

RAPORT ȘTIINȚIFIC

i-TURB sistem integrat pentru obținerea celui mai bun echilibru între potențialul ecologic al apei și eficiența turbinei

Realizarea și validarea sistemului i-Turb în mediu industrial Etapa 2

Coordonator
Director proiect

SC MECANICA-IND 2004 SRL
Ing. IORDĂNESCU Daniel

Partener 1

Institutul Național de Cercetare-Dezvoltare pentru Inginerie
Electrică ICPE-CA

Responsabil proiect P1

Dr. ing. BUNEA Florentina

Partener 2

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie

Responsabil proiect P2

POLITEHNICA București

Conf. dr. ing. DUNCA Georgiana

CUPRINS

Rezumat

A2.1. Realizarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

A2.1.1 Conceperea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

A2.1.2 Testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

A 2.2 - Proiectarea sistemului automatizat i-Turb și integrarea într-un program de testare

A2.2.1 Integrarea elementelor componente sistemului automatizat i-Turb într-un program de testare

A2.2.2 Proiectarea sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor procesului de aerare și de funcționare a turbinei

A 2.3 - Realizarea sistemului integrat, pentru obținerea celui mai bun echilibru între potențialul ecologic al apei și eficiența turbinei

A 2.4 - Implementare în condiții relevante de funcționare a sistemului automatizat de aerare i-Turb

A 2.4.1 Implementarea în condiții relevante de funcționare a echipamentelor pentru monitorizarea parametrilor de aerare și energetici

A 2.4.2 Rezultate experimentale și interpretarea datelor

A 2.5 - Diseminarea rezultatelor cercetării

Concluzii

NOTE:

Anexele 1 si 2 se regăsesc în raport extins al acestei etape.

Claritatea unor imagini este intenționat scăzută pentru a proteja informația.

Rezumat

Proiectul are ca scop dezvoltarea și realizarea prototipului unui sistem inteligent de aerare a apei utilizată în turbinele hidraulice (*i-Turb*), cu impact pozitiv atât asupra potențialului ecologic al apei cât și asupra funcționării turbinei hidraulice.

Necesitatea automatizării și dezvoltării unei soluții complete care să integreze dispozitivul de aerare a rezultat în cadrul unui proiect precedent al echipei de cercetare, în urma testării in situ a acestuia. Fără a fi controlată admisia naturală a aerului în timpul funcționării turbinei, la un anumit regim de funcționare s-a observat scăderea puterii turbinei cu aproximativ 18 %, față de o scădere a puterii turbinei de maxim 1,2 % în timpul injectării controlate cu aer comprimat. Pe de altă parte, la anumite regimuri de funcționare a turbinei s-a remarcat că aerarea are un rol benefic asupra randamentului turbinei. Astfel, dispozitivul de aerare, dacă este comandat în mod *inteligent*, poate fi utilizat nu numai pentru aerare, dar și pentru îmbunătățirea funcționării turbinei la regimuri de sarcină parțială

Etapă 1 a proiectului *Stabilirea caracteristicilor tehnice ale sistemului i-Turb*, s-a desfășurat în perioada iunie 2022 - decembrie 2022 și a fost structurată în două activități principale și o activitate de diseminare. Toți indicatorii de rezultat propuși au fost realizați.

Etapă a 2-a a proiectului, *Realizarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei și implementarea sistemului automatizat de aerare i-Turb*, desfășurată în perioada ianuarie 2023-decembrie 2023, s-a împărțit în patru activități principale (A2.1, A2.2, A2.3 și A2.4) și o activitate de diseminare (A.2.5).

În prima activitate (A2.1) a fost conceput, implementat și testat un algoritm de optimizare a performanțelor turbinei hidraulice în condițiile funcționării cu un dispozitiv de aerare a apei. În cea de-a doua activitate (A2.2) sunt prezentate integrarea elementelor componente sistemului automatizat i-Turb într-un program de testare, schema electrică a modului de aerare forțată precum și proiectul de execuție al sistemului automatizat. În cel de-al 3-lea capitol (A2.3) se prezintă realizarea instalației experimentale de testare a echipamentelor ce compun sistemul pneumatic, compusă în principal din: modelul experimental de sistem integrat de aerare pentru testarea modului AF, unitatea de comandă, două interfețe grafice (una pentru monitorizarea sistemului hidraulic, a algoritmilor de reglare, configurarea parametrilor sistemului precum și controlul manual al sistemului și o alta optimizată în special pentru controlul la distanță și salvarea de date). În cel de-al 4-lea capitol se prezintă implementarea în condiții relevante de funcționare a modului de aerare forțată precum și rezultatele testelor și discuții. În ultimul capitol sunt prezentate lucrările științifice diseminate în această etapă.

În etapa de raportare prezentă au fost realizați toți indicatorii de rezultat propuși:

Livrabil	Propus	Realizat
L1. Algoritm de optimizare a performanțelor turbinei	1	1 (Activitatea 2.1)
L2. Proiectul sistemului i-Turb	1	1 (Activitatea 2.2 și Anexa 1)
L3. Sistem integrat, interfață grafică	1	2 (Activitatea 2.3, fig. 11, 14,15, 18)
L4. Model de sistem automatizat de aerare i-Turb	1	1 (Activitatea 2.4, fig. 19)
L5. Articole științifice indexate ISI/BDI	3	4 (Activitatea 2.5)
L6. Web-site actualizat	1	1 (https://www.icpe-ca.ro/i-turb/)

Activitatea 2.1. Realizarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei (CO, P1, P2)

A2.1.1. Conceperea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

Acest algoritm are în vedere două obiective: diminuarea pierderilor cauzate de aerare și creșterea eficienței la sarcină parțială prin același proces de aerare.

Algoritmul de optimizare a performanțelor turbinei vine în completarea algoritmului de reglare automată a procesului de oxigenare descris în Etapa I a proiectului. La acesta s-a adăugat posibilitatea de calcul a punctului de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei. Aceasta este o referință esențială pentru evaluarea randamentului turbinei la funcționarea acesteia cu sistem de aerare și fără.

Sistemul pornește cu citirea *parametrilor de sistem*: secțiune maximă admisie aer prin electrovalvă (necesar calculului debitului de aer), pas de discretizare al deschiderii electrovalvei și intervalul de execuție a buclei algoritmului (se alege conform latenței fenomenelor controlate).

De asemenea se citesc *parametrii procesului de oxigenare*: nivelul de oxigen dizolvat dorit (în aval) și pragul de histerezis, limite ale fracției de goluri admisă în sistemul hidraulic și pragul de histerezis, limite factor de corecție a debitului de aer introdus.

Bucula principală a programului debutează cu citirea valorilor măsurate: nivelul oxigenului dizolvat din amonte de turbină, diferența dintre presiunea din aspirator și presiunea atmosferică, debitul de apă, debitul de aer, presiunea la intrarea în turbină, puterea electrică, vibrații etc.

Utilizând valorile măsurate de debit și presiune se evaluează, prin interpolarea caracteristicii de exploatare, randamentul turbinei.

Dacă se constată că randamentul este sub limita specificată prin interfața grafică cu utilizatorul (GUI), se activează procesul de aerare (AN – aerarea naturală sau AF – aerarea forțată).

Dacă randamentul este peste această limită, atunci se verifică dacă nivelul oxigenul dizolvat este în limitele prestabilite. În caz afirmativ, aerarea este oprită (sau rămâne oprită). Altminteri, se activează procesul de aerare.

În urma aerării se verifică impactul asupra randamentului turbinei. În caz că scăderea randamentului se face cu mai mult de o limită impusă de operator prin interfața grafică, se decide oprirea aerării și intrarea în modul SLEEP pentru conservarea energiei.

În caz contrar (randamentul este peste limita impusă de operator), se continuă aerarea, și se salvează pentru analiză ulterioară punctele de funcționare care indică o creștere a randamentului peste caracteristica de exploatare.

Operatorul poate decide funcționarea cu sau fără aerare, precum și modul de aerare, AN sau AF sau poate ignora condiția de a interveni, caz în care se trece la următorul pas.

