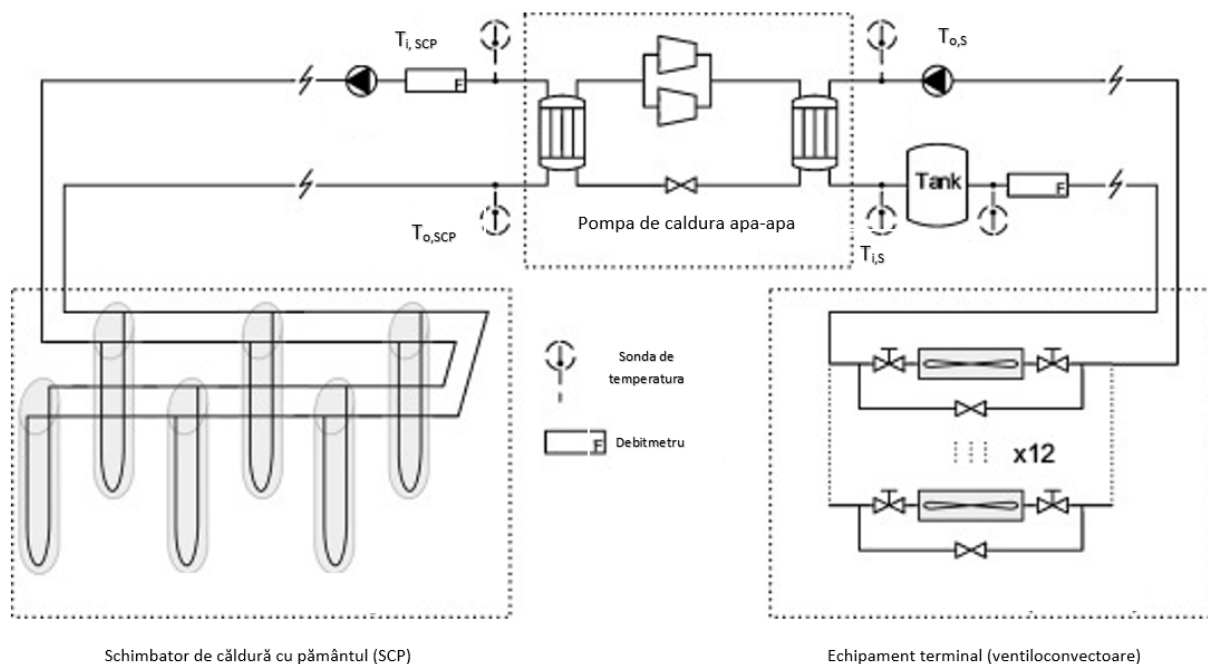


Figura 18. Sistemul geotermal de la Universitat Politècnica de València [14]

unde ($^{\circ}\text{C}$): $T_{o,S}$ – temperatura la ieșirea din bucla de sarcină; $T_{i,S}$ – temperatura la intrarea în bucla de sarcină; $T_{o,SCP}$ – temperatura la ieșirea din bucla de schimb de căldură cu pământul; $T_{i,SCP}$ – temperatura la intrarea în bucla de schimb de căldură cu pământul.

Capacitatea nominală de încălzire este de 18 kW (retur clădire 35°C / retur schimbător de căldură cu pământul 17°C), respectiv de răcire de 15,4 kW (retur clădire 14°C / retur schimbător de căldură cu pământul 25°C). Pompa de căldură are două compresoare „scroll”, de aceeași capacitate, care lucrează în tandem, pentru a adapta mai bine sistemul la sarcina termică a clădirii. Schimbătorul de căldură cu pământul este alcătuit din șase foraje având 50 m adâncime fiecare. Atât bucla de sarcină termică cât și bucla de schimb de căldură cu pământul conțin câte o pompa de circulație având debitul masic și puterea electrică cu valori nominale de 3180 kg/h și 0,63kW (la 50 Hz), respectiv 2560 kg/h și 0,36 kW (la 50 Hz). Pompa de circulație din bucla de sarcină lucrează continuu, iar pompa de circulație din bucla de schimb de căldură cu pământul lucrează numai atunci când cel puțin unul din compresoarele pompei de căldură lucrează. Debitul în ambele bucle poate fi variat cu două convertizoare de frecvență.

Sistemul funcționează de la 7 am la 10 pm pe parcursul a 5 zile pe săptămână iar parametrii monitorizați printr-o rețea de senzori sunt temperatura agentului termic, debitul agentului termic și consumul de energie electrică.

4.3.2. Metodologia

Într-o prima etapa, autorii au realizat o metodologie experimentală de optimizare „în situ” a funcționării pompelor de circulație. Principalul său avantaj este că se bazează pe măsurători experimentale și poate fi realizată „în situ” pentru orice sistem, luând astfel în considerare caracteristicile reale ale sistemului și condițiile reale de funcționare.

Figura 19 prezintă valorile debitului de agent termic și puterii pompei de circulație din circuitul de schimb de căldură, din sistemul studiat, măsurate pentru diferite valori ale frecvenței, frecvența nominală fiind 50 Hz. Se observă că, practic, cu cât frecvența este mai mare, debitul de agent termic este mai mare. Practic relația dintre acestea este liniară, în vreme ce puterea crește cubic în raport cu debitul. Pe de altă parte un debit de agent termic mai mare îmbunătățește coeficientul de transfer termic în schimbătorul de căldură al pompei de căldură și reduce variațiile de temperatură. Același lucru se întâmplă și în schimbătorul de căldură cu pământul. [15]

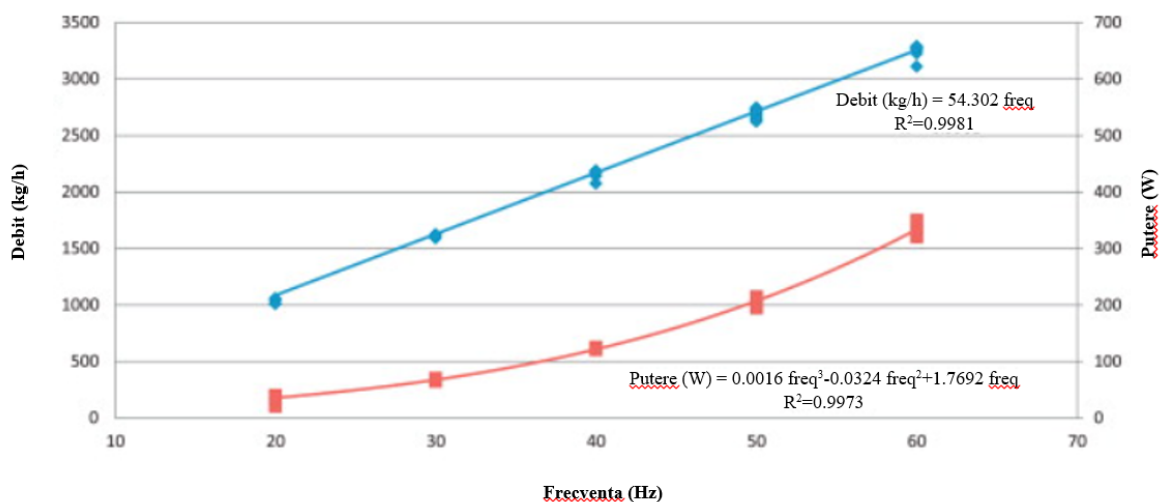


Figura 19. Puterea și debitul pompei de circulație în funcție de frecvența pompei de circulație [15]

Înspre pompa de căldură, creșterea debitului de agent termic conduce la micșorarea diferenței dintre temperatura acestuia și temperatura agentului frigorific din pompa de căldură. În consecință, efortul de compensare a temperaturii pe care trebuie să îl realizeze compresorul este mai mic și coeficientul de performanță al pompei crește (vezi Figura 20). [14]

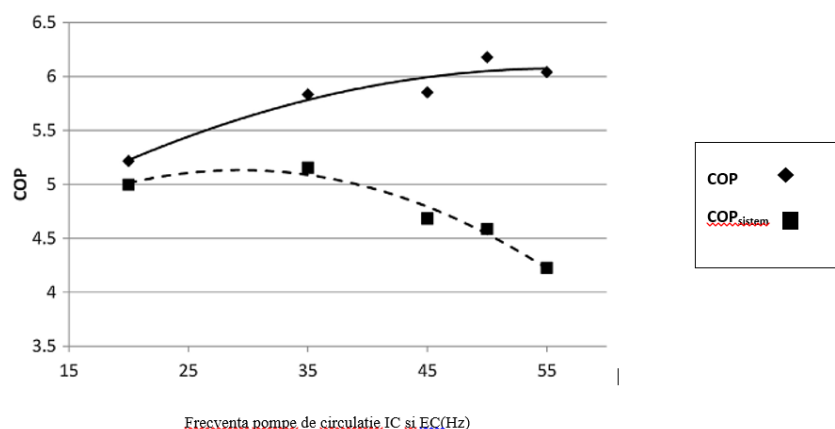


Figura 20. Influenta debitului pompei de circulație asupra COP [14]

Acest efect a fost analizat în lucrarea [14] și verificat experimental în decurs de o zi în sistemul prezentat, rezultatele fiind prezentate în Figura 21, în care se poate observa că efectul influențează coeficientul de performanță a pompei de căldură.

Astfel pe de o parte o creștere a debitului în evaporator și condensator reduce consumul compresorului, în vreme ce consumul pompelor de circulație crește. Pe de alta parte, reducerea debitului de agent termic diminuează consumul pompelor de circulație, dar conduce la creștea consumului pompelor de căldură și reduce coeficientul de transfer termic în schimbătorul de căldură cu pământul, existând și posibilitatea de a reduce confortul interior. Faptul că varierea frecvenței pompelor de circulație conduce la tendințe opuse de variație a consumului de energie conduce la concluzia că exista un optim al frecvenței pentru fiecare dintre bucle [14].

