

Influența unui dezechilibru hidraulic asupra corpurilor de încălzire ale unei coloane

Cosmin IORDACHE

Universitatea Tehnică de Construcții București

Email : c.iordache@student.utwente.nl

Vlad IORDACHE*

Universitatea Tehnică de Construcții București

Email : viordach@yahoo.com

Abstract: *Balancing the indoor heating network has an important role on thermo-hydraulic operation of the installation as well as ensuring the interior comfort. In this study we want to quantify the effect of a single unbalance on the entire heating column and on the supplied rooms. The operation of the heating column was simulated through a system of 66 hydraulic and thermal equations that connected the water flows to the room's indoor air temperatures. We analyzed the effect of unbalancing a single heating device within a column while other heating devices remained balanced according to design. It was determined that by adding an additional loss of 300 Pa leads to a major worsening of thermal comfort in the affected room and minor effects in other rooms.*

Key words : Hydronic balance, Flow distribution, Interior temperature, Hydronic heating

Rezumat: *Echilibrarea instalațiilor de încălzire are un rol important în funcționarea termo-hidraulică a acestora, precum și pentru asigurarea confortului la interiorul camerelor. În acest studiu dorim să cuantificăm efectul unui singur dezechilibru asupra întregii coloane a unei instalații de încălzire și a camerelor deservite de aceasta. Funcționarea coloanei a fost simulată prin intermediul unui sistem de 66 ecuații hidraulice și termice care realizează legătura între dezechilibrarea coloanei și temperaturile interioare ale camerelor. S-a analizat efectul pe care îl are dezechilibrarea unui singur corp de încălzire din cadrul unei coloane, celelalte corpuri rămânând echilibrate conform situației de proiectare. S-a determinat că introducerea unei pierderi suplimentare de sarcină de 300 Pa conduce la înrăutățirea majoră a confortului termic în camera unde s-a produs dezechilibrul, efectul asupra celorlalte camere rămânând minor.*

1. Introducere

Instalațiile de încălzire din clădire sunt dimensionate astfel încât să asigure debitele de agent termic nominale pentru a obține temperaturi interioare de confort [1] prestabilite prin tema de proiectare. După dimensionarea instalației interioare de încălzire trebuie realizată etapa de echilibrare hidraulică a instalației. Această etapă conduce la închiderea parțială a unor robinete de reglaj (plasați pe returul corpului de încălzire) în vederea echilibrării instalației și asigurării debitelor de agent termic necesare fiecărui corp de încălzire [2]. Totuși, în timpul funcționării unei instalații de încălzire pot apărea diferite dezechilibre hidraulice: fie nu s-a realizat

echilibrarea corespunzătoare de la început, fie un anumit proprietar a plecat de acasă închizându-și robinetul de pe tur pentru a nu consuma căldură cât timp nu este prezent în apartament, fie s-au jucat copiii la robinetul de pe tur, sau alte cauze. Ca urmare a acestor dezechilibre față de varianta echilibrată din proiectare [3], debitele de agent termic ce trec prin corpul de încălzire nu mai sunt cele proiectate, deci fluxurile de căldură cedate de corpurile de încălzire spre camere vor fi diferite față de cele din proiectare și în final temperaturile interioare nu vor mai fi cele de confort termic. Deci, un dezechilibru hidraulic în instalația încălzire conduce către un disconfort termic în camerele deservite de instalație.

Iată câteva întrebări la care dorim să răspundem în acest articol : este mare acest disconfort datorat unui dezechilibru hidraulic ? Efectul unui dezechilibru este grav ? Cât este de importantă echilibrarea hidraulică a instalației ? Cercetările privind efectele dezechilibrelor hidraulice în instalațiile de încălzire sunt importante, deoarece pot indica "robustețea" instalației și clădirii la astfel de solicitări.

În acest articol investigăm comportamentul unei coloane dintr-o instalație de încălzire în cazul unui singur dezechilibru hidraulic prezent în instalație (la un singur corp de încălzire) datorat introducerii unei pierderi de sarcină locale de 300 Pa.