De asemenea operatorul poate decide oricând oprirea programului, iar acesta se va opri după parcurgerea buclei principale și oprirea procesului de aerare.

Operatorul poate ignora decizia automată de activare a aerării și impune funcționarea cu sau fără aerare, precum și modul de aerare, AN sau AF.

Din punctul de vedere al performanțelor energetice și mecanice ale agregatului, se vor monitoriza:

- presiunea la intrarea în turbină,
- debitul turbinat (același debit de apă menționat mai sus),
- puterea electrică produsă de agregat,
- vibrațiile la arbore și pe carcasa turbinei.

Plecând de la măsurările parametrilor de funcționare ai turbinei, se va poziționa punctul de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei. Se vor introduce parametrii specifici de aerare pentru diferite zone de funcționare în vederea îmbunătățirii randamentului turbinei. Acești parametri vor fi optimizați într-o etapă următoare a proiectului, într-o anumită plajă de variație, astfel încât să nu fie afectată integritatea instalației, pentru a se obține cel mai bun raport între eficiența aerării (dacă este necesară), nivelul fluctuațiilor de presiune și randamentul turbinei. În funcție de condițiile de operare, un obiectiv poate fi prioritizat în raport cu celelalte. Schema logică a algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei este prezentată în figura 1.

2.1.2 Testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

În activitățile precedente au fost determinate regimurile de funcționare care trebuie optimizate, precum și parametrii ce trebuie considerați pentru realizarea acestei optimizări (A 2.1.1). Conform rezultatelor prezentate în studiile anterioare realizate de consorțiul de parteneri ai acestui proiect [1-3], parametrii utilizați la optimizare sunt:

- Oxigenul dizolvat – conform literaturii de specialitate, se consideră deficit de oxigen dacă $OD < 6 \text{ mg/l}$
- Căderea presiune la aspirator: domeniu de variație $-0.057 \div -0.122 \text{ bar}$,
- Debitul de apă: domeniu de variație $0 \div 1.24 \text{ m}^3/\text{s}$,
- Debitul de aer: domeniu de variație $0 \div 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ (max 8 % din debitul de apă),
- Presiunea la intrarea în turbină: domeniu de variație $1,34 \div 1,43 \text{ bar}$,
- Puterea electrică: domeniu de variație $8 \div 130 \text{ kW}$.

Din cercetările anterioare [1] s-a observat că din punctul de vedere al performanțelor energetice injecția aerului în traseul hidraulic are ca efect o ușoară scădere a randamentului global al agregatului (maxim 2 - 3%), exceptând cazurile în care agregatul funcționează la încărcări reduse. În aceste situații, injecția de aer influențează structura de curgere din zona de injectare (aval de rotorul turbinei) îmbunătățind structura curgerii.

Din punctul de vedere al performanțelor mecanice ale agregatului s-a concluzionat că injecția de aer nu are o influență semnificativă asupra comportării agregatului. Totuși se vor monitoriza și nivelurile de vibrații măsurate cu accelerometre și cu senzorii de proximitate, pentru prevenirea eventualele degradări a funcționării turbinei datorate injecției de aer.

Au fost definite funcția multiobiectiv precum și algoritmul de optimizare asociat. Acest algoritm va utiliza sistemul de aerare în scopul îmbunătățirii performanțelor energetice ale hidro-agregatului turbinei hidraulice. Cei doi algoritmi vor funcționa în paralel.

Testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei s-a făcut prin modificarea parametrilor primului algoritm pentru a împiedica ca modul de aerare să afecteze performanța turbinei.

S-a realizat un program în Matlab în care etapele principale ale algoritmului au fost incluse. Astfel, prima condiție care este verificată este aceea ca randamentul teoretic al turbinei hidraulice să fie mai mare decât cel experimental. Dacă această condiție este adevărată este pornită aerarea și se monitorizează modificarea randamentului turbinei în timpul aerării. Aerarea este oprită dacă randamentul turbinei scade cu mai mult de 2%.

În figura 2 se prezintă o captură de ecran cu rularea programului și cu mesajele afișate

în funcție de cazurile analizate. Din cazul prezentat în figură se observă că apare mesajul “Start aeration” sau “Stop aeration”, fiecare afișându-se când condițiile de randament se îndeplinesc (randamentul experimental al turbinei < randamentul teoretic al turbinei → “Start aeration”, respectiv scăderea randamentului în timpul aerării > 2% → “Stop aeration”).

În figura 3 sunt prezentate cele șase puncte de funcționare ale turbinei hidraulice (PF1 → PF6), obținute experimental în studii anterioare [1] folosite ca date de testare a algoritmului de reglare a performanțelor turbinei. Parametrii caracteristici ai acestor puncte de funcționare sunt prezentați în tabelul 1.

În figurile 4-9 sunt prezentate detaliat rezultatele obținute pe baza datelor experimentale din [1], unde s-a marcat cu albastru punctul de funcționare teoretic și cu dreptunghiuri de culoare roșu, verde, albastru, bleu, magenta, galben și negru evoluția acestuia în timpul aerării controlate.



Fig. 2. Rularea programului în Matlab realizat pentru testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

Tabelul 1. Date experimentale utilizate pentru testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei, în condiția funcționării fără aerare

Punct de funcționare	Debit apă	Căderea netă a turbinei	Randamentul turbinei
	$Q_{ap\bar{a}}$ [m ³ /s]	H_n [m]	η [%]
PF1	1,239	15,040	80,843
PF 2	1,175	15,107	79,114
PF 3	1,012	15,325	73,9932
PF 4	0,788	15,552	65,330
PF 5	0,563	15,683	54,747
PF 6	0,375	15,806	44,460

În urma testării algoritmului cu ajutorul programului realizat în Matlab s-a observat că scăderea randamentului turbinei cu mai mult de 2% (limita impusă în program) este corect identificată și imediat este semnalizată prin oprirea aerării. În concluzie, algoritmul este corect și pregătit să fie implementat în automatizarea sistemului *i-Turb*.

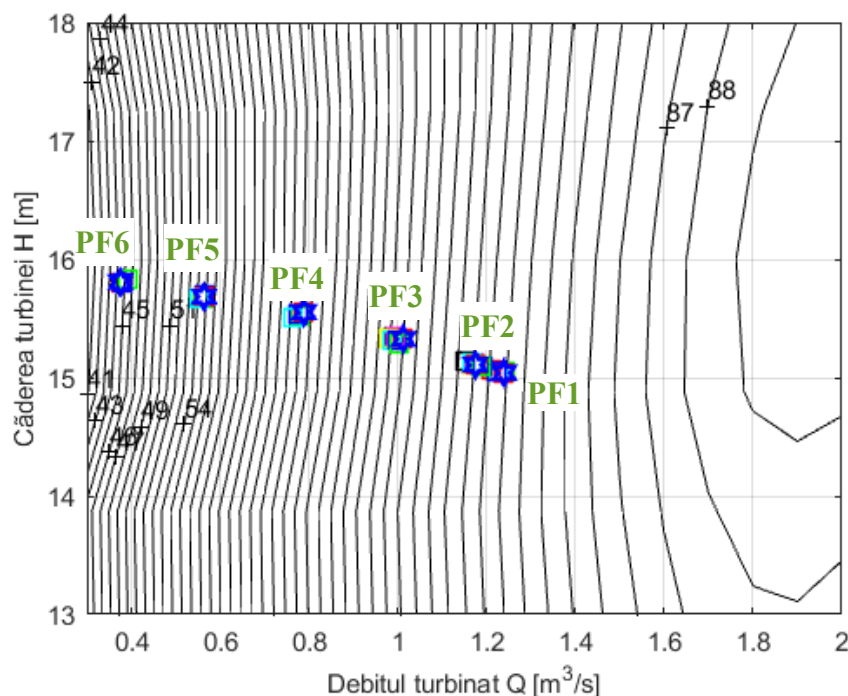


Fig. 3. Punctele de funcționare ale turbinei hidraulice (PF1 → PF6) utilizate pentru testarea algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