Variabilele analizate au fost debitul masic al agentului termic în bucla de sarcina, temperatura de referință „set-point” și mărimea intervalului de temperatură setat în sistemul de control al pompei de căldură / controlerul pompei de căldură, temperatura set-point a spațiului clădirii și mărimea intervalului de temperatură în interiorul clădirii. Studiul a oferit indicații clare despre existența unor frecvențe optime pentru pompele de circulație în funcție de condițiile de funcționare, care în general concordă cu rezultatele obținute în studiile experimentale ulterioare. [15]

Metodologia de optimizare constă în trei pași, conform diagramei din Figura 22. [14]

La primul pas se testează o secvență pseudo-aleatorie de frecvențe pentru ambele pompe de circulație (cea aferentă buclei de sarcină - care alimentează echipamentele terminale cu agent termic și cea aferentă buclei de schimb de căldură cu pământul), de la 20 Hz la 55 Hz, descris în detaliu în lucrarea. [15]

Scopul acestui prim pas este de a caracteriza performanța sistemului pe timpul „pornit” al ciclului de funcționare al compresorului pentru diferite frecvențe.

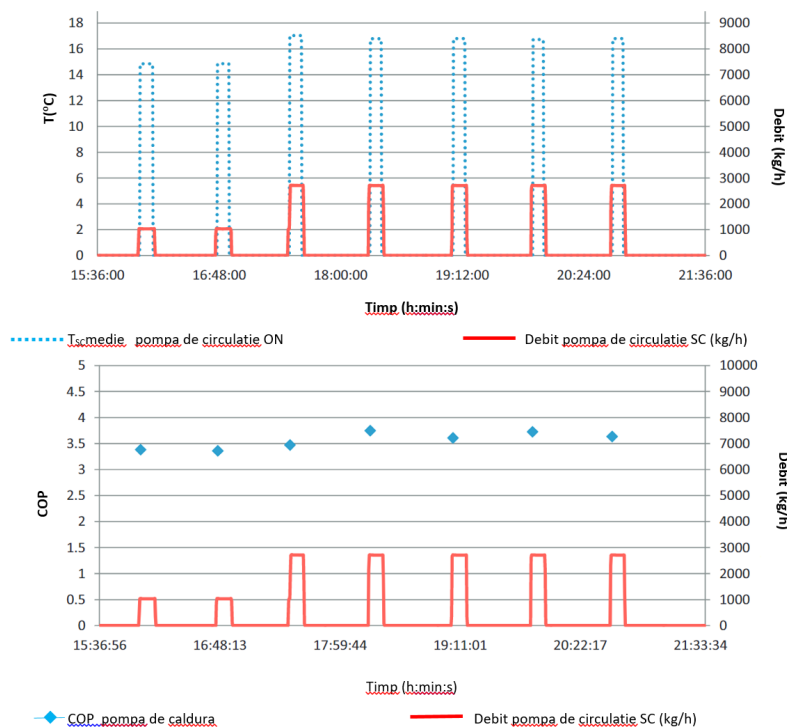


Figura 21. Influența variației debitului de agent termic primar asupra transferului de căldură în SC [15]

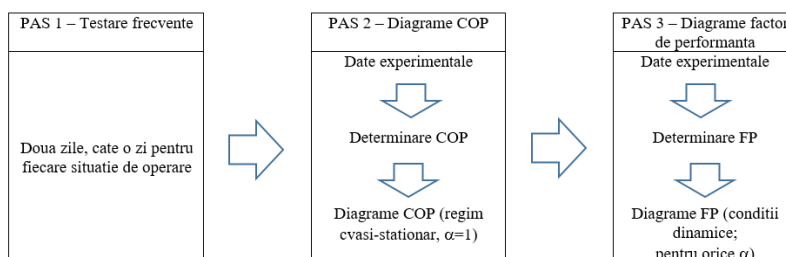


Figura 22. Diagrama metodologiei de optimizare [14]

Al doilea pas, descris în detaliu în lucrările [14] și [15] constă în analizarea rezultatelor obținute la primul pas, estimarea coeficientului de performanță al sistemului (COP_{sys}) în regim cvasi-staționar (pentru timpul „PORIT” al ciclului) și în cele din urmă reprezentarea valorilor COP_{sys} pe o diagramă în funcție de frecvențele ambelor pompe de circulație.

Prin al treilea pas se determina influența pompei de circulație din bucla de sarcină și pierderile de energie parazitare pe timpul „OPRIT” al ciclului, calculând, cu ajutorul diagramei realizate la pasul 2, frecvențele optime, în funcție de cererea de încălzire a clădirii.

Cererea de încălzire a clădirii este reprezentată de raportul sarcinii parțiale (α), care este definit ca raportul dintre sarcina termică instantanee a clădirii și capacitatea pompei de căldură. În urma acestui pas rezultă factorul de performanță al sistemului ca funcție de raportul sarcinii parțiale a sistemului pentru diferite valori ale frecvențelor ambelor pompe de circulație.

Cu ajutorul acestor diagrame se pot obține și implementa expresii care furnizează valorile optime ale frecvențelor pentru ambele pompe de circulație în funcție de raportul sarcinii parțiale.

Valorile raportului sarcinii parțiale considerate în algoritmul de sunt calculate pentru fiecare ciclu de lucru al pompei de căldură ca medie ponderată a numărului de compresoare pornite, în funcție de perioada de timp în care acestea funcționează în timpul ciclului și luând în considerare numărul total de compresoare ale pompei de căldură și timpul total de lucru al ciclului complet.

Acești parametri se pot determina / citi de pe panoul de control al pompei de căldură, care atunci când pompa este în funcțiune semnalizează starea fiecărui compresor.

În vederea finalizării secvenței de control optimal, valoarea de referință a temperaturii la ieșirea din pompa de căldură (“setpoint”), care determină pornirea sau oprirea compresorului, este variată în funcție de temperatura exterioară printr-o strategie simplă de resetare. Variabilele controlate sunt valoarea de referință a temperaturii agentului termic la ieșirea din pompa de căldură și frecvențele pompelor de circulație din bucla de sarcina și din bucla de schimb de căldură cu pământul.

Variabilele măsurate sunt temperatura ambiantă și raportul de sarcină parțială a sistemului. Valoarea de referință pentru temperatura la ieșirea din pompa de căldură a fost determinată numai în funcție de temperatura ambiantă, deoarece cu cât este mai mare temperatura ambiantă, cu atât temperatura de referință este mai mică.

Pe de altă parte, frecvențele pompelor de circulație au fost determinate, în baza metodologiei în trei pași, în funcție de raportul de sarcină parțială. Cu cât raportul de sarcină este mai mare, cu atât s-au stabilit la convertizoare valori mai mari ale frecvenței și, prin urmare, debite de apă mai mari în ambele circuite hidraulice.

Obiectivul algoritmului de control este de a optimiza performanța energetică a sistemului, reprezentată de factorul de performanță al sistemului definit ca relația dintre energia termică utilă furnizată clădirii și consumul de energie al sistemului, inclusiv al pompei de căldură și al pompelor de circulație.

Ca o primă încercare de control, a fost calculată, prin intermediul metodologiei experimentale dezvoltate, valoarea frecvenței pompei de circulație din bucla de sarcină, care optimizează factorul de performanță al sistemului în funcție de raportul de sarcină parțială a sistemului, iar temperatura agentului termic la ieșirea din pompa de căldură a fost determinată în funcție de temperatura ambiantă.

Această strategie de control optimal a fost implementată și testată o perioadă de câteva luni. Rezultatele au arătat că prin aplicarea acestei metode se realizează economii cu energia de $(31,70 \pm 0,07)\%$ prin comparație cu controlul standard, respectiv frecvență fixă de 50 Hz pentru ambele pompe de circulație și temperaturi de referință de 10°C pentru modul “răcire” și 40°C pentru modul “încălzire.”

Cu toate acestea, s-a constatat că în condiții meteorologice extreme în timpul verii, cerințele de confort interior nu au fost îndeplinite deoarece influența scăderii debitului de agent termic (apă) din bucla de sarcină nu a fost luată în considerare la eficientizarea ventilconvectorului. Mai exact strategiile au fost decuplate, adică au funcționat independent una de cealaltă.

4.3.3. Rezultate

În urma studiilor realizate a fost dezvoltat un algoritm de control care menține sistemul IVC geotermal cu pompe de căldură apă-apă instalat la Universitat Politècnica de València la

parametri optimi, fiind în același timp îndeplinite și cerințele de confort interior. Algoritmul a fost implementat și testat atât în modul de răcire cât și în modul de încălzire.

Problema de control optimal a fost abordată asociind valorile estimate optime ale frecvenței pentru pompa de circulație din bucla de sarcină cu temperatura agentului termic astfel încât sistemul să funcționeze cu consum minim de energie, cu condiția ca ventiloconvectoarele să aibă o capacitate de a acoperi cererea de căldură și a satisface cerințele de confort interior chiar și în condiții meteorologice extreme.

Metodologia de optimizare realizată este aplicabilă oricărui alt sistem geotermal cu pompe de căldură similar.

Rezultatele implementării acestei metodologii arată o îmbunătățire a factorului de performanță sezonier al sistemului cu până la 35% în modul de răcire și de 53% în modul de încălzire.

4.4. Studiu de caz – Sistemul IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP

4.4.1. Prezentare a sistemului IVC geotermal care deserveste infrastructura de cercetare ELI-NP

Sistemul geotermal de la ELI-NP este instalat pe o suprafață cu aria totală de aproximativ 27.000 m², are o lungime de 135.000 m și asigură integral energia necesară încălzirii și răcirii infrastructurii, având o capacitate instalată de 6,2 MW (4.2 MW încălzire și 6 MW răcire).

Sistemul IVC geotermal ELI-NP deserveste o suprafață construită de aproximativ 33.000 m² care are următoarea structura:

- Două clădiri amenajate special pentru activitatea de cercetare, cu laboratoare și încăperi în care sunt amplasate echipamentele de cercetare (HPLS, VEGA, LBTS) și aranjamentele experimentale, având respectiv, suprafețe de aproximativ 11.500 mp și 14.500 mp
- Trei clădiri pentru activitățile de suport (clădire de birouri, restaurant, casă de oaspeți) totalizând aproximativ 8000 mp (vezi tabelul).

Tabel 5. Suprafețe clădiri din infrastructura de cercetare ELI-NP

Clădire	Destinație	Suprafața construită (m ²)
Clădirea LASER și LABORATOARE	CERCETARE	11.631
Clădirea GAMMA	CERCETARE	14.314
Clădirea BIROURI	ADMINISTRATIV	5.237
Clădirea OASPEȚI	ADMINISTRATIV	2.568
Altele	ADMINISTRATIV	124

Infrastructura de cercetare ELI-NP este deservită de un sistem IVC de mari dimensiuni, care utilizează energia neconvențională geotermală ca sursă de răcire sau încălzire. Sursa termică

este o sursă de joasă entalpie, captată prin intermediul unor puțuri forate și apoi utilizată și pusă în valoare cu ajutorul pompelor de căldură.

