

Nr. înregistrare Sanimed: 482 / 6 decembrie 2023

RAPORT ȘTIINȚIFIC ȘI TEHNIC
Proiect PN-III-P2-2.1- PTE-2021-0429. Contract 85PTE/2022.
Etapă 2023

**Instalație pentru controlul automatizat al reproductibilității șarjelor
de gel colagenic destinat aplicațiilor biomedicale și cosmeceutice**

Acronim: REMEDIAL

Avizat la Coordonator,
S.C. Sanimed International Impex S.R.L.
Administrator,
Laura-Nicoleta Toma – Hideg

Director de proiect,
Conf. dr. ing. **Stelian Sergiu Maier**



**Acest document este proprietatea organizațiilor participante la proiect și nu poate fi utilizat,
reprodus, distribuit sau diseminat către terți, fără acordul prealabil al autorilor.**

PLANUL DE REALIZARE AL PROIECTULUI - Etapa 2023

Anul	Etapa	Obiectivele etapei	Activitățile și subactivitățile derulate	Rezultate livrate în cadrul etapei
2023	Unică	Proiectarea de execuție, realizarea și testarea modelului experimental al sistemului de automatizare	A.2.1. Realizarea fizică a instalației de automatizare. Proiectarea și realizarea componentelor cibernetice și a aplicațiilor software.	1. Instalația de automatizare. 2. Algoritmii de urmărire și control a parametrilor tehnologici. 3. Aplicații software pentru PLC-uri și computerul dispecer. 4. Trei lucrări trimise spre publicare sau publicate în periodice indexate în baze de date.
			A.2.1.1 - Proiectarea algoritmilor de control și reglare.	
			A.2.1.2 - Elaborarea și testarea tehnicilor de prelucrare, sistematizare și stocare a datelor de urmărire tehnologică.	
			A.2.1.3 - Realizarea, montarea și testarea componentelor sistemului de automatizare al instalației pilot.	
			A.2.1.4 - Proiectarea sistemului informatic și al rețelelor.	
			A.2.1.5 - Realizarea sistemului informatic și al rețelelor.	
			A.2.1.6 - Proiectarea și elaborarea aplicațiilor software dedicate (PLC, HMI, comunicații, interfațare, procesare).	
			A.2.2. Diseminarea rezultatelor	

I. Descrierea științifică și tehnică a rezultatelor proiectului, obținute în etapa 2023

Preambul

Proiectul REMEDIAL vizează proiectarea, realizarea fizică și testarea unei instalații de automatizare cu structura și funcționalitatea adecvate conducerii automate a proceselor de obținere a formelor colagenice, procese derulate în instalația pilot care funcționează în secțiile de producție ale S.C. Sanimed International Impex S.R.L. Pentru a i se asigura adecvarea la necesitățile de operare specifice obținerii formelor colagenice (mai cu seamă la înalta variabilitate a caracteristicilor materiei prime, de origine naturală), structura și principiile de funcționare ale instalației de automatizare au fost concepute pornind de la analiza particularităților proceselor fizico-chimice implicate în fluxul tehnologic implementat în instalația pilot. Drept consecință, instalația de automatizare realizată este una particulară, dedicată. Proiectarea sa a implicat *armonizarea principiilor fizico-chimice ale operațiilor de procesare a țesuturilor conjunctive, cu principiile cibernetice de conducere automatizată a proceselor lente, pentru care răspunsul în timp real la reglaje aplicate nu poate fi obținut / măsurat, dar poate fi estimat / prognozat în urma aplicării unor algoritmi de identificare dinamică a operațiilor asociate.*

Lentoarea proceselor își are originea fie (i) în *cinetica intrinsec lentă a transformărilor induse prin varierea parametrilor de control / reglare* (cauze obiective legate de procesul fizico-chimic supus reglării), fie (ii) în *întârzierea pe care o induce efectuarea determinărilor analitice cantitative necesare pentru măsurarea răspunsului procesului la varierea parametrilor de control* (cauze obiective legate de durata lungă a măsurării răspunsului sistemului controlat). În ambele

cazuri rezultă decorelări / desincronizări semnificative între (i) sesizarea abaterii de la valorile prescrise, (ii) lansarea comenzilor de control în vederea efectuării corecției și (iii) sesizarea răspunsului sistemului la aplicarea controlului. Într-un astfel de context, reglarea procesului devine imposibilă doar recurgând la sistemele clasice, de tipul reglatoarelor PID (cu *feed-back* Proportional – Integrativ – Derivativ), ori chiar a celor de tip anticipativ (*feed forward*).

Proceselor fizico-chimice de obținere a suspensiilor coloidale colagenice prin operații de solubilizare, separare și purificare le sunt caracteristice ambele mecanisme de întârziere a răspunsului la modificări induse ale parametrilor de control tehnologic. Cinetica lor intrinsecă este una lentă (fiind rezultanta mai multor procese unitare intercondiționate: difuzie, difuzie cu reacție, reacție chimică, distribuție între faze, contradifuzie), dublată de echilibre stabilite la interfețe (gonflare, peptizare) și de procese chemo-mecanice (penetrare, destructurare, fragmentare) ori fizico-chimice (hidratare suplimentară, inducere / compensare a sarcinilor, asociere / repulsie electrostatică etc.). În plus, caracterizarea stării materiei în curs de prelucrare și măsurarea rezultatelor transformărilor induse tehnologic nu se poate realiza în timp real, ci doar prin tehnici analitice, mari consumatoare de timp (de ordinul orelor) chiar dacă acestea sunt de tip instrumental.

Drept urmare, în cadrul etapei 2023 a proiectului REMEDIAL s-a conceput și a fost implementată o tehnică particulară de control predictiv, din clasa *predictor-corector de stare*, care asigură un *control adaptiv* în condiții de incertitudine și variabilitate tehnologică [1]. Respectiva tehnică urmează a fi evaluată și ajustată în cursul etapei 2024 din punctul de vedere al performanței și al adecvării sale la structura și funcționalitatea instalației pilot din dotarea companiei Sanimed.

A.2.1. Realizarea fizică a instalației de automatizare. Proiectarea și realizarea componentelor cibernetice și a aplicațiilor software.