(★ -fără aerare, ■ ~ 1% aerare, ■ ~ 2% aerare, ■ ~ 3% aerare, ■ ~ 4% aerare, ■ ~ 5% aerare, ■ ~ 6% aerare, ■ ~ 7% aerare, ■ ~ 8% aerare)

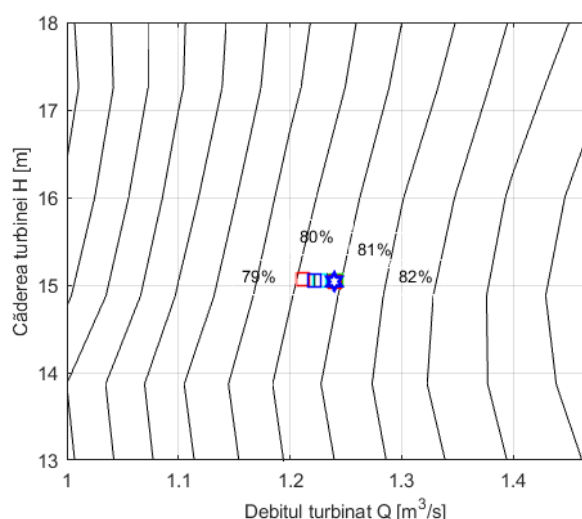


Fig. 4. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF1

(★ -fără aerare, ■ ~ 1% aerare, ■ ~ 2% aerare, ■ ~ 3% aerare, ■ ~ 4% aerare, ■ ~ 5% aerare, ■ ~ 8% aerare)

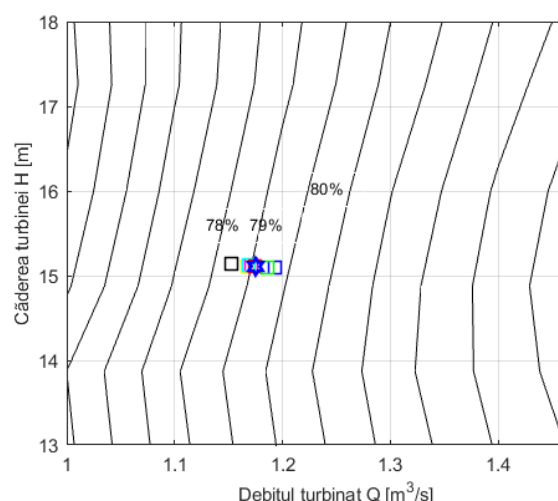


Fig. 5. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF2

(★ -fără aerare, ■ ~ 1% aerare, ■ ~ 2% aerare, ■ ~ 3% aerare, ■ ~ 4% aerare, ■ ~ 5% aerare, ■ ~ 7% aerare)

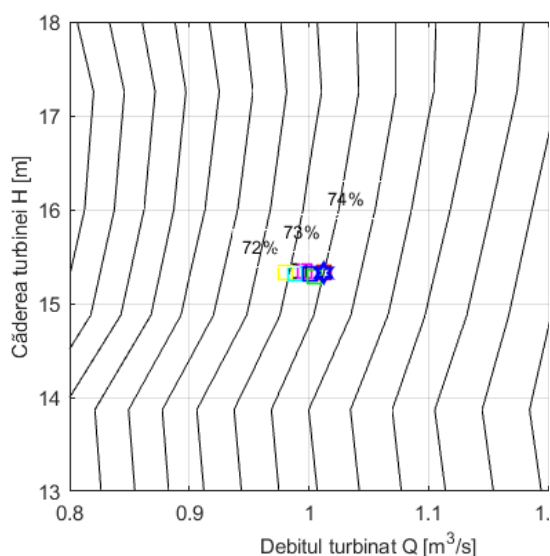


Fig. 6. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF3

(★ -fără aerare, □ ~ 1% aerare, ▤ ~ 2% aerare, ▥ ~ 3% aerare, ▦ ~ 4% aerare, ▧ ~ 5% aerare, ▨ ~ 7% aerare)

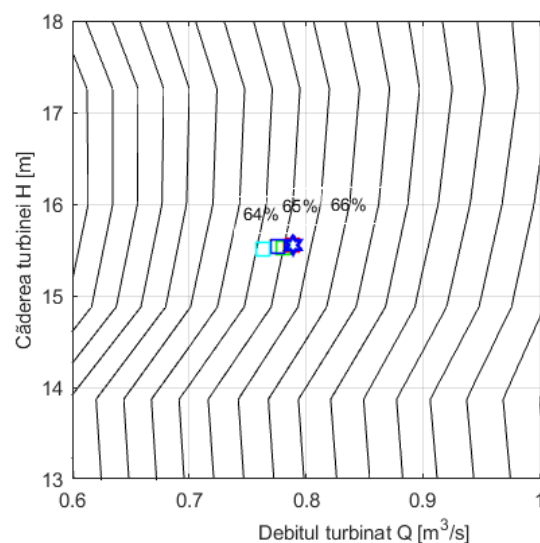


Fig. 7. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF4

(★ -fără aerare, □ ~ 2% aerare, ▤ ~ 3% aerare, ▥ ~ 4% aerare, ▦ ~ 5% aerare, ▧ ~ 6% aerare)

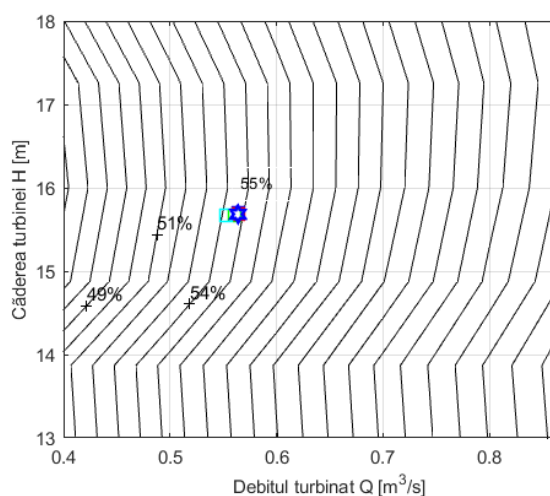


Fig. 8. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF5

(★ -fără aerare, □ ~ 3% aerare, ▤ ~ 4% aerare, ▥ ~ 6% aerare)

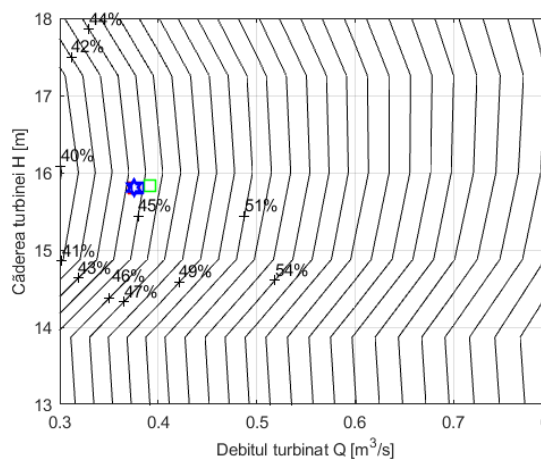


Fig. 9. Poziționarea punctelor de funcționare pe caracteristica de exploatare a turbinei hidraulice și evidențierea efectului aerării la funcționarea turbinei pentru PF6

(★ -fără aerare, □ ~ 4% aerare, ▤ ~ 5% aerare)

Activitatea 2.2 Proiectarea sistemului automatizat i-Turb și integrarea într-un program de testare (CO, P1, P2)

2.2.1 Integrarea elementelor componente sistemului automatizat i-Turb într-un program de testare

Sistemul de reglare este bazat pe o serie de măsurători în timp real ale parametrilor de aerare și de funcționare a turbinei. Astfel, în cazul concret al unei turbine hidraulice de tip Francis pe care se va testa sistemul *i-Turb*, etapa de proiectare a sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor de funcționare a turbinei constă în alegerea aparatelor și tehnicilor de măsurare adaptate pentru a corespunde cerințelor de gamă, precizie și frecvența de achiziție definite în activitatea A 2.1.