Componentele esențiale ale acestuia sunt (vezi figura 23):

- schimbătorul de căldură cu pământul (SCP), prin intermediul căruia este vehiculată căldura din interiorul Pământului
- pompele de căldură, care pun în valoare energia geotermală.

Fluidul folosit este apa, deoarece temperatura minimă de lucru a agentului care merge spre schimbătorul de căldură cu pământul (**SCP** sau *geoexchange*) este controlată și menținută peste 4°C, astfel încât nu apare posibilitatea de îngheț în circuitul primar al pompelor termice. Debitul de agent vehiculat prin SCP are valoarea de 13,3 l/min/3,5kW.

Schimbătorul de căldură cu pământul care a rezultat, este un sistem geoexchange în circuit închis, format dintr-un număr de 1080 foraje cu o adâncime utilă de 120 m fiecare. La partea superioară, forajele sunt unite 2 câte 2 cu ajutorul unor piese în formă de << Y >> și sunt grupate în 18 ploturi de câte 60 foraje fiecare. Conductele din forajele aferente fiecărui plot geotermal sunt conectate la un distribuitor/colector (manifold), prevăzut cu vane de sectorizare cu două căi, de tip ON/OFF, motorizate. În interiorul fiecărui manifold sunt amplasați câte 2 senzori de temperatură, pe tur și retur, pentru monitorizarea temperaturilor agentului termic.

De la cele 18 distribuitoare/colectoare, pleacă/sosesc câte o pereche de magistrale geotermale (tur/retur), prin care agentul termic este transportat către stația de pompare a ansamblului de clădiri, care are rolul de a gestiona cantitatea de energie extrasă din sol în perioada rece a anului, respectiv cantitatea de energie injectată în sol în perioada caldă a anului. De aici energia este distribuită către fiecare din 9 puncte termice. Suprafața ocupată de schimbătorul de căldură cu pământul este de aproximativ 27.000 mp.

Distribuția agentului termic către și de la forajele geotermale, precum și a agentului termic de la și către nouă puncte termice situate în clădiri se realizează prin stația de pompare a SCP, care este o construcție de sine stătătoare. În acest scop stația de pompare SCP este dotată cu pompe de circulație prevăzute cu convertizoare de frecvență.

Forajele sunt amplasate unul față de celălalt la o distanță medie de 5 metri, au o adâncime medie de aproximativ 120 m și un diametru de 160 mm.

Încălzirea și răcirea ansamblului se realizează cu pompe de căldură tip apă-apă și apă-aer reversibile, cu ciclu frigorific ecologic. Agentul frigorific folosit este R410a.

Agentul termic primar care alimentează aceste echipamente este apa recirculată prin bucla închisă care trece prin foraje.

Agentul termic secundar (apă) pentru răcire și încălzire, preparat în punctele termice cu ajutorul pompelor de căldură apă-apă, este livrat echipamentului IVC din clădiri (centrale de tratare a aerului, ventiloconvectoare), care asigură microclimatul interior al clădirilor și parametrii de funcționare.

Sarcina termică necesară de 6,2 MW (pentru încălzire 4,2 MW, pentru răcire 6 MW, pentru răcire tehnologică 2,2 MW) este asigurată de 129 de pompe de căldură apă-apă. În unele încăperi, răcirea sau încălzirea aerului interior se realizează direct, prin 46 de pompe de căldură apă-aer. De asemenea, în măsura în care soluția proiectată permite, sistemul este echipat cu mijloace de recuperare a energiei. Agentul termic primar și secundar este vehiculat prin bucla închisă prin intermediul 185 de pompe de circulație.

Pentru clădirea LASER și LABORATOARE, sarcina termică de încălzire și răcire este asigurată de două puncte termice echipate cu pompe de căldură apa-apa. Debitul de aer necesar este asigurat de opt centrale de tratare a aerului, având fiecare un debit de 54.200 m³/h. Obiectivul principal al centralelor de tratare a aerului este de a efectua încălzirea și ventilația camerei curate LASER și a celorlalte camere curate existente ISO 6 și ISO 7, asigurând un maxim de 20 schimburi orare de aer, care reprezintă un debit de 435.000 m³/h aer refulat vertical.

Microclimatul interior al Clădirii GAMMA este realizat și menținut cu 18 pompe de căldură tip apa-aer, montate perimetral, care asigură prelucrarea a 58.500 m³/h aer, din care aer proaspăt 5.000 m³/h în hala principală. Totodată, clădirea GAMMA este echipată cu două centrale de tratare a aerului care asigură un debit de aer de 80.000 m³/h în camerele de experimente. Configurația sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură instalat la ELI-NP este prezentată schematic în figura 23.

Potrivit destinației sale, clădirea LASER și LABORATOARE are mai multe încăperi clasificate CAMERE CURATE, în conformitate cu standardul ISO 14644.

Încăperea care adăpostește laserii de mare putere, clasificată ISO 7, după standardul 14644, este o încăpere de mari dimensiuni, având o suprafață de 2540 mp cu înălțimea de 5 m.

Fluxul de aer vertical se realizează cu un număr de 8 centrale de tratare dispuse câte patru pe fiecare latură a încăperii, pe culoarele tehnice adiacente, de la etajul superior.

Introducerea aerului tratat în încăperea LASER se face prin intermediul plafonului perforat (constituit din panouri perforate și panouri neperforate).

Aerul recirculat este aspirat de către cele 8 CTA-uri de la nivelul pardoselii, prin 8 guri de aspirație prevăzute cu plasă de sârma pentru protecție. Aportul de aer proaspăt reprezintă 20% din debitul uneia dintre centralele de tratare a aerului.

Sarcina de umiditate necesară încăperii este controlată cu ajutorul unor umidificatoare cu abur amplasate pe fiecare centrală de tratare a aerului.

Sarcina termică de încălzire/răcire este asigurată cu ajutorul celor 8 centrale de tratare a aerului alimentate cu agent termic cald/rece de la un număr de 34 pompe de căldură “APĂ-APĂ” amplasate pe cele două culoare tehnice adiacente încăperii laserilor.

Sistemul IVC geotermal cu pompe de căldură nu utilizează combustibili fosili ca sursă de energie. Sursa de energie atât pentru încălzire, cât și pentru răcire (inclusiv răcirea tehnologică) este energia geotermală. Energia electrică este utilizată numai pentru acționarea echipamentelor.

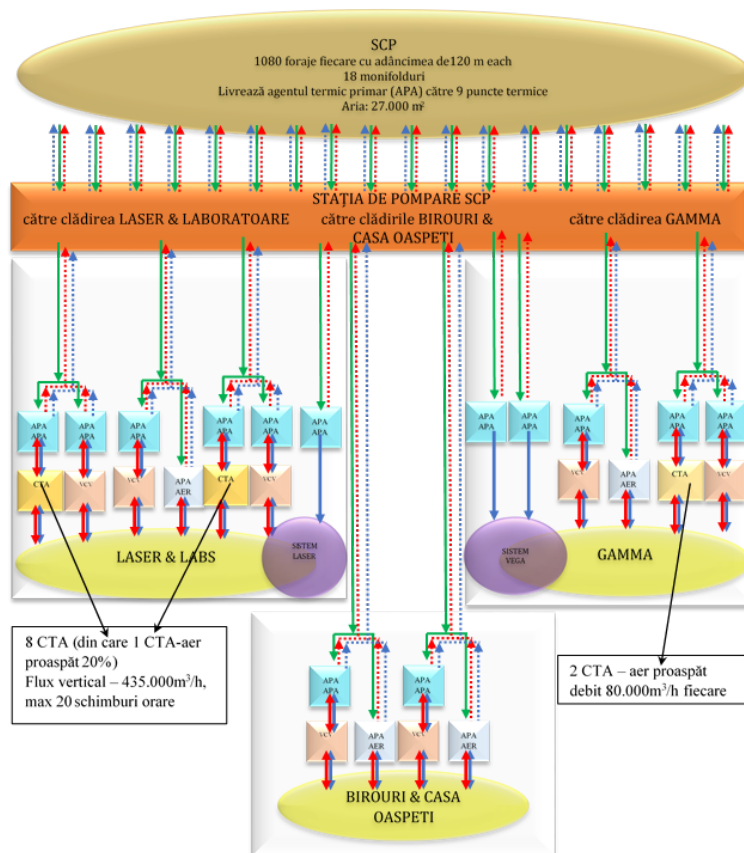


Figura 23. Sistemul geotermal cu pompe de căldură de la ELI-NP

4.4.2. Prezentare a sistemului de reglaj automatizat – DDC

Sistemul IVC geotermal este monitorizat și controlat prin sistemul de automatizare Digital Direct Control (DDC). Astfel, temperatura și umiditatea sunt monitorizate, înregistrate și ajustate continuu, informațiile fiind transmise în timp real sistemului Building Management System (BMS), care monitorizează toate sistemele clădirilor.

Sistemul de supraveghere și control al sistemului de ventilație și climatizare din cadrul infrastructurii ELI-NP monitorizează toate clădirile și a fost dezvoltat sub denumirea generică de ARENA AX. Este similar unui sistem SCADA și îndeplinește următoarele funcțiuni:

- colectează toate valorile parametrilor din controlerle sistemului IVC geotermal
- permite afișarea valorilor parametrilor citiți de senzorii instalați în sistem
- înregistrează toate valorile parametrilor pe sever-ul dedicat achiziției de date, în vederea realizării și vizualizării graficelor de variație în timp a acestora.

Pagina principală arată întregul ansamblu de clădiri, iar în partea stângă a ecranului se găsesc butoanele de navigare de unde se poate accesa oricare dintre instalațiile monitorizate sau oricare dintre clădirile monitorizate. Nu este necesară o altă autentificare. Pagina dorită se afișează direct și foarte rapid.

Sistemul DDC propus este structurat după o logica de sistem de achiziție de date, prelucrare și control distribuit, pe baza unor programe de aplicație rezidente în memoria controlerelor, cu

posibilitate de transmisie și comunicație cu un server central DDC conectat în rețeaua intranet a sistemului BMS sau la distanță folosind comunicarea TCP/IP prin internet.



