

CONTROL MULTI-AGENT PENTRU SISTEME TERMICE ÎN CLĂDIRI

Delia Mihaela Rădulescu

delia.mihaela2010@gmail.com

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare în Informatică - ICI București

Rezumat: Problema utilizării eficiente a energiei și problema conservării energiei în interiorul unei clădiri în condițiile asigurării unui grad de confort sunt probleme complexe care au atras atenția cercetătorilor în ultimele decenii. În lucrare se prezintă mai multe modalități de rezolvare a problemei utilizării eficiente a energiei în clădiri. La început se definește problema optimizării consumului de energie în clădiri, subiectele fiind: energie, confort și control. În continuare se prezintă pe scurt sistemele de control convenționale în clădiri precum și avantajele și dezavantajele lor. Se pune accent pe tehnicile de inteligență artificială (Artificial Intelligence - AI) care au fost aplicate pentru controlul atât al clădirilor convenționale cât și al celor bioclimatice. Se descrie modul în care dezvoltarea sistemelor inteligente de control a îmbunătățit eficiența sistemelor de control pentru managementul mediului interior, luând în considerare preferințele utilizatorilor. Sistemele de control ce au încorporate agenți software autonomi, denumiți agenți de control, oferă o bază pentru controlul autonom al sistemelor distribuite senzor/acționator. Prin schimbul de informații și în cazuri speciale, raționament, agenții de control pot folosi în colaborare resursele sistemului de control într-un mod care să abordeze la nivel global sarcinile de sistem. Se prezintă în continuare o aplicație care are ca obiect realizarea controlului sistemelor termice în clădiri, cu accent special pe încălzire, ventilație, aer condiționat și producerea de apă caldă menajeră. Aplicația utilizează un control multi-agent.

Cuvinte cheie: energie, sisteme de control, controlere inteligente, sisteme fuzzy, control multi-agent.

Abstract: The problem of efficient use of energy and the problem of energy conservation inside a building when comfort conditions are given are complex problems that attracted the interest of scientific researchers in the last decades. This paper presents the ways of solving the problem of efficient utilization of energy in buildings. In the beginning is defined the problem of optimizing energy consumption in buildings, the subjects of interest being: power, comfort and control. Next we briefly introduce conventional control systems in buildings and describe their advantages and disadvantages. The focus is on techniques of artificial intelligence (AI) that have been applied for the control of both conventional buildings and those bioclimatic. We describe how the development of intelligent control systems improve the efficiency of control systems for environmental management inside the building, taking into account user preferences. Control systems that incorporate autonomous software agents, known as control agents, provide a base for the autonomous control of distributed systems sensor/actuator. By sharing information and in special cases reasoning, control agents may use in conjunction resources of the control system in a manner that view system tasks at a global level. In the following we describe an application for the control of heating systems in buildings, with particular emphasis on heating, ventilation, air conditioning and domestic hot water production. The application uses a multi-agent control.

Key Words: energy, control systems, smart controllers, fuzzy systems, multi-agent control

1. Introducere

Sectorul construcțiilor acoperă o optime din totalul activității economice în Uniunea Europeană (UE), cu mai mult de opt milioane de angajați. Activitatea intensă în construcții, împreună cu nevoia de economisire a energiei și cu politica de protecție a mediului, conduce la necesitatea elaborării unor soluții optimizate de proiectare pentru clădiri. În clădiri se consumă 40 % din cantitatea totală de energie din Uniunea Europeană (UE). Directiva UE lansată în anul 2010, "Performanța energetică a clădirilor" ("Energy Performance of Buildings" - EPBD) se referă la utilizarea eficientă a energiei în clădiri și îndeamnă națiunile membre ale UE să stabilească reglementări mai stricte în ceea ce privește utilizarea eficientă a energiei în clădiri. Implementarea directivei EU pentru clădiri (reducerea consumului de energie cu 22%) ar putea să salveze 40Mtone (echivalent cu milioane tone de petrol) până în anul 2020. Din acest motiv, unul dintre obiectivele principale ale sistemelor de control avansate, care se aplică la clădiri, este minimizarea consumului de energie.

Pentru că oamenii petrec mai mult de 80% din viața lor în interiorul unor clădiri, gradul de confort într-un loc de muncă determină esențial gradul de satisfacție și de productivitate al ocupanților. Pe de altă parte, după cum se știe, consumul de energie într-o clădire este cu atât mai mare cu cât gradul de confort al ocupanților este mai mare. Prin urmare consumul de energie și condițiile de confort sunt, de cele mai multe ori, în conflict unul cu altul. În ultimii 20 de ani, un accent deosebit a fost pus pe arhitectura bioclimatică a clădirilor. Arhitectura bioclimatică este

orientată spre confort și economie de energie, folosind sisteme de geamuri, spații solare, ventilație naturală, sisteme de răcire, etc. Arhitectura bioclimatică se concentrează pe proiectarea și construcția de clădiri bioclimatice care utilizează radiația solară și fluxul de aer natural pentru a ventila natural și pentru o răcire pasivă.

Calitatea vieții în clădiri (gradul de confort) este determinată de trei factori de bază: confortul termic, confortul vizual și calitatea aerului interior (Indoor Air Quality - IAQ). Confortul termic este determinat de indicele "Vot Mediu Predictiv" (Predictive Mean Vote - PMV) [1]. PMV se calculează prin ecuația lui Fanger [1], [2]. PMV estimează votul mediu de senzație termică pe o scară standard pentru un grup mare de persoane. Societatea Americană "American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers - ASHRAE a dezvoltat indicele de confort termic prin utilizarea următoarei codificări: -3 pentru frig, -2 pentru rece, -1 pentru ușor rece, 0 pentru natural, +1 pentru puțin cald, +2 pentru cald și +3 pentru foarte cald. PMV a fost adoptat de către standardul ISO 7730 [3]. ISO recomandă menținerea PMV la nivel 0, cu o toleranță de 0,5 ca cel mai bun confort termic.

