

Rezumat teză de abilitare

Contribuții privind integrarea sistemelor HVAC-R avansate pentru clădiri eficiente energetic: pompe de căldură, tehnologii de răcire, stocare termică și control digital în contextul tranziției energetice europene

Conf. univ. dr. ing. Marius – Costel BALAN

Prezenta teză de abilitare sintetizează contribuțiile științifice, didactice și profesionale dezvoltate, conturând o direcție de cercetare coerentă și actuală: integrarea sistemelor HVAC-R avansate în clădiri eficiente energetic, în contextul tranziției energetice și al decarbonizării sectorului construcțiilor la nivel european. Demersul științific propus depășește abordarea clasică a instalațiilor, prin integrarea conceptelor de eficiență energetică, utilizare a surselor regenerabile, digitalizare și modelare predictivă, contribuind la dezvoltarea unor soluții tehnice sustenabile și replicabile.

Primul capitol evidențiază evoluția profesională și științifică, demonstrând o dezvoltare progresivă, orientată strategic către domenii de interes major la nivel european, precum clădirile NZEB/ZEB, reducerea emisiilor de carbon și digitalizarea sistemelor energetice. Activitatea didactică și de cercetare este susținută prin contribuții științifice relevante, participări în proiecte naționale și internaționale și colaborări cu mediul socio-economic, consolidând transferul de cunoștințe către aplicații reale.

Capitolul al-II-lea poziționează cercetarea în contextul științific actual al decarbonizării sistemelor HVAC-R, evidențiind contribuții proprii în optimizarea performanțelor energetice prin recuperarea energiei și integrarea surselor regenerabile. Rezultatele obținute în studiile privind răcirea adiabatică, intensificarea transferului de căldură în schimbătoarele de căldură și dezvoltarea sistemelor frigorifice cu absorbție acționată solar demonstrează capacitatea de a valorifica energia reziduală și de a reduce consumurile energetice. Integrarea modelării matematice cu validarea experimentală conduce la soluții inovatoare, aplicabile în sisteme reale, contribuind la creșterea eficienței globale a instalațiilor.

Capitolul al-III-lea tratează stocarea energiei termice ca element strategic în arhitectura sistemelor energetice moderne. Contribuțiile vizează analiza comparativă și integrarea diferitelor tipuri de stocare – sensibilă, latentă și chimică – precum și fundamentarea criteriilor de selecție și dimensionare în funcție de aplicație. Sunt evidențiate soluții avansate de stocare intersezonieră și utilizarea materialelor cu schimbare de fază, demonstrând rolul acestora în creșterea flexibilității energetice, reducerea vârfurilor de sarcină și optimizarea consumurilor. Abordarea propusă susține integrarea eficientă a surselor regenerabile și contribuie la dezvoltarea unor sisteme energetice reziliente.

Capitolul al-IV-lea extinde aria cercetării către clădirile de patrimoniu, analizând impactul instalațiilor asupra mediului interior și asupra integrității construcțiilor de cult. Rezultatele investigațiilor realizate evidențiază deficiențe majore generate de soluții tehnice neadaptate, cu efecte directe asupra microclimatului și conservării elementelor artistice. Contribuția principală constă în definirea unui cadru conceptual pentru integrarea instalațiilor în astfel de clădiri, bazat pe stabilizarea microclimatului și abordarea multidisciplinară a intervențiilor. Se susține necesitatea dezvoltării unor metodologii specifice de calcul higrotermic și a unui ghid de proiectare dedicat, în concordanță cu particularitățile acestor construcții.

Capitolul al-V-lea evidențiază dezvoltarea unei infrastructuri experimentale integrate – laboratorul HVAC-R NIBE din cadrul TUIASI – conceput ca platformă de cercetare aplicată și validare experimentală. Această infrastructură permite monitorizarea în timp real a funcționării sistemelor energetice, colectarea și analiza datelor relevante, precum și determinarea indicatorilor de performanță, facilitând corelarea riguroasă dintre modelele teoretice și comportamentul real al sistemelor. În acest context, laboratorul oferă un cadru avansat pentru evaluarea comparativă a diferitelor soluții tehnologice și pentru dezvoltarea unor strategii de operare optimizate.

Pe baza acestei platforme experimentale, capitolul dezvoltă și validează conceptul de Digital Twin aplicat sistemelor HVAC-R, ca instrument esențial pentru digitalizarea și optimizarea sistemelor energetice din clădiri. Prin realizarea unei legături bidirecționale între sistemul fizic și modelul virtual, se creează premisele pentru monitorizare avansată, simulare predictivă și optimizare în timp real. Integrarea datelor experimentale în modele numerice permite evaluarea scenariilor de operare și fundamentarea deciziilor fără intervenții directe asupra sistemelor reale, contribuind la dezvoltarea unor soluții inteligente și adaptative.

Aplicațiile dezvoltate și validate evidențiază impactul semnificativ al strategiilor de control asupra performanței energetice, demonstrând potențialul ridicat al abordărilor bazate pe date reale și modele predictive. Rezultatele obținute au aplicabilitate directă în proiectarea și exploatarea clădirilor eficiente energetic, facilitând integrarea pompelor de căldură, optimizarea consumurilor și reducerea emisiilor de carbon.