Controlerele folosite sunt Honeywell de tip Lynx pentru procesările locale reduse. Concentrarea BACnet MS/TP a acestora și interfațarea lor la BACnet IP, server și Internet s-a realizat cu controlere Honeywell de tip Eagle.

Aplicația software instalată pe server va permite implementarea unor funcții de monitorizare și control a echipamentelor clădirii, utilizând meniuri și ferestre grafice interactive. Aplicația se bazează pe facilitatea web-server integrată în controlerele de tip EAGLE.

Soluția aleasă se încadrează în solicitările specificației tehnice, după cum urmează:

- Conformitate cu standardul de utilizare EN60730-1
- Protocoale de comunicație utilizate
 - BACnet /IP (suport Ethernet),
 - BACnet MS/TP (suport RS485),
 - Modbus (suport RS485)
 - Server DDC propriu cu comunicație BACnet /IP

Scopul acestui sistem este de a monitoriza și controla unitar funcționarea echipamentelor din clădiri.

4.4.3. Funcționarea sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP de la darea în folosință până în prezent

În exploatarea sistemului IVC geotermal instalat la ELI-NP trebuie luate în considerare o serie de constrângeri impuse în principal de activitatea care se desfășoară în clădirile de cercetare,

care impune stabilitate ridicată a parametrilor de ambient. Sunt enumerate mai jos câteva din cerințele și condițiile care impun constrângeri în operare:

- cerințe de stabilitate ridicată a umidității relative și a temperaturii în majoritatea dintre laboratoare
- temperaturi relativ scăzute în camerele curate
- cerințele privind ratele mari de schimbare a aerului
- condiții multiple de operare
- cerințe de presurizare
- opțiuni limitate de utilizare a strategiilor de recuperare a energiei, pentru a evita contaminarea încrucișată
- dificultatea de a anticipa sarcinile termice ale echipamentelor și cerințele de evacuare
- consumul mare de energie al procesului și al echipamentelor de cercetare.

În cele ce urmează sunt trecute în revistă etapele importante de exploatare a sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură instalat la ELI-NP.

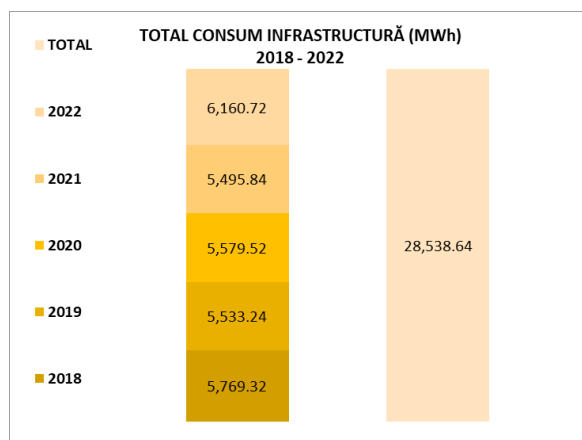
Sistemul geotermal a fost pus în funcțiune și a început să fie operat odată cu recepția la terminarea lucrărilor de construire a clădirilor și instalațiilor din cadrul infrastructurii de cercetare ELI-NP, în noiembrie 2016.

Instalarea laserului de mare putere a fost finalizată în anul 2019, atingerea puterii 10 PW în luna martie a aceluiași an fiind un punct de referință pentru cercetarea științifică la nivel mondial și un reper în istoria științei. A urmat apoi calibrarea și testarea echipamentului.

În anii 2021 și 2022 trei din cele cinci clădiri din infrastructură au fost ocupate 100%, iar în anul 2022 Clădirea Laser și Laboratoare a fost utilizată 100 %.

În prezent gradul de ocupare și utilizare pe clădiri este după cum urmează:

- clădirea de birouri – ocupată 100%
- cantina – utilizată la 100% din capacitate (200 persoane)
- casa de oaspeți – utilizată la 100% din capacitate (grad de ocupare mediu 70%, în funcție de calendarul de experimente și numărul de utilizatori programați)
- clădirea Laser și Laboratoare (destinată cercetării) – utilizată la 100% din capacitate (după un calendar stabilit la sfârșitul anului precedent pentru anul în curs)
- clădirea Gamma (destinată cercetării) – utilizată la 70% din capacitate.



Sistemul IVC geotermal funcționează la capacitate maximă, în prezent aflându-se în al 3-lea an de monitorizare intensivă, dovedind un rezultat bun în ceea ce privește eficiența energetică și stabilitatea parametrilor solicitați.

Sursa de energie atât pentru încălzire, cât și pentru răcire (inclusiv răcirea tehnologică) este energia geotermală. Energia electrică se utilizează numai pentru acționarea echipamentelor, cel mai important consumator de energie electrică fiind sistemul IVC, care este responsabil pentru aproximativ două treimi din consum. În consecință, consumul de energie electrică este singurul care generează costuri pentru infrastructură, consumul de energie electrică total al infrastructurii în perioada 2018 – 2022 fiind prezentat în Figura 29.

4.4.4. Mărimile fizice și parametrii de funcționare determinate în funcționarea sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură din Infrastructura de Cercetare ELI-NP, descrierea echipamentelor de măsură, modul de măsură

Stabilitatea parametrilor de ambient impusă de echipamentele de cercetare unice și de activitatea de cercetare ce se desfășoară la ELI-NP este prioritară. Sistemul IVC geotermal trebuie să asigure stabilitatea parametrilor în mod permanent și pe termen lung.

Cei mai restrictivi parametri care trebuie menținuți în laboratoarele de cercetare sunt după cum urmează:

Clădirea Laser și Laboratoare

- temperatura în camera Laser 22 +/- 0,5 °C
- temperatura în unele Laboratoare 20 +/- 0,5 °C
- umiditatea relativă în camera Laser și Laboratoare 35-50%, fără condensare
- suprapresiune în camera Laser și Laboratoare 40 Pa
- clasa de curățenie în camera Laser ISO7
- clasa de curățenie în Laboratoare ISO6, ISO7

Clădirea Gamma

- presiune negativă în sala VEGA 14 Pa
- temperatura în sălile de experimente 22 +/- 0,5 °C
- umiditatea relativă în sălile de experimente 35-50%, fără condensare

Chiar dacă menținerea stabilității parametrilor este prima prioritate avută în vedere în exploatare, de importanță majoră este și eficiența energetică, având în vedere consumurile energetice ridicate pe care le implică activitatea de cercetare desfășurată în infrastructura de cercetare ELI-NP.

Cei doi laseri de mare putere funcționează într-o cameră curată ISO 7, cu o suprafață de aproximativ 2.500 mp. Numărul ridicat de schimburi orare de aer, cu păstrarea condițiilor de suprapresiune, impus de cerințele de control strict al temperaturii și umidității relative, precum și opțiunile limitate de utilizare a strategiilor de recuperare a energiei, conduc la un necesar de energie foarte mare.

Încă de la începutul monitorizării în exploatare a clădirilor și sistemelor din infrastructura de cercetare ELI-NP s-a ajuns la concluzia că o poziționare corectă a infrastructurii din punctul de

vedere a eficienței energetice se poate realiza prin comparare cu alte infrastructuri de cercetare, cunoscut fiind faptul ca activitatea de cercetare presupune consum ridicat de energie electrica.

Astfel, ca o prima etapă de caracterizare și determinare a poziției pe care se situează infrastructura de cercetare ELI-NP din punctul de vedere al eficienței energetice s-a calculat indicatorul EUI (Energy Use intensity), care exprimă consumul de energie al unei clădiri în funcție de dimensiunile acesteia sau de alte caracteristici și se calculează împărțind energia totală consumată de clădire într-un an (măsurată în kBtu sau GJ) la suprafața construită desfășurată a clădirii (măsurată în picioare pătrate sau metri pătrați).

Statisticile pentru EUI median în SUA, care au început să realizeze evaluare a clădirilor de cercetare, sunt publicate pe platforma ENERGY STAR pentru tipuri de clădiri, în funcție de utilizarea acestora. Această platformă este administrată de Agenția pentru Protecția Mediului din SUA (EPA) și împreună cu aceasta din urmă oferă soluții de eficiență energetică care economisesc costurile, care protejează clima, îmbunătățesc calitatea aerului și protejează sănătatea publică.

Consumul total de energie electrică (clădiri, echipament de cercetare, iluminat exterior etc.) este citit lunar și se regăsește în factura emisă de furnizorul de energie electrică.

Cunoscând consumul total de energie electrică și suprafața construită a infrastructurii de cercetare a fost posibilă compararea valorii EUI a ELI-NP cu valoarea mediană a EUI pentru laboratoare de cercetare publicată de ENERGY STAR.

Într-o a doua etapă s-a urmărit evaluarea performanței energetice a sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură instalat la ELI-NP, prin determinarea unui coeficient de performanță, valorificând resursele oferite de soluția constructivă IVC adoptată și exploatată la ELI-NP.

Sistemul de control automat DDC al sistemului IVC, descris în capitolul anterior permite:

- înregistrarea în timp real a parametrilor de interes (temperatură și umiditate relativă a aerului introdus), prin senzorii amplasați în tubulatură
- ajustarea valorilor acestor parametri la valorile de referință cerute de proces
- stocarea datelor și realizarea de curbe de evoluție pentru diferite perioade.

Consumul de energie electrică este cunoscut pentru toți consumatorii importanți din infrastructura de cercetare, individual pentru clădiri și sisteme, putând fi citit în timp real de pe analizoarele de rețea instalate pe tablourile electrice de distribuție. Următoarele consumuri de energie electrică sunt contorizate separat:

- consumul de energie pentru fiecare din pompele de circulație cu turație variabilă care vehiculează agentul termic primar către punctele termice
- consumul de energie pentru punctele termice ale fiecărei clădiri
- consumul de energie pentru răcirea tehnologică pentru echipamentele de cercetare
- consumul de energie pentru iluminat și prize al fiecărei clădiri.

Având aceste date și determinând necesarul de căldură/frig precum și consumul de energie termică respectiv, este posibilă evaluarea performanței energetice a sistemului IVC geotermal, prin determinarea unui coeficient de performanță. S-au calculat aproximativ coeficienți de performanță pentru sistemul IVC aferent fiecărei clădiri, relevanți fiind cei pentru clădiri cu gradul de ocupare și utilizare 100%.

4.4.5. Indicatori de performanță

Performanța energetică a clădirilor și în general subiectele legate de eficiență energetică nu sunt abordate unitar, existând diferențe de la țară la țară.