Eficiența energetică este definită prin două componente: eficiența energetică pasivă și eficiența energetică activă. Eficiența energetică pasivă se realizează prin dispozitive care au consum redus de energie, materiale izolatoare, etc. Eficiența energetică activă se realizează prin (a) optimizare prin automatizare și reglaj și (b) prin servicii de monitorizare, menținere și îmbunătățire și software de analiză.

Problema utilizării eficiente a energiei și problema conservării energiei în interiorul unei clădiri în condițiile asigurării unui grad de confort sunt probleme complexe care au atras atenția cercetătorilor din domenii diferite, în ultimele decenii. Cu toate acestea, în esență, subiectul rămâne o problemă deschisă. În lucrare se prezintă mai multe modalități de rezolvare a problemei utilizării eficiente a energiei în clădiri. La început se formulează problema optimizării consumului de energie în clădiri, subiectele fiind: energie, confort și control. În continuare, se prezintă pe scurt sisteme convenționale de control al energiei în clădiri, precum și avantajele și dezavantajele lor. Se pune accent pe tehnicile de inteligență artificială (Artificial Intelligence - AI) care au fost aplicate pentru controlul atât al clădirilor convenționale, cât și al celor bioclimatice. Se descrie modul în care dezvoltarea sistemelor de control inteligente a îmbunătățit eficiența sistemelor de control pentru managementul mediului interior, inclusiv luând în considerare preferințele utilizatorilor. În ultimele decenii au fost elaborate mai multe studii privind agenții software autonomi. Acești agenți operează fără intervenția directă a oamenilor și realizează un control asupra propriilor acțiuni cât și asupra stării lor interne. Ei acționează cu alți agenți (posibil și cu agenți umani) prin intermediul unui limbaj de comunicare al agenților. Ei percep mediul înconjurător (care poate fi lumea fizică, utilizatorii prin intermediul unei interfețe grafice utilizator, o colecție de alți agenți, INTERNETUL sau poate toate aceste lucruri combinate) și răspund în timp util la schimbările care apar. Agenții autonomi pot chiar să aibă un comportament direcționat către un scop și să ia inițiative.

Sistemele de control ce au încorporate agenți software autonomi, denumite agenți de control, oferă o bază pentru controlul autonom al sistemelor distribuite senzor/acționator. Prin schimbul de informații și în cazuri speciale, raționament, agenții de control pot folosi în colaborare resursele sistemului de control într-un mod care să abordeze la nivel global sarcinile de sistem. Se prezintă în continuare o aplicație ce constă în controlul sistemelor termice în clădiri, cu accent special pe încălzire, ventilație, aer condiționat și producerea de apă caldă menajeră, aplicație ce utilizează un control multi-agent.

2. Ingineria sistemelor de control convenționale în clădiri

Inițial sistemele de control pentru clădiri au fost dezvoltate, în principal, pentru minimizarea consumului de energie. Termostatele au fost folosite pentru controlul temperaturii. Pentru a evita schimbările frecvente între două stări ale unui termostat au fost introduse și folosite termostate care aveau o zonă moartă "dead zone". Acest fel de control a fost numit control "bang-bang" cu zonă moartă. Cu toate acestea, nu au putut fi evitate depășirile apărute în controlul temperaturii, ceea ce a dus la o creștere a consumului de energie. În scopul de a rezolva problema, proiectanții au folosit

controlere de tip PID (Proportional–Integrate–Derivative). Deși aceste controlere au îmbunătățit situația, utilizarea unui controler PID ar putea face întregul sistem instabil. Prin urmare, cercetătorii au apelat la tehnici de control optimale, predictive, sau adaptive.

În perioada anilor 1980–1990 au fost desfășurate cercetări asupra strategiilor de control optimale și predictive. Totuși aceste cercetări nu s-au concretizat în dezvoltări industriale datorită problemelor de implementare a lor. Pentru a folosi controale optimale [4], [5] sau controale adaptive [6] este necesar să fie realizat un model al clădirii. Controlul predictiv [7] este foarte important deoarece include un model pentru viitoarele perturbări (de exemplu, creșterea temperaturii datorită radiațiilor solare, prezența oamenilor, etc.). Acesta îmbunătățește confortul termic în principal, prin reducerea supraîncălzirii, dar mai ales prin răcire în cursul nopții. Cu toate acestea, analiza matematică a comportamentului termic al unei clădiri, în general, duce la modele neliniare. Este important de menționat, că aceste modele pot să difere de la o clădire la alta. Controlerele adaptive au capacitatea de auto-reglare și de adaptare la condițiile climatice din diferite clădiri. Mai precis, regulatoare fuzzy adaptive sunt considerate ca fiind cele mai promițătoare sisteme de control adaptive pentru clădiri. Un alt mod de a rezolva problema este prin utilizarea metodelor de estimare a parametrilor (estimări recursive bazate pe Metoda Celor mai mici pătrate - Recursive Least-Squares estimation -RLS).

