

 <p>Universitatea Tehnică de Construcții București</p>	<p>Universitatea Tehnică de Construcții București</p> <p>Departamentul de Sisteme Termohidraulice și pentru Protecția Atmosferei</p> <p><i>Centrul de cercetare avansată pentru calitate ambientală și fizica clădirilor</i></p>	 <p>Unitatea Executivă pentru Finanțarea Învățământului Superior, a Cercetării, Dezvoltării și Inovării</p>
<p>RST - PN-III-P1-1.1-PD-2021-0342</p>		

Raport Tehnic și Științific – RST 01/2023

Proiect: *PN-III-P1-1.1-PD-2021-0342*

PNEUMA

Strategii de control adaptiv pentru un simulator artificial al sistemului respirator uman

Rezumatul Executiv al Etapei

Pe perioada anului în curs, în cadrul proiectului **PNEUMA** s-au desfășurat în principal două pachete de lucru: **WP2** și **WP3** și a fost încheiat și pachetul de lucru.

Al doilea pachet de lucru (**WP2**) acoperă dezvoltarea standului experimental al simulatorului artificial al sistemului respirator uman (ABS). Acest pachet de lucru s-a desfășurat în perioada 1 Februarie – 30 Septembrie 2023. Activitățile principale au fost asamblarea și punerea în funcțiune a standului experimental, realizarea sistemului de achiziție de date pentru echipamentele electronice achiziționate și verificarea funcționării ABS. Repartizarea bugetului a împiedicat completarea achiziției în primul an al proiectului, drept urmare etapa WP2 a pornit cu o întârziere cauzată de livrări. Această etapă a fost însă dusă la bun sfârșit. Livrabilul dezvoltat în cadrul **WP2** este standul experimental ABS și testul de funcționare al sistemului respirator. Standul se află la Facultatea de Inginerie a Instalațiilor din cadrul instituției gazdă (UTCB) în posesia directorului de proiect.

Al treilea pachet de lucru (**WP3**) acoperă dezvoltarea sistemului de control automat pentru ABS. Acest pachet de lucru a demarat la data de 1 Aprilie 2023, în tandem cu **WP2**, mai exact, la începutul implementării sistemului de achiziție de date pentru echipamentele de măsură (din cadrul **WP2**). Activitățile principale au fost conceperea logicii de control în baza funcționării echipamentelor de măsură și verificarea funcționării ABS. Livrabilul dezvoltat în cadrul **WP3** pentru prezenta etapă este schema de control pentru ABS.

Diseminarea realizată în prezenta etapă constă în: **2 articole de conferință** legate de dezvoltarea standului ABS și de posibilitatea implementării ABS într-un manechin termic, prezentate la o conferință internațională (*CIEM 2023*) indexată ISI; **1 articol de jurnal** aflat în curs de publicare (trecut de două etape de Review) în revista *Energies*, indexată WOS cu FI 3.2; Conferința NetZeroCities la Unviersitatea din Suceava (participare la o discuție despre eforturi de digitalizare a caselor pasive în sectorul construcțiilor și echipamente moderne de evaluarea a calității aerului). Toate publicațiile științifice rezultate din prezenta etapă au fost încărcate pe site-ul proiectului (<https://cambi.utcb.ro/researchprojects/pneuma>).

Pe parcursul acestei etape, pe lângă activitățile de realizare a ABS, măsurători experimentale, achiziție de date, cercetare, proiectare și diseminare s-au desfășurat și activități de management al proiectului, precum: realizarea referatelor pentru achiziția echipamentelor necesare (în conformitate cu legislația în vigoare) și realizarea unui audit financiar al proiectului.

Descrierea științifică și gradul de realizare al obiectivelor

Activitățile propuse și gradul de realizare al obiectivelor

Planul de lucru al proiectului este împărțit în mai multe pachete de lucru (**WP**), fiecare dintre acestea fiind alcătuit din mai multe sarcini (**T**), pe parcursul cărora au fost identificate două etape de referință (**M**). Planul de lucru este prezentat în **Figura 1**.

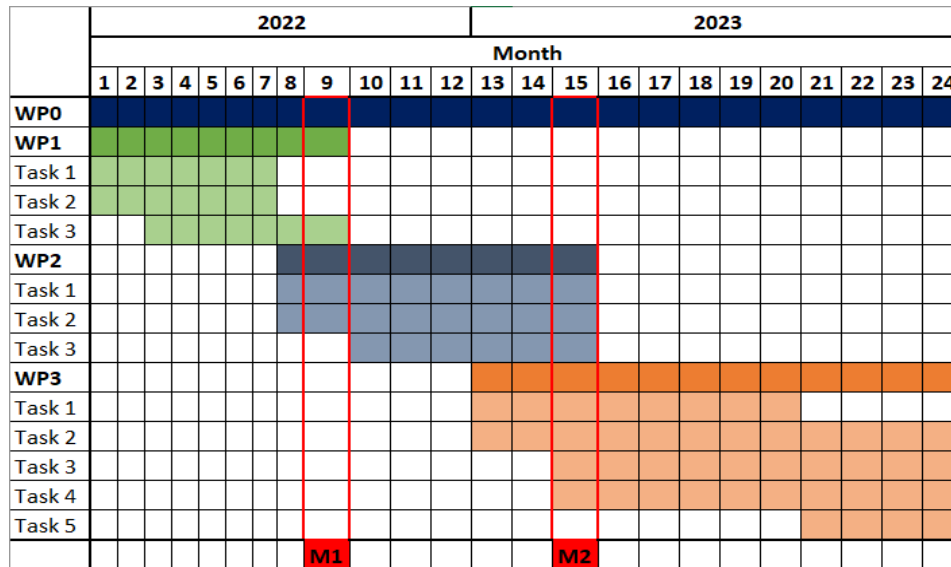


Figura 1 Graficul Gantt al proiectului PNEUMA

WP0 – reprezintă activitățile de management ale proiectului.

WP1 - se referă la documentația și proiectarea pentru construcția ABS, cu următoarele sarcini: (**T1**) proiectare teoretică și pre-dimensionare ABS, pre-dimensionare, estimare a materialelor necesare; (**T2**) Revizuirea proiectării și reitararea dacă este necesar; (**T3**) achiziția materialelor necesare; (**M1**) Documentele de proiectare pentru construcția ABS.

WP2 - acoperă construcția ABS și implementarea software-ului de achiziție de date, cu următoarele sarcini: (**T1**) instalarea hardware-ului, configurarea software-ului de achiziție de date; (**T2**) verificarea sistemelor și depanarea (dacă este necesar); (**T3**) validare preliminară pe baza măsurătorilor existente ale ratei de generare de CO₂ de către om; (**M2**) ABS validat pentru simularea experimentală a respirației umane.

WP3 - va acoperi implementarea sistemului de control automat și verificarea și optimizarea acestuia prin comparație cu rezultatele existente, cu următoarele sarcini: (**T1**) conceperea sistemului de control automatizat; (**T2**) determinări experimentale ale ratelor de generare de CO₂ uman pentru diferiți subiecți umani; (**T3**) evaluarea performanțelor ABS prin comparație cu rezultatele experimentale existente; (**T4**) revizuirea și îmbunătățirea sistemului de control automatizat; (**T5**) Validarea finală a sistemului ABS pe baza ratelor medii de generare de CO₂ uman măsurate experimental.

Gradul de realizare al sarcinilor a fost reprezentat în procente pe o scară de la 0-100%. Pentru obiectivele care sunt în curs de desfășurare sau unde gradul de realizare nu poate fi cuantificat direct prin rezultate, procentajul a fost calculat ca ponderea lunii curente din durata totală de desfășurare (conform graficului). Gradul de realizare al pachetelor de lucru (WP) a fost calculat drept media ponderată a gradului de realizare al sarcinilor componente.