În continuare vom prezenta succint: clădirea și instalația analizată, modelarea matematică a funcționării instalației de încălzire și rezultatele simulării realizate, punând în evidență efectele dezechilibrului hidraulic.

2. Clădirea și instalația de încălzire analizată

Analiza a fost realizată pe o clădire reală, de tip rezidențial, situată în București, având regimul de înălțime S+P+9E (**Figura 1a**). Se va analiza efectul dezechilibrului survenit pe o coloană simplă ce deservește un număr de 10 camere (**Figura 1b**).

În partea de proiectare a instalației de încălzire au fost efectuate următoarele etape:

- S-a determinat necesarul de căldură pentru fiecare cameră a coloanei (**Figura 1c**). Camerele de la ultimul nivel și de la parter sunt caracterizate de valori mai ridicate ale necesarului de căldură.
- Au fost alese corpuri de încălzire din aluminiu cu elemente pentru toate camerele coloanei.
- S-a dimensionat și echilibrat coloana instalației de încălzire aferentă camerelor analizate.

Instalația de încălzire este cu circulație forțată de tip bitubular cu distribuție inferioară (**Figura 1b**), fiind racordată la o rețea exterioară de agent termic cu parametri nominali 90/70 °C.

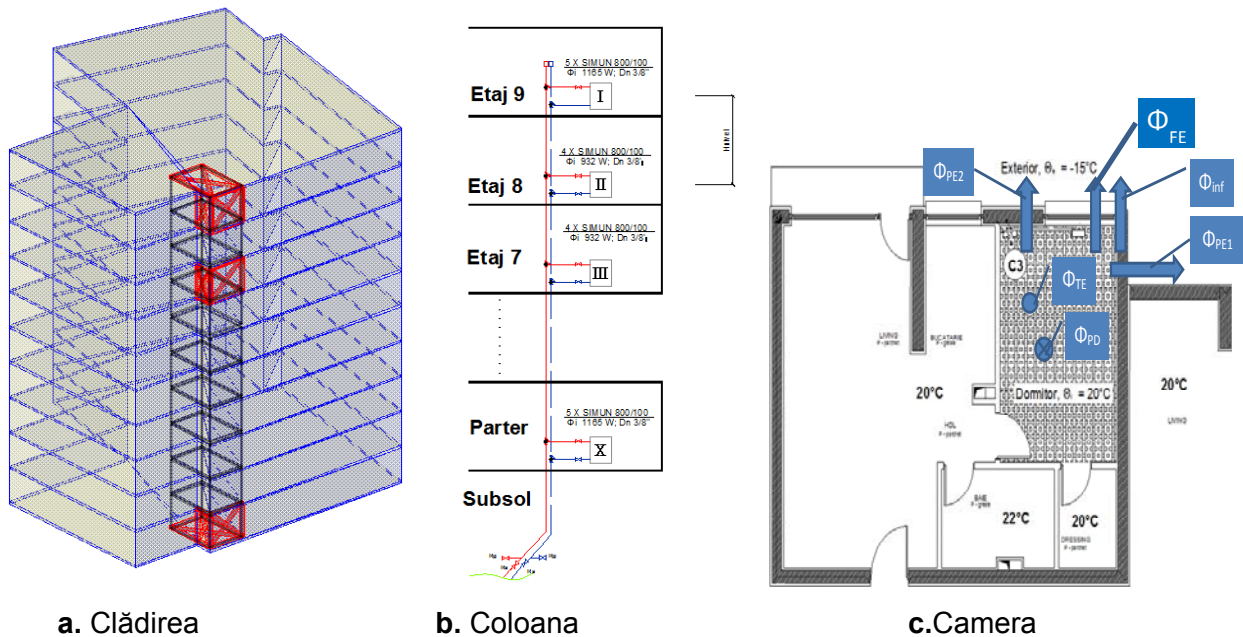


Figura 1. Poziția camerelor deservite de coloana analizată

3. Metoda

În acest capitol vom prezenta modul în care se va simula funcționarea coloanei instalatiei de încălzire și modul în care se realizează legătura între parametrii de confort termic ai încăperilor și parametrii hidraulici ai coloanei.