Nesler [8] a dezvoltat teoria controlului adaptiv al proceselor termice în clădiri. Algoritmii de control standard este adecvat pentru controlul proceselor de încălzire, ventilare și aer condiționat (heating, ventilation, and air conditioning - HVAC). Estimatorul RLS oferă estimări ale succesului, constantei de timp și timpului mort al unui proces. Estimatorul RLS diverge când bucla de control este supusă unei perturbații de încărcare care nu a fost luată în considerare la momentul modelării. Neliniaritatea elementului de execuție constituie o limitare a posibilității de autoreglare a controlerului. Deoarece soluțiile optime de mai sus nu sunt întotdeauna fezabile, s-au folosit soluții care aproximează soluțiile optime. Aceste tehnici au diferite dezavantaje cum ar fi:

- necesitatea construirii unui model al clădirii;
- minimizarea funcției de cost necesită folosirea elementelor de arhitectură bioclimatică. Acest lucru complică procesul de minimizare. Chiar dacă problema minimizării este rezolvată, rezultatele nu au aplicabilitate în practică;
- deoarece estimarea parametrilor trebuie făcută în timp real trebuie folosiți algoritmi existenți care sunt sensibili la zgomot. Astfel, în condiții reale, astfel de tehnici pot conduce la rezultate eronate;
- astfel de tehnici nu se ocupă cu problema de confort. Caracteristicile neliniare pot să dea naștere la probleme dificile atunci când echipamentul HVAC de monitorizare și control caracterizează indicii PMV;
- sistemele de control rezultate nu sunt prietenoase cu utilizatorii deoarece utilizatorii nu sunt antrenați să participe la configurarea propriului lor climat;
- aceste metode de control nu folosesc metode de învățare;
- controlul clasic maximizează conservarea energiei, fără a acorda atenție tehnicilor pasive.

3. Inteligența computațională în optimizarea consumului de energie în clădiri

Inteligența computațională este un domeniu de cercetare în curs de dezvoltare, care oferă instrumente puternice pentru modelarea și analiza sistemelor complexe. Inteligența computațională este preocupată de descoperirea de structuri în date și recunoașterea de modele. Aceasta cuprinde tehnici, cum ar fi rețelele neuronale, logica fuzzy și așa mai departe. Aceste tehnici produc reguli, modele și dezvoltă hărți complexe de date. Recentele progrese în domeniul tehnologiei informației au permis colectarea de volume mari de date. Inteligența computațională folosește metode inspirate din biologie pentru rezolvarea problemelor complexe de optimizare, cum ar fi algoritmi de calcul

evolutiv sau algoritmi inteligenți bazați pe roiuri de particule (particle swarm). Aplicații ale inteligenței computaționale au fost făcute în probleme de business, de marketing, probleme medicale și probleme de fabricație.

Aplicarea de metode inteligente pentru sistemele de control ale clădirilor a început în anii 1990. Tehnicile de inteligență artificială (AI) au fost aplicate pentru controlul atât al clădirilor convenționale cât și al celor bioclimatice. Controlere inteligente, construite prin utilizarea algoritmilor evolutivi au fost dezvoltate pentru controlul subsistemelor unei clădiri inteligente [9]. Îmbinarea tehnicilor bazate pe rețele neuronale, logica fuzzy și algoritmi evolutivi au condus la așa-numita Inteligență computațională (CI), care în prezent a început să fie aplicată în managementul consumului de energie în clădiri. Pentru a depăși caracteristica neliniară de calcul a PMV, întârzierile și incertitudinea prezentă în cadrul sistemului, au fost proiectați câțiva algoritmi avansați de control care au încorporat controale adaptive de tip fuzzy [10], [11], controale de confort optimal [12] și controale pentru confort care să minimizeze energia utilizată [13].

Rețele neuronale au fost utilizate pe scară largă în Japonia. Acestea au fost aplicate la produse comerciale, cum ar fi aparate de aer condiționat, aparate de umidificare, ventilatoare electrice, etc. Un sistem de două rețele neuronale a fost încorporat într-un aparat de aer condiționat pentru a permite utilizatorilor să aibă acces la o reglare de precizie. Una dintre cele două rețele neuronale estimează valoarea indicelui PMV prin utilizarea exclusivă a datelor de intrare a unui senzor. Cealaltă rețea neuronală corectează aceste ieșiri. Utilizatorul poate antrena această rețea neuronală.

Necesitatea de a obține economii de energie și pentru a garanta condițiile de confort, luând în considerare preferințele utilizatorilor, a condus la dezvoltarea de sisteme inteligente de gestionare a energiei în clădiri (Building Intelligent - Energy Management Systems - BIEMS), în special pentru clădiri mari, cum ar fi clădirile de birouri, hotelurile, clădirile publice și comerciale etc. Aceste sisteme sunt concepute să monitorizeze și să controleze parametrii de mediu ai microclimatului unei clădiri și sunt utilizate pentru a minimiza consumul de energie și costurile operaționale. Un număr mare de articole cu privire la aplicarea tehnicilor fuzzy BIEMS pot fi găsite în literatura de specialitate. Tehnicile fuzzy sunt utilizate pentru controlul confortului termic interior, confortului vizual sau calitatea aerului din interiorul unei clădiri [14], [15], [16]. Rezultatele obținute prin sistemele fuzzy sunt superioare în comparație cu cele obținute prin sistemele de control clasice. Aplicațiile practice ale controlului fuzzy și neuronal pentru încălzirea prin ventilație și aer condiționat (Heating Ventilation and Air Conditioning - HVAC), au fost cercetate cu scopul de a îmbunătăți performanța față de controlul clasic [17], [18].