Pentru etapa curentă s-a propus următorul grad de realizare pentru obiectivele:

- **WP0 – 87%** (echivalentul perioadei de 21 luni în cursul căreia s-a desfășurat etapa curentă, raportată la durata totală de 24 de luni a proiectului)
- **WP1 – 100%**
- **WP2 – 100 %**
 - **T1 – 100 %**
 - **T2 – 100 %**
 - **T3 – 100 %**
 - **M2 – 100 %**
- **WP3 – 72 %**
 - **T1 – 100 %**
 - **T2 – 75 %**
 - **T3 – 70 %**
 - **T4 – 70 %**
 - **T5 – 25 %**

Gradul de realizare al obiectivelor propuse pentru etapa curentă este prezentat în **Tabelul 1**.

Tabelul 1 Gradul de realizare al obiectivelor propuse pentru etapa curentă

Pachet de lucru / Sarcină	Grad de realizare
WP 0 – Management proiect	87%
WP1 – Proiectare ABS, achiziție echipamente	100%
T1 – Principiu de funcționare și predimensionare	100%
T2 – Proiectare finală	100%
T3 – Achiziții echipamente	100%
M1 – Documente pentru proiectare ABS	100%
WP2 – Construcție ABS	100%
T1 – Instalare hardware și software	100%
T2 – Verificare sisteme	100%
T3 – Validare preliminară ABS	100%
M2 – ABS validat experimental	100%
WP3 – Implementarea sistemului de control automatizat	63%
T1 – Conceperea logicii de control	100%
T2 – Determinări experimentale generare CO₂	66%
T3 – Evaluare performanțe ABS	70%
T4 – Revizuirea și optimizarea sistemului de control automatizat	50%
T5 – Validare finală ABS automatizat	

În cursul prezentei etape, s-au atins majoritatea obiectivelor propuse. Obiectivele care nu au atins gradul de propunere prevăzut (T2, T4) au fost influențate de întârzierile bugetare din etapa precedentă. În ciuda acestui fapt, obiectivele au fost începute și se află într-un stadiu de realizare avansat în raport cu valoarea propusă, urmând ca T2 și T4 să atingă gradul de propunere prevăzut până la sfârșitul anului curent. Sarcina T5 a fost planuită a fi demarată în ultima lună a anului curent și va fi demarată imediat ce sarcina T2 va atinge gradul de realizare planuit.

Pachetul de lucru **WP0** care reprezintă activitățile de management a fost îndeplinit într-un procent echivalent cu raportul dintre durata prezentei etape a proiectului (21 de luni) raportată la durata totală a proiectului (24 de luni). **WP0 va atinge un grad de realizare de 100% la finalul proiectului.**

Sarcinile începute care nu au atins gradul de realizare propus **T2** și **T4** sunt legate de performanțele ABS și de optimizarea sistemului de control automatizat. Gradul de realizare incomplet are legătură cu eforturile în desfășurare de a regla debitul de CO₂ introdus în ABS. Cauza este reglajul manual al treptei de reglare II, în rezervorul secundar (care înmagazinează CO₂ la o ușoară suprapresiune) și corelarea gradului de deschidere al electrovanei care delimitează rezervorul secundar de corpul central al ABS.

Sarcina **T5** reprezintă etapa finală a proiectului care implică o campanie de măsurători experimentale desfășurată în tandem cu eforturile de evaluare și optimizare a performanțelor ABS (**T3** și **T4**). De îndată ce sarcina **T2** atinge gradul de realizare prevăzut pentru etapa curentă, etapa **T5** poate începe.

Toate celelalte obiective propuse pentru prezenta etapă (WP2 - T1, T2, T3, M2 și WP3 – T1, T3) au atins procentul de realizate prevăzut pentru prezenta etapă.

Desfășurarea activităților din **WP2** și **WP3** din punct de vedere științific, pe parcursul prezentei etape, va fi detaliată în capitolele următoare.

I. Pachetul de lucru WP2

ABS-ul va fi construit cu ideea de a utiliza concentrația de CO₂ din aerul expirat ca parametru de control pentru TV (volumul respirat – tidal volume) și bf (frecvența respiratorie). Principiul de control se va baza pe concentrația expirată de CO₂, care, conform literaturii medicale [1], este aproximativ constantă la 4% per volum. Astfel, ABS-ul va avea trei sub-sisteme: primul (1) va fi pistonul utilizat pentru a inhala/exhala aerul, al doilea (2) va fi un mecanism pentru creșterea concentrației de CO₂ în aerul din interiorul pistonului la valoarea necesară (4% per volum), indiferent de concentrația ambientală de CO₂ în timpul inhalării, iar al treilea sub-sistem (3) va fi o stație de măsurare care evaluează concentrația de CO₂ în aerul expirat/inhalat în timp real.

Pistonul - sub-sistemul (1) trebuie să aibă o capacitate totală de 5800 ml (volumul mediu al plămânilor umani [1]) la presiune atmosferică. Pistonul va fi deplasat de-a lungul unui șurub filetat cu ajutorul unui motor pas cu pas. Soluția cu motor pas cu pas a fost aleasă pentru ușurința de implementare, control și măsurare (volumul precis de aer deplasat poate fi calculat cunoscând diametrul interior al pistonului, viteza motorului și pasul filetului șurubului). Pistonul trebuie dimensionat astfel încât motorul pas cu pas să poată crește/descrește rapid volumul de aer deplasat, ceea ce înseamnă că cursa medie a pistonului trebuie să fie relativ scurtă. Dimensionarea pistonului este descrisă mai jos în Tabelul 2. Motorul selectat a fost un motor pas cu pas NEMA23, cu o rotație de 1,8°/pas și micro-pași de 1/16. În funcție de sarcina reală a pistonului, viteza de rotație a motorului poate fi ajustată prin utilizarea unor curelelor și fulii.

Mecanismul de injectare a CO₂ - sub-sistemul (2) trebuie să injecteze o cantitate de CO₂ în sub-sistemul (1) în timpul etapei de inhalare a ciclului respirator, astfel încât concentrația de CO₂ în interiorul sub-sistemului (1) să atingă aproximativ 4% per volum. Presupunând că aerul inhalat are o concentrație de CO₂ de 0,04% per volum (media la nivelul mării), pentru un TV=500 ml, trebuie injectați 18,8 ml de CO₂ în piston în timpul inhalării pentru a atinge valoarea setată dorită.

Tabelul 2 Dimensionarea pistonului principal (plămân)

Denumire Volum [-]	Valoare teoretică [ml]	Diametru intern piston [mm]	Cursă internă necesară [mm]	Volum intern rezultat [ml]	Eroare față de teorie [%]
Tidal Volume	500	140	33	508	1.6
Inspiratory reserve volume	3000		195	3002	0.1
Expiratory reserve volume	1100		71	1093	-0.6
Residual volume	1200		78	1201	0.1
Total	5800		377	5803	0.1

Sub-sistemul (2) va utiliza un rezervor SCUBA umplut cu CO₂ ca sursă primară, din care CO₂-ul va trece prin două regulatoare de presiune pentru scufundări, pentru a umple un spațiu mai mare cu CO₂ la o presiune mai mare peste presiunea de referință de 0 atmosferic. Valoarea precisă a presiunii va fi ajustată în timpul calibrării echipamentului. Sub-sistemul (2) va fi calibrat pe baza diferenței de presiune dintre compartimentul de CO₂ și interiorul pistonului, în raport cu debitul de CO₂ injectat în piston într-un interval de timp fix în care o supapă electronică este deschisă. Acest lucru va permite sistemului de control să varieze timpul în care supapa este ținută deschisă pentru a ajusta volumul injectat de CO₂ în funcție de concentrațiile măsurate la inhalare.