Fenomene termohidraulice corespunzătoare instalației de încălzire sunt simulate prin ecuații matematice corespunzătoare. Așa cum fenomenele termohidraulice sunt intercorelate, la fel sunt și ecuațiile matematice folosite pentru simulare. Prin urmare, simularea funcționării instalației constă în rezolvarea unui sistem de 66 ecuații neliniare caracteristic interconexiunii clădire-instalație.

În cele ce urmează vom prezenta diferitele tipuri de ecuații ce intră în componența acestui sistem matematic :

- 9 ecuații hidraulice în nodurile rețelei (suma debitelor de agent termic care intră în nodul de rețea este egală cu suma debitelor de agent termic ce ies din nodul de rețea [5]):

$$G = \sum_{i=1}^n G_i \quad [m^3/s] \quad (1)$$

unde G (m^3/s) este debitul volumic de agent termic și i (-) indice al debitelor care ies din nodul de rețea.

- 9 ecuații hidraulice pe ochiurile rețelei [5], [6] (pierderea de sarcină pe un traseu al agentului termic este egală cu pierderea de sarcină de pe alt traseu plus diferența de efect de termosifon):

$$M_x * G_x^2 + Z_{robTx} + Z_{robRx} = M_y * G_y^2 + Z_{robTy} + Z_{robRy} + 0,5 (\rho_{qRx} - \rho_{qTy}) * g * H_{nivel} \quad (2)$$

unde M (s^2/m^5) este modulul de rezistență hidraulică al traseului considerat, Z (Pa) pierderea de sarcină locală, ρ (kg/m^3) densitatea agentului termic, g (m/s^2) accelerația gravitațională și H (m) diferența de înălțime între cele două circuite analizate.

- 10 ecuații de bilanț termic pe camere [2], [4] (căldura cedată de agentul termic plus aporturile termice interne și solare sunt egale cu pierderile de căldură ale camerei spre exterior):

$$G * \left(\frac{\rho_{qR} + \rho_{qT}}{2} \right) * c_{pw} * (\theta_T - \theta_R) + \Phi_i + \Phi_s = H_{cam} * (\theta_i - \theta_e) \quad (3)$$

unde c_{pw} (J/kg*K) este căldura specifică a apei, Φ_i (W) și Φ_s (W) sunt aporturile de căldură interne și solare, θ_i ($^{\circ}C$) este temperatura interioară a aerului din camere, θ_e ($^{\circ}C$) este temperatura exterioară și H_{cam} (W/K) coeficient de transfer termic caracteristic camerei și puterii termice instalate a corpului de încălzire.

$$H_{cam} = \frac{\Phi_{inst-GI}}{\theta_i - \theta_e} \quad (4)$$

- 10 ecuații termo-hidraulice ale corpurilor de încălzire (căldura pierdută de agentul termic este egală cu căldura cedată de corpul de încălzire către camera):

$$G * \left(\frac{\rho_{qR} + \rho_{qT}}{2} \right) * c_{pw} * (\theta_T - \theta_R) = k_{Cl} * S_{RCl} * \Delta\theta_{m0} \quad (5)$$

unde k_{Cl} (W/m²*K) este coeficientul de transfer termic al corpului de încălzire, S_{RCl} (m²) este suprafața radiantă a corpului de încălzire, $\Delta\theta_{m0}$ (K) este diferența de temperatură medie logaritmică corespunzătoare fluxului de căldură de la corpul de încălzire la aerul interior.

- 9 ecuațiile de bilanț de putere termică în nodurile coloanei (puterea termică transportată printr-un tronson de coloană este egală cu suma dintre puterea termică livrată către tronsonul următor de coloană și puterea termică livrată pe racordul corpului de încălzire):

$$G_x * \left(\frac{\rho_{qR} + \rho_{qT}}{2} \right) * c_{pw} * (\theta_T - \theta_R)_x + G_y * \left(\frac{\rho_{qR} + \rho_{qT}}{2} \right) * c_{pw} * (\theta_T - \theta_R)_y = G_x * \left(\frac{\rho_{qR} + \rho_{qT}}{2} \right) * c_{pw} * (\theta_T - \theta_R)_x \quad (6)$$