Cerința pentru existența unui model matematic a funcționării unei clădiri a fost un obstacol în calea aplicării metodelor tradiționale de control în clădiri. În sistemele inteligente nu este necesar un astfel de model. Acest fapt este o inovație în dezvoltarea sistemelor de control automat. Prin încorporarea variabilelor de tip nou, variabile de nivel superior, care definesc confortul în controlerele inteligente (de exemplu PMV), a fost posibil să se controleze gradul de confort, fără a ține cont de reguli privind variabile de nivel mic cum ar fi temperatura, umiditatea și viteza aerului. În astfel de sisteme, utilizatorii încep să participe la specificarea nivelului de confort dorit. Dezvoltarea de regulatoare fuzzy pentru controlul gradului de confort termic, confort vizual și ventilație naturală, cu controlul combinat al acestor subsisteme a condus la rezultate remarcabile [19], [20]. Alte tipuri de sisteme utilizate pentru obținerea de economii de energie în clădiri sunt tehnicile neuro-fuzzy. În domeniul inteligenței artificiale, tehnicile neuro-fuzzy se referă la combinații de rețele neuronale artificiale și logica fuzzy. Tehnicile neuro-fuzzy a fost propuse de J. S. R. Jang [21]. Hibridizarea neuro-fuzzy a condus la un sistem inteligent hibrid care sinergizează aceste două tehnici prin combinarea stilului raționamentului-uman din sisteme fuzzy cu structura de învățare și de conexiune din rețele neuronale.

Sistemele hibride, cum ar fi Sistemul Inferență Adaptiv Neuro - Fuzzy (Adaptive neuro fuzzy inference system - ANFIS) [21] au fost folosite pentru predicție și pentru controlul iluminatului artificial în clădiri, urmând variante de iluminat natural. Alegerea corectă a strategiei de control predictiv, în combinație cu un model neliniar al unei clădiri, cu comportamentul utilizatorului și cu predicția parametrilor climatici permit sistemului obținerea de economii de energie și garantează un confort satisfăcător [22]. Un controller neural, dotat cu capacitățile de predicție a rețelelor

neuronale, poate fi utilizat în controlul sistemelor de încălzire hidraulice și în clădirile solare. Kanarachos și Geramanis [23] au propus un controler de rețea adaptivă neuronală (Adaptive Neural Network - ANN) pentru controlul unei singure zone de sisteme de încălzire hidronice. Intrările și ieșirile din acest controler includ parametri legați de instalația de încălzire și temperatura punctului setat de interior.

4. Controlul multi-agent a sistemelor termice în clădiri

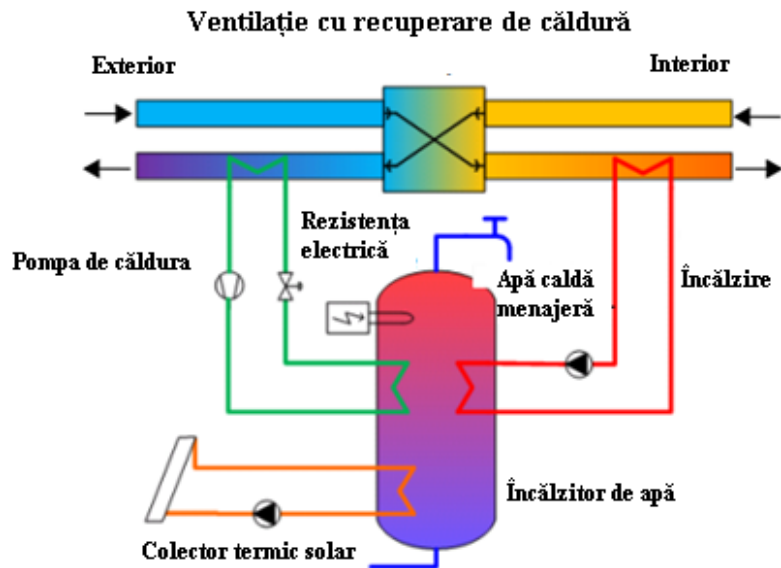
Sistemele de control ce au încorporate agenți software autonomi, denumite agenți de control, oferă o bază pentru controlul autonom al sistemelor distribuite senzor/acționator. Prin schimbul de informații și în cazuri speciale, raționament, agenții de control pot folosi în colaborare resursele sistemului de control într-un mod care să abordeze la nivel global sarcinile de sistem. Agenții de control sunt autonomi în sensul că aceștia nu au nevoie de supraveghere umană sau de monitorizare, în scopul de a funcționa. Cu toate acestea, autonomia nu înseamnă că agenții de control sunt independenți de oameni, ci mai degrabă agenții de control sunt receptivi la informațiile furnizate de către operatori, după cum este necesar și reacționează la cerințele unui operator.

Vom prezenta în continuare o aplicație ce constă în controlul sistemelor termice în clădiri, cu accent special pe încălzire, ventilație, aer condiționat și producerea de apă caldă menajeră, aplicație ce utilizează un control multi-agent. Astăzi, sistemele instalate în clădiri combină de multe ori diferite dispozitive:

- una sau mai multe pompe de căldură, care pot fi utilizate pentru producerea de apă caldă menajeră, încălzire și/sau răcire;
- ventilație cu recuperare de căldură, care să permită recuperarea căldurii între fluxurile de aer de intrare și ieșire din clădire;
- un încălzitor de apă (boiler), care poate combina diferite surse de căldură: de exemplu, un colector solar termic în partea de jos, o sursă alternativă în partea de mijloc și o rezistență electrică în partea de sus. Boilerul se poate ocupa de producerea de apă caldă menajeră și poate să contribuie la încălzirea clădirii prin schimbătoare de căldură specifice;
- alte surse alternative de energie, cum ar fi încălzirea geotermală, utilizată direct sau în combinație cu un rezervor de apă;
- soluții de stocare a energiei, prin depozitarea termică în rezervoare speciale, sau depozite geo-termale.