Echipamentul de măsurare a CO₂ va fi instalat la intrarea/ieșirea sub-sistemului (1). Echipamentul trebuie să evalueze debitul de aer inhalat/expirat (ca modalitate de verificare a preciziei pistonului). Un

senzor NDIR de CO₂ cu timp de răspuns rapid va fi folosit pentru evaluarea concentrației de CO₂. Inițial au fost achiziționați doi senzori de CO₂ din cauza faptului că fișa lor tehnică nu specifica dacă erau bidirecționali sau nu. În urma testelor s-a dovedit că senzorii NDIR achiziționați sunt bidirecționali, drept urmare unul singur va fi suficient pentru evaluarea concentrației de CO₂ în aerul vehiculat de ABS:

Debitmetrele pe de altă parte sunt unidirecționale, datorită necesității unui filtru pe aspirația aerului, lucru care influențează calibrarea. Pentru a evita realizarea mai multor ramuri de curgere a aerului, două astfel de debitmetre au fost montate cu în sens opus pe aceeași ramură (cu filtrele către exterior). Acest montaj va rezulta în faptul că unul din cele două debitmetre va citi mereu corect valorile debitului în fiecare caz (inspirație/expirație).

Asamblarea, testarea și a ABS

Corpul ABS (Figura 2) a fost construit cu dimensiunile prezentate în Tabelul 2 din acrilic transparent. Două plăci de capăt servesc drept suport pentru cilindrul de acrilic. Fixarea cilindrilor de cele două plăci se face prin compresie cu ajutorul unor tije filetate care leagă cele două plăci de capăt prin piulițe cu frână. În interiorul cilindrilor se află pistonul (din acrilic transparent) care glisează pe un șurub cu bile acționat de motorul pas cu pas NEMA23 aflat într-unul din capetele sistemului. Șurubul este fixat de piston și de capetele plăcilor rectangulare prin flanșe cu rulmenți. Pentru a preveni rotirea pistonului datorită forței generate de motor a fost instalată o tijă fixă de ghidaj pe toată lungimea cilindrilor. Pe fața interioară a plăcilor de capăt au fost instalate două contacte care întrerup alimentarea motorului în cazul în care pistonul se apropie prea mult de capetele cilindrilor.

În partea opusă față de motor, se află admisia de aer și CO₂ în sistem. Aerul va fi introdus/evacuat prin șase orificii conform documentelor de proiectare. Aceste șase orificii sunt menite să crească suprafața de admisie a aerului pentru a reduce viteza și a minimiza pierderile de sarcină prin sistem. În plus, mai există un al șaptelea orificiu de dimensiuni reduse prin care se va face admisia de CO₂ din rezervorul secundar sub presiune, în funcție de necesarul cerut de sistemul de control pentru a atinge concentrația de 4% CO₂ în interiorul cilindrilor în timpul inspirației. Echipamentele de măsură și control vor fi montate pe racordurile din furtun de poliuretan care alimentează cu aer / CO₂ orificiile de admisie.

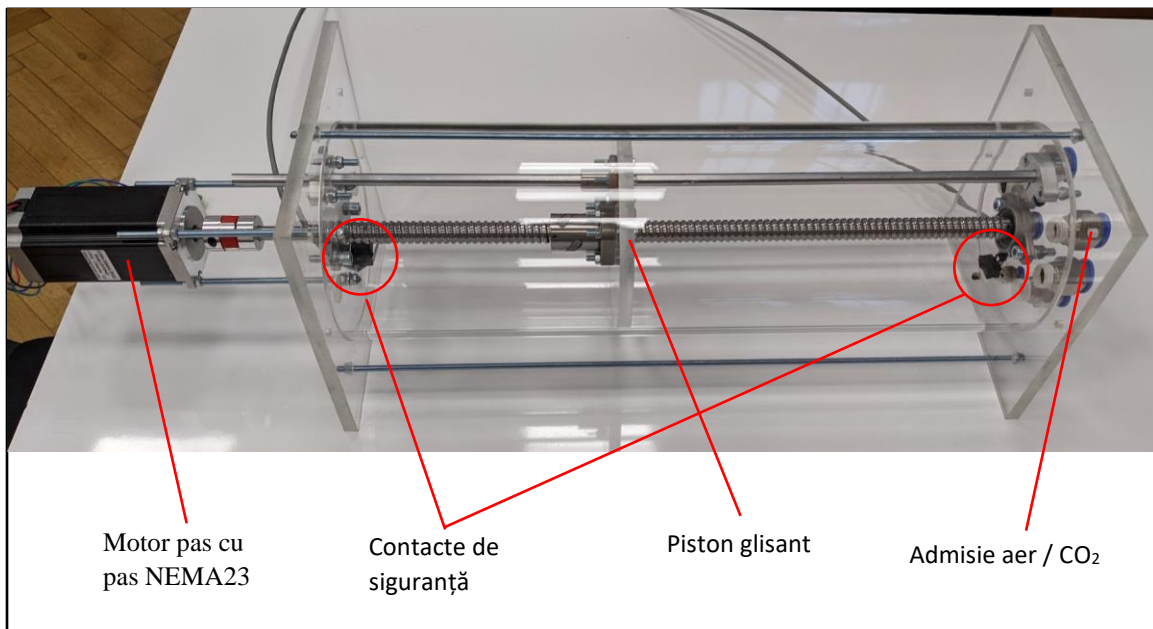


Figura 2 Corpul ABS cu elementele componente principale

Sursa de CO₂ care va alimenta corpul principal al ABS constă într-un rezervor aflat la suprapresiune față de atmosferă, alimentat de la o butelie umplută cu CO₂ (Figura 3). Valoarea exactă a suprapresiunii va depinde de amplitudinea de respirație a ABS. Datorită naturii variabile a necesarului de CO₂ din ABS, s-a optat pentru folosirea unei butelii cu reglatoare de presiune variabile. Reglatoarele folosite pentru scufundări sunt construite pentru a se deschide proporțional cu depresiunea aplicată (inspirația omului). Un astfel de sistem cu reglatoare de presiune a fost conectat la unul dintre capetele rezervorului cu CO₂. Însă, alterarea regulatorului prin introducerea rezervorului și a circuitelor de legătură dintre sursa de CO₂ și corpul ABS a introdus pierderi suplimentare de sarcină care vor trebui luate în calcul prin modificarea poziției neutre a reglatoarelor. Această modificare se face manual prin slăbirea sau strângerea unui șurub de reglaj din interiorul regulatorului. Acest proces este lent deoarece din motive de siguranță trebuie asigurată evacuarea CO₂-ului acumulat pentru evitarea efectelor adverse asupra participanților la test.

În capătul opus alimentării de la butelia cu CO₂ se află două orificii. Primul orificiu face legătura dintre rezervorul cu CO₂, și corpul ABS printr-un furtun de poliuretan pe care este montată o electro-vană cu solenoid (electromagnetică) și un debitmetru de gaz. Al doilea orificiu este destinat unui senzor de presiune diferențial care va fi folosit pentru a cuantifica depresiunea provocată în corpul ABS prin creșterea amplitudinii / frecvenței de respirație.