În sferele farmaceuticii și dispozitivelor medicale, automatizarea proceselor are un specific aparte, legat de necesitatea asigurării documentării detaliate a variației parametrilor tehnologici și de control tehnologic, necesitate impusă prin criteriile asigurării calității produselor. În plus, trasabilitatea produselor adaugă exigențe în ceea ce privește bilanțurile de materiale, energie, auxiliari și utilități pe fluxurile tehnologice, bilanțuri care trebuie nu doar contabilizate ci și documentate. Obligatorietatea documentării parametrilor tehnologici și a bilanțurilor pe fluxuri aduce avantajul disponibilității unor serii de timp (valori numerice înregistrate la momente predefinite sau cunoscute) cu relevanță tehnologică. Respectivul seriei de timp constituie un tezaur de date, exploatabil nu doar pentru documentarea procesării, ci și pentru realizarea de predicții și prognoze de interes tehnologic. În acest scop, într-o primă etapă, seriile de timp (în speță, seriile de date tehnologice) sunt supuse analizei și modelării statistico-matematice. Modelele rezultate sunt apoi exploatate pentru *anticiparea evoluției / trendului parametrilor mășurați* (altfel spus pentru *realizarea de predicții pentru un orizont de timp scurt*) și pentru *estimarea valorilor cel mai probabil necesare ale parametrilor de control* (respectiv pentru *elaborarea de prognoze*). Tipul modelelor matematice ajustate seriilor de timp dictează acuratețea predicțiilor / prognozelor, dar și gradul lor de semnificație tehnologică, implicit utilitatea lor.

Proiectul REMEDIAL contribuie la îmbunătățirea performanțelor de operare ale instalației pilot destinată obținerii suspensiilor coloidale colagenice, prin dezvoltarea unei structuri anexe, sub forma unei instalații de automatizare dedicate. Așadar, proiectul dezvoltă un *complement cibernetic al instalației pilot*. Acesta aplică modele matematice ale operărilor tehnologice trecute (generate pornind de la seriile de timp ale bilanțurilor, comenzilor de control automat și efectelor măsurate ale variației mărimilor de control) pentru *elaborarea predictivă și prognostică a corecțiilor necesare a fi aplicate legilor de control automat*, astfel încât să se atingă valori impuse (constante sau cu variații preconizate) ale caracteristicilor materiei în curs de prelucrare și/sau ale produsului finit (prin prisma funcționării instalației pilot automatizate, în speță ale suspensiei coloidale colagenice produse). În acest mod, complementul cibernetic al instalației pilot asigură creșterea performanțelor tehnologice ale acesteia, inclusiv reproductibilitatea operărilor succesive.

A.2.1.1 - Proiectarea algoritmilor de control și reglare

Controlul și reglarea predictivă și prognostică se deosebește de varianta anticipativă (de tip *feed forward*) a controlului automat prin faptul că pune la dispoziția regulatorului numeric opțiuni tactice, alături de soluții de moment. Fiecărei opțiuni îi este asociată o pondere a verosimilității sale, în baza căreia se poate stabili oportunitatea măsurilor de reglare și control sugerate. Opțiunile tactice de control și reglare oferă legi statistico-matematice cu valabilitate prelungită pentru pașii ulteriori ai operării curente, dar și pentru operările viitoare. În acest mod, sistemul automat „învață” să ia decizii optime, pentru moment (operarea curentă) și pentru viitor (operările ulterioare), printr-un proces ghidat (denumit *supervised machine learning*), de acumulare a informațiilor și de rafinare a coeficienților modelelor matematice, pornind de la seriile de timp cu relevanță tehnologică, pe care le tratează drept seturi dinamice de date de antrenament ai algoritmilor de modelare. Demersurile matematice de „învățare automată supervizată” se soldează cu extinderea și rafinarea structurii modelelor statistico-matematice utilizate pentru controlul și reglarea automată a proceselor și instalațiilor. Avantajul major al respectivelor demersuri constă în faptul că sunt aplicabile și pentru automatizarea proceselor lente, altfel imposibil de controlat eficient.

Pentru implementarea controlului predictiv și prognostic, structura instalației de automatizare trebuie să includă câteva elemente particulare. Între acestea se numără reglatoarele numerice și sistemele informatice de analiză și modelare dinamică. Figura 1 prezintă structura generică proiectată a instalației de automatizare concepută drept complement cibernetic al instalației pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice, din dotarea companiei Sanimed.

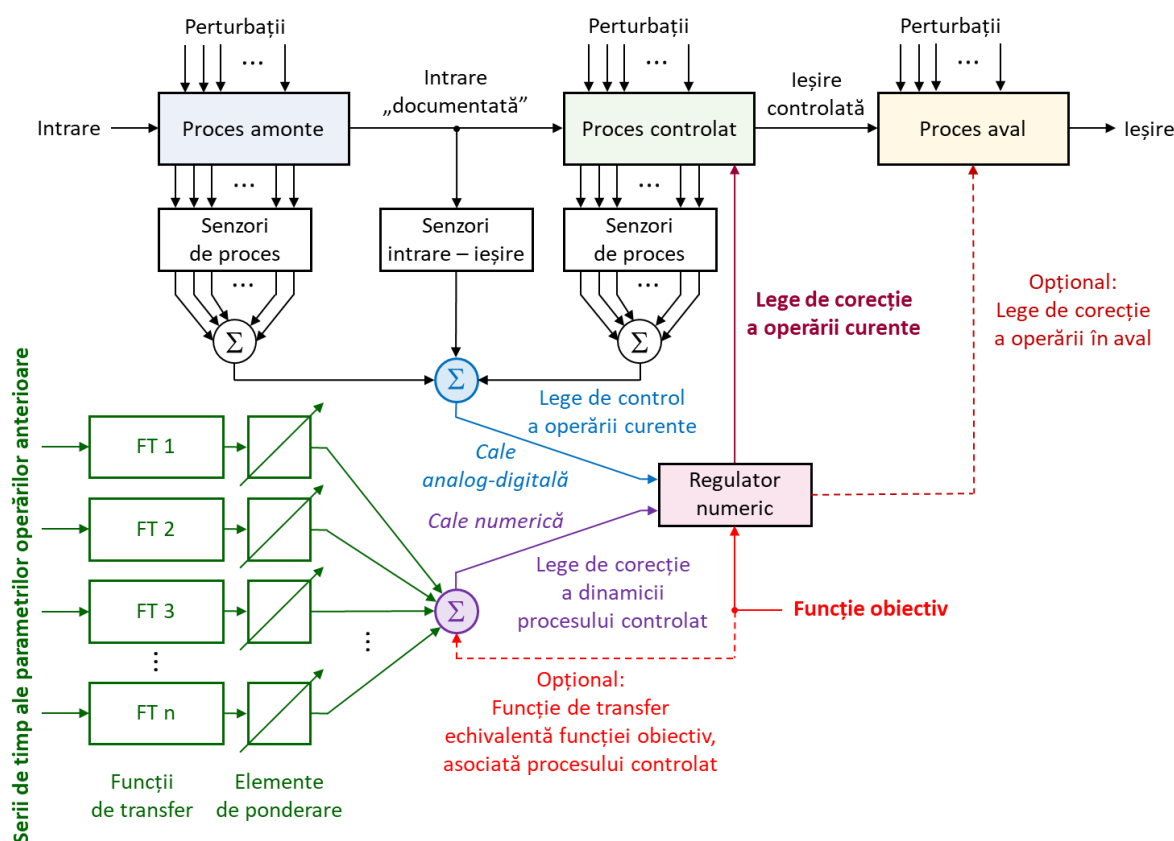


Figura 1. Structura generică a complementului cibernetic de tip predictor – corector de stare asociat instalației de obținere a suspensiilor coloidale colagenice.