În astfel de sisteme, dispozitivele de multe ori se ocupă simultan cu funcții diferite, ceea ce face controlul lor mai complex. De exemplu, Figura 1 prezintă schema simplificată a unui sistem folosind unele dintre aceste dispozitive și unde pompa de căldură se ocupă atât cu producerea de apă caldă menajeră, cât și pentru încălzire prin încălzitorul de apă.

În clădirile cu consum redus de energie, companiile au dezvoltat sisteme specifice, care se ocupă de diverse funcții, folosind un singur echipament compact. Abordarea propusă poate fi aplicată pentru a proiecta controlul unor astfel de dispozitive. Aceasta poate fi de asemenea aplicată la sisteme solare combinate sau mai general, la orice sistem care implică probleme de control termic.



Considerăm astfel sisteme, care includ un:

- set de aparate (care consumă, produc sau distribuie energie),
- un set de senzori, precum și
- un set de elemente de acționare.

Obiectivul sistemului de control este de a calcula, la fiecare pas de timp, valorile care vor fi atribuite fiecărui dispozitiv de acționare la următorul pas de timp. Metoda propusă combină un proces de modelare, unde sistemul fizic este descris ca un sistem multi-agent și un mecanism care se ocupă în mod automat de controlul sistemului fizic. Diferite tipuri de agenți (de exemplu: agenți producători, agenți de consum, agenți distribuitori, agenți de mediu etc.) compun sistemul multiagent (Figura 2):

- agenții producători reprezintă elementele care au ca scop producerea de energie termică;
- agenții de consum reprezintă elementele care se ocupă cu funcții de confort folosind energia termică;
- agenții distribuitori reprezintă elementele care au impact asupra transferului de energie termică: un distribuitor reprezintă o subcategorie a rețelei de distribuție fizică. Aceasta este asociată cu un set de clienți (agenți de consum) și o serie de furnizori (agenți producători);
- în cele din urmă, agenții de mediu furnizează informații suplimentare cu privire la mediul fizic de sistem.

Această descriere conduce la o reprezentare ierarhică a sistemului fizic: producătorii sunt conectați la consumatori printr-o ierarhie de distribuitori, care reprezintă rețeaua de distribuție a energiei. Pe baza acestei reprezentări, sistemul de control funcționează astfel: folosind observațiile disponibile de la senzori din sistemul fizic, agenții construiesc planuri pentru nevoile lor de energie și resurse. O optimizare distribuită combină o selecție multicriterială și o optimizare locală a resurselor între distribuitori și furnizorii acestora, înainte de a aloca resursele clienților. Când acest pas este finalizat, producătorii, consumatorii și agenții distribuitori au un plan de resurse pe care le vor primi și/sau pe care trebuie să le furnizeze. Acest plan reprezintă o stare determinată de toate acțiunile sistemului. În final, valorile dispozitivelor de acționare ale sistemului multi-agent sunt atribuite la dispozitivele de acționare fizice, care controlează sistemul.

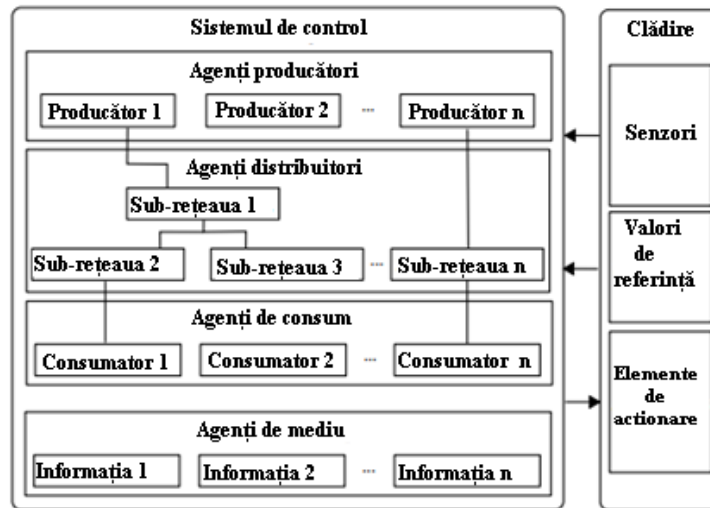


Figura 2. Privire de ansamblu asupra arhitecturii sistemului

Aceast mecanism răspunde la diferite obiective. În primul rând, reprezentarea explicită a rețelei de distribuție permite să se țină seama de costurile și restricțiile impuse. Apoi agenții încorporează modele interne care să le permită să elaboreze soluțiile, folosind restricții interne (termice). Mai mult decât atât, etapa de optimizare permite luarea în considerare a diferitelor criterii. În fine, descrierea agentului de bază crește flexibilitatea sistemului, iar înlocuirea unui agent nu influențează modelarea sistemului sau strategiile de control.

4.1 Sistem multi-agent de control automat clădire

Controlul sistemului fizic prezintă diferite etape. Procesul începe cu primirea de informații actualizate de la sistemul fizic (valori actualizate ale senzorilor). Valoarea inițială a fiecărui senzor este actualizată folosind valoarea măsurată de senzorul fizic corespunzător. Apoi, fiecare agent calculează dacă estimarea senzorilor este corectă utilizând modelul intern senzorului. Fiecare agent consumator construiește apoi un plan care descrie nevoile sale de energie și utilitatea corespunzătoare. În mod similar, fiecare agent producător construiește un plan care descrie resursele, pe care este capabil să le producă și costurile asociate. Pe baza acestor date se realizează o optimizare distribuită. Acest pas combină diferiți algoritmi ce permit selectarea, optimizarea și alocarea resurselor în funcție de criteriile alese. Se construiește pentru fiecare agent producător, consumator și distribuitor un plan cu resursele pe care le vor primi și/sau trebuie să le ofere. Utilizând modele interne pentru elemente de acționare acest plan este convertit la o stare determinată a tuturor dispozitivelor de comandă din sistem. Valorile elementelor de acționare pentru pasul următor sunt apoi asignare elementelor de acționare fizice, care controlează sistemul.