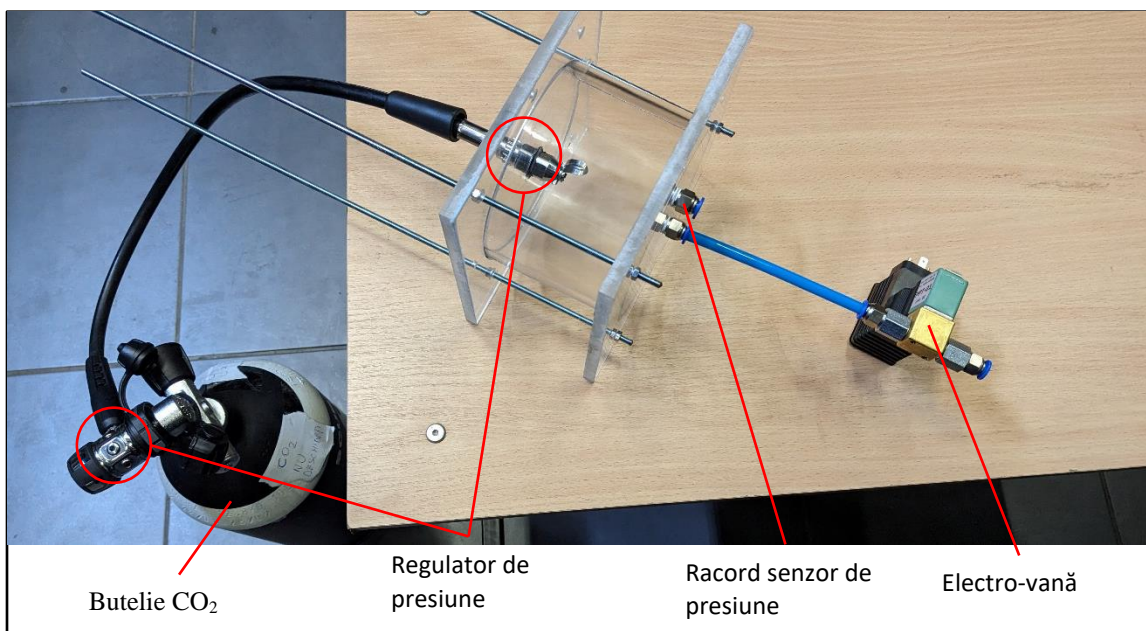


Figura 3 Rezervorul de alimentare cu CO₂

Achiziția datelor

Datele necesare pentru controlul ABS sunt: concentrația de CO₂ din aerul inspirat/expirat, debitul de aer inspirat/expirat, debitul de CO₂ introdus în timpul inspirației de la rezervorul de CO₂, diferența de presiune între rezervorul de CO₂ și interiorul pistonului. Senzorii sunt prezentați în Tabelul 3 și Figura 4.

Tabelul 3 Lista senzorilor utilizați pentru evaluarea ABS

Parametru măsurat	Denumire Senzor	Interval de măsură	Reprezentare senzor
Concentrație CO ₂	GSS SprintIR®-R	0-5% volumic la 50Hz	Figura 4 (a)
Debit gaz	D6F-10A7D-000-0 D6F-70AB71D-000-0	0-10 L/min; 0-70 L/min	Figura 4 (b)
Presiune diferențială	D6F-PH5050AD3	-50 – 50 Pa	Figura 4 (c)

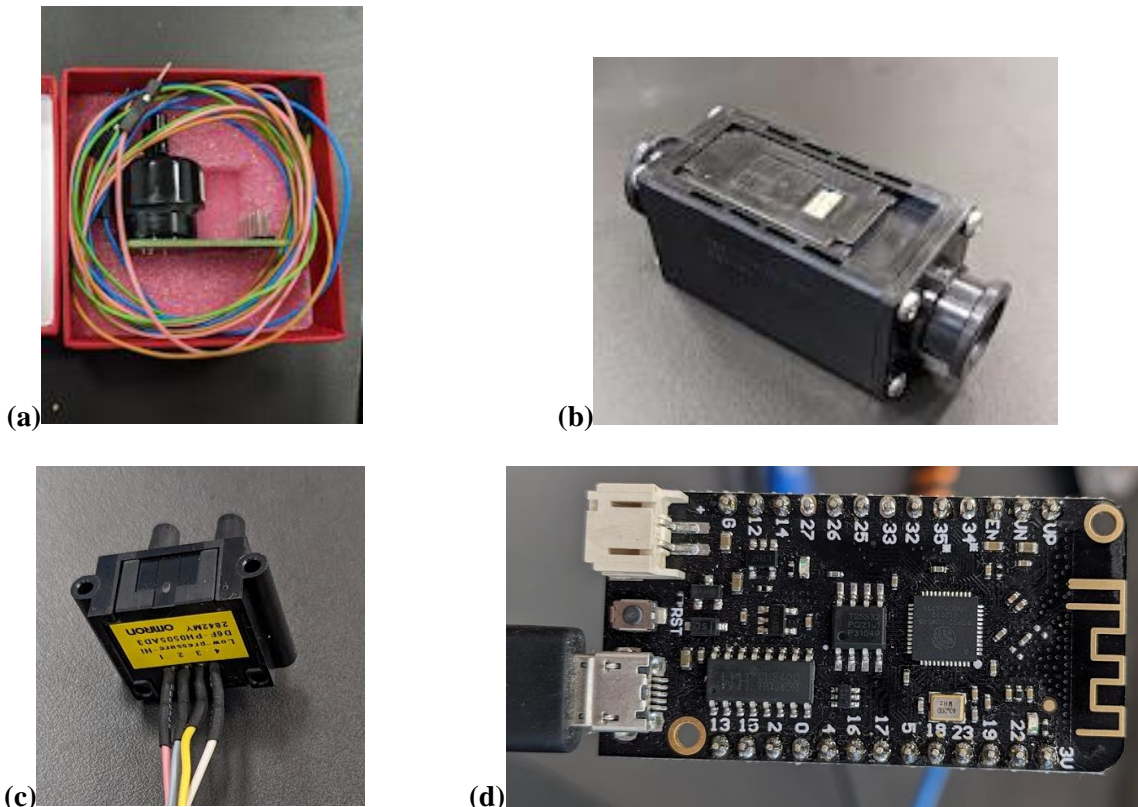


Figura 4 Lista senzorilor: (a) Senzor de CO₂, (b) Debitmetru de gaz, (c) Senzor diferențial de presiune și (d) placă de achiziție.

Achiziția de date se va face prin plăci de achiziție de tip Arduino Mega și ESP32, prin software-ul Arduino IDE. Datele vor fi achiziționate direct de la senzori și se vor construi programe în Arduino IDE pentru prelucrarea semnalului brut în date utilizabile în format text care ulterior vor fi prelucrate pentru interpretarea rezultatelor. Programele construite și folosite în Arduino IDE pentru achiziția datelor de la senzori sunt prezentate mai jos în Tabelul 4.

Tabelul 4 Programele de achiziționarea a datelor aferente fiecărui senzor

Senzor CO₂ – GSS SprintIR®-R
<pre> void setup() { Serial2.begin(9600); czr.init(); Serial.begin(115200); Serial.print("FILTERED\t"); Serial.println("RAW"); Serial.println(); // set to streaming explicitly. czr.setOperatingMode(CZR_STREAMING); // set digifilter on an average value czr.setDigiFilter(8); // select RAW and FILTERED CO2 czr.setOutputFields(CZR_DEFAULT); delay(1000); } void loop() { </pre>


```

if (Serial2.available()) {
  char c = Serial2.read();
  switch (c) {
    case 'Z': // FILTERED CO2
      field = 'Z';
      break;
    case 'z': // RAW CO2
      field = 'z';
      break;
    case '0' ... '9':
      tmp *= 10;
      tmp += c - '0';
      break;
    case ' ':
    case '\n':
    case '\r':
      if (tmp > 0 && field == 'Z') F_CO2 = tmp;
      if (tmp > 0 && field == 'z') R_CO2 = tmp;
      tmp = 0;
      break;
    default:
      break; } }
if (millis() - lastPrint > 500) {
  lastPrint += 500;
  Serial.print(F_CO2);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(R_CO2);
  Serial.print("\t");
  Serial.print(czr.getPPMFactor());
  Serial.println(); } }