Blocurile funcționale figurate cu verde reprezintă componenta cu rol predictiv și prognostic în sistemul de automatizare și control. Majuscula sigma reprezintă componentele locale ale sistemului informatic de analiză și modelare dinamică a datelor de urmărire tehnologică.

Orice flux tehnologic este definit și caracterizat prin două categorii de mărimi: de factură materială (bilanțuri ale transformărilor) și de natură informațională (date de măsurare și date de urmărire tehnologică). Conform teoriei sistemelor, deoarece operațiile tehnologice de procesare exprimă ansambluri de transformări ale materiei în curs de prelucrare, ele pot fi privite ca filtre caracterizate prin funcții de transfer. Așadar, fluxul tehnologic poate fi considerat ca fiind o magistrală pe care se vehiculează informații tehnologice. Respectiv informații își au originea în proprietățile și caracteristicile materiei prime și în curs de prelucrare, sau sunt elaborate ca urmare a derulării operațiilor tehnologice. Majoritatea informațiilor tehnologice sunt de natura mărimilor fizico-mecanice și fizico-chimice măsurabile, dar nu toate își găsesc expresia în mărimi “citite” pe magistrală. Multe dintre ele, deși circulă efectiv de la o operație la alta și deși sunt “utilizate” în cursul derulării operațiilor tehnologice, nu fac obiectul unei măsurări sau evidențieri calitative. O serie de informații tehnologice sunt lipsite de expresie cantitativă, deși au o semnificație netă pe magistrală. Pentru operațiile tehnologice, aceste din urmă mărimi au semnificația aparte de “stări” ale materiei în curs de transformare pe fluxul tehnologic. Respectiv “stări” se pot identifica sau nu cu stările definite în teoria sistemelor.

Aționând drept filtre, operațiile tehnologice transformă cantitativ și/sau calitativ informațiile tehnologice care le sunt prezentate la intrări. Astfel, o operație oglindește informația în stări “interne”, unele invizibile prin frontiera subsistemului, transferând-o apoi, transformată, către ieșire. Funcția de transfer își are originea în procesele elementare pe care le implică operația tehnologică [2], procese care uneori nu pot fi cunoscute sau nu pot fi modelate (aduse la o exprimare matematică) în mod adecvat. De aceea, în majoritatea situațiilor concrete, funcția de transfer nu poate fi scrisă prin analiza structurii subsistemului tehnologic, impunându-se estimarea sa prin tehnici speciale, de *identificare*, ce se bazează pe interpretarea și modelarea informațiilor de intrare / ieșire în / din subsistemul asociat fiecărei operații tehnologice (Figura 2) [3].

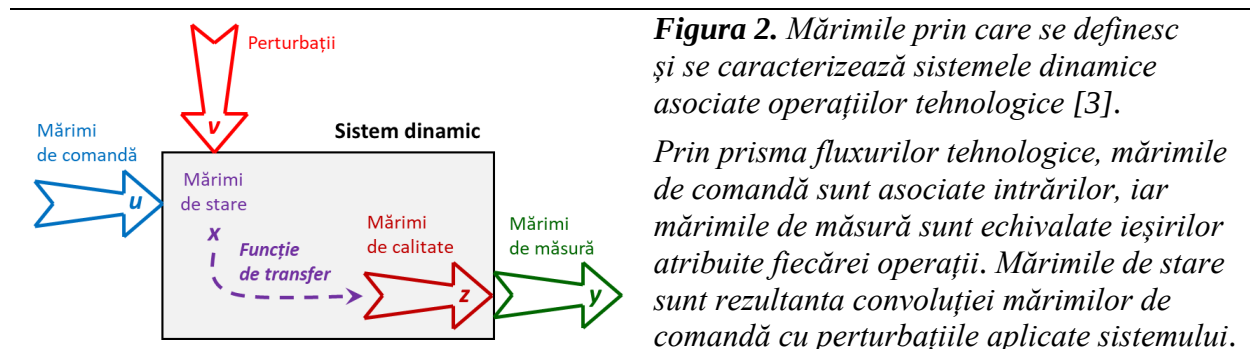


Figura 2. Mărimile prin care se definesc și se caracterizează sistemele dinamice asociate operațiilor tehnologice [3].

Prin prisma fluxurilor tehnologice, mărimile de comandă sunt asociate intrărilor, iar mărimile de măsură sunt echivalate ieșirilor atribuite fiecărei operații. Mărimile de stare sunt rezultanta convoluției mărimilor de comandă cu perturbațiile aplicate sistemului.

În cazul particular al operațiilor tehnologice care implică derularea în paralel a mai multor procese de difuzie cu reacție, identificarea proceselor globale (în sensul teoriei sistemelor) poate fi realizată doar recurgând la ecuații neliniare stocastice [4], a căror structură și ai căror coeficienți se stabilesc prin algoritmi statistico-matematici, inclusiv prin cei utilizați în tehnica de modelare *wavelets* [5]. În cadrul proiectului REMEDIAL, modelele stocastice obținute în urma demersurilor de identificare a proceselor convolute sunt utilizate pentru generarea unui pachet de funcții de transfer translatate în spațiul stărilor. Utilizând apoi formalismul matematic al controlului predictiv [6] și al analizei sistemelor cu decalaje în timp, sau cu timpi morți (*time-delay*) [7, 8], respectivul pachet va furniza legi de control cu scop corectiv, aplicabile, fie individual fie convolut, unei operații tehnologice cheie (esențială pentru dobândirea caracteristicilor impuse produsului vizat în sens tehnologic), operație condusă prin intermediul unui *regulator numeric multiparametric* (implementat fizic utilizând controllere logice programabile (PLC-uri), administrate de un computer sau de un controller dedicat, dotat cu interfețe de interacțiune cu utilizatorul).