Etapa de optimizare distribuită se bazează pe agenții de distribuție. Obiectivul acestei etape este de a maximiza criteriile alese, luând în considerare în același timp caracteristicile sistemului fizic. De exemplu, atunci când sunt disponibile resurse ieftine, cum ar fi căldura produsă de către un colector termic solar, acestea trebuie să fie utilizate înaintea altor resurse mai scumpe cum ar fi cele obținute cu o rezistență electrică. Mai mult decât atât, mecanismul trebuie să anticipeze utilizarea resurselor energetice, permițând, de exemplu, să aștepte înainte de a utiliza rezistența electrică în cazul în care producția de energie solară a fost prognozată.

Mecanismul propus prezintă următoarele caracteristici: permite să fie selectate cele mai ieftine (în funcție de criterii) resurse energetice pe durata prognozată. El permite optimizarea simultană a funcționării aparatelor interdependente (de exemplu, parametrii pompei de căldură depind de valoarea temperaturii interne, de performanța ventilației pentru recuperarea căldurii, de fluxul de aer și de temperatura medie a încălzitorului de apă, care se schimbă în mod dinamic în cursul timpului), permite să se ia în considerare costul auxiliarelor și respectarea parametrilor de confort ai locatarilor. Pentru a construi acest mecanism au fost combinate metodele de selecție a resurselor energetice cu algoritmi de alocare a resurselor energetice și cu optimizarea utilizării resurselor.

Mecanismul funcționează după cum urmează: la fiecare pas de timp, un distribuitor preia nevoile tuturor clienților săi. Când toate informațiile au fost colectate se actualizează propriul plan de necesități. Aceasta se realizează prin adăugarea nevoilor fiecărui client și a costului suplimentar introdus de către distribuitor. Obiectivul este de a selecta apoi, dintre resursele disponibile, pe cele care optimizează criteriile alese, în condițiile satisfacerii nevoilor clienților. Pentru a realiza acest lucru este utilizat următorul procedeu:

1. dacă nevoile totale nu sunt acoperite de mulțimea resurselor disponibile, vor fi selectate toate acestea și se va trece la faza de calcul pentru alocarea resurselor. În caz contrar se va trece la pasul 2;
2. distribuitorul și furnizorii săi calculează un optim local al resurselor care permite să se ia în considerare efectele distribuției și a producției de energie. Cu ajutorul modelelor interne se găsește o soluție care maximizează performanțele, dar care ar putea să nu satisfacă nevoile clienților. În cazul în care resursele acoperă nevoile, se calculează o soluție de alocare a resurselor. În caz contrar se va trece la pasul 3;
3. pentru a obține un set de resurse care să satisfacă cât mai bine posibil nevoile, se pornește de la resursele inițiale stabilite de pasul 1 și se crește progresiv performanța fiecărei perechi distribuitor și furnizor (creșterea performanței scade mărimea resurselor disponibile), până când mulțimea de resurse este cât mai aproape de nevoile existente. La sfârșitul acestei faze, planul distribuitorului reține resursele selectate, care au fost optimizate cu furnizorii săi;
4. următoarea fază alocă aceste resurse pentru clienți. Pentru fiecare pas de timp al planului, resursele selectate sunt atribuite în funcție de utilitatea și de nevoile acestora. Această alocare se bazează pe un plan de producție pentru fiecare furnizor al distribuitorilor și pe un plan al furnizorilor pentru fiecare dintre clienții lor.

Descrierea ierarhică a sistemului garantează convergența mecanismului. Tot ceea ce se face presupune că toți agenții pot fi de încredere și că ei răspund la toate cererile de informații. La sfârșitul procesului, distribuitorii și producătorii au un plan de producție actualizat. Un avantaj important al acestui proces este faptul că este complet automatizat, odată ce agenții au fost definiți.

4.2 Modelarea sistemului

Obiectivul este de a proiecta sistemul de control al unui echipament compact similar cu cel prezentat în Figura 1. Senzorii și elementele de acționare disponibile sunt descrise în Tabelul 1. Unitatea combină o ventilație cu recuperare de căldură, un rezervor de stocare, o pompă de căldură, un colector termic solar și o rezistență electrică de încălzire. Modelăm aceste elemente după cum urmează (Figura 3): pompa de căldură, colectorul solar termic și rezistența electrică sunt agenți producători, confortul termic și apa caldă menajeră sunt agenți de consum. Utilizăm modelul intern de pompe de căldură. Pentru rezistența electrică, energia produsă ϵ_p = energia consumată ϵ_c :

$$\epsilon_p = \epsilon_c = P_{max} \times \Delta t \quad (\text{cu } P_{max} \text{ puterea de rezistență în W)}$$

Pentru colectorul termic solar energia produsă este:

$$\epsilon_p = S \times G \times \left(\eta_0 - \alpha_1 \times \frac{T_m - T_a}{G} - \alpha_2 \times G \times \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2 \right) \times \Delta t$$

Unde: S - suprafața colector (în m^2),

G - radiația solară (în $W \cdot m^2$),

η_0 - factorul optic,

α_1 și α_2 – coeficienții de pierdere (în $W \cdot m^{-2} K^{-1}$),

T_m - colectorul de temperatură medie,

T_a - temperatura exterioară (K).

Colectorul nu consumă energie, prin urmare $e_c = 0$.