```

Debitmetre gaz – D6F-10A7D-000-0 și D6F-70AB71D-000-0

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("peripherals: I2C");
  Wire.begin(); // i2c master
  Serial.println("sensor: Differential pressure Sensor");
  delay(32);
  // 1. Initialize sensor (0Bh, 00h)
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x0B00, NULL, 0); }
void loop() {
  delay(100);
  // 2. Trigger getting data (00h, D0h, 40h, 18h, 06h)
  uint8_t send0[] = {0x40, 0x18, 0x06};
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send0, 3);
  delay(50); // wait 50ms
  // 3. Read data (00h, D0h, 51h, 2Ch) (07h)
  uint8_t send1[] = {0x51, 0x2C};
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send1, 2);
  uint8_t rbuf[2];
  if (i2c_read_reg8(D6F_ADDR, 0x07, rbuf, 2)) {
    return; }
}

```

```

uint16_t rd_flow = conv8us_u16_be(rbuf);
float flow_rate;
// 0-70[L/min] range
flow_rate = ((float)rd_flow - 1024.0) * 70.0 / 60000.0;
// 0-10[L/min] range
flow_rate = ((float)rd_flow - 1024.0) * 10.0 / 60000.0;
Serial.print(flow_rate, 2); // print converted flow rate
Serial.println(" [L/min]"); }

```

Senzor de presiune – D6F-PH5050AD3

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("peripherals: I2C");
  Wire.begin(); // i2c master
  Serial.println("sensor: Differential pressure Sensor");
  delay(32);
  // 1. Initialize sensor (0Bh, 00h)
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x0B00, NULL, 0); }
/** <!-- loop - Differential pressure sensor {{{ 1 --> * 1. read and convert sensor. * 2. output results,
format is: [Pa] */
void loop() {
  delay(150);
  // 2. Trigger getting data (00h, D0h, 40h, 18h, 06h)
  uint8_t send0[] = {0x40, 0x18, 0x06};
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send0, 3);
  delay(50); // wait 50ms
  // 3. Read data (00h, D0h, 51h, 2Ch) (07h)
  uint8_t send1[] = {0x51, 0x2C};
  i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send1, 2);
  uint8_t rbuf[2];
  if (i2c_read_reg8(D6F_ADDR, 0x07, rbuf, 2)) { // read from [07h]
    return; }
  uint16_t rd_flow = conv8us_u16_be(rbuf);
  float flow_rate;
  // calculation for +/-50[Pa] range
  flow_rate = ((float)rd_flow - 1024.0) * 100.0 / 60000.0 - 50.0;
  Serial.print(flow_rate, 2); // print converted flow rate
  Serial.println(" [Pa]"); }

```

Verificarea debitului

Pentru încheierea pachetului de lucru **WP2** este necesară verificarea funcționării corpului central al ABS prin testarea debitului de inspirație /expirație. Dacă debitul rezultat este echivalent (cu o marjă de eroare <10%) cu debitul inspirat teoretic (508 ml), corpul ABS va fi considerat funcțional și validat experimental, constituind **Livrabilul principal al pachetului de lucru WP2**.

Cele 6 orificii de admisie a aerului inspirat/expirat au fost racordate cu multiple secțiuni de furtun de poliuretan și cuplate prin îmbinări de tip Y. În capătul acestor îmbinări au fost montate două debitmetre de gaz model D6F-70AB71D-000-0, pentru a măsura între 0-70 L/min. Debitmetrele au fost conectate în serie astfel încât vor citi alternativ valoarea debitului în funcție de caz (inspirație/expirație). Prima încercare cu acest sistem a dus la niște valori extrem de reduse ale debitului (de 5 ori mai mici decât valoarea prevăzută de 15 L/min). S-a demarat o investigație a cauzelor și prima verificare a fost efectuată asupra

etanșării corpului ABS. Investigația a fost desfășurată folosind un atomizator cu ulei. Fumul produs de atomizator a fost introdus în ABS și neetanșitățile au fost evaluate vizual. Prima observație evidentă (și presupunerea care a demarat investigația) a fost lipsa de etanșitate din jurul pistonului. S-a încercat remedierea prin fixarea unui strat de neopren între două discuri de acrilic și aplicarea unei garnituri între cilindru și plăcile de fixare din capete. Desfășurarea investigației este prezentată în Figura 5.

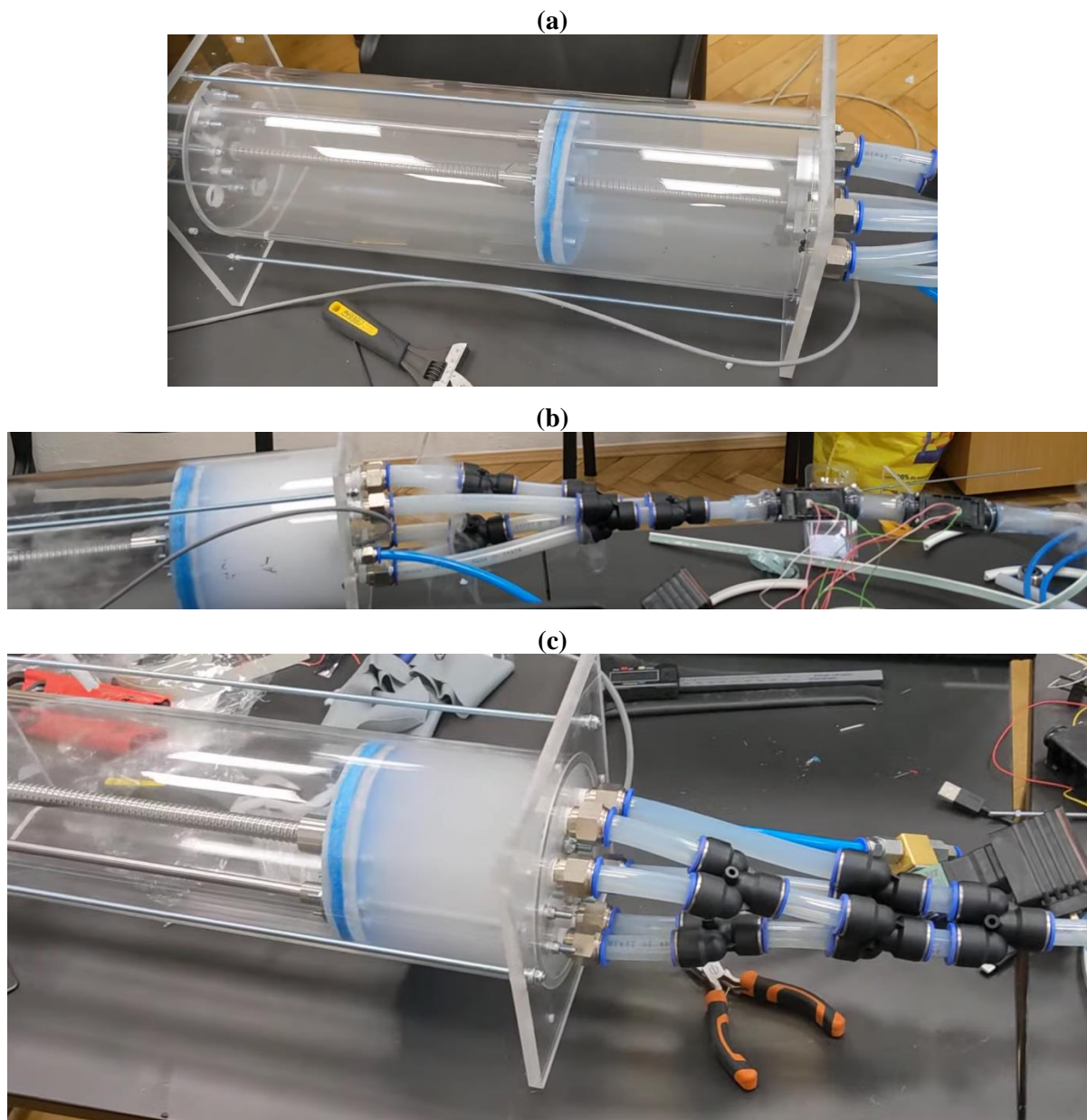


Figura 5 Verificarea etanșării pentru corpul ABS: (a) un singur strat de neopren fixat în piston – neetanșități perimetral în jurul pistonului, (b) strat dublu de neopren fixat în piston – neetanșități prin flanșa șurubului cu bile și pe la îmbinările furtunului de admisie; (c) strat dublu de neopren fixat în piston, etanșare suplimentară a flanșei și refacerea legăturilor cu segmente mai lungi de furtun – neetanșități vizibile eliminate.