Cel mai frecvent pentru evaluarea performanței energetice a clădirilor sunt utilizați indicatori de tipul “consum specific de energie”, în cazul clădirilor aceștia fiind exprimați prin raportarea consumului de energie la aria suprafeței clădirii.

Akville ș.a. au abordat pe larg în [16] subiectul și au prezentat constatările lor cu privire la definirea și tratarea diferențiată a acestui tip de indicator. Autorii precizează că în ciuda utilizării frecvente a indicatorului Consum specific de energie / Specific Energy Consumption (SEC) atunci când se face benchmarking / evaluare cu scopul îmbunătățirii eficienței energetice, descrieri clare și detaliate ale ipotezelor pe care se bazează calculul SEC par să lipsească atât din literatura științifică, cât și din standardele internaționale.

În urma revizuirii publicațiilor științifice și a standardelor care abordează și utilizează SEC autorii au precizat faptul că SEC este calculat în baza unor ipoteze, ipoteze care sunt rareori sunt prezentate sau evidențiate. În consecință ar fi necesară o îmbunătățire substanțială din punctul de vedere al fiabilității și comparabilității SEC, acesta fiind afectat de o multitudine de factori.

Cu scopul de a analiza critic SEC în legătură cu eficiența energetică industrială Akville ș.a., formulează următoarele concluzii:

- SEC este mai util dacă este întreprinsă o analiză comparativă longitudinală (i.e. aceeași companie, același sector sau aceeași țară, în timp)
- În vederea unei evaluări corecte, este recomandată atenție deosebită la utilizarea SEC pentru evaluare comparativă între companii, sectoare sau țări,
- Utilizarea SEC pentru comparații este optimă în cazul unui calcul unitar al acestuia.
- Deoarece există un decalaj atât în cercetare, cât și între standardele internaționale în ceea ce privește utilizarea SEC, ar fi necesar un plan pentru utilizarea ulterioară a SEC, însoțit de activități de monitorizare.
- Calculul SEC poate fi influențat semnificativ de factorul de conversie de la energie primară la energie finală.
- SEC este un indicator de performanță mai adecvat în cadrul aceluiași studiu, atunci când ipotezele de bază sunt aceleași.
- De asemenea autorii sugerează că abrevierea SEC ar fi mai corectă pentru consumul specific de exergie decât consumul specific de energie. **Alternativ, ar putea fi folosit termenul *utilizare specifică a energiei*.**
- Înainte de utilizarea SEC din alte studii, se recomandă studierea ipotezelor care au stat la baza calculelor. SEC este un indicator convenabil cu potențial de utilizare în diverse aplicații de evaluare, cu condiția ca ipotezele utilizare pentru realizarea calculelor să fie adecvate.
- Concret, este recomandată considerarea următoarelor aspecte:
 - Originea, disponibilitatea și calitatea informațiilor și datelor care au fost utilizate pentru calculare SEC
 - Precizia limitelor sistemului, de exemplu, energia utilizată de echipamentul principal, echipamente auxiliare utilizate în producție și/sau părți ale acestuia
 - Factorii de conversie de la energia primară la energia non-primară

-
- Modul de calcul al energiei
 - Alți factori, cum ar fi specificațiile echipamentelor (i.e. vechimea).

În cele ce urmează, sunt prezentate modalități de tratare a performanței energetice a clădirilor și de utilizare a unor indicatori de performanță în scopul de a motiva soluția aleasă pentru evaluarea prin comparație a infrastructurii de cercetare ELI-NP.

Dintre indicatorii de performanță definiți pentru a evalua clădirile în ceea ce privește performanța energetică lucrarea abordează următorii indicatori:

- Consumul specific de energie (Specific Energy Consumption), exprimat ca energie pe metru pătrat pe an și calculat prin raportarea energiei totale consumate de clădire într-un an (măsurată în kWh) la suprafața utilă a clădirii (măsurată în metri pătrați), utilizat în Uniunea Europeană și implementat în legislația românească.
- “Energy Use Intensity” – EUI (Intensitatea utilizării energiei) exprimată ca energie pe metru pătrat pe an și calculată prin raportarea energiei totale consumate de clădire într-un an (măsurată în kBtu sau GJ) la suprafața totală construită a clădirii (măsurată în picioare pătrate sau metri pătrați), utilizat în Statele Unite ale Americii.

Portfolio Manager este un instrument interactiv de gestionare care permite evaluarea consumului de energie al oricărui tip de clădire, totul într-un mediu online securizat. Aproape 25% din spațiul clădirilor comerciale din SUA face deja în mod activ evaluare în Portfolio Manager, făcându-l instrumentul de benchmarking lider în industrie, comparând performanța energetică a clădirilor cu clădiri similare. [17]

Indicatorul cu ajutorul căruia se compara clădirile în Portfolio Manager este Energy Use Intensity / intensitatea consumului de energie / intensitatea utilizării energiei sau EUI. În esență, EUI exprimă consumul de energie al unei clădiri în funcție de dimensiunea acesteia sau de alte caracteristici. [18]

Pentru tipurile de proprietate în Portfolio Manager, EUI este exprimată ca energie pe metru pătrat pe an. Se calculează împărțind energia totală consumată de clădire într-un an (măsurată în kBtu sau GJ) la suprafața construită totală brută a clădirii (măsurată în picioare pătrate sau metri pătrați). [18]

4.5. Rezultate obținute la ELI-NP. Rezultatele determinărilor experimentale-prelucrare

Ca un prim pas pentru optimizare, în vederea atingerii celei mai bune performanțe energetice posibile, lucrarea de cercetare și-a propus să determine unde se situează infrastructura de cercetare ELI-NP din punctul de vedere al eficienței energetice și în ce măsură ELI-NP a îndeplinit obiectivul propus la demararea proiectului și anume acela de a fi o clădire „prietenosă cu mediul”.

Eficiența energetică a sistemului IVC instalat la ELI-NP a început să fie monitorizată, la diferite grade de ocupare, descrise anterior, după instalarea echipamentelor de cercetare, începând cu perioada de testare și apoi în perioada de realizare a experimentelor.

În acest interval, sistemul geotermal cu pompe de căldură a asigurat regimul de funcționare cerut de activitatea de cercetare, parametrii (temperatura și umiditate relativă) menținându-se constanți. Totodată, s-a conservat clasa de curățenie ISO 7 (conform standard 14644) a camerei curate din clădirea care adăpostește laserul de mare putere și a celorlalte laboratoare.

Inexistența datelor pentru infrastructuri similare face dificilă evaluarea ELI-NP. Infrastructurile pentru sănătate, mai frecvent evaluate și clasificate, sunt într-o oarecare măsură

asemănătoare în ceea ce privește nevoia de IVC, dar în cazul ELI-NP încăperile care adăpostesc echipamentele de cercetare sunt încăperi monovolum cu suprafețe și înălțimi mari. În plus, în unele situații subsolul clădirilor comunică în mod direct cu parterul. De asemenea, în clădirile de cercetare o suprafața de laboratoare, cu necesar de nivel de iluminare ridicat având aria de aproximativ 8.200 m² nu are iluminat natural. În plus, clădirile de cercetare au funcționare continuă, cel puțin din punct de vedere al încălzirii/răcirii ventilării și climatizării, asigurarea continuă parametrilor de ambient în aceste clădiri fiind obligatorie.

O descriere, din punctul de vedere al performanței energetice, a infrastructurii de cercetare ELI-NP ar fi relevantă, dacă s-ar putea realiza o comparație cu infrastructuri similare („peer group of facilities”).

Consumul final de energie electrică lunar al infrastructurii se situează în jurul a 500.000 kWh (consumul tehnologic este inclus). În figura 25 sunt prezentate consumurile de energie electrică totale ale infrastructurii pentru anul 2022, iar figurile 26, 27, 28 și 29 sunt prezentate datele detaliate pentru anul 2022.

Sursa de date pentru consumul total al instalației este citirea lunară a furnizorului de energie electrică. Consumul lunar înregistrat este relativ constant pe parcursul unui an, în lunile de iarnă și lunile de vară fiind mai mare cu aproximativ 12% decât consumul mediu, fiind singura sursă de energie care poate fi cuantificată financiar „în bani.”

Așa cum era de așteptat, consumul pentru încălzirea, răcirea și condiționarea clădirilor are proporția cea mai mare din consumul al clădirilor, aproximativ două treimi din consumul total de energie. S-a constatat, totodată, faptul că o componentă semnificativă din consumul energetic este reprezentată de energia consumată pe sistemul de transport.

În anii 2021 și 2022 trei din cele cinci clădiri din infrastructura au fost ocupate 100%, iar clădirea de cercetare Laser și Laboratoare a avut în anul 2022 grad de utilizare 100%. Infrastructura ELI-NP a funcționat în anul 2022 ca entitate „user office”, unde s-au planificat și realizat experimente care presupun operarea laserului de mare putere, a sistemului de transport al fasciculului și a aranjamentelor experimentale realizate.

După cum am mai precizat, în reglementările existente în România nu există cerințe privind consumul de energie pentru obiectivele industriale. Infrastructura ELI-NP se încadrează într-o altă categorie, cea a infrastructurilor de cercetare, care au alte particularități în comparație cu clădirile industriale, direcție care nu a fost abordată la nivel european și nici în România, unde fondul de clădiri din această categorie este aproape inexistent, astfel încât încadrarea într-o clasă energetică nu este posibilă.

Având în vedere profilul activității de cercetare, care presupune utilizarea mixtă a a sistemelor geotermale de suprafață în regim de încălzire și răcire, conformarea la Metodologia Mc 001-2022 conduce la o valoare irelevantă a consumului specific dat fiind faptul că această evaluare nu poate să țină cont de degajările de căldură simultane de la echipamentul tehnologic cât și de echipamentele aferente furnizării necesarului de utilități. Drept urmare abordarea secvențială în calculul consumurilor energetice poate oferi doar o imagine locală a acestor consumuri fără a putea structura un indice global privind consumul specific. De aceea, pentru calculul consumului specific am propus abordarea conform platformei Energy Star, administrată de Agenția pentru Protecția Mediului/US Environmental Protection Agency (US EPA).

Indicatorul EUI publicat în literatura de specialitate americană face posibilă evaluarea mai realistă a eficienței energetice a infrastructurii ELI-NP, având în vedere că se realizează comparația cu infrastructuri similare.