Tabelul 2. Sensorii și elementele de acționare ale dispozitivului

Senzori	T_{wht}	Temperatura maximă de depozitare
	T_{whm}	Temperatura medie de depozitare
	T_{whb}	Temperatura minimă de depozitare
	T_{sol}	Temperatura colectorului solar termal
	T_{ext}	Temperatura externă
	T_{int}	Temperatura clădirii
	T_{old}	Temperatura aerului care iese din clădire
	T_{new}	Temperatura aerului care intră în clădire
Elemente de acționare	c_{hp}	Pompa de caldură (stop, start)
	c_{sol}	Pompa solară (in [0,1])
	c_{res}	Rezistența electrică (stop, start)
	c_{vent}	Ventilator (in [0,1])
	c_{heat}	Pompa de încălzire (in [0,1])

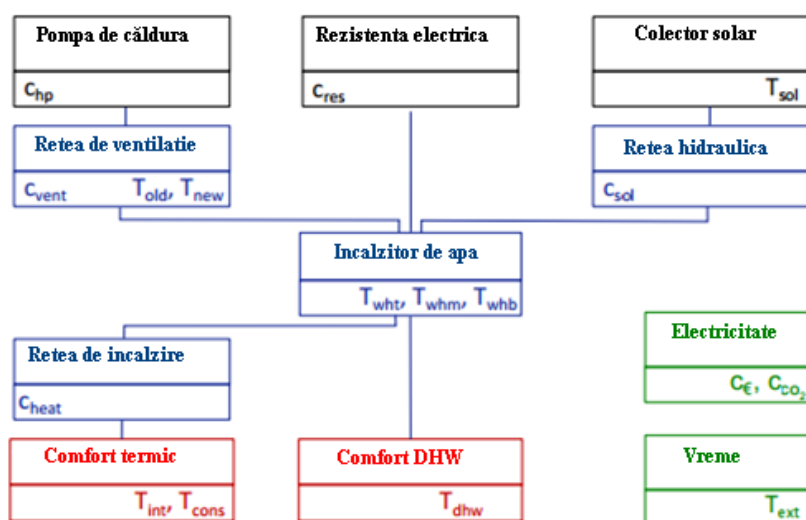


Figura 3. Modelarea sistemului utilizând arhitectura propusă

Agenții de consum reprezintă funcții de confort. Confortul termic într-o clădire este reprezentat de o valoare de referință fixată la:

- 19° C în intervalul de [0h, 10h] și [18h, 24h] în perioada zilelor de lucru;
- 16° C, între 10h și 18h;
- 19° în toate zilele de sfârșit de săptămână.

Parametri modelului de clădire au fost învățați prin utilizarea metodei celor mai mici pătrate și un simulator termic al clădirii. Confortul privind apa caldă menajeră este reprezentat de o valoare de referință fixată la 50° C, în partea de sus a boilerului.

Următorii agenți distribuitori modelează rețeaua de distribuție a energiei:

- un agent reprezintă rețeaua de ventilare, inclusiv ventilatoare și schimbătorul de recuperare a căldurii. El are un client, rezervorul de stocare și un furnizor, pompa de caldură. Modelul său intern reprezintă consumul de energie al ventilatoarelor:

$$e_2 = P_{max} \times (a_0 + a_1 \times \gamma + a_2 \times \gamma^2) \times \Delta t$$

unde: P_{max} este ventilatorul de putere maximă (W), a_0, a_1, a_2 sunt valori caracteristice ale ventilatorului și γ este comandă între 0 și 1;

- un agent reprezintă rețeaua hidraulică între colectorul termic solar și cel de încălzire a apei. El are un client, rezervorul de stocare și un furnizor, colectorul termic solar;
- un agent reprezintă rezervorul de stocare. Acesta are doi clienți, confortul de apă caldă menajeră și rețeaua de încălzire și trei furnizori, rețeaua de ventilație, rezistența electrică și rețeaua hidraulică solară;
- în cele din urmă, un agent reprezintă rețeaua de încălzire între rezervorul de stocare și fluxul de aer de intrare în clădire. El are un client, confortul termic și un furnizor, încălzitorul de apă. Acesta include o pompă.

Doi agenți de mediu reprezintă efectele externe ale sistemului: primul reprezintă prognoza meteo, corespunzând la senzorul de temperatură exterioară, cel de al doilea furnizează costurile de operare și de mediu pentru energia electrică de la rețeaua de energie electrică.

Modelele interne pentru senzori se bazează pe persistența sau modele istorice, cu excepția fluxurilor de aer de intrare și ieșire, care utilizează schimbătorul de recuperare al căldurii ca factor de performanță. Modelele interne ale elementelor de acționare reprezintă punerea în aplicare a planului de producție al agenților.

5. Concluzii

În prima parte a acestui articol se realizează o trecere în revistă a modului de rezolvare a problemei utilizării eficiente a energiei în clădiri. Primele sisteme de control în clădiri studiate sunt sistemele de control convențional: controlul cu ajutorul termostatelor, controlere de tip PID (Proportional–Integrate–Derivative) și apoi strategii de control optimale și predictive. Începând cu anii 1990, optimizarea consumului de energie în clădiri a fost realizată cu ajutorul tehnicilor de inteligență artificială. Tehnicile de inteligență artificială au fost aplicate pentru controlul atât al clădirilor convenționale, cât și al celor bioclimatice. Din cadrul acestora, tehnicile fuzzy sunt utilizate pentru confortul termic interior, confortul vizual sau calitatea aerului din interiorul unei clădiri. De observat că cerința pentru existența unui model matematic al funcționării unei clădiri nu mai este necesară în cadrul unui astfel de model. Alte sisteme inteligente sunt sistemele hibride folosite pentru predicție, controlul iluminatului artificial în clădiri, controlul sistemelor de încălzire hidraulice și clădiri solare.