Demersul de identificare a proceselor globale derulate în diversele operații tehnologice ale fluxului de obținere a suspensiilor coloidale colagenice pornește de la seriile de timp ale mărimilor de control tehnologic, înregistrate ca date de urmărire tehnologică. Respectiv seriile de timp au

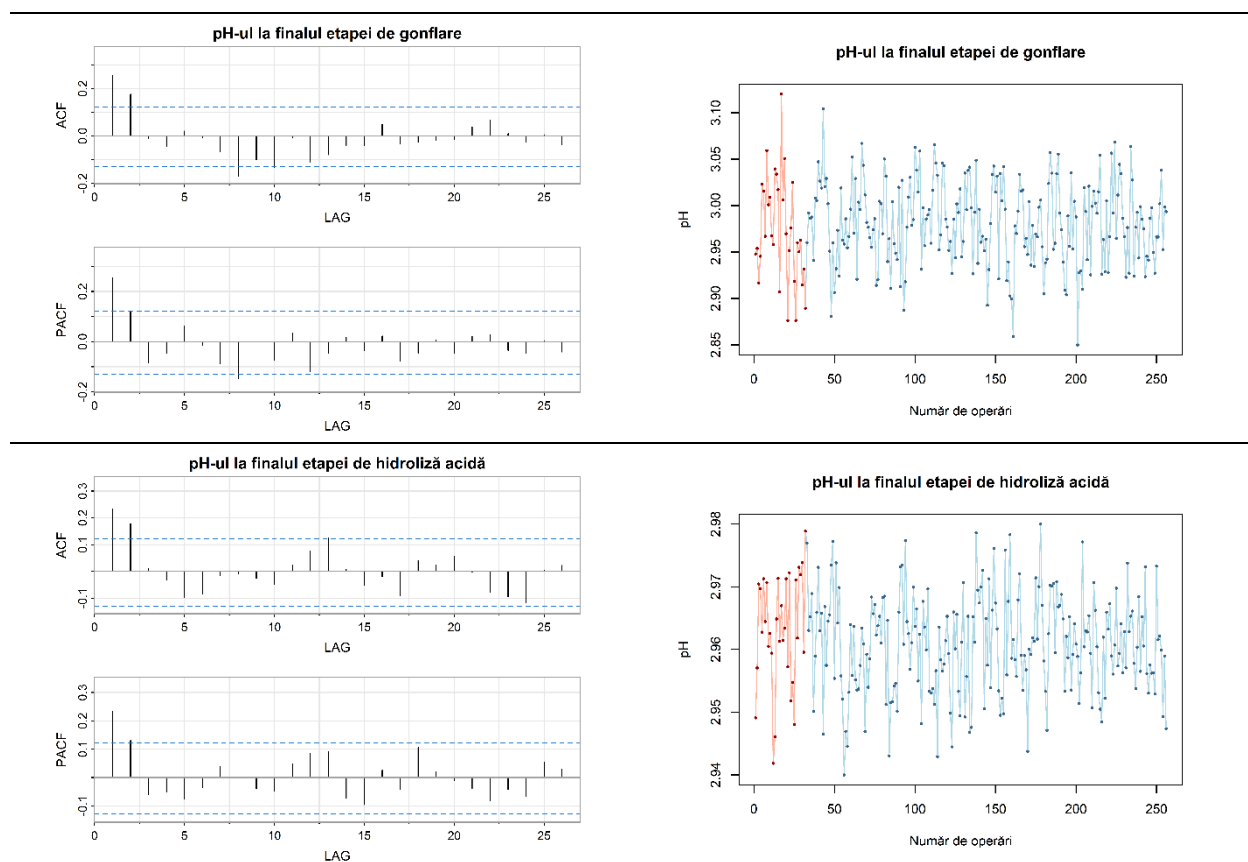
fost procesate numeric conform unor algoritmi dedicați [10], făcând apel la limbajul de programare *R* version 4.3.2 [11] și la pachetele *sysid* v1.0.4, *timsac* v1.3.8.4, *signal* v1.8.0, *kalmanfilter* 2.0.2, *astsa* v2.0 (toate disponibile freeware în repository-ul [12], sau prin GitHub).

În mod concret, pentru identificarea procesului global de obținere a suspensiei coloidale de collagen, proces derulat în instalația încă neautomatizată din dotarea companiei Sanimed, s-au selectat drept variabile tehnologice:

- valoarea măsurată a pH-ului la finalul operației de gonflare a materiei prime în mediu acid;
- valoarea măsurată a pH-ului la finalul operației de peptizare / hidroliză în mediu acid;
- valoarea determinată analitic a conținutului de substanță uscată a materiei în curs de prelucrare la finalul operației de peptizare / hidroliză în mediu acid;
- valoarea determinată analitic a conținutului de substanță uscată a materiei în curs de prelucrare la finalul operației de hidroliză enzimatică;
- valoarea determinată analitic a conținutului de substanță uscată a materiei în curs de prelucrare la finalul operației de filtrare primară.

Toate cele cinci variabile selectate sunt critice pentru derularea la parametrii calitativi impuși a procesului tehnologic de obținere a suspensiei coloidale collagenice.