- 19 ecuații ale densităților agentului termic pentru tronsoanele coloanei și pentru racorduri (ecuație polinomială de gradul 6 de calcul a densității în funcție de temperatura agentului termic):

$$\rho_{\theta} - 1.93 \cdot 10^{-11} \cdot (\theta^6) - 7.52 \cdot 10^{-9} \cdot (\theta^5) + 1.16 \cdot 10^{-6} \cdot (\theta^4) - 0.00008 \cdot (\theta^3) - 0.0008 \cdot (\theta^2) - 0.13 \cdot (\theta) + 1002 \quad (7)$$

Acest sistem de ecuații se poate închide în două feluri: (1) fie prin ecuația de echilibru între curba rețelei și curba pompei, (2) fie considerând un debit constant la baza coloanei. În cazul nostru am optat pentru cea de-a doua variantă, deoarece nu dispunem de date ale pompelor din centrala termică / punctul termic și nici de restul de informații ale distribuției inferioare sau ale rețelei de încălzire urbană. Deci debitul de la baza coloanei este cunoscut și reprezintă o dată de intrare în acest sistem de ecuații.

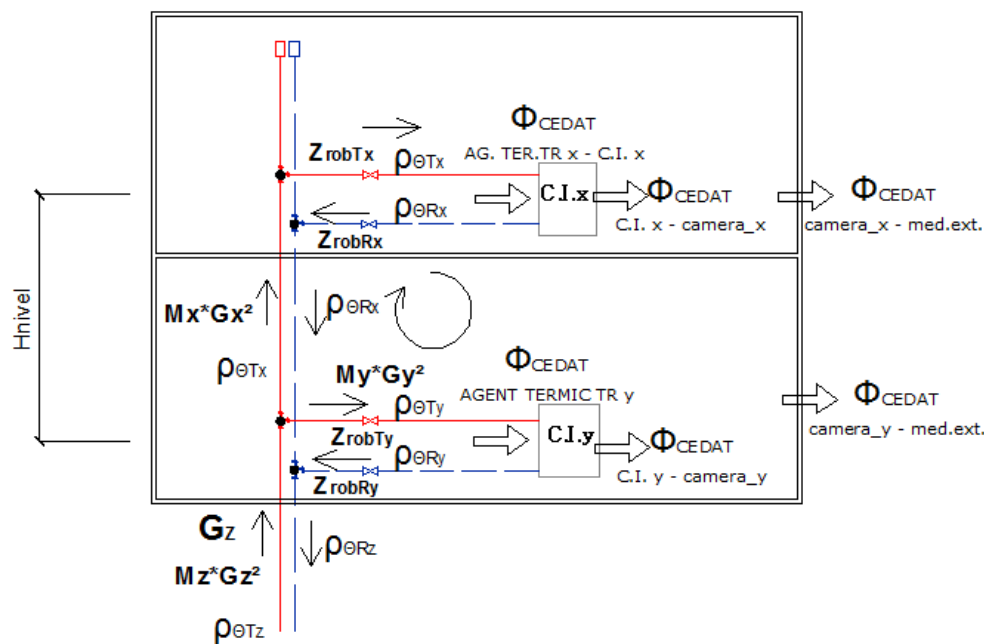


Figura 2. Reprezentarea parametrilor ecuațiilor termo-hidraulice pentru două niveluri ale coloanei

În cazul introducerii unui dezechilibru prin intermediul parametrului Z_{robR} , sistemul hidraulic (**Figura 2**) se va echilibra singur, iar această echilibrare se realizează prin modificarea debitelor de agent termic pe tronsoanele instalației având ca și consecință modificarea temperaturilor interioare ale camerelor. În cazul nostru acest sistem de ecuații este folosit pentru a determina noua repartitie de debite de agent termic după introducerea unei pierderi de sarcină locale pe unul din corpurile de încălzire.