La alegerea aparatelor de măsurare s-a ținut cont de **caracteristicile metrologice** ale acestora, prezentate în continuare [4].

A. Intervalul sau domeniul de măsurare reprezintă mulțimea de valori cuprinse între cea minimă și cea maximă măsurabile cu un mijloc de măsurare.

B. Extinderea aparatului de măsurare reprezintă raportul dintre valoarea maximă și cea minimă care pot fi măsurate cu acel mijloc de măsurare (de exemplu 10 : 1).

C. Rezoluția aparatului de măsurare reprezintă cea mai mică variație a măsurandului care poate fi apreciată de afișajul aparatului de măsurare.

La afișarea analogică, cu scară gradată și ac indicator, rezoluția se consideră de obicei de o diviziune (uneori chiar 1/2 din diviziune). La aparatele cu afișare numerică rezoluția este egală cu o unitate a ultimului rang zecimal. Practic la afișarea analogică rezoluția obținută este (10^{-2} , ..., 10^{-3}) unități, iar la cea numerică este (10^{-5} , ..., 10^{-7}) unități.

D. Sensibilitatea aparatului de măsurare este raportul între variația mărimii de ieșire și variația corespunzătoare a mărimii de intrare (în regimuri staționare).

E. Constanta aparatului de măsurare este inversul sensibilității, putând fi medie, punctuală sau relativă.

F. Pragul de sensibilitate al aparatului de măsurare, reprezintă cea mai mică valoare a măsurandului, care poate fi pusă în evidență cu aparatul de măsurare în condiții reale de funcționare. Este apropiată de noțiunea de rezoluție, dar rezoluția se poate mări prin amplificare (electrică, mecanică, optică sau prin adăugare de ranguri zecimale) pe când pragul de sensibilitate nu poate fi mărit prea mult (frecare internă a diferitelor piese ale aparatului, zgometul molecular, agitația termică etc.).

G. Precizia aparatului de măsurare, este calitatea acestuia de a oferi rezultate apropiate de valoarea adevărată a măsurandului. Cantitativ precizia aparatului de măsurare este descrisă de eroarea aparatului de măsurare.

H. Reproducibilitatea unui aparat de măsurare se referă la o valoare sub care se găsește diferența între două rezultate ale procesului de măsurare, atunci când se folosește aceeași metodă, același măsurand, dar în condiții diferite (alt operator și/sau alt interval de timp între măsurări). Noțiunea de reproducibilitate a unui aparat de măsurare este înrudită cu repetabilitatea, ultima determinându-se cu același operator și la intervale scurte de timp între măsurări.

I. Trasabilitatea unui aparat de măsurare arată modul în care acesta se poate raporta la un alt aparat de măsurare standard, la etalonarea față de acesta.

J. Fiabilitatea aparatului de măsurare este probabilitatea aparatului de măsurare de a funcționa în limitele parametrilor lui metrologici. Cantitativ fiabilitatea se exprimă prin *timpul mediu de bună funcționare, timpul mediu de depanare și timpul mediu între reparații succesive*.

S-au analizat tehnicile moderne adecvate monitorizării funcționării turbinelor hidraulice

în contextul tendințelor mondiale actuale. În această analiză au fost incluse dispozitive electronice de măsură inteligente pentru măsurarea vibrațiilor, cuplului mecanic, turației, puterii electrice, debitului, presiunii.

2.2.2. Proiectarea sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor de aerare și de funcționare a turbinei

Sistemul automatizat de monitorizare a parametrilor de funcționare a turbinei va fi compus pe următoarele dispozitive:

- Senzori de accelerație pentru măsurarea vibrațiilor – tip HS 100, domeniu de măsură 10g, sensibilitate 500 mV/g;
 - Senzori de proximitate, domeniu de măsură 4 mm;
 - Marcă tensometrică pentru măsurarea cuplului mecanic - tipul punte întreagă, precizie 1%;
 - Senzor laser de turație, S30LDQ, 60000 rpm, 2 m distanța de sesizare;
 - Analizor trifazat de putere, 3 intrari tensiune 100Vrms/600Vrms, și 3 intrari curent 5Arms/10Arms, cu separare galvanica individuala 2500 Vrms, precizie de 0,1%;
 - Debitmetru de apă, ultrasonic portabil TDS-100H, liniaritate 0,5%, repetabilitate 0,2%, precizie 1%;
 - Traductoare de presiune pentru măsurarea presiunii la intrarea și ieșirea din turbina, Siemens SITRANS P200, 0-4/6 bari, ieșire în curent 4÷20 mA;
 - Debitmetru aer, SD9500, gama măsură 0- 410 m³/h, ieșire în curent 4-20 mA;
 - Senzor oxigen dizolvat, OPTOD senzor optic de oxigen dizolvat, game de măsură: 0 - 20mg/l(ppm) și 0-200 %;
 - Electrovalve – SECTORIEL TCR-05T, alimentare 230 V, control în curent 4-20 mA;
 - Compresor aer Comprag (0-8 bar) și recipient tampon;
 - Reductor de presiune SD 220227
 - Microcontroller pentru implementarea algoritmilor - Arduino MKR WiFi 1010, procesorul principal de pe placa este un Arm Cortex-M0 SAMD21 de 32 biti, 48 MHz, dispune de 7 pini analogici de intrare și unul de ieșire, comunicații WiFi, Bluetooth, UART, SPI și I2C.
- În figura 10 sunt prezentate principalele componente ale sistemului i-Turb.





Fig. 10. Componente ale sistemului i- TURB: a) Debitmetrul de apa, cu ultrasunete, b) Senzor de accelerație, c) Senzor de proximitate, d) senzor optic OD, e) regulator de presiune, f) electrovalva, g) debitmetru de aer, cu fir cald

În figura 11 este reprezentată schema electrică a sistemului de aerare forțată care definește modul de conectare a componentelor electrice prezentate mai sus.