În concluzie, contribuțiile prezentate în cadrul tezei susțin tranziția către sisteme HVAC-R inteligente, eficiente și sustenabile, aliniate obiectivelor europene privind decarbonizarea mediului construit. Direcțiile viitoare de cercetare vizează extinderea conceptului de Digital Twin, integrarea inteligenței artificiale în controlul sistemelor și dezvoltarea unor soluții energetice hibride, adaptate diversității tipurilor de clădiri. Prin îmbinarea cercetării fundamentale cu validarea experimentală și aplicațiile practice, teza oferă o contribuție solidă și relevantă la dezvoltarea domeniului ingineriei instalațiilor.

Habilitation Thesis Abstract

Contributions to the Integration of Advanced HVAC-R Systems for Energy-Efficient Buildings: Heat Pumps, Cooling Technologies, Thermal Energy Storage and Digital Control in the Context of the European Energy Transition

Assoc. Prof. PhD Eng. Marius-Costel BALAN

This habilitation thesis synthesizes the scientific, educational, and professional contributions developed after the completion of doctoral studies, outlining a coherent and contemporary research direction: the integration of advanced HVAC-R systems into energy-efficient buildings, in the context of the European energy transition and decarbonization of the built environment. The proposed scientific approach goes beyond conventional building services engineering by integrating concepts such as energy efficiency, renewable energy utilization, digitalization, and predictive modeling, contributing to the development of sustainable and scalable technical solutions.

The first chapter presents the professional and scientific evolution, highlighting a progressive and strategically oriented development towards major European priorities, including NZEB/ZEB buildings, carbon emission reduction, and the digitalization of energy systems. The academic and research activities are supported by relevant scientific contributions, participation in national and international research projects, and collaboration with the socio-economic environment, strengthening the transfer of knowledge into real-world applications.

Chapter II positions the research within the current scientific context of HVAC-R system decarbonization, emphasizing original contributions in improving energy performance through energy recovery and renewable energy integration. The results obtained from studies on adiabatic cooling, heat transfer enhancement in heat exchangers, and the development of solar-driven absorption refrigeration systems demonstrate the potential for valorizing waste energy and reducing overall energy consumption. The integration of mathematical modeling with experimental validation leads to innovative and applicable solutions, contributing to increased system efficiency.

Chapter III addresses thermal energy storage as a strategic component in modern energy systems. The contributions focus on the comparative analysis and integration of different storage types—sensible, latent, and thermochemical—as well as the establishment of selection and sizing criteria depending on the application. Advanced solutions such as seasonal storage and phase change materials are highlighted, demonstrating their role in increasing system flexibility, reducing peak loads, and optimizing energy consumption. The proposed approach supports the efficient integration of renewable energy sources and contributes to the development of resilient energy systems.

Chapter IV extends the research scope to heritage buildings, analyzing the impact of building services systems on indoor environmental quality and structural integrity, particularly in religious buildings. The investigations reveal significant deficiencies caused by inadequate technical solutions, with direct effects on microclimate stability and the preservation of artistic elements. The main contribution lies in defining a conceptual framework for integrating building services in such sensitive environments, based on microclimate stabilization and a multidisciplinary approach. The need for dedicated hygrothermal calculation methodologies and specific design guidelines is emphasized, tailored to the unique characteristics of heritage buildings.

Chapter V highlights the development of an integrated experimental infrastructure—the HVAC-R NIBE laboratory within TUIASI—designed as a platform for applied research and experimental validation. This infrastructure enables real-time monitoring of energy systems, acquisition and analysis of relevant operational data, and determination of performance indicators, facilitating a robust correlation between theoretical models and real system behavior. In this context, the laboratory provides an advanced framework for comparative evaluation of technological solutions and for developing optimized operational strategies.

Based on this experimental platform, the thesis develops and validates the Digital Twin concept applied to HVAC-R systems, representing a major contribution of the research. By establishing a bidirectional link between the physical system and its virtual model, the approach enables advanced monitoring, predictive simulation, and real-time optimization. The integration of experimental data into numerical models allows the evaluation of operational scenarios and supports decision-making without direct intervention on real systems, opening new perspectives for intelligent building systems.

The developed and validated applications demonstrate the significant impact of control strategies on energy performance, highlighting the effectiveness of data-driven and model-based approaches. The results have direct applicability in the design and operation of energy-efficient buildings, supporting the integration of heat pumps, optimization of energy consumption, and reduction of carbon emissions.

In conclusion, the contributions presented in this thesis support the transition towards intelligent, efficient, and sustainable HVAC-R systems, aligned with European objectives for the decarbonization of the built environment. Future research directions include the extension of the Digital Twin concept, the integration of artificial intelligence in HVAC-R system control, and the development of hybrid energy solutions adapted to various building types. By combining fundamental research with experimental validation and practical applications, the thesis provides a solid and relevant contribution to the advancement of building services engineering.