Datele de intrare în acest sistem de ecuații sunt reprezentate de parametrii de modelare ai coloanei și ai camerelor încălzite: debitul de la baza coloanei (G), modulele de rezistență hidraulică ale coloanei și ale racordurilor (M), înălțimea nivelului curent (3 m), căldura specifică a apei (c_{pw}), suprafețele radiante ale corpurilor de încălzire ($S_{R\ C.I.}$), coeficientul de transfer termic al corpurilor de încălzire ($k_{C.I.}$), coeficientul de transfer termic al camerei și puterile termice

instalate (H_{cam}), temperatura exterioara de calcul corespunzătoare zonei climatice (θ_e), pierderi de sarcină locale în robinetul de reglaj (Z_{robR}), densitatea pe tur corespunzătoare temperaturii de 90°C (ρ_T), temperatura pe tur (θ_T). Datele de ieșire din acest sistem de ecuații sunt: debite pe tronsoanele coloanei și pe racorduri (G), temperaturi pe conductele de retur ale racordurilor și ale coloanei (θ_R), densități ale agentului termic pe tronsoanele coloanei și racorduri pe retur (ρ_R), temperaturi interioare ale aerului din camere (θ_i). Acest sistem de ecuații modelează funcționarea termo-hidraulică a coloanei și a camerelor încălzite putând fi privit ca o "cutie neagră" în care se introduc datele de intrare obținându-se datele de ieșire.

Rezolvarea acestui sistem de ecuații a fost realizată în programul Matlab [7] prin folosirea funcției *fsolve* și a algoritmului *Trust-Region Dogleg* [8], algoritm destinat rezolvării sistemelor de ecuații pătratice neliniare. Rezolvarea în mediul de programare Matlab a constat în dezvoltarea a două fișiere: unul pentru definirea sistemului de ecuații și altul pentru rezolvarea propriu-zisă a sistemului.

Această comparație este dependentă de parametrul de solicitare climatic, temperatură exterioară θ_e ($^\circ\text{C}$), care intervine în sistemul de ecuații prin intermediul ecuațiilor de bilanț al fluxurilor de caldură ale camerei (Ecuația 3) (**Figura 1c**).

Acest sistem de ecuații a fost validat prin egalitatea dintre datele de ieșire (repartiția de debite) și debitele de proiectare în situația când nu este introdus nici un dezechilibru local (nici o pierdere de sarcină suplimentară), iar temperatura exterioară are valoarea de dimensionare, adică -15 ($^\circ\text{C}$).

Modelul matematic a fost folosit pentru evidențierea efectelor unui singur dezechilibru hidraulic pentru corpul de încălzire de la etajul 5 al coloanei într-o situație reală de exploatare a clădirii, adică cu aporturi interne pentru fiecare cameră $\Phi_i = 120$ (W), dar fără aporturi solare.

Efectele termice și hidraulice sunt puse în evidență prin comparația a două rezultate de simulări: (1) cazul de referință, când peste situația din dimensionare mai adăugăm aporturile interne, și (2) cazul dezechilibrat, când peste situația din dimensionare adăugăm aporturi interne și o pierdere locală de sarcină la corpul de încălzire de la etajul 5 de 300 Pa.

4. Rezultate

În urma simulării funcționării instalației în cele două situații: (1) coloană echilibrată, denumit în continuare Caz 2 și (2) coloană dezechilibrată, denumit în continuare Caz A s-au pus în evidență efectele hidraulice și termice ale dezechilibrării cu $+300$ Pa introduse pe corpul de încălzire de la etajul 5. Cele două situații de funcționare ale instalației (Caz 2 și Caz A) sunt comparate din prisma parametrilor de ieșire rezultați după simularea realizată în Matlab.

Comparație în funcție de debitele de agent termic ce trec prin corpurile de încălzire

Se observă că la o introducere de pierdere de sarcină de 300 Pa la corpul de încălzire aferent camerei 507 se va realiza o redistribuire a debitelor pe tronsoanele adiacente. Debitul de agent termic scade pe racordul corpului de încălzire de la etajul 5 (camera 507 în **Figura 3**), unde a fost introdusă pierderea de sarcină suplimentară, de la 41 (l/h) la 12 (l/h), deci aproximativ cu 70%. Instalația a fost "închisă" prin programul de simulare la baza coloanei unde se conservă debitul de agent termic. Astfel, diferența de debit care nu se mai duce spre corpul de încălzire de la camera 507 este repartizată către celelalte corpuri de încălzire de pe coloană, unde rezistența hidraulică este mai mică.