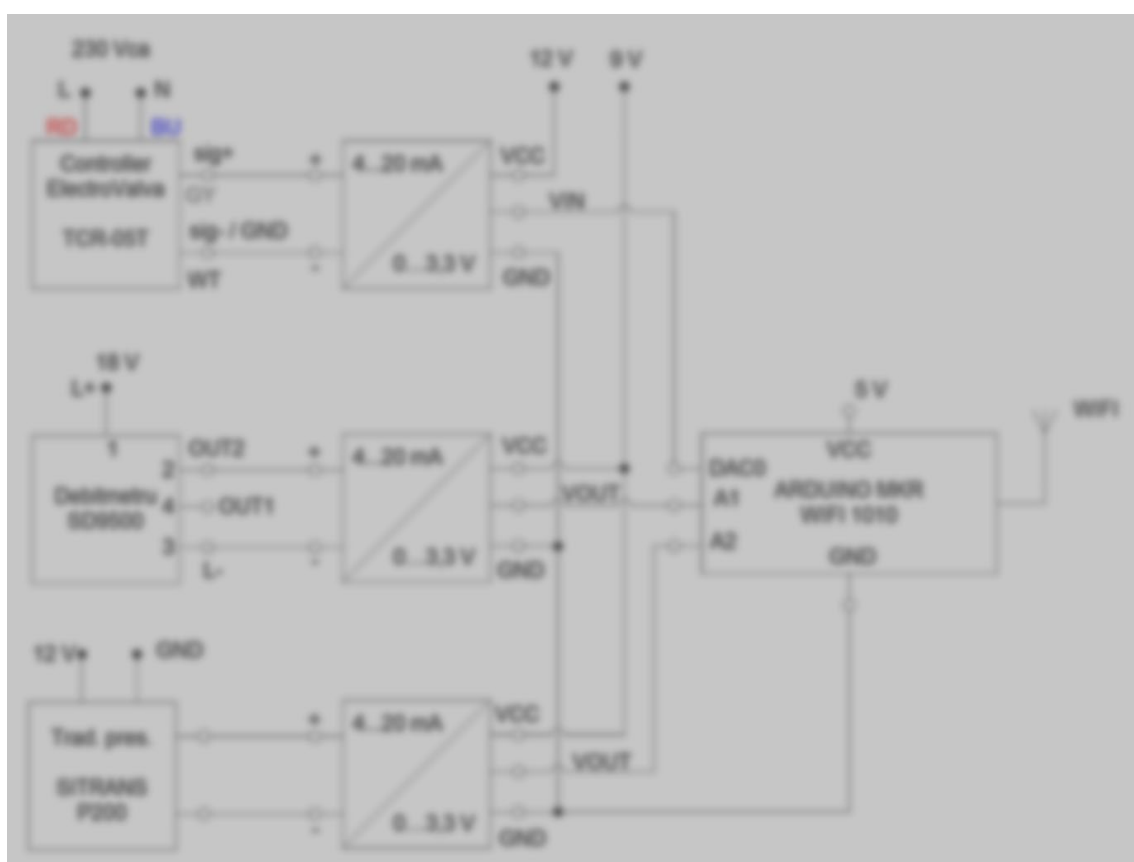


Fig. 11. Schema electrică a modului de comandă

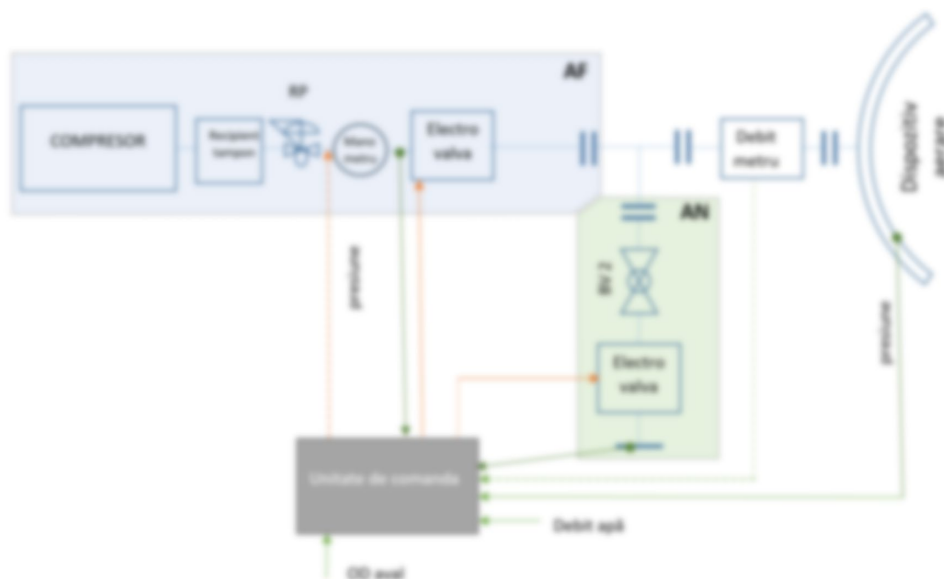


Fig. 12. Reprezentare schematică a sistemului i-Turb

Legenda

BV2 – robinet cu bila operat manual,

RP – regulator de presiune,

AN – modulul de aerare naturală,

AF – modulul de aerare forțată,

Unitatea de comanda – ansamblu componente electronice care implementează algoritmul automatizat de aerare,

Debitmetru – debitmetru aer ,

Linie verde – conexiune traductori (input),

Linie roșie – conexiune comanda (output),

Linie întreruptă – conexiune opțională.



Fig. 13, Configurația montajului de calibrare în laborator a vanei electrice pentru aerare forțată

O reprezentare schematică a sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor procesului de aerare este prezentată în figura 12. Logica acționează electrovalvele în

conformitate cu algoritmul dezvoltat și prezentat în capitolul 2.1. Unitatea de comandă primește date de presiune din modulele AF, AN și din dispozitivul aerare, date despre nivelul de oxigen dizolvat din avalul centralei hidrolice, și date despre debitul de apă turbinată.

Proiectul sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor de funcționare a turbinei i-Turb este prezentat în Anexa 1. În figura 13 se prezintă detaliile de execuție ale modelului experimental de sistem integrat de aerare pentru testarea modulului de aerare forțată.

Activitatea 2.3. Realizarea sistemului integrat, pentru obținerea celui mai bun echilibru între potențialul ecologic al apei și eficiența turbinei (CO, P1, P2)

Pentru efectuarea în bune condiții a măsurătorilor experimentale in situ, ce urmează a fi efectuate în mediu industrial, în etapa a treia a proiectului, s-a dezvoltat o instalație experimentală de testare a echipamentelor ce compun sistemul pneumatic. Acest sistem face parte din modulul de aerare forțată (AF) a sistemului automatizat de monitorizare a parametrilor procesului de aerare și are rolul de a asigura debitul de aer comprimat necesar aerării apei turbinate în cazul în care presiunea din aspiratorul turbinei hidrolice este superioară presiunii atmosferice.

Sistemul pneumatic testat în aceasta etapa este compus din: compresor, recipient tampon, regulator de presiune, electrovalvă, debitmetru de aer, senzori de presiune (fig. 14). Aceste componente au fost integrate în sistemul automatizat și s-au testat pentru anumite condiții de funcționare, prezentate în capitolul A2.4. Astfel, a fost posibilă testarea în condiții relevante a modulului de aerare forțată, reprezentat schematic în figura 14 și a modulului de comandă. **Sistemul integrat de comandă** (L4), denumit în acest raport **modul de comandă** este compus din: microcontrollerul Arduino, logica de comandă (fig. 1), convertoare de semnal (fig. 11), programul care integrează aparatura de măsură și control a sistemului i-Turb (Anexa2), și interfețele grafice asociate (fig. 15 și fig. 18).

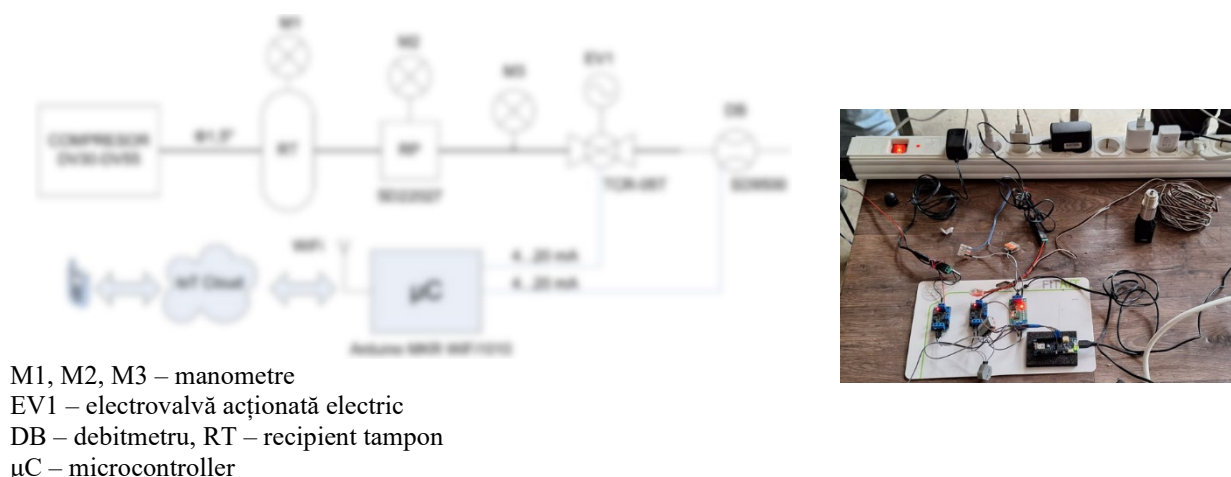


Fig. 14. Reprezentare schematică a modulului de aerare forțată și modulul de comandă (foto)

În prealabil s-a realizat un program care integrează aparatura de măsură și control a sistemului *i-Turb*, funcții de achiziții de date și cei doi algoritmi de reglare automată realizați în activitățile precedente. Programul este realizat în LabVIEW și are o interfață grafică (fig.

15) ce permite utilizatorului monitorizarea funcționării sistemului hidraulic, a algoritmilor de reglare automată, configurarea parametrilor sistemului precum și controlul manual al sistemului.