Portfolio Manager prezintă/recomandă valorile naționale mediane de referință ale EUI sursă pentru toate tipurile de clădiri. Mediana este mai adecvată pentru analiză decât medie (media aritmetică) pentru compararea performanței energetice relative, deoarece reflectă mai precis valorile de mijloc ale consumului de energie pentru majoritatea tipurilor de proprietăți. Aceste date sunt centralizate și publicate pe platforma, baza de date fiind continuu actualizată.

Deoarece activitatea de cercetare experimentală de vârf este consumatoare mare de energie a apărut interesul pentru definirea unor indicatori care să evalueze performanța energetică a infrastructurilor de cercetare. Însă până în prezent, o evaluare a acestui tip de infrastructuri s-a realizat numai în Statele Unite.

În tabelul 7. sunt prezentate valori ale indicatorului EUI pentru întreaga infrastructura de cercetare ELI-NP, respectiv numai pentru clădirile de cercetare aferente anilor 2021 și 2022.

După cum se poate observa în figura 30a. și figura 30b., în anul 2022 EUI al infrastructurii de cercetare ELI-NP se situează la mai puțin de jumătate din valoarea EUI mediană de 1.004 kWh/m²/an publicată pe platforma ENERGY STAR, atât pentru întreaga infrastructură cât și pentru clădirile de cercetare. [17]

Factorul de conversie de la energie finală la energie primară utilizat pentru calcule este 2.5 conform SR EN ISO 52000-1.

Cunoașterea cu grad ridicat de precizie a tiparului de consum în exploatare și stabilitatea ridicată a parametrilor de ambient ce a caracterizat funcționarea în perioada de monitorizare permit trecerea la etapa reglajului fin al sistemului, optimizarea și controlul optimal al acestuia.

La acest stadiu al proiectului se pot realiza estimări foarte bune ale comportamentului pentru clădirile care grad de utilizare și ocupare de 100%.

În figura 78 este reprezentat consumul total de energie al clădirii Laser și Laboratoare (inclusiv consumul energetic pentru răcirea tehnologică).

Pe baza strategiilor de optimizare studiate, unele din ele prezentate în lucrare, următorul pas realizat în cadrul cercetării doctorale este calculul unui coeficient de performanță al sistemului IVC geotermal instalat la ELI-NP, ca primă etapă pentru optimizarea și implementarea strategiei de control optimal a sistemului. Rezultatul obținut în baza datelor înregistrate în cursul anului 2022 pentru clădirea Laser și Laboratoare cu grad de utilizare de 100% sunt prezentate în graficele din Figura 31 și Figura 32.

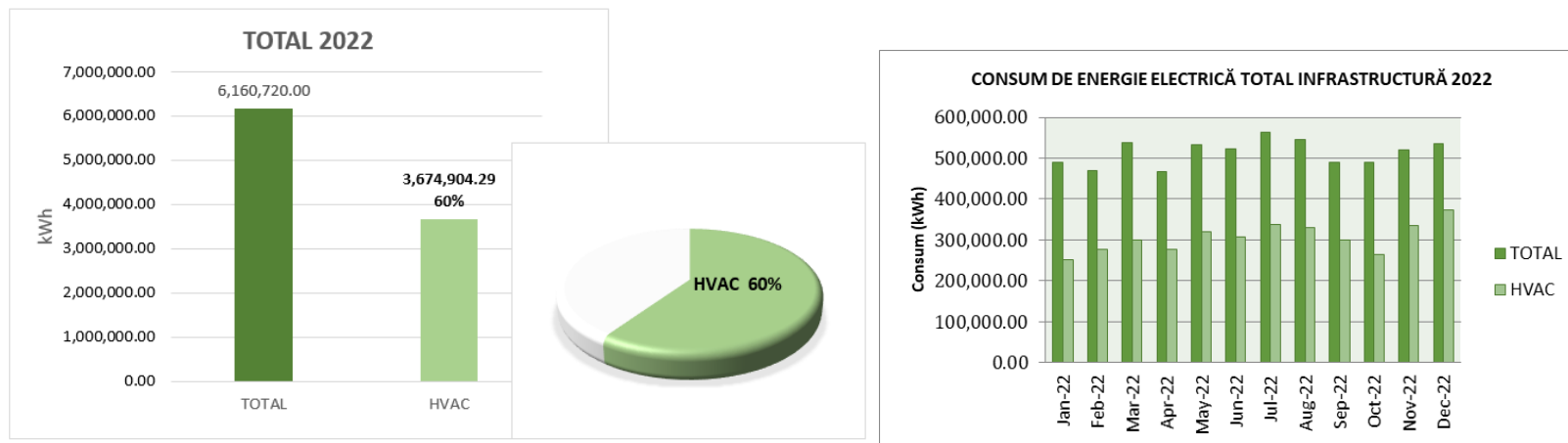


Figura 25. Consumul de energie electrica total al infrastructurii ELI-NP – ANUL 2022

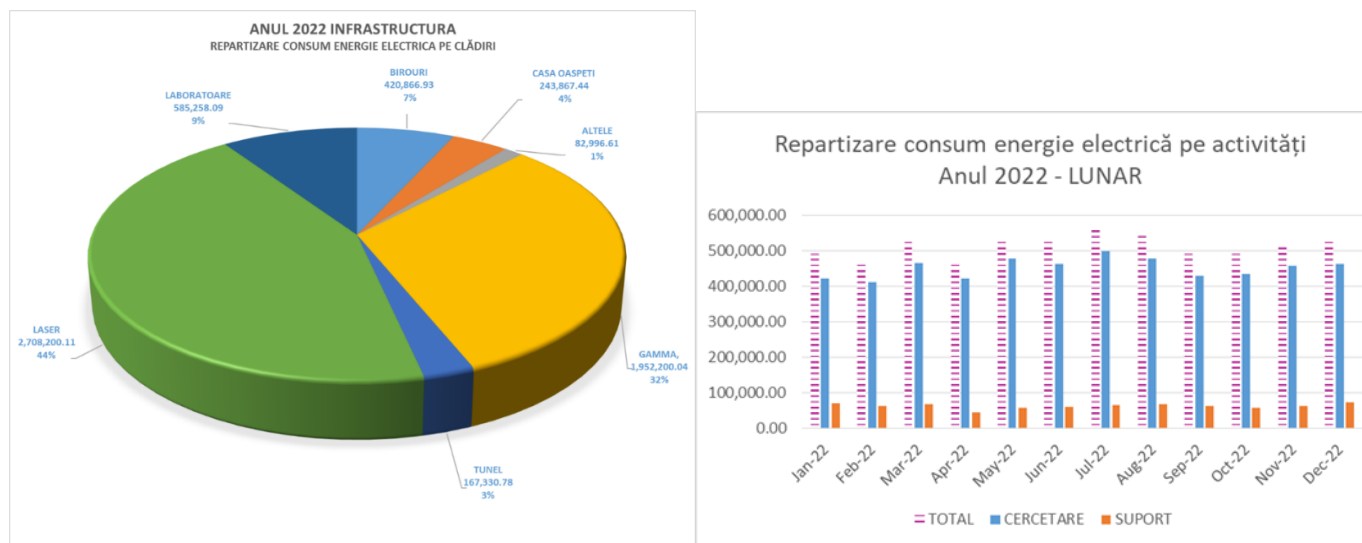


Figura 26. Repartizarea consumului de energie electrică pe clădiri – ANUL 2022

Figura 27 Repartizarea consumului de energie electrică total al infrastructurii de cercetare ELI-NP pe clădiri, pe activități, pe utilități – ANUL 2022

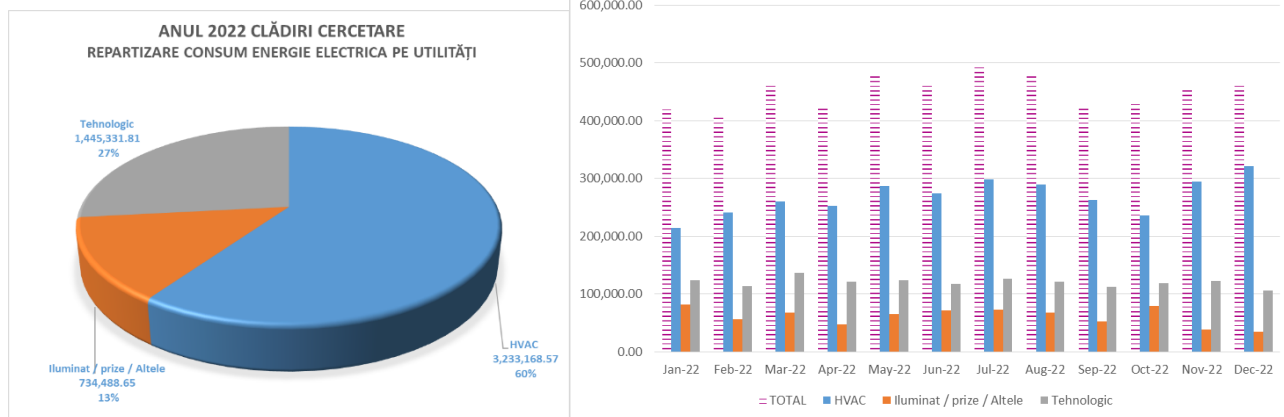


Figura 28 Repartizarea consumului de energie electrică a clădirilor de cercetare – ANUL 2022