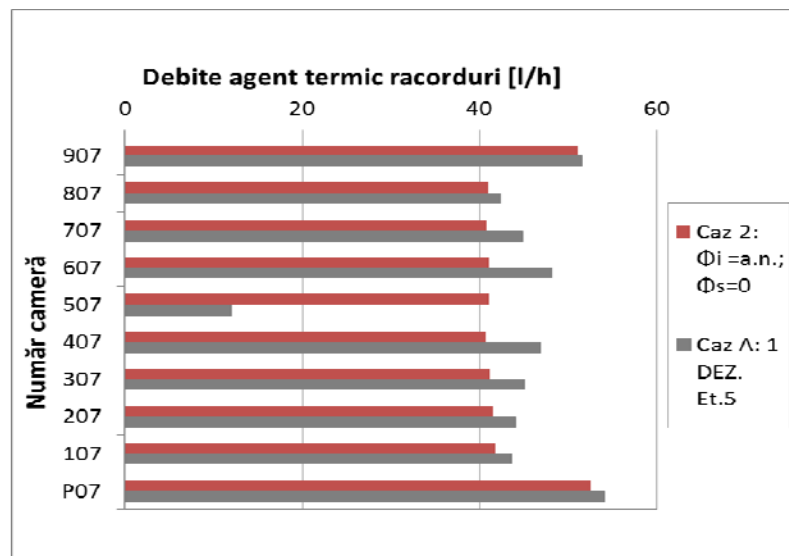


Figura 3. Debite agent termic prin corpurile de încălzire

În urma echilibrării naturale care se realizează, și pe care o simulăm prin modelarea matematică, se observă ca majoritatea debitului se repartizează pe corpurile de încălzire cele mai apropiate (de la etajul imediat superior, 607, și de la etajul imediat inferior, 407). La etajul 6 (camera 607) debitul de agent termic crește de la 41 (l/h) la 47 (l/h), deci aproximativ 15%, iar la etajul 4 (camera 407) debitul crește de la 41 (l/h) la 46 (l/h), deci aproximativ 12%. Majorările de debit de la etajele 6 și 4 sunt un pic diferite datorită influenței efectului de termosifon. Cu cât ne îndepărtăm de etajul 5, unde a fost introdus dezechilibrul, suplimentarea de debit rezultată din redistribuirea debitului este din ce în ce mai mică.

Comparație în funcție de fluxurile termice transmise de agentul termic spre camere

Ca urmare a modificărilor debitului de agent termic, și fluxurile de căldură transmise de agentul termic spre cameră sunt modificate (**Figura 4**). În camera unde a fost introdus dezechilibrul de +300 Pa, fluxul de căldură s-a diminuat de la 890 (W) la 695 (W), deci cu aproximativ 22%. Asemeni debitelor de agent termic, și fluxurile de căldură au crescut mai mult pentru nivelurile

adiacente, și mai puțin pentru nivelurile mai depărtate. Pentru etajele 6 și 4, fluxul de căldură a crescut de la 890 (W) la 905 (W), deci cu aproximativ 1.7%.