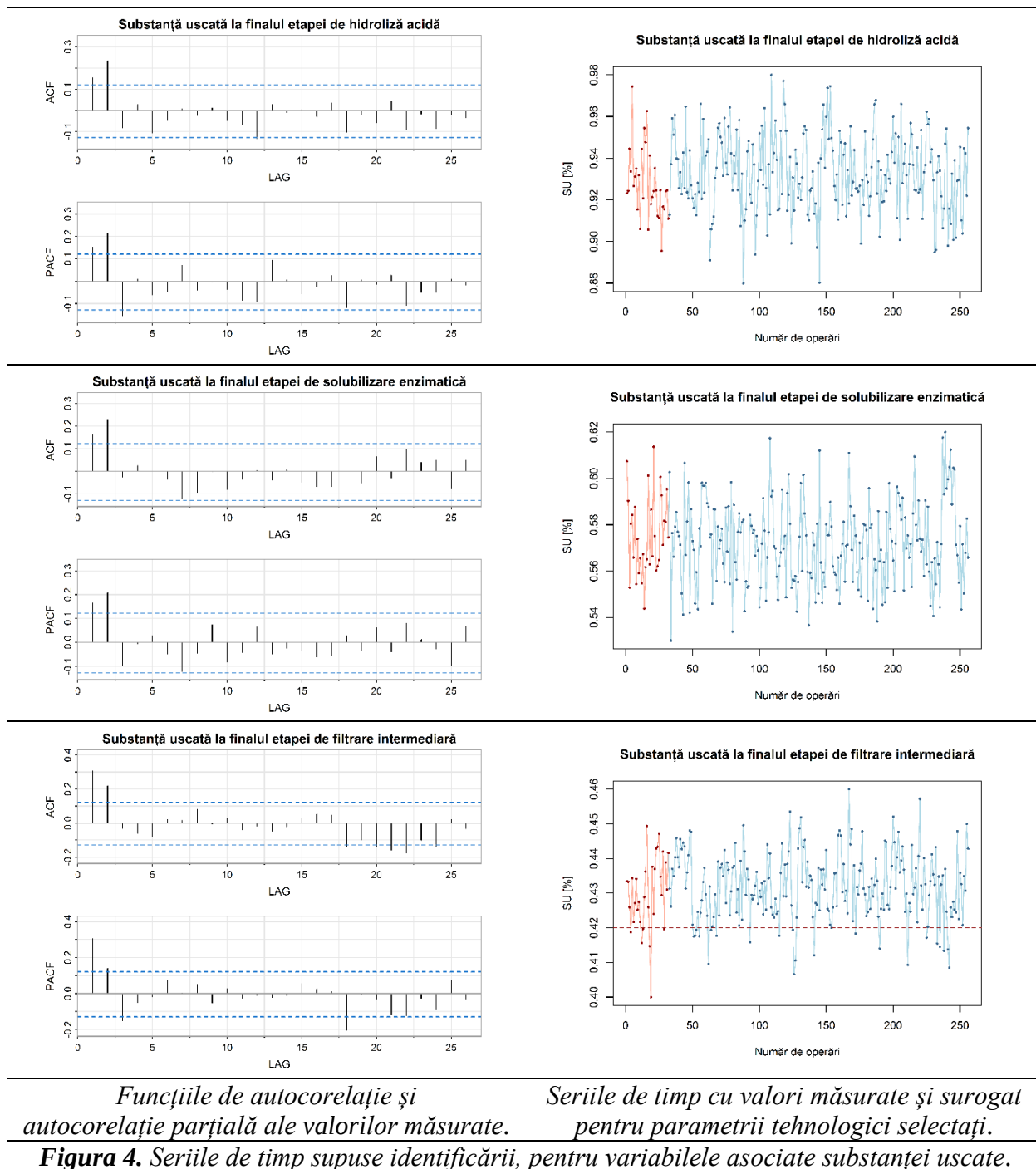
Figurile 3 și 4 prezintă seriile de timp luate în considerare în procedura de identificare. Respectivul serii de timp constau din două epoci. Prima, alcătuită din 36 de operații, include valorile efective determinate în cursul exploatării instalației pilot. Cea de-a doua cuprinde valori surogat în complement față de 256, determinate prin simularea aplicată modelelor ARMA stabilite pentru valorile corespunzătoare primei epoci. Modelele ARMA au fost parametrizate pornind de la valorile funcțiilor de autocorelație (ACF) și autocorelație parțială (PACF) ale seriilor de timp corespunzătoare primei epoci.



Funcțiile de autocorelație și autocorelație parțială ale valorilor măsurate.

Seriile de timp cu valori măsurate și surogat pentru parametrii tehnologici selectați.

Figura 3. *Seriile de timp supuse identificării, pentru variabilele asociate valorii pH-urilor critice din punct de vedere tehnologic.*



Funcțiile de autocorelație și autocorelație parțială ale valorilor măsurate.

Seriile de timp cu valori măsurate și surogat pentru parametri tehnologici selectați.

Figura 4. Seriile de timp supuse identificării, pentru variabilele asociate substanței uscate.

Urmare ajustării unor modele ARMA (auto-regresive, cu medie alunecătoare) seriilor de timp ale parametrilor tehnologici critici s-a obținut descrierea lor în domeniul timp (prin operatorul de întârziere cu un pas, q^{-1}), în domeniul frecvență (prin frecvența complexă, z), respectiv în planul complex $Re(z) / Im(z)$ (prin amplitudinea, r , și frecvența unghiulară, ω) [13]. Descrierea proceselor în domeniul timp (în spațiul s , continuu) este utilă pentru controlul reguletoarelor analogice. Pentru comanda reguletoarelor numerice, procesele trebuie reprezentate în domeniul frecvență (în spațiul z , discret, caracterizat prin perioada de eșantionare/control/ajustare, T). Reprezentarea în spațiul z a procesului care a generat o serie de timp permite scrierea *funcției de transfer* a respectivului proces, echivalenta discretă (în planul z) a transformatei sale Laplace continue (valabilă în planul s). Reprezentarea evoluției unui proces (pornind de la o serie de timp asociată acestuia) în planul complex $Re(z) / Im(z)$ permite evaluarea stabilității procesului (polii plasați înafara cercului unitar descriu procese instabile), precum și natura filtrului asociat operației (zerourile plasate în interiorul cercului unitar descriu filtre trece-jos, iar cele plasate înafara cercului unitar, filtre trece-sus).

Tabelul 1 include valorile numerice ale parametrilor modelelor ARMA ajustate seriilor de timp asociate mărimilor tehnologice luate în considerare. Valorile polilor tuturor proceselor sunt situate în interiorul cercului unitar (în planul $Re(z) / Im(z)$), fapt care sugerează cauzalitatea și stabilitatea respectivelor procese. Cu o singură excepție, zerourile proceselor sunt situate în interiorul cercului unitar, fapt echivalent cu existența unor frecvențe caracteristice proceselor în cauză, frecvențe care trebuie compensate prin intermediul regulatorului numeric, filtrând trece-sus valorile măsurate de senzorii de proces. Doar valoarea substanței uscate la finalul peptizării prezintă o variabilitate slab predictibilă, fapt care justifică filtrarea trece-jos a acestei mărimi de intrare în regulatorul numeric.

Tabelul 1. Parametrii numerici care descriu modelele ARMA ajustate seriilor de timp ale mărimilor tehnologice luate în considerare.

Seriile de timp asociate parametrului tehnologic	Descrierea ARMA a seriilor de timp reprezentate statistico-matematic în:		
	domeniul timp	domeniul frecvență	planul complex
	operatorul q^{-1}	variabila $z = e^{sT} = r \cdot e^{j\omega}$	$Re(z) / Im(z)$
	pasul de discretizare, în [număr de operări]	frecvența complexă, în [radiani per perioadă]	[unități abstracte]
pH-ul la finalul etapei de gonflare	AR: 1.000; 0.3540 MA: - 0.6793; 0.1194	AR: 1.000; - 0.6992 MA: - 0.5264; 0.6279	zerouri: 0.1758 + 0i poli: - 0.35408 + 0i amplificare: - 0.6794
pH-ul la finalul etapei de peptizare	AR: 1.000; 0.9364 MA: - 0.8428; 0.8007	AR: 1.000; - 0.36222 MA: - 0.3012; 0.8467	zerouri: 0.9500 + 0i poli: - 0.9364 + 0i amplificare: - 0.8428
Substanța uscată la finalul etapei de peptizare acidă	AR: 1.000; 0.0000 MA: - 0.3046; 0.6938	AR: 1.000; - 1.0000 MA: - 0.6515; 0.0423	zerouri: - 2.2775 + 0i poli: 0.0000 + 0i amplificare: - 0.0346
Substanța uscată la finalul etapei de hidroliză enzimatică	AR: 1.000; 0.0000 MA: - 0.6561; 0.3418	AR: 1.000; - 1.0000 MA: - 0.8270; 0.4852	zerouri: - 0.5210 + 0i poli: 0.0000 + 0i amplificare: - 0.6561
Substanța uscată la finalul etapei de filtrare primară	AR: 1.000; 0.1433 MA: - 0.2450; - 0.1436	AR: 1.000; - 0.8662 MA: - 0.2956; 0.1616	zerouri: 0.5862 + 0i poli: 0.1433 + 0i amplificare: - 0.2450

Figura 5 rezumă structura blocului predictor-corector de stare și valorile preliminare ale parametrilor de control. Respectivii parametri vor fi ajustați dinamic, în fiecare pas al operării.