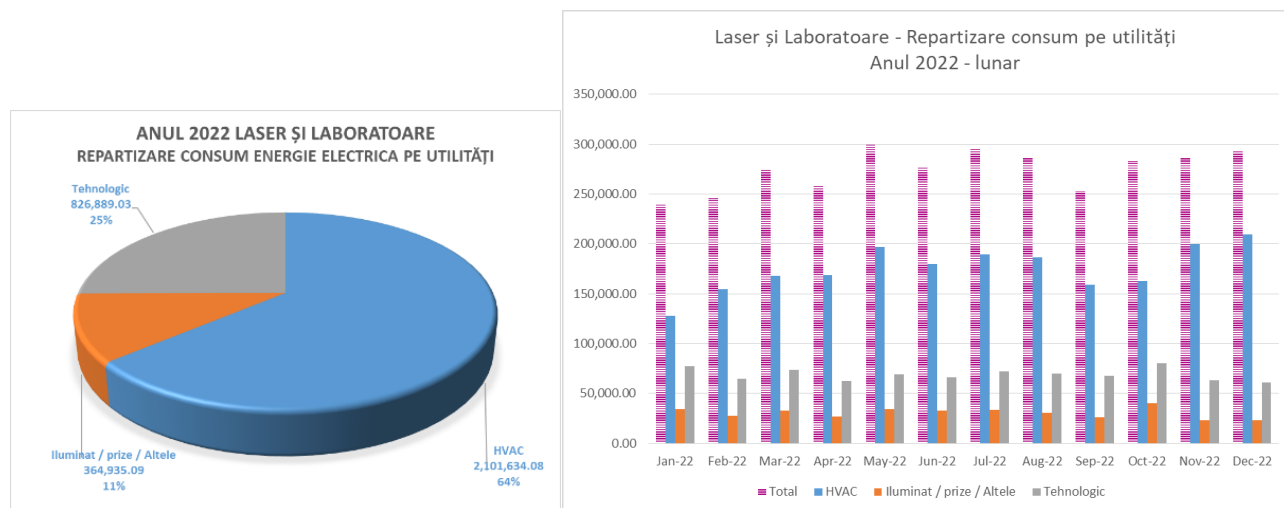


Figura 29 Repartizarea consumului de energie electrică pentru CLADIREA LASER ȘI LABORATOARE – ANUL 2022

Tabel 6. EUI Infrastructura de cercetare ELI-NP

EUI Energy STAR				EUI ELI - NP - întreaga infrastructură de cercetare						
kBTU/sf/an		kWh/m2/an		AN	Factor de conversie	Consum total de energie electrică	kWh/m2/an		kBTU/sf/an	
la sursă	la locul de consum	la sursă	la locul de consum			kWh	la sursă	la locul de consum	la sursă	la locul de consum
318.20	115.30	1,003.79	363.72	2021	2.50	5,495,840.00	405.60	162.24	128.57	51.43
				2022	2.50	6,160,720.00	454.67	181.87	144.13	57.65

EUI Energy STAR				EUI ELI - NP - Cladirile de cercetare						
kBTU/sf/an		kWh/m2/an		AN	Factor de conversie	Consum total de energie electrică	kWh/m2/an		kBTU/sf/an	
la sursă	la locul de consum	la sursă	la locul de consum			kWh	la sursă	la locul de consum	la sursă	la locul de consum
318.20	115.30	1,003.79	363.72	2021	2.50	4,874,596.08	477.21	190.88	151.27	60.51
				2022	2.50	5,412,989.02	529.91	211.97	167.98	67.19

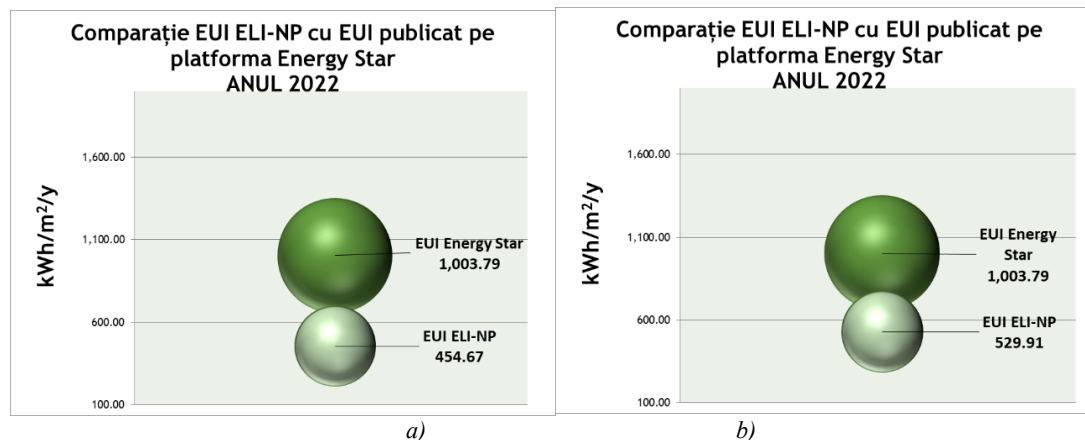


Figura 30 Comparație EUI ELI-NP cu EUI median laboratoare de cercetare publicat de EPA Energy Star a) întreaga infrastructură b) CLĂDIRILE în care se desfășoară activitate de CERCETARE

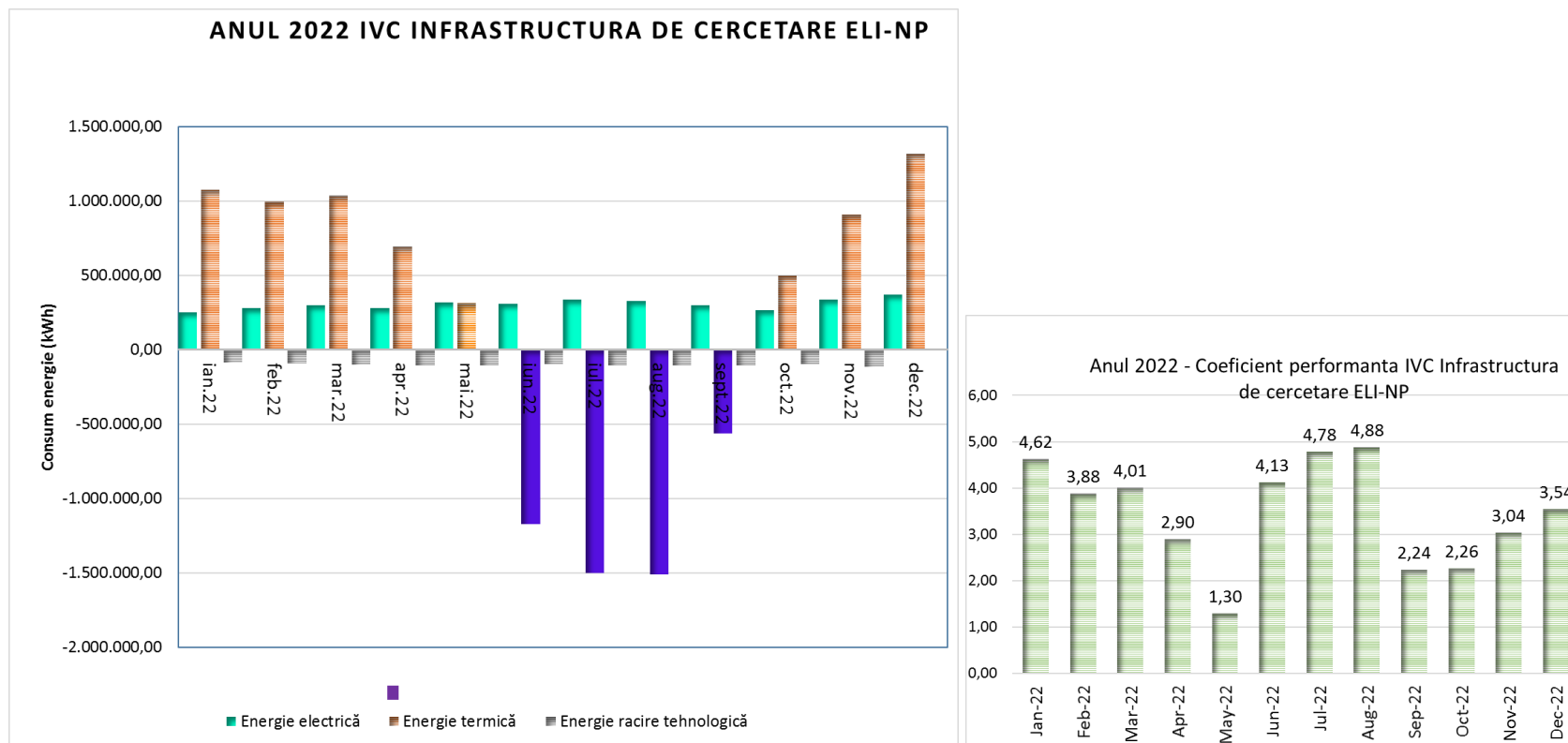


Figura 31. ANUL 2022 Consum energetic IVC Infrastructura ELI-NP. Coeficient de performanță sistem IVC geotermal