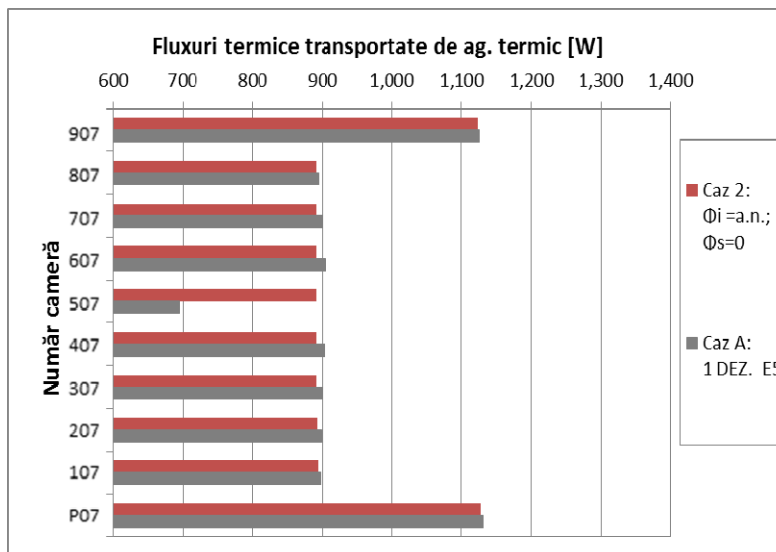


Figura 4. Fluxuri termice transmise de agentul termic camerei

Creșterea fluxului de căldură transmis de la agentul termic camerei nu este la fel de mare procentual precum în cazul debitelor, deoarece din punct de vedere fizic și matematic modificarea de debit (parametru excitant în acest sistem) duce la o înșiruire de modificări diferite ale parametrilor de ieșire (fluxuri cedate de agentul termic spre corpul de încălzire, fluxuri cedate de corpul de încălzire spre cameră, fluxuri cedate de cameră spre exterior) până la valoarea finală constantă care este reprezentată în sistemul nostru de temperatura exterioară.

Altfel spus, este normal ca diferențele pe care le obținem între modificările parametrilor de ieșire să nu fie asemănătoare, și să varieze în funcție de alți parametri (asemeni factorilor de cuplaj din fenomenul transferului termic unidimensional).

Comparație în funcție de temperaturile aerului interior din camere

Ca urmare a pierderii de sarcină suplimentară introdusă pe radiatorul camerei 507, se remarcă o scădere a temperaturii din această camera de la 23(°C) (Figura 5) (cu 3 °C mai mare decât temperatura de confort, datorită aporturilor interne care au fost introduse în calcul) la 15.5 (°C). Astfel, temperatura rămâne superioară valorii caracteristice încălzirii intermitente de 13(°C).

Temperaturile interioare ale tuturor camerelor suferă modificări mai mici sau mai mari în funcție de apropierea față de corpul de încălzire dezechilibrat hidraulic. Creșterea maximă de temperatură a aerului apare pentru etajele 6 și 4, de la 23 (°C) la 23.5 (°C), deci nesemnificativă, iar pentru corpurile cele mai îndepărtate creșterea de temperatură scade la sub 0.2 (°C).

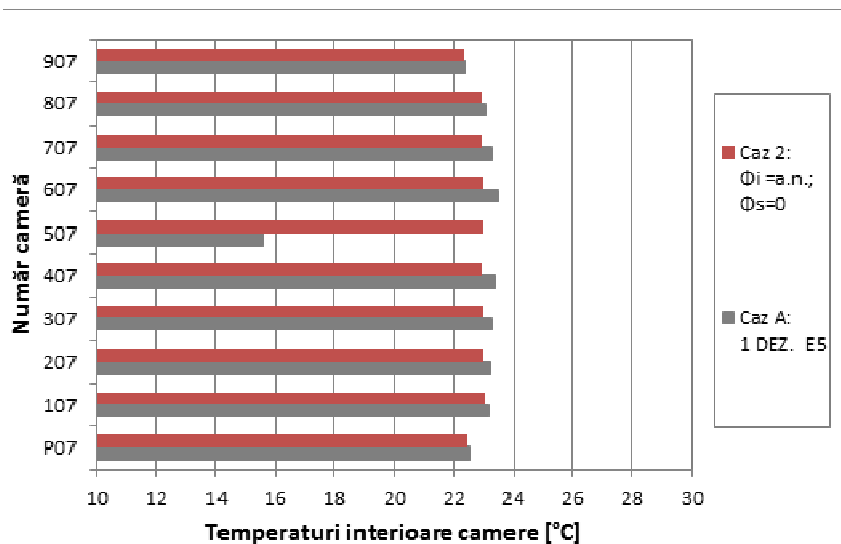


Figura 5. Temperaturi interioare în camere

Comparație în funcție de fluxurile termice pierdute de camere

Ca urmare a modificării temperaturilor de la interiorul camerei, se vor modifica și fluxurile de căldură pierdute de la interior spre exterior (Figura 6). După dezechilibrarea hidraulică, fluxul de căldură pierdut de camera spre exterior scade pentru camera 507 de la 1010 (W) la 810 (W), deci cu 19,8%, iar pentru camerele alăturate fluxul crește de la 1010 (W) la 1025 (W), deci cu 1,5%.