După trei iterații ale procesului de etanșare, au fost într-un final eliminate toate neetanșitățile vizibile. Măsurile finale au constat în: aplicarea unei garnituri între cilindru și plăcile de capăt, fixarea unui

strat dublu de neopren între două discuri care vor constitui pistonul (au fost produse discuri noi cu un diametru redus pentru a acomoda garnitura de neopren), garnitură de etanșare pentru flanșa șurubului cu bile și utilizarea unor lungimi mai mari de furtun pentru a asigura etanșarea cuplelor Y din circuitul de admisie. În urma acestor măsuri debitul a fost evaluat pentru o cursă a pistonului de 33 mm echivalentă unui volum teoretic de 508 ml. Rezultatele sunt prezentate mai jos în Tabelul 5 și Figura 6.

Tabelul 5 Rezultatele măsurărilor de debit desfășurate în timpul validării corpului ABS

Timp [s]	Debit [L/min]	Interval de măsură [s]	Volum introdus [ml]
0,0	0,00	0,2	0
0,2	0,76		1,26
0,4	4,52		8,79
0,6	10,75		25,45
0,8	14,88		42,72
1,0	18,67		55,91
1,2	19,65		63,86
1,4	15,66		58,86
1,6	11,90		45,94
1,8	6,04		29,90
2,0	0,84	11,46	
Total			~344 ml

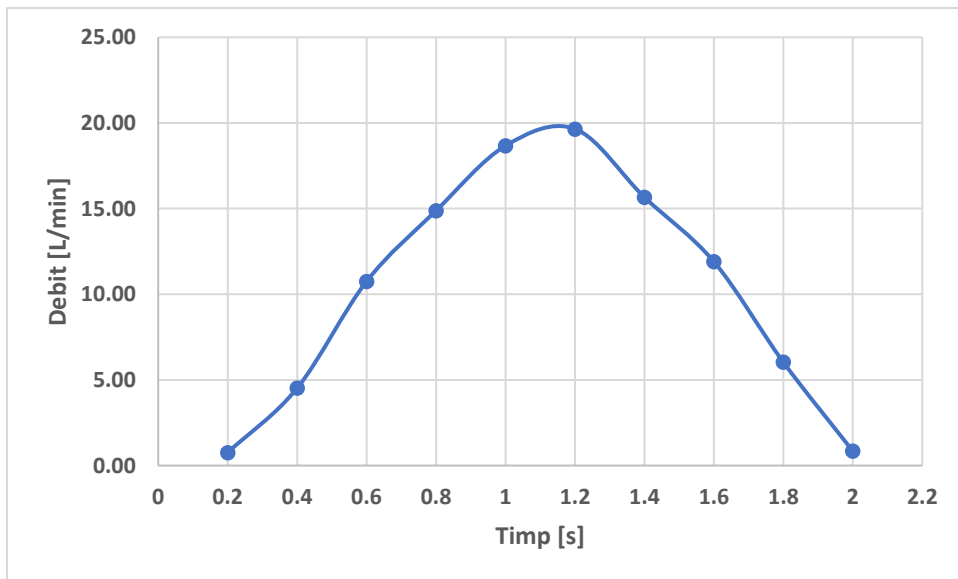


Figura 6 Reprezentarea grafică a rezultatelor măsurărilor de debit pentru o inspirație

Se poate observa că în urma măsurărilor a rezultat un debit introdus de cca. 344 ml. În literatura medicală [1] este specificat că în cadrul volumul respirat în mod normal (tidal volume) intră și un volum de aer „mort” aflat pe esofag și în cavitatea nazală, echivalent cu 150 ml. A fost estimat volumul de aer aflat pe circuitul de admisie din cadrul ABS prin calculul volumelor cunoscute și a fost obținută o valoare de cca. 135 ml (115 pe traseu, cca 20 ml în armături). Însușind valoarea introdusă în ABS cu volumul de aer mort din circuitul de admisie **rezultă un volum total de 479 ml**. Comparat cu volumul teoretic estimat de 508 ml, **eroarea rezultatelor experimentale este de 5.6%**. **În consecință, corpul ABS este considerat validat experimental pentru simularea respirației.**

II. Pachetul de lucru WP3

ABS-ul construit în cadrul proiectului PNEUMA trebuie să abordeze mai multe dintre problemele întâlnite până în prezent în simularea procesului respirator: (a) în primul rând, trebuie să varieze frecvența și amplitudinea respirației, pentru a funcționa ca un cadru comun pentru cercetări în nișa respirației umane; și (b) în al doilea rând ABS va trebui să ajusteze în timp real a frecvenței și amplitudinea respirației în funcție de parametrii de control (concentrațiile de CO₂ în interiorul ABS și în aerul expirat), parametrii care, până acum, erau fixați de utilizator.

În cadrul ABS, parametrii de control sunt debitele de aer și de CO₂, diferența de presiune dintre rezervorul cu CO₂ și concentrația de CO₂ în aerul inspirat/expirat; parametrii acționați sunt viteza și numărul de pași ai motorului NEMA23 și gradul și rata de deschidere a electro-vanei cu solenoid. Drept urmare a fost propusă schema de control logic prezentată în Figura 7.