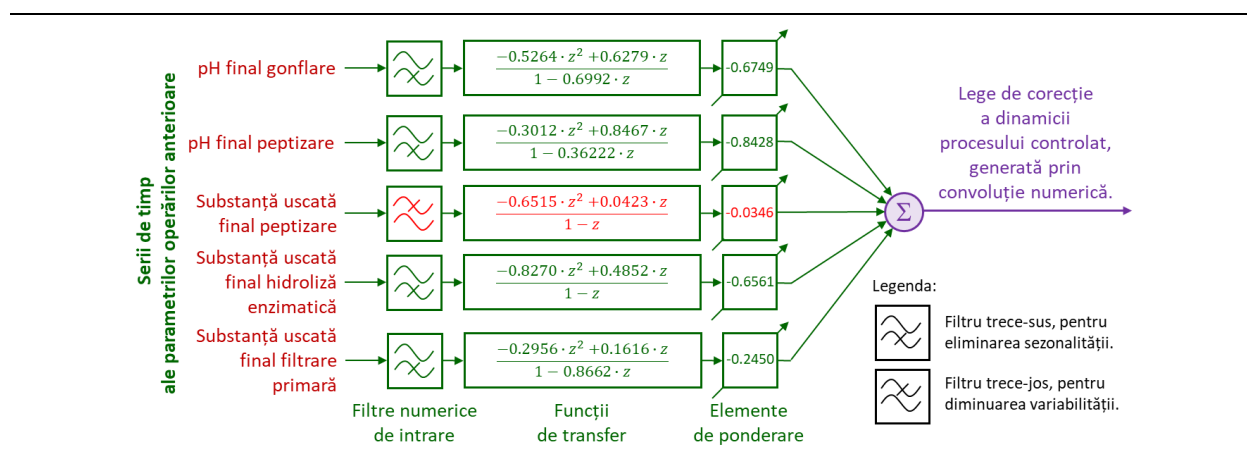


Figura 5. Structura, funcțiile de transfer și ponderile asociate blocului predictor-corector de stare al instalației de automatizare destinate instalației pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice, instalație existentă în secțiile de producție ale companiei Sanimed.

A.2.1.2 - Elaborarea și testarea tehnicilor de prelucrare, sistematizare și stocare a datelor de urmărire tehnologică

Pentru a răspunde exigențelor de funcționare a instalațiilor tehnologice din sfera farmaceuticii și dispozitivelor medicale, instalația de automatizare asociată lor trebuie să asigure (i) procesarea datelor de urmărire tehnologică, precum și (ii) stocarea informațiilor tehnologice relevante din punctul de vedere al trasabilității operărilor (și implicit al asigurării calității). Ambele deziderate se ating prin aplicarea unor algoritmi de colectare, prelucrare, sistematizare și stocare în format informatic a datelor de urmărire tehnologică obținute prin măsurare, ori prin analiză.

În cazul concret al instalației automatizate pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice, tratarea datelor de urmărire tehnologică se realizează prin:

- măsurarea locală, cu cadență predefinită, urmată de centralizarea datelor de măsurare;
- colectarea și centralizarea datelor obținute prin tehnici analitice instrumentale, de laborator;
- modelarea statistico-matematică a seriilor de timp constituite din măsurători și analize;
- modelarea proceselor supravegheate și conduse automatizat, prin aplicarea de algoritmi numerici de tip *single-input – single-output* (SISO), *multi-input – single-output* (MISO) și *bounded-input – bounded-output* (BIBO);
- modelarea variabilității și sezonality proceselor, prin algoritmi de analiză multirezolutivă de tip *wavelets*;
- întocmirea și analiza statistică a diagramelor de control.

Modelarea seriilor de timp a fost ilustrată în subcapitolul precedent. Modelarea procesului global de obținere a suspensiilor coloidale colagenice, alcătuit din patru procese elementare înseriate: (i) gonflarea materiei prime în mediu acid, (ii) peptizarea porțiunilor de țesut conjunctiv, (iii) hidroliza enzimatică a fragmentelor de țesut conjunctiv și (iv) separarea prin filtrare tangențială a suspensiei colagenice primare, va fi discutată în cele ce urmează.

Dinamica ieșirii procesului global mai sus menționat a fost modelată aplicând algoritmul Box – Jenkins (BJ), ce aparține clasei modelelor erorilor variabilității ieșirilor (OE, Output Errors). Structura matematică a unui model Box – Jenkins de tip SISO și MISO este redată de ecuațiile:

$$\text{SISO BJ: } y(t) = \frac{B(q^{-1})}{F(q^{-1})} \cdot u(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot \varepsilon(t);$$

$$\text{MISO BJ: } A(q^{-1}) \cdot y(t) = \frac{B_1(q^{-1})}{F_1(q^{-1})} \cdot u_1(t) + \dots + \frac{B_{nu}(q^{-1})}{F_{nu}(q^{-1})} \cdot u_{nu}(t) + \frac{C(q^{-1})}{D(q^{-1})} \cdot \varepsilon(t).$$

Astfel de modele au fost obținute utilizând biblioteca *sysid* v1.0.4, exploatată sub interpretorul R version 4.3.2. Modelarea s-a aplicat fiecărei perechi de intrare – ieșire, selectate dintre seriile de timp discutate în subcapitolul precedent. Validitatea modelelor a fost evaluată prin intermediul testului Ljung – Box aplicat reziduurilor modelului (adică diferenței între valoarea prezisă de model și valoarea corespunzătoare aceleiași poziții din seria de timp modelată). Valori $p > 0,05$ ale acestui test indică lipsa unei autocorelații seriale statistic semnificative a reziduurilor modelului pentru o întârziere cu un pas de operare. Altfel spus modelul reprezintă cu acuratețe procesul.