Fig. 15. Interfața grafică a sistemului i-TURB pentru monitorizare și control

Pentru a evita funcționarea reglării în condiții de măsurători defectuoase s-a implementat un algoritm de auto-test (fig. 16 și fig. 17). În dezvoltarea software-lui și hardware-lui pentru reglarea automată a sistemului de aerare s-a ținut cont de posibilitatea funcționării defectuoase a unor componente. Astfel comunicația dintre microcontroller și senzori respectiv actuatori se face în principal pe standardul de curent unificat $4\div 20$ mA, care permite identificarea stării de defect. În privința comunicațiilor digitale dintre microcontroller și celelalte echipamente digitate (IoT Cloud, laptop, smartphone etc.) defectul de comunicație este urmărit software prin metode specifice protocoalelor folosite. Apariția erorilor este semnalizată în interfața grafică după cum se poate observa și în figura 15 (semnalizate cu LED-uri verzi).

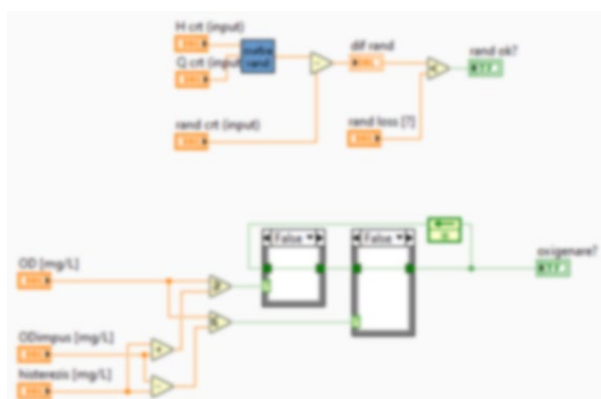


Fig. 16. Verificare condiții aerare din algoritmul de reglare a procesului de aerare și algoritmului de optimizare a performanțelor turbinei

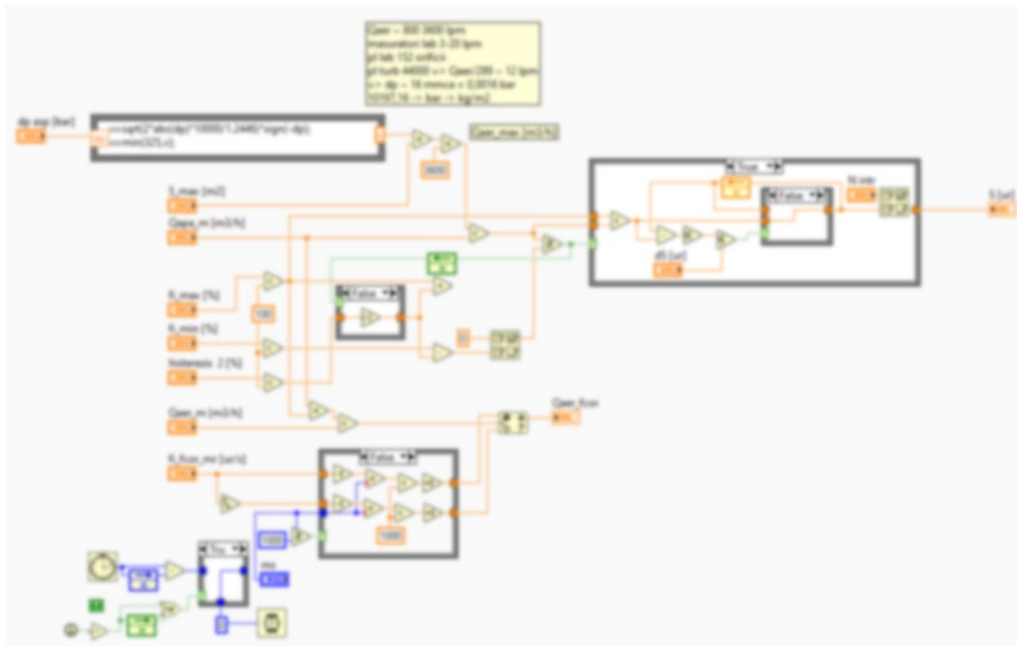


Fig. 17. Comandă aerare

Programul care integrează aparatura de măsură și control a sistemului i-Turb a fost implementat pe o placă de dezvoltare Arduino MKR WiFi 1010, conectată la Arduino IoT Cloud pentru stocarea datelor măsurate. Pentru aceasta o altă interfață grafică, (Fig. 18), a fost dezvoltată și este disponibilă atât pentru un dispozitiv mobil (IoT Remote) cât și pentru PC, versiune desktop (Arduino IoT Cloud), optimizată în special pentru controlul la distanță și salvarea de date.

Codul C implementat pentru programul care integrează aparatura de măsură și control a sistemului i-Turb este prezentat în Anexa 2.

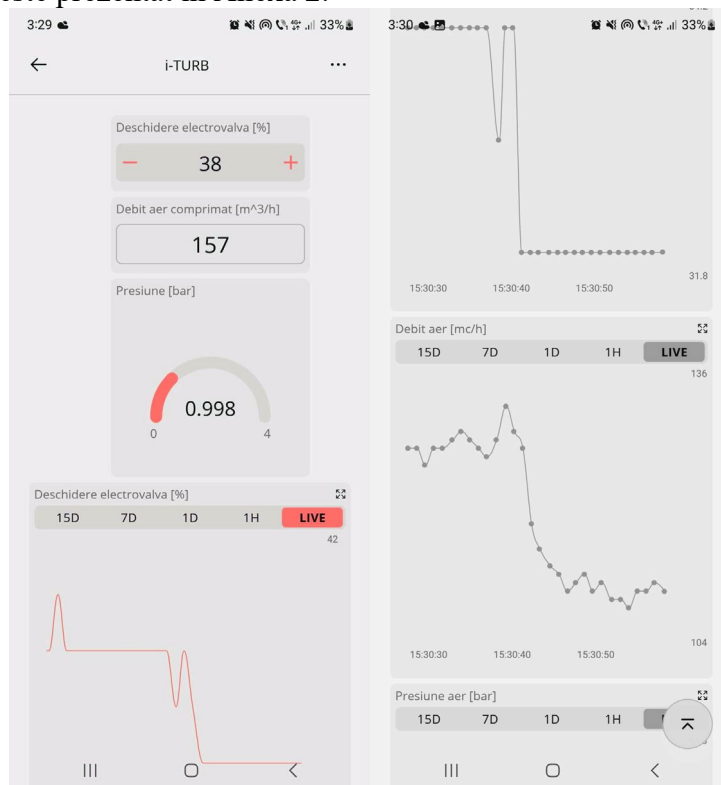


Fig. 18. Interfața grafică din aplicația IoT Remote

Activitatea 2.4 - Implementare în condiții relevante de funcționare a sistemului automatizat de aerare i-Turb (CO, P1, P2)

2.4.1 Implementarea în condiții relevante de funcționare a echipamentelor pentru monitorizarea parametrilor de aerare și energetici

Un model experimental de sistem integrat de aerare – modulul de aerare forțată, a fost realizat cu scopul de a testa echipamentele ce compun sistemul pneumatic. Acest modul are rolul de a asigura necesarul de aer atunci când presiunea în turbina hidraulică este superioară presiunii atmosferice. Acest necesar a fost determinat în cercetările anterioare ca fiind de maxim 360 m³/h pentru a asigura o fracție de goluri în circuitul hidraulic de maxim 8 %. Experimental s-a constatat că presiunea la intrarea în turbina Francis pe care se va face implementarea sistemului i-TURB a fost de maxim 1,43 bar. Astfel, pentru a acoperi întreaga plajă de debite și presiuni din situ, testarea modului AF s-a realizat în următoarele condiții relevante de funcționare:

- Debitul de aer: 0 ÷ 360 m³/h;
- Presiunea la intrarea în sistem (aval de regulatorul de presiune): 0,5 bar, 1 bar respectiv 2 bar.