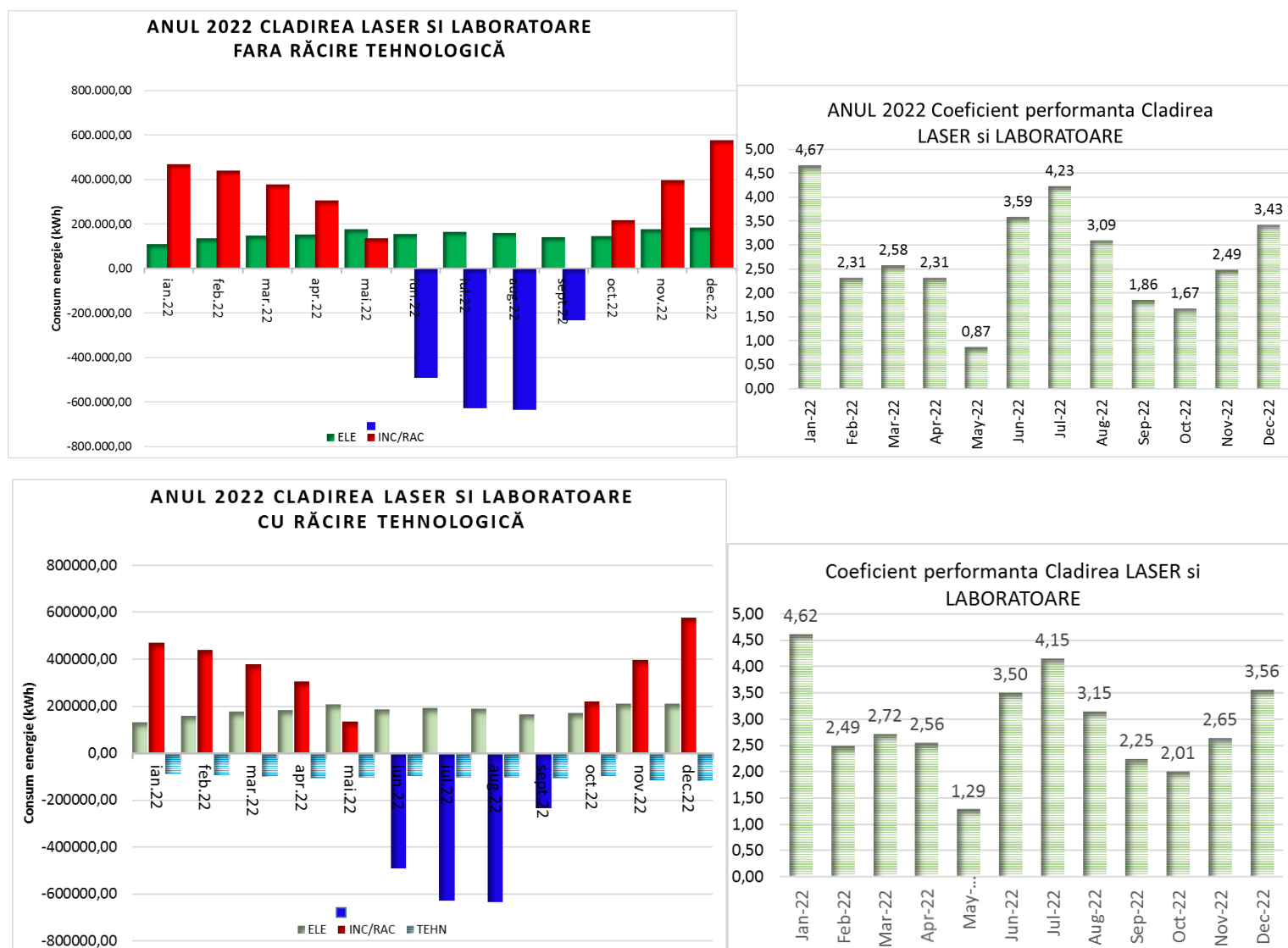


Figura 32. ANUL 2022 Consum energetic IVC Clădirea Laser si Laboratoare – grad de utilizare 100%.. Coeficient de performanță sistem IVC geotermal

În vederea realizării controlului optimal, în cadrul strategiei în curs de implementare la ELI-NP, se vor utiliza două categorii de scheme de exploatare: prima schemă vizează eficientizarea energetică prin echilibrarea hidraulică a circuitelor de pe bucla de primar a sistemului geotermal, iar cea de-a doua schemă utilizează tehnici de eficientizare a circulației pe buclele de secundar prin secvențierea utilizării distribuției agentului termic către punctele de distribuție terminale. Rezultatele așteptate prin optimizările funcționale propuse se referă atât la reducerea consumurilor energetice (cu un rezultat așteptat de 25%) dar și la eficientizarea distribuției sarcinii termice între diferitele puncte de distribuție (prin preluare de sarcină între diferitele ploturi aflate în exploatare - 18 unități).

Se realizează monitorizare hidrogeologică a câmpului de foraje, valori ale temperaturii și presiunii hidrostatice pentru acviferele monitorizate fiind prezentate în figura 41.

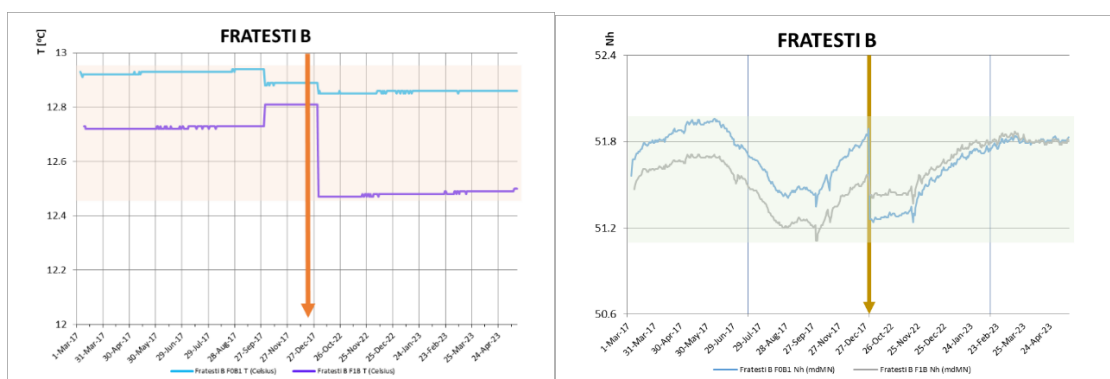


Figura 33. Monitorizare hidrogeologică Comparatie temperatura și presiune hidrostatica (valori înregistrate în 2017 – valori înregistrate în 2023)

Analiza va fi extinsa pas cu pas astfel încât la momentul utilizării de 100% a infrastructurii să existe o imagine completa și optimizata a comportării întregului sistem.

Rezultatele monitorizării în exploatare pe termen lung așteptate ar fi posibilitatea de a determina coeficienții de performanță ai sistemului și, în consecință, de a identifica acțiunile de executat în vederea reglajului fin și a optimizării sistemului în exploatare. Scopul final este identificarea strategiei de optimizare adecvate, în urma căreia coeficientul de performanță să crească la cea mai bună valoare posibilă în condițiile impuse de activitatea infrastructurii de cercetare.

5. Concluzii și direcții viitoare de cercetare

Această lucrare are la bază studiile teoretice practice asupra controlului automat, cu accent pe controlul automat al sistemelor IVC și pe cercetarea experimentală efectuată de autor asupra sistemului de mare capacitate IVC geotermal cu pompe de căldură instalat și operațional la ELI-NP.

Pe baza studiului teoretic și a cercetării experimentale realizate au rezultat următoarele concluzii:

-
- Optimizarea are sens în corelare cu automatizarea instalațiilor. Acestea privite ca întreg, în strânsă legătură, reprezintă astăzi cea mai bună opțiune, pentru obținerea unor soluții sustenabile de utilizare responsabilă a resurselor.
 - Efectele operării și controlului automat al clădirilor conduc la diminuarea impactului asupra mediului precum și reducerea amprente de carbon pentru clădiri din zona industrială considerate a fi principalul vector de impact asupra mediului înconjurător.
 - Prin valorificarea datelor obținute în urma monitorizării și exploatării sistemului de mare capacitate IVC geotermal cu pompe de căldură instalat la ELI-NP, împreună cu sistemul automat DDC aferent, se poate proba practic sustenabilitatea energiei geotermale ca alternativă pentru eficiență energetică ridicată. Infrastructura de cercetare ELI-NP are o eficiență energetică ridicată în raport cu alte obiective similare, coeficienții de performanță ai sistemului IVC calculați au, în prezent, valori scăzute, dar se așteaptă o îmbunătățire a acestora urmând finalizării și implementării strategiei de optimizare aflate în lucru.
 - Având în vedere că există, pe plan mondial, o preocupare pentru studiul consumului de energie al infrastructurilor și laboratoarelor de cercetare, studiul de caz ELI-NP poate furniza informații cu privire la reducerea consumului energetic datorată utilizării sistemului IVC geotermal cu pompe de căldură.
 - Împreună cu multitudinea de instrumente / aplicații software existente în prezent, sistemul ELI-NP permite realizarea mai multor modele care pot aduce date noi cu privire la comportarea și impactul sistemelor geotermice cu pompe de căldură. Se urmărește evaluarea performanței viitoare și optimizarea sistemului geotermal de la ELI-NP, în sine, dar și utilizarea modelelor pentru realizarea altor sisteme similare.
 - Din punctul de vedere al optimizării sistemelor hidraulice care utilizează pompe de căldură în buclă închisă, principalele aspecte de urmărit sunt cele legate de eficientizarea consumului de energie electrică aferent stațiilor de pompare precum și echilibrarea hidraulică judicioasă a sistemului atât pe circuitul primar cât și pe cel secundar. Cele două studii de caz folosite ca referință bibliografică în prezentul referat urmăresc aceste aspecte din perspectiva utilizatorului acestor sisteme, similitudinea cu sistemul geotermal al ELI-NP fiind asigurată de graficele de utilizare similare. În același timp trebuie menționat faptul că aceste studii se diferențiază de situația curentă de exploatare a infrastructurii ELI-NP prin faptul că parametrii termici ai obiectivelor respective nu necesită condiții de exploatare atât de restrictive ca în cazul obiectivului nostru. Drept urmare, întregul grafic de exploatare al infrastructurii ELI-NP va trebui adaptat conform cerințelor operaționale care primează în fața cerințelor de economie energetică.
 - Având ca punct de pornire utilizarea continuă a circuitelor hidraulice care alcătuiesc bucla de primar a unui sistem geotermal de suprafață, orice strategie de exploatare trebuie să țină cont de diminuarea consumurilor energetice prin modularea celor doi parametri de comandă ai unui astfel de sistem: debit de agent termic, respectiv temperatura pe bucla de primar. Prezenta teză de doctorat prezintă efectele pozitive ale modulării debitului de agent termic prin utilizarea sistemelor de pompare cu turație variabilă, fără a atinge subiectul modulării conjugate atât a debitului de agent termic cât și a temperaturii pe buclă. O direcție viitoare de cercetare presupune utilizarea

simultană ca parametri de referință a debitului de agent termic și a temperaturii pe bucla primară prin utilizarea vanelor de amestec montate pe astfel de sisteme închise. De asemenea, în cadrul infrastructurii ELI-NP, din dorința de a scădea coeficientul de performanță a sistemului, se utilizează o zonă de reper pentru care s-a adoptat mixajul agentului termic din bucla primară cu secundarul aferent circuitelor de răcire tehnologice. Până la momentul actual, rezultatele au fost afectate de faptul că circuitele de comandă ale buclei primare sesizează injecția parazitară a unor debite incidente buclei primare fără a exista capacitatea sistemului de a redefini o structură de comandă care să țină cont de amestecul respectiv. De aici rezultă o a doua direcție de cercetare care presupune introducerea unor echipamente de câmp suplimentare care să poată fi capabile să ofere sistemului capacitatea de control simultană atât cantitativ (debit de agent termic) cât și calitativ (temperatura de comandă pe fiecare buclă în parte).

- Strategia de operare și control prezentată în teza de doctorat a fost validată prin rezultatele obținute de-a lungul celor șapte ani de operare a sistemului generând un impact asupra temperaturii pânzei freatice nesemnificativ ceea ce conduce la premisa că operarea acestui sistem se va putea face în condiții de încărcare nominală pe o perioadă mai mare de 20 de ani așa după cum indicau testele de răspuns termic din faza de proiectare. În dorința de a economisi energie, orice intervenție în cadrul strategiei de operare trebuie realizată ținând cont de faptul că sursa energetică în acest caz implică un factor de instabilitate generat de potențialul geotermal, spre deosebire de stabilitatea unor surse energetice convenționale (cazan și chiller).