Exemplificativ, în cele ce urmează este prezentat modelul SISO BJ al perechii pH final gonflare – substanță uscată după filtrarea primară. Polinoamele asociate, obținute prin modelare, au structura:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 \\ B(q^{-1}) &= 0.138 - 0.026 \cdot u(t-1) \\ C(q^{-1}) &= 1 - 0.378 \cdot \varepsilon(t-1) + 0.476 \cdot \varepsilon(t-2) \\ D(q^{-1}) &= 1 - 0.695 \cdot \varepsilon(t-1) + 0.456 \cdot \varepsilon(t-2) \\ F(q^{-1}) &= 1 - 0.223 \cdot u(t-1) + 0.002 \cdot u(t-2) \end{aligned}$$

Valoarea p determinată conform testului Ljung – Box este 0,9431, fapt echivalent cu independența reziduurilor modelului și, deci, cu adecvanța acestuia.

Confirmarea validității modelului s-a realizat și prin simularea unei serii de timp ce are ca origine un proces SISO ai cărui parametrii au rangul polinoamelor mai sus prezentate. Figura 6 redă respectiva serie de timp. Modelul ARMA al acestei serii de timp este următorul:

$$y(t) + 0.3764 \cdot y(t-1) = 0.1072 \cdot \varepsilon(t) - 0.6779 \cdot \varepsilon(t-1),$$

indicând o dependență de doar un pas întârziere a valorilor curente ale seriei. Respectiva serie este echivalentă funcției de transfer:

$$y(z) = \frac{-0.5254 \cdot z^2 + 0.6157 \cdot z}{1 - z} \cdot u(z),$$

care, în planul complex, are un pol la $-0.3764+0i$ și un zero la $0.1582+0i$, ambii în interiorul cercului unitar, fapt echivalent cu staționaritatea și stabilitatea procesului pe care îl reprezintă. Procesul este atenuat cu factorul -0.6779 . Diagrama care descrie procesul SISO BJ modelat este prezentată în Figura 7.

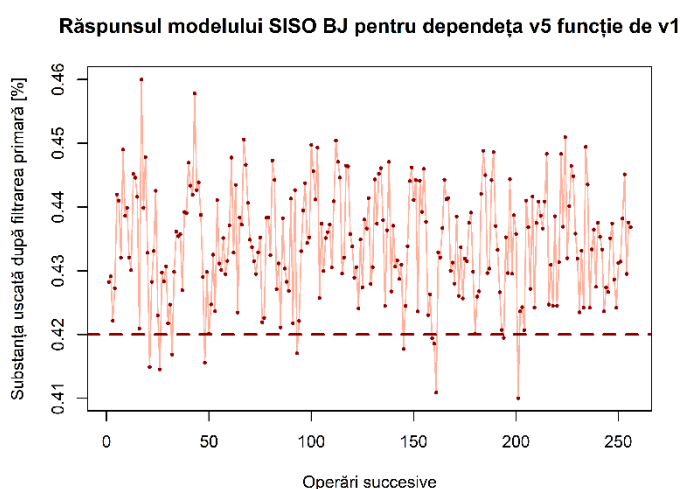


Figura 6. Expresia grafică a seriei de timp generată de modelul SISO BJ ale cărui polinoame au fost stabilite anterior prin modelare.

Sub 5 % (circa 3,5 %) din valorile seriei de timp prezisă de model se situează sub limita acceptabilă a conținutului de substanță uscată în suspensia coloidală de collagen obținută după filtrarea primară.

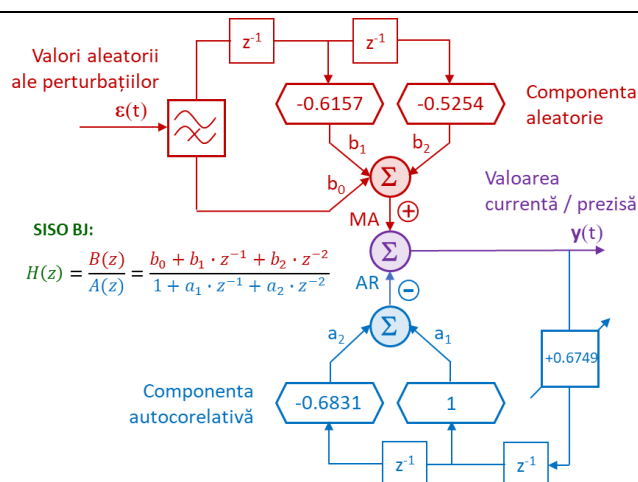


Figura 7. Diagrama procesului SISO BJ a cărei ieșire a fost ajustată printr-un model ARMA.

Componenta aleatorie o domină pe cea autocorelativă.

Pentru controlul procesului global, la momentul de operare t se impune filtrarea trece-sus a mărimilor de ieșire a celorlalte procese derulate în paralel, precum și amplificarea compensatorie a valorii proprii ieșiri, întârziate cu un pas de operare.

Opțional, legea de corecție a dinamicii procesului global implementabilă prin intermediul unui regulator numeric (respectiv setul de funcții de transfer stabilite analizând seriile de timp ale datelor de urmărire tehnologică) se completează cu funcțiile de transfer de tip Box – Jenkins ale proceselor din aval (scrise pentru perechi de serii de timp generate de procesul controlat și de cel din aval), ori chiar ale proceselor disjuncte, din amonte și aval. Legile de corecție complexe impun însă testarea algoritmului predictor – corector de stare prin prisma stabilității la variații aleatorii și controlate (spre exemplu la impuls, treaptă, rampă și sezoniere) ale parametrilor de intrare.

A.2.1.3 - Realizarea, montarea și testarea componentelor sistemului de automatizare al instalației pilot

Etapa 2023 a proiectului REMEDIAL a prevăzut realizarea fizică a instalației de automatizare, complementară instalației pilot de obținere a suspensiilor coloidale colagenice. Obiectivul primar al realizării fizice constă în dezvoltarea infrastructurii electrice, electronice și informatice, infrastructură necesară controlului și îmbunătățirii reproductibilității șarjelor succesive de suspensie colagenică procesată în instalația pilot. Proiectarea de principiu a instalației de automatizare a făcut obiectul etapei 2022. În etapa 2023, activitățile de proiectare au fost extinse prin proiectarea de execuție, posibilă doar după ce componentele instalației au fost achiziționate integral (componentele electronice fiind critice, în contextul crizei circuitelor integrate, în 2023).

Într-un prim pas al realizării fizice a instalației, traductorii suplimentari au fost montați și testați individual, drept componente ale unor bucle locale de control al operațiilor elementare (dozări volumice, menținerea constantă a presiunii, modificarea debitelor conform unei legi de variație impuse, ajustarea și menținerea nivelului de lichid, modificarea controlată a pH-ului etc.), independente de celelalte componente ale instalației. Apoi, efectorii suplimentari au fost adăugați instalației pilot și au fost testați, de asemenea, în bucle locale, verificând operabilitatea lor (viteza de răspuns, precizia răspunsului, reproductibilitatea răspunsului, răspunsul în regim static și dinamic de acționare, eventualele deficiențe funcționale, eventualele derive în timp etc.). Buclele locale au inclus traductorii inițiali și pe cei nou adăugați, iar drept regulatoare au fost utilizate cele clasice (de tip PID) dar și unele din clasa PLC, cu intrări analogice și digitale. Figurile 8 – 15 prezintă imagini ale elementelor nou adăugate instalației pilot, atât traductori, cât și efectori.