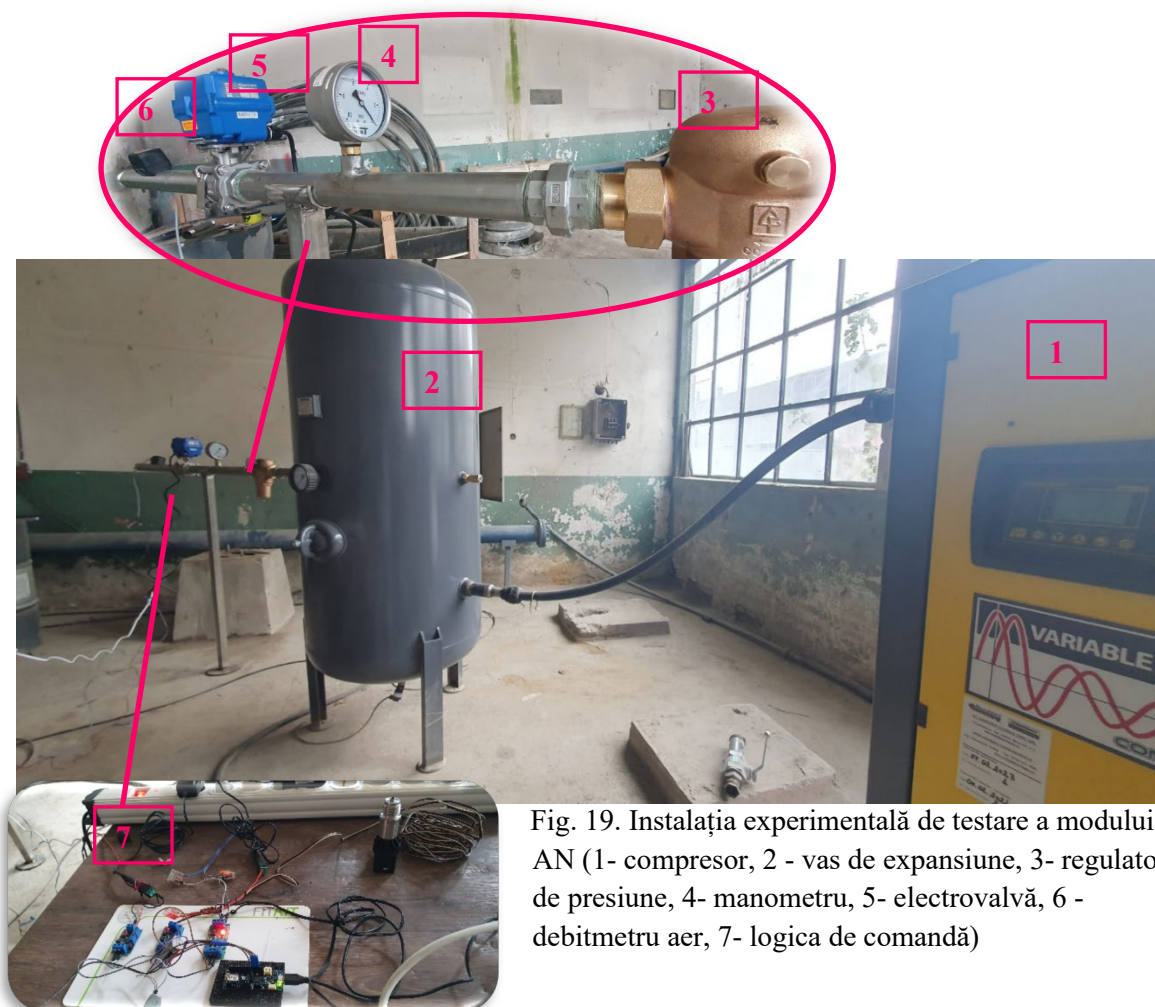


Fig. 19. Instalația experimentală de testare a modului AN (1- compresor, 2 - vas de expansiune, 3- regulator de presiune, 4- manometru, 5- electrovalvă, 6 - debitmetru aer, 7- logica de comandă)

În figura 19 se prezintă instalația experimentală realizată în această etapă a proiectului, cu scopul de a fi testat modulul de aerare forțată în condiții relevante de funcționare a echipamentelor

Programul care integrează aparatura de măsură și control a sistemului i-Turb a fost implementat utilizând limbajul de programare C, în program se setează ieșirea convertorului digital analogic pentru generarea comenzii necesare controlului deschiderii electrovalvei, intrările convertoarelor analogic digitale pentru citirea valorilor primite de la traductorul de presiune și debitmetru. Valoarea deschiderii electrovalvei este trimisă din interfață și este convertită pentru a fi trimisă electrovalvei. Valorile parametrilor mășurați se citesc la fiecare 100 ms și sunt mediate pe un interval de o secundă și sunt trimise pentru a fi vizualizate în interfață și a fi stocate în Arduino IoT Cloud la un interval de o secundă.

2.4.2. Rezultate experimentale și interpretarea datelor

În figurile de mai jos se prezintă variația debitului aerului comprimat la ieșirea din electrovalvă pentru trei presiuni diferite ale aerului comprimat la intrarea în electrovalvă. În figura 20 se prezintă o secvență a graficului variației în timp din interfața web a aplicației IoT Remote, unde se pot observa valorile debitului de aer comprimat la diferite deschideri ale electrovalvei. Curbele din partea din stânga a graficului sunt corespunzătoare unei presiuni de intrare de 2 bar, iar curbele din partea din dreapta a graficului sunt corespunzătoare unei presiuni de intrare de 1 bar. Se poate observa că pentru o presiune de 2 bar debitul maxim necesar este obținut la o deschidere mai mică a electrovalvei. Cu cât presiunea de intrare a aerului în sistem scade, deschiderea electrovalvei de mărește proporțional, pentru a asigura un debit impus / necesar în procesul de aerare. Indiferent de presiunea de intrare, dacă aceasta este cuprinsă între 0 și 2 bar presiune relativă, se poate asigura un debit maxim de 360 mc/h, necesar .

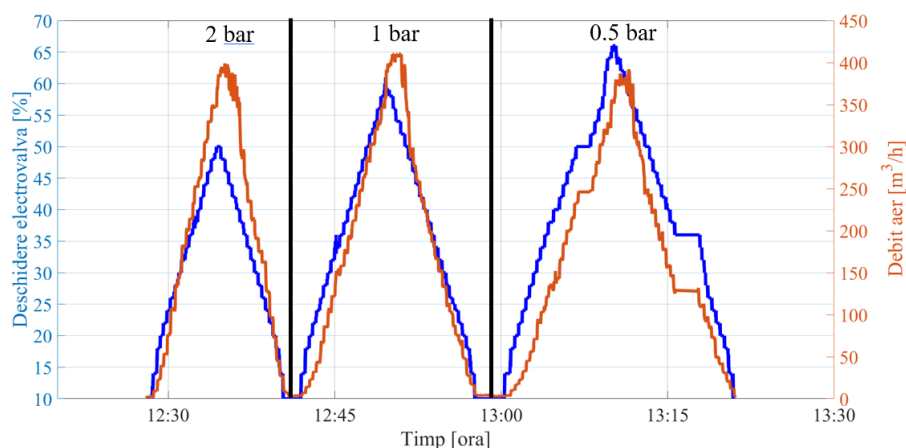


Fig. 20. Debitul aer și deschiderea electrovalvei pentru diferite presiuni de intrare (2 bar, 1 bar și 0,5 bar)

În figurile 21-23 sunt prezentate variațiile debitului de aer funcție de deschiderea electrovalvei pentru trei presiuni de intrare în modulul de aerare. Măsurătorile experimentale în fiecare dintre presiunile de intrare au fost efectuate atât pentru deschiderea graduată a electrovalvei cât și pentru închiderea electrovalvei, pentru evidențierea fenomenului de histerezis. Aceste măsurători sunt utile pentru calibrarea deschiderii electrovalvei în funcție de debitul necesar de aer ce se dorește a fi utilizat pentru aerarea apei turbinate, în funcție de

deficitul de oxigen din situ.