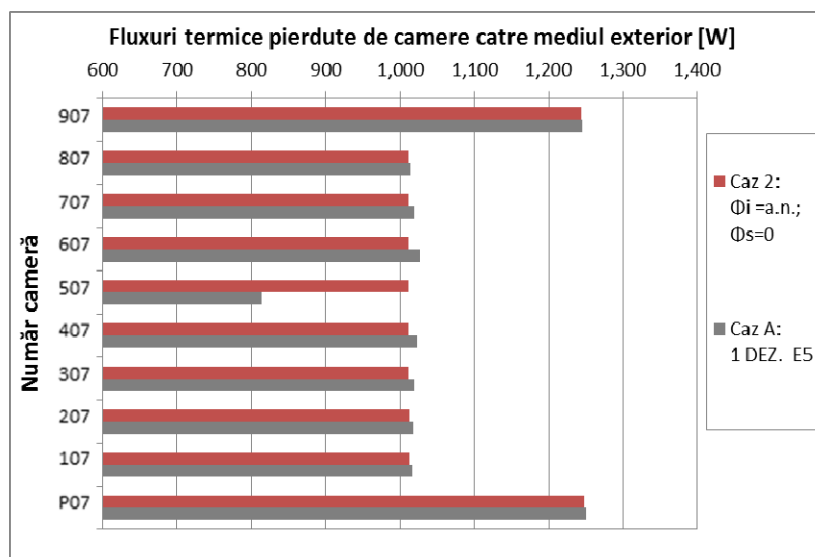


Figura 6. Fluxuri termice pierdute de camere către mediul exterior

5. Concluzii

În urma dezechilibrării hidraulice cu +300 Pa debitul de agent termic scade cu 70% pentru camera unde s-a aplicat acest dezechilibru, iar temperatura scade semnificativ, de la 23 °C la 15,5 °C. Pentru celelalte camere, debitul crește cu 12%, iar temperatura crește de la 23°C la 23.5 °C. Deci, efectul dezechilibrului hidraulic pentru corpul de încălzire dezechilibrat este unul destul de mare din prisma tuturor parametrilor analizați, iar pentru celelalte corpuri de încălzire efectul este unul minor, neducând la modificări majore ale parametrilor termo-hidraulici. Aceste camere vor suferi atât de un deficit de confort termic minor cât și de un consum energetic mai ridicat.

Totuși, această concluzie a fost obținută pentru un regim de exploatare a instalației în care temperatura exterioara de calcul este -15 (°C), dar în realitate temperatura exterioară variază, iar efectul dezechilibrului va fi de asemenea variabil. Pentru corpul de încălzire pentru care s-a produs dezechilibrul hidraulic temperatura poate scădea sub 13 (°C), devenind o temperatură periculoasă pentru locuire, iar pentru celelalte camere efectul ar fi tot minor.

References

- [1] SR 1907:1997 - Calculul necesarului de caldura, Prescripții de calcul
- [2] Vlad Iordache, Instalații de încălzire interioare cu apa caldă, p. 165-193, Editura MATRIX ROM, București, 2013
- [3] Manualul de Instalatii, Instalații de Încălzire, Editia a II-a, Editura Artecno, București, 2010
- [4] Florin Iordache, Bogdan Caracaleanu, Vlad Iordache, Termotehnica construcțiilor. Culegere de probleme rezolvate, Editura MATRIX ROM, București, 2006
- [5] Andrei-Mugur Georgescu, Sanda-Carmen Georgescu, Hidraulica rețelelor de conducte și mașini hidraulice, Editura Printech, București 2007
- [6] Constantin Iamandi, Virgil Petrescu, Radu Damian : Hidraulica instalațiilor, vol. I, Editura Tehnica, Bucuresti, 1994
- [7] <http://www.mathworks.com/help/optim/ug/choosing-a-solver.html#bsbqd7i>
- [8] <http://www.applied-mathematics.net/LMvsTR/LMvsTR.pdf>