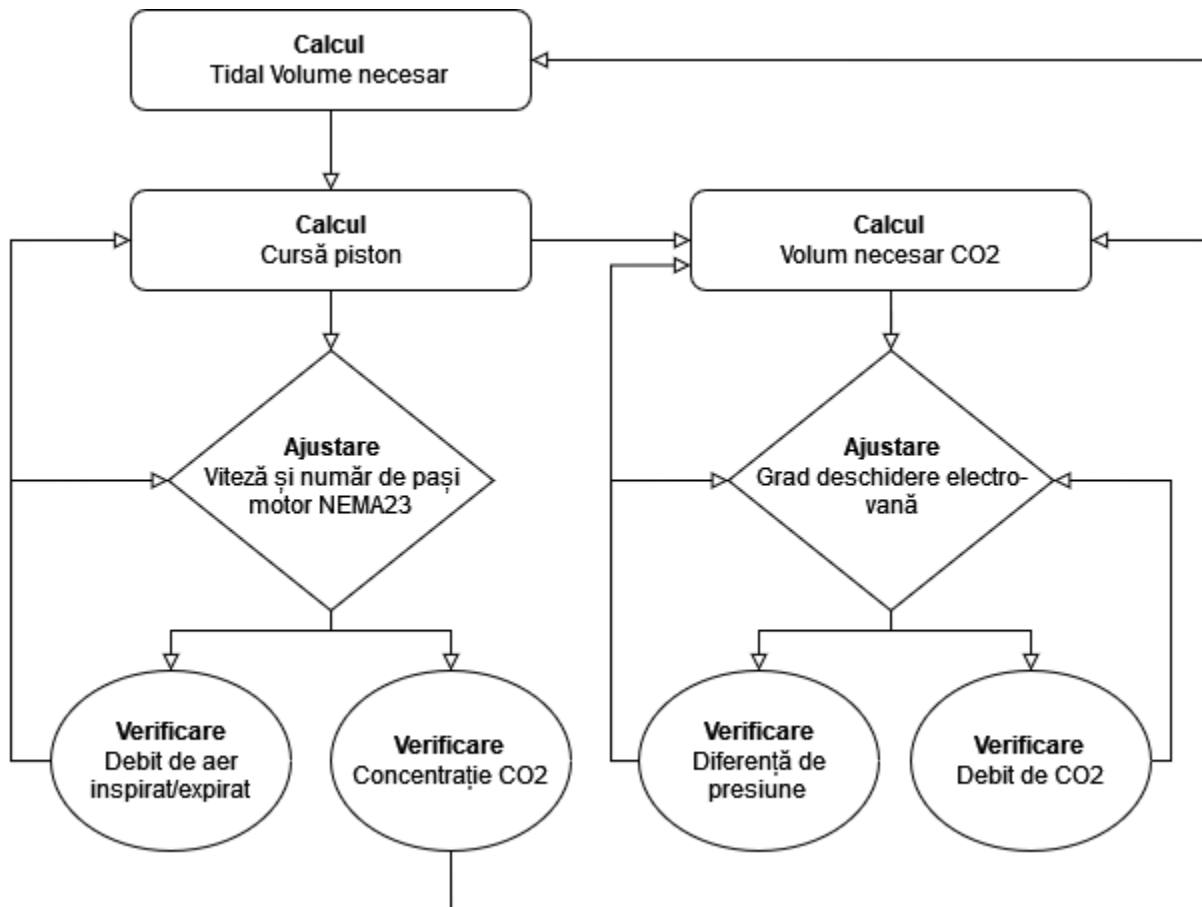


Figura 7 Schema de control pentru sistemul de automatizare al ABS

În Figura 7, logica de control începe cu un Tidal Volume impus de utilizator. Bazat pe acest parametru inițial, este calculată cursa pistonului necesară pentru a vehicula volumul de aer specificat. În paralel se determină volumul necesar de CO₂ care trebuie introdus în timpul inspirației pentru obținerea concentrației de 4% la expirație (calcul care presupune concentrația atmosferică normală de CO₂, 0.04%). În funcție de parametri calculați se ajustează parametrii acționați: viteza și numărul de pași pentru motor, respectiv gradul de deschidere pentru electro-vană. ABS-ul pornește la parametrii setați. Se verifică atingerea valorilor dorite prin verificarea debitului de aer inspirat și expirat, a concentrației de CO₂ în aerul

expirat, a diferenței de presiune dintre rezervorul de CO₂ și corpul ABS și nu în ultimul rând debitul de CO₂ introdus în ABS.

Dacă debitul de aer nu este suficient, cursa pistonului este recalculată și viteza și numărul de pași ai motorului sunt ajustați. Această ajustare are loc și în timpul inspirației și în timpul expirației. Ajustarea Tidal Volume se poate face prin modificarea fie a vitezei motorului fie prin modificarea numărului de pași.

Când concentrația de CO₂ nu este adecvată există două cazuri: dacă este mai mare de 4%, electro-vana trebuie menținută închisă și Tidal Volume recalculat pentru a dilua concentrația mare de CO₂ din ABS (echivalentul unei respirații intense); dacă concentrația este prea mică, va crește gradul de deschidere al electro-vanei și, după caz va crește și Tidal Volume pentru a ajunge cât mai repede la concentrația dorită. În timpul inspirației, dacă concentrația de CO₂ este mai mare decât concentrația normală atmosferică (0,04%), se va recalcula volumul de CO₂ necesar a fi introdus pentru a atinge valoarea de 4% la următoare expirație și se va ajusta gradul de deschidere al electro-vanei în consecință.

Diferența de presiune este folosită pentru a ajusta gradul de deschidere al electro-vanei. Datorită naturii permanente a fenomenului de respirație este posibil ca volumul vehiculat de ABS să fie modificat în timpul inspirației fără ca senzorul de CO₂ din aerul inspirat să comande o modificare. În acest moment în interiorul pistonului se va produce o depresiune care va necesita recalcularea volumului de CO₂ necesar și ajustarea gradului de deschidere al electro-vanei în consecință.

Debitul de CO₂ introdus va fi folosit pentru a ajusta gradul de deschidere al electro-vanei în situațiile în care senzorul diferențial de presiune nu impune vreo modificare (diferențe de presiune în afara toleranțelor acceptate).

Logica de control prezentată mai sus reprezintă principalul livrabil pentru sarcina T1 din cadrul WP3.

Implementarea logicii de control automate se va face etapizat, mai întâi pentru corpul ABS care influențează debitul de aer inspirat și expirat, iar apoi pentru partea de control al CO₂. Odată realizate, aceste două componente ale logicii de control vor fi integrate într-un sistem unitar pentru a controla întregul ABS.

Prima etapă realizată în cadrul prezentului pachet de lucru este integrarea tuturor senzorilor (presiune, debit, și CO₂) într-un cadru comun. Însă protocoalele de comunicație sunt diferite între senzorii de CO₂ și cei de debit și presiune. Ca atare, senzorul de CO₂ va fi citit independent cu programul de achiziție prezentat în capitolul precedent, iar senzorii de debit și de presiune vor fi citite simultan cu ajutorul unui multiplexor. Programul de achiziție pentru multiplexor este prezentat mai jos:

Program Multiplexor Debitmetre și Senzor Presiune Diferențială

```
// START DATA ACQUISITION
void loop()
{
  myMux.setPort(0);
  byte nDevices = 0;
  for (byte address = 1; address < 127; address++) {
    Wire.beginTransmission(address);
    byte error = Wire.endTransmission();
    if (error == 0) {
      nDevices++;
    }
    else if (error == 4) {
      Serial.print("Unknown error at address 0x");
      if (address < 0x10)
```



```

    Serial.print("0");
    Serial.println(address, HEX);
  } }
if (nDevices == 0)
  Serial.println("No I2C devices found");

// READ PRESSURE SENSOR
// 2. Trigger getting data (00h, D0h, 40h, 18h, 06h)
uint8_t send0[] = {0x40, 0x18, 0x06};
i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send0, 3);
delay(50); // wait 50ms
// 3. Read data (00h, D0h, 51h, 2Ch) (07h)
uint8_t send1[] = {0x51, 0x2C};
i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send1, 2);
uint8_t rbuf[2];
if (i2c_read_reg8(D6F_ADDR, 0x07, rbuf, 2)) { // read from [07h]
  return;
}
uint16_t rd_flow = conv8us_u16_be(rbuf);
float pressure;
// calculation for +/-50[Pa] range
pressure = ((float)rd_flow - 1024.0) * 100.0 / 60000.0 - 50.0;
Serial.println();
Serial.print(pressure, 2); // print converted flow rate
Serial.print(" ");

// READ FLOW SENSORS
for (byte portID=1; portID<4; portID++) {
myMux.setPort(portID); //Connect master to port labeled '1' on the mux
  byte nDevices = 0;
  for (byte address = 1; address < 127; address++) {
    Wire.beginTransmission(address);
    byte error = Wire.endTransmission();
    if (error == 0) {
      nDevices++; }
    else if (error == 4) {
      Serial.print("Unknown error at address 0x");
      if (address < 0x10)
        Serial.print("0");
      Serial.println(address, HEX); } }
if (nDevices == 0)
  Serial.println("No I2C devices found");
// 2. Trigger getting data (00h, D0h, 40h, 18h, 06h)
uint8_t send0[] = {0x40, 0x18, 0x06};
i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send0, 3);
delay(50); // wait 50ms
// 3. Read data (00h, D0h, 51h, 2Ch) (07h)
uint8_t send1[] = {0x51, 0x2C};
i2c_write_reg16(D6F_ADDR, 0x00D0, send1, 2);
uint8_t rbuf[2];