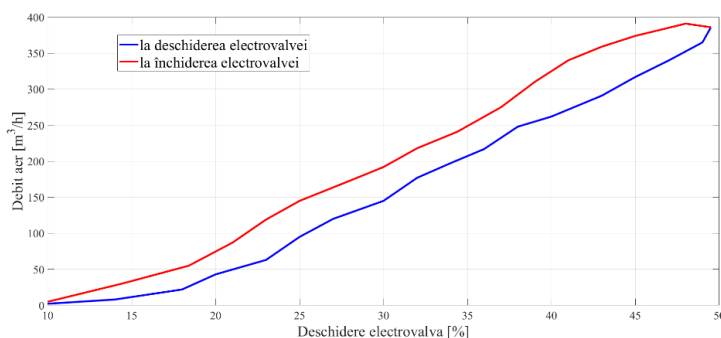


Fig. 21. Debit aer în funcție de deschiderea electrovalvei pentru o presiune de intrare de 2 bar

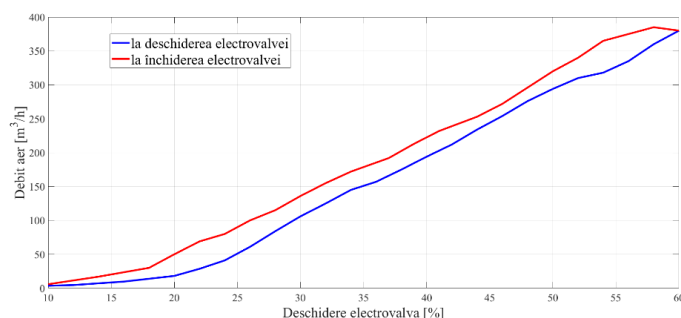


Fig. 22. Debit aer în funcție de deschiderea electrovalvei pentru o presiune de intrare de 1 bar

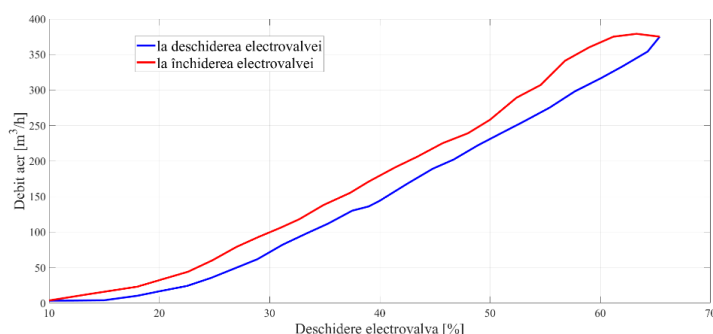


Fig. 23. Debit aer în funcție de deschiderea electrovalvei pentru o presiune de intrare de 0,5 bar

A 2.5 Diseminarea rezultatelor cercetării

Pentru etapa a doua a proiectului au fost propuse 3 articole științifice ISI/BDI și s-au realizat următoarele:

1. P. A. Danca, C. Babutanu, F. Bunea, A. Dogeanu, A possibility of harnessing the heat discarded into the environment using thermoelectric generators, (28th Conference of the Faculty of Power Engineering and Power Machines at the Technical University of Sofia), Innovations in Energy and Environment - InnoEE 2023, 17-19 May 2023, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1234 012006, DOI: [10.1088/1755-1315/1234/1/012006](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1234/1/012006), ISSN: 1755-1307. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1234/1/012006>, BDI, in curs de indexare ISI
2. S. Nicolaie, E. Tudor, F. Bunea, Clean access in Danube Delta, „Deltas & Wetlands” DDNI Scientific Event Community, 30-th edition Deltas & Wetlands International Symposium, Tulcea, June 05 - 09, 2023, prezentare orală, <https://ddni.ro/wps/ro/deltas-and-wetlands-simpozionul-30/>, ISSN: 2344-3766; ISSN-L: 2344-3766
3. R. Mitrut, D. M. Bucur, G. Dunca, I. S. Grecu, M. J. Cervantes, Passive control of flow around a circular cylinder with different bluff-bodies, (11th International Conference on Energy and

Environment, 26 - 27 October 2023),

<http://ciem.UNSTPB.ro/2023/files/Program%20CIEM%202023.pdf>, in curs de publicare, indexare ISI

4. A. I. Stroilescu, G. Dunca, D. M. Bucur, Improving the performance of an axial hydrokinetic turbine using auxiliary equipment, (11th International Conference on Energy and Environment, 26 - 27 October 2023), <http://ciem.UNSTPB.ro/2023/files/Program%20CIEM%202023.pdf>, in curs de publicare, indexare ISI
5. R. Mitrut, D. M. Bucur, G. Dunca, M. J. Cervantes, Flow around a 2D-cylinder: influence of bluff-bodies in the wake, UPB Scientific Bulletin, Series D, acceptat pentru publicare, indexare BDI

Concluzii

În prezenta etapă de raportare au fost realizați toți indicatorii de rezultat propuși, respectiv:

L1: Algoritm de optimizare a performanțelor turbinei - este prezentat în capitolul A 2.1 și reprezentat schematic în figura 1. Acest algoritm are în vedere două obiective: diminuarea pierderilor cauzate de aerare și creșterea eficienței la sarcină parțială prin același proces de aerare. În urma testării algoritmului cu ajutorul programului realizat în Matlab s-a observat că scăderea randamentului turbinei cu mai mult de 2% (limita impusă în program) este corect identificată și imediat este semnalizată prin oprirea aerării. În concluzie, algoritmul este corect și pregătit să fie implementat în automatizarea sistemului *i-Turb*.

L2: Proiectul sistemului i-Turb – este prezentat în detaliu în capitolul A 2.2 și în Anexa 1 este atașat proiectul tehnic.

L3: Sistem integrat, interfață grafică - denumit în acest raport *modul de comandă* este prezentat în capitolul A2.3 și este compus din: microcontrollerul Arduino, logica de comandă (fig. 1), convertoare de semnal (fig. 11), programul care integrează aparatura de măsură și control a sistemului i-Turb (Anexa2), și interfețele grafice asociate: una pentru monitorizarea sistemului hidraulic, a algoritmilor de reglare, configurarea parametrilor sistemului precum și controlul manual al sistemului și o alta optimizată în special pentru controlul la distanță și salvarea de date (fig. 15 și fig. 18).

L4: Model de sistem automatizat de aerare i-Turb - Un model experimental de sistem integrat de aerare – modulul de aerare forțată (fig. 19), a fost realizat cu scopul de a testa echipamentele ce compun sistemul pneumatic.

L5: 3 articole științifice indexate ISI/BDI. În capitolul A2.5 sunt prezentate lucrările științifice diseminate respectiv lucrări prezentate la conferințe științifice de specialitate indexate ISI și acceptate spre publicare, o lucrare publicat în jurnal BDI și o alta lucrare prezentată la o conferință internațională.

L6: Site web - Web-site a fost actualizat (<https://www.icpe-ca.ro/i-turb/>).

Bibliografie selectivă

- [1] *Innovative aeration system of the water used by hydraulic turbines, for preservation of the aquatic life* ECOTURB, PNII-PT-PCCA, UEFISCDI, ctr. 88/2014, Dir. proiect Bunea F.
- [2] Bucur DM, Dunca G, Bunea F, Ciocan GD, 2019, Experimental analysis of the operation of a small Francis turbine, 29 th IAHR Symp. on Hydraulic Machinery and Systems, Kyoto, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Sci.240, 042010, doi:10.1088/1755-1315/240/4/042010
- [3] Bunea F., Ciocan G.D., Bucur D.M., Dunca G., Nedelcu A., Hydraulic Turbine Performance Assessment with Implementation of an Innovative Aeration System. *Water* 2021, 13, 2459. <https://doi.org/10.3390/w13182459>, factor impact 3,1
- [4] Isbășoiu E. C., Bucur D.M., Dunca G., Ghergu C.M., Tănase N.O., Încercarea mașinilor hidraulice, Editura Politehnica Press, 2009.

NOTA: Anexele 1 și 2 se regăsesc în raport extins al acestei etape