În partea a doua a articolului se prezintă o aplicație ce constă în controlul sistemelor termice în clădiri, cu accent special pe încălzire, ventilație, aer condiționat și producerea de apă caldă menajeră. Această aplicație utilizează un control multi-agent. Procesul este dinamic, fiecare pas începe cu primirea de informații actualizate de la sistemul fizic (valori actualizate ale senzorilor) și se termină cu asignarea de valori elementelor de acționare care controlează sistemul. În cadrul procesului se combină diferiți algoritmi ce permit selectarea, optimizarea și alocarea resurselor în funcție de criterii alese.

BIBLIOGRAFIE

1. **FANGER, P.O.:** Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering. New York: McGraw-Hill; 1972.
2. **CHEN, K.; JIAO, Y.; LEE, E.S.:** Fuzzy Adaptive Networks in Thermal Comfort. Applied Mathematics Letters 2006;19(5):420–6.

3. **ISO 7730** (International Standard). Moderate thermal environments—determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort; 1994.
4. **WANG, S.; JIN, X.:** Model-based Optimal Control of VAV Air-conditioning System Using Genetic Algorithms. *Building and Environment* 2000;35:471–87.
5. **KUMMERT, M.; ANDRE, P.; NICOLAS, J.:** Optimal Heating Control in a Passive Solar Commercial Building. *Solar Energy* 2001;69(Nos. 1–6):103–16.
6. **CURTIS, P.S.; SHAVIT, G.; KREIDER, K.:** Neural Networks Applied to Buildings - A Tutorial and Case Studies in Prediction and Adaptive Control. *ASHRAE Transactions* 1996;102(1).
7. **MOREL, N.; BAUER, M.; EL-KHOURY, KRAUSS J.:** Neurobat, a Predictive and Adaptive Heating Control System Using Artificial Neural Networks. *International Journal of Solar Energy* 2000;21:161–201.
8. **NESLER, C.G.:** Adaptive Control of Thermal Processes in Buildings. *IEEE Control Systems Magazine* 1986;6(4):9–13.
9. **LOPEZ, L.; SANCHEZ; HAGRAS, H. C. V.:** An Evolutionary Algorithm for the Off-line Data Driven Generation of Fuzzy Controllers for Intelligent Buildings. In: *Systems, Man and Cybernetics*, 2004.
10. **CALVINO, F.; GENNUSCA, M. L.; RIZZO, G.; SCACCIANOCE, G.:** The Control of Indoor Thermal Comfort Conditions: Introducing a Fuzzy Adaptive Controller. *Energy and Buildings* 2004;36:97–102.
11. **SINGH, J.; SINGH, N.; SHARMA, J. K.:** Fuzzy Modelling and Control of HVAC Systems - A Review. *Journal of Scientific and Industrial Research* 2006;65(6):470–6.
12. **ARTHUR MAC, J. W.; GRALD, E. W.:** Optimal Comfort Control for Variable-Speed Heat Pumps. *ASHRAE Transactions* 1998;94:1283–97.
13. **FEDERSPIEL, C. C.; ASADA, H.:** User-adaptable Comfort Control for HVAC Systems. *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control* 1994;116(3):474–486.
14. **FRAISSE, G.; VIRGONE, J.; ROUX, J. J.:** Thermal Comfort of a Discontinuously Occupied Building Using a Classical and a Fuzzy Logic Approach. *Energy and Buildings* (26), 1997, pp. 303–316.
15. **KOLOKOTSA, D.; KALAITZAKIS, K.; STAVRAKAKIS, G. S.; TSOUTSOS, T.:** Applying Genetic Algorithms for the Decision Support of Thermal, Visual Comfort, Indoor Air Quality and Energy Efficiency In Buildings. *Proceedings of NTUA RENES Conference in Renewable Energy Sources - Priorities in the Liberalization of the Energy Market*, Athens, Greece, 2001.
16. **DOUNIS, A.I.; SANTAMOURIS, M.; LEFAS, C.C.; ARGIRIOU, A.:** Design of a Fuzzy Set Environment Comfort System. *Energy and Buildings* 1994;22:81–87.
17. **SHEPHERD, A. B.; BATTY, W. J.:** Fuzzy Control Strategies to Provide Cost and Energy Efficient High Quality Indoor Environments in Buildings with High Occupant Densities. *Building Service Engineering Research and Technology* 2003;24(1): 35–45.
18. **LIANG, J. D. U. R.:** Thermal Comfort Control Based on Neural Network for HVAC Application. In: *Control applications 2005, CCA 2005, proceedings of IEEE conference, 2005*, pp. 819–24.
19. **ARDEHALI, M. M.; SABOORI, M.; TESHNELAB, M.:** Numerical Simulation and Analysis of Fuzzy PID and PSD Control Methodologies as Dynamic Energy Efficiency Measures. *Energy Conversion and Management* 2004;45:1981–92.
20. **LAH, M. T.; BORUT, Z.; PETERNELJ, J.; KRAINER, A.:** Daylight illuminance Control with Fuzzy Logic. *Solar Energy* 2006;80:307–21.

21. **JANG, J. S. R.; SUN, C. T.; MIZUTANI, E.:** Neuro-fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall; 1996.
22. **MOREL, N.; BAUER, M.; EL-KHOURY, K. J.:** Neurobat, a Predictive and Adaptive Heating Control System Using Artificial Neural Networks. International Journal of Solar Energy 2000;21:161–201.
23. **KANARACHOS, A.; GERAMANIS, K.:** Multivariable Control of Single Zone Hydronic Heating Systems with Neural Networks. Energy Conversion Management 1998;13(13):1317–36.