```

```

if (i2c_read_reg8(D6F_ADDR, 0x07, rbuf, 2)) {
    return; }
uint16_t rd_flow = conv8us_u16_be(rbuf);
float flow_rate;
if (portID==1)
    // 0-10[L/min] range
    flow_rate = ((float)rd_flow - 1024.0) * 10.0 / 60000.0;
else
    // 0-70[L/min] range
    flow_rate = ((float)rd_flow - 1024.0) * 70.0 / 60000.0;
Serial.print(flow_rate, 2); // print converted flow rate
Serial.print(" "); } }

```

În stadiul actual, programul de achiziție prezentat mai sus afișează valorile debitelor și a diferenței de presiune la intervale de 0.2s. Aceste valori vor fi ulterior preluate în variabile și integrate în sistemul integrat la finalul etapei de lucru curente.

Electro-vana cu solenoid are două poziții de funcționare: închisă sau deschisă, iar datorită solenoidului trecerea dintre poziții se face practic instantaneu. Gradul de deschidere este controlat prin închiderea și deschiderea rapidă a electro-vanei, rezultând ca în timp această să fie parcursă de o cantitate de fluid echivalentă cu cea care ar trece printr-un robinet clasic parțial deschis. Controlul electro-vanei se face prin intermediul alimentării cu curent electric care poate fi ajustată printr-un întrerupător pe placa de achiziție de date.

Motorul pas cu pas este controlat prin intermediul unui driver logic. Acest driver este acționat de placa de achiziție Arduino Mega (având nevoie de 5.5V pentru a funcționa). Driverul transmite motorului informația legată de numărul de pași pe care motorul trebuie să-i parcurgă (200 de pași per revoluție și 1.8° rotație per pas), viteza maximă pe care poate să o atingă și accelerația motorului (cu câți pași/secundă este crescută viteza într-un interval de timp). Programul de control al motorului pas cu pas este prezentat mai jos:

Control Motor NEMA23

```

const int MOTOR_STEP_PIN = 16;
const int MOTOR_DIRECTION_PIN = 14;
FlexyStepper stepper;
void setup() {
    // setup the LED pin and enable print statements
    //pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    // connect and configure the stepper motor to its IO pins
    stepper.connectToPins(MOTOR_STEP_PIN, MOTOR_DIRECTION_PIN); }
void loop() {
    // set the speed and acceleration rates for the stepper motor
    stepper.setSpeedInStepsPerSecond(20000);
    stepper.setAccelerationInStepsPerSecondPerSecond(1200);
}

```

```
// Rotate the motor in the forward direction, then wait 800 milliseconds.
```

```
// This function call will not return until the motion is complete.
```

```
stepper.moveRelativeInSteps(2640);
```

```
delay(800);
```

```
// rotate backward, then wait 1 millisecond
```

```
stepper.setAccelerationInStepsPerSecondPerSecond(3300);
```

```
stepper.moveRelativeInSteps(-2640);
```

```
delay(100); }
```

Programele de control prezentate până în acest punct sunt rezultatul investigațiilor și încercărilor desfășurate în cadrul sarcinilor **T2**, **T3** și **T4** din **WP3**. Prezentul pachet de lucru va continua cu integrarea programelor dezvoltate într-un cadru comun care să permită controlul simultan al tuturor componentelor ABS.

Programele de control pentru rezervorul de CO₂ și interacțiunea acestuia cu corpul ABS, sunt încă în lucru. Regulatorul de presiune instalat în rezervorul de CO₂ este conceput să elibereze CO₂ la aplicarea unei depresiuni echivalente cu cea a plămânilor față de racordul de alimentare cu CO₂ care are o presiune nominală de 10 bar. Regulatorul este instalat într-un rezervor deoarece nu poate fi acționat fără prezența unui plenum în care să fie resimțită diferența de presiune. Acest plenum va trebui ținut la o suprapresiune față de corpul ABS. Principiul fiind ca în momentul deschiderii electro-vanei să se stabilească un debit de CO₂ din rezervor către ABS în timpul inspirației. Acest debit va fi ajustat prin deschiderea și închiderea electro-vanei pentru a permite trecerea cantității de CO₂ strict necesare pentru atingerea concentrației de 4% în timpul expirației. Valoarea exactă a supra-presiunii nu a fost încă stabilită datorită procesului iterativ de reglare manuală a regulatorului de presiune și de verificare a debitelor rezultate. Din acest motiv, sarcinile T2 și T4 au un grad de realizare mai mic decât cel prevăzut inițial.

Este prevăzut ca până la sfârșitul anului în curs, sarcina T2 să fie adusă la gradul de realizare propus, lucru care, în consecință ar cauza și sarcina T4 să atingă gradul de realizare propus la scurt timp după aceea. Sarcina T5 urmează a fi demarată de îndată ce controlul debitului de CO₂ va fi stabilit. Sarcina T5 va demara cu teste ale logicii de control prezentate la începutul acestui capitol și va culmina în ultima etapă a proiectului cu măsurători realizate cu ABS, validate experimental.

Bibliografie

- [1] Guyton A C and Hall J E 2011 *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology* vol 12 (SAUNDERS Elsevier)

Sumar al progresului

Rezultate cuantificabile

1. **Articol științific de conferință - M.-R. Georgescu**, I. Năstase, Design Proposal for Artificial Breathing Simulators for Human Thermal Manikins, The 11th International Conference on Energy and Environment, CIEM 2023, Bucharest, Romania. <http://ciem.upb.ro/2023/>.
2. **Articol științific de conferință - M.-R. Georgescu**, A. Cernei, I. Năstase, P. Dancă, D.-I. Guță, I. Ursu, Development and Use of a New Architecture of Thermal Manikin for Assessing Local Thermal Comfort, The 11th International Conference on Energy and Environment, CIEM 2023, Bucharest, Romania. <http://ciem.upb.ro/2023/>.
3. **Articol științific de jurnal – F. Bode, R. Calotă, C. Berville, C. Croitoru, M.-R. Georgescu**, Enhancing energy efficiency of transpired solar collectors using phase change materials and nanomaterials - A review, *Energies*, Review Papers in Energy and Environment, 2023. Articolul este în curs de publicare.

Rezultatele propuse pentru a doua etapă a proiectului PNEUMA au fost dezvoltarea standului experimental ABS, rezultatele preliminare care verifică funcționarea ABS (prezentate mai sus în capitolele I și II) un articol științific de conferință și un articol științific de jurnal. **Toate aceste obiective au fost atinse cu succes în intervalul de timp propus.**

Diseminarea rezultatelor

În prima etapă a proiectului PNEUMA, rezultatele au fost diseminate în cadrul unui congres științific internațional (*CIEM 2023*), în cadrul unui jurnal științific (*Energies*) și în cadrul unei conferințe naționale (*NetZeroCities – Universitatea din Suceava*). Pentru etapa următoare a proiectului, pe parcursul anului 2024 s-a propus diseminarea rezultatelor sub forma unui articol științific prezentat la o conferință internațională (*ROOMVENT 2024*) și un articol științific publicat într-un jurnal internațional indexat ISI.

Întocmit

04 Decembrie 2023

Director de proiect

Dr. Ing. Matei-Răzvan GEORGESCU