Figura 8. Traductor de debit plasat pe traseul aducțiunii de apă purificată.



Figura 9. Traductor de presiune plasat pe traseul aducțiunii de apă purificată.



Figura 10. Traductor de presiune plasat pe traseul de pompare a apei purificate în vasele de reacție ale instalației pilot.



Figura 11. Traductor de vacuum necesar amorsării transferului de lichide în instalația pilot.



Figura 12. Senzor de presiune dotat cu modul de conversie tensiune - curent în regim de semnal unificat, amplasat pe diverse trasee de pompare.



Figura 13. Traductor de debit montat pe traseele de dozare a reactivilor chimici.



Figura 14. Vană comandată pneumatic, amplasată la capătul inferior al coloanei de filtrare tangențială.

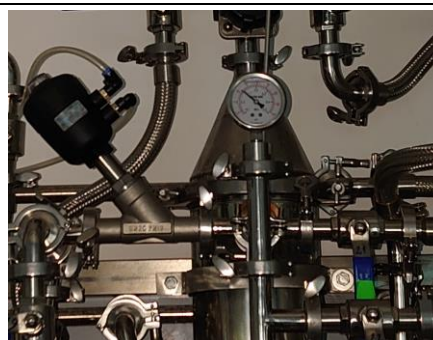


Figura 15. Vană comandată pneumatic, amplasată la capătul superior al coloanei de filtrare.

În continuare, componentele electronice ale instalației de automatizare au fost montate în dulapurile de protecție și au fost racordate la traductorii și efectorii (inițial existenți și nou adăugați) ai instalației de automatizare complementară instalației pilot. Figurile 16 și 17 prezintă conținutul și amplasarea respectivelor dulapuri care includ componentele electronice ale noii instalații.



Figura 16. Componentele montate într-un dulap de protecție.



Figura 17. Amplasarea și racordarea dulapului de protecție al unei părți a instalației de automatizare la instalația pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale de colagen.

Au fost proiectate, realizate și montate trei panouri de control și comandă, montate în tot atâtea dulapuri de protecție (cofrete). Fiecare panou a inclus câte un ansamblu alcătuit din PLC (TM221CE40R), surse de alimentare, diverse module de extensie analogice și digitale (TM3AI8/G, TM3TI4/G, TM3DM8R/G, TM3AQ4/G) și elemente de comandă și conectică electrică (întrerupătoare magneto-termice, contactoare electrice comandate, siguranțe automate, relee intermediare, relee de protecție, relee statice, diode și varistoare pentru protecția contactelor mecanice ale releelor și pentru reducerea perturbațiilor ce apar la comutarea sarcinilor inductive). Primul ansamblu a fost alocat monitorizării și controlului funcționării vasului de reacție în care se derulează procesele de gonflare în mediu acid, peptizare în mediu acid și hidroliză enzimatică a fragmentelor de țesut conjunctiv. Cel de-al doilea ansamblu a fost alocat instalației de filtrare prin baterii de filtre sită înseriate și instalației de curățare prin spălare și de sanitarizare a filtrelor sită și a traseelor care le deservește. Al treilea ansamblu a fost alocat coloanelor de filtrare și diafiltrare în regim tangențial a suspensiei coloidale colagenice, precum și instalațiilor conexe acestora (instalații pentru operațiile de curățare / spălare, decolmatare prin *back-flush*, sanitarizare, sterilizare, clătire cu apă pură sterilă, inundare cu apă sterilă). Figura 18 prezintă schema electrică a unui ansamblu pentru control și comandă, dezvoltat în jurul unui PLC.

Înainte de a fi racordat la componentele instalației pilot, fiecare subansamblu de control și comandă a fost testat utilizând (i) surse de semnal (tensiuni și curenți în regim unificat, 0 – 10 V, 4 – 20 mA), iar apoi filiera analogică a fost calibrată utilizând (ii) etaloane de tensiune (celule Whetton care furnizează tensiunea de 1,018638 V, incluse în montaje pentru amplificarea și translatarea (*zero and span adjustment*) de înaltă precizie a tensiunii de referință, dotate cu etaje tampon (*buffer*) cu impedanță controlată), (iii) etaloane de curent debitat și consumat, (iv) etaloane de rezistență și de impedanță, (v) divizoare rezistive de precizie pentru simularea termistorilor și termorezistențelor, (vi) generatoare electronice de semnal (*waveform generators*), pentru măsurarea răspunsului lanțului de reglare la variații controlate (impuls, treaptă, rampă, sinusoidale, dreptunghiulare cu factor de umplere variabil) și aleatorii (zgomot „alb” (*random signal*) și „roz” (cu densitate spectrală a puterii invers proporțională cu frecvența)) divers filtrate (trece-jos, trece-sus, trece-bandă, oprește-bandă, pieptăn). Testele enumerate sunt cele uzual necesare pentru a simula funcționarea instalațiilor de automatizare în ambiente industriale și pentru a le evalua stabilitatea și sensibilitatea în funcționare în condițiile parazitării semnalelor cu zgomot de diverse tipuri și la diverse rapoarte semnal/zgomot. Cunoașterea răspunsului instalațiilor de automatizare la respectivele teste este necesară ori de câte ori urmează a li se adăuga regulatoare numerice (comandate cu funcții de transfer implementate numeric), capabile să lucreze în tandem cu regulatoare digitale deservite de senzorică analogică. Parazitarea oricăreia dintre căile electrice și/sau electronice care deservește regulatoarele cuplate în tandem scoate regulatorul numeric din regimul de lucru stabil, deoarece alterează valorile seriilor de timp de intrare. Pentru imunizarea respectivului regulator se impune cunoașterea și anticiparea efectelor variațiilor aleatoare pe liniile de măsurare analogică și de comunicare și transfer digitale. Imunizarea se realizează scriind funcții de transfer pentru un număr cât mai mare de influențe parazitare stocastice. Odată realizată, imunizarea conferă o mare stabilitate și reproductibilitate comenzilor emise de regulatoarele numerice, eficacitatea lor de reglare depășind-o cu mult pe cea a regulatoarelor analog-digitale.

După racordarea la senzorii și efectorii instalației pilot, subansamblurile de automatizare au fost testate și reglate în condiții de funcționare simulate (utilizând fluide uzuale) și apoi reale (cu materie în curs de prelucrare și reactivi chimici). Au fost apoi reglate regimurile de măsurare și control (momentele și frecvența de achiziție a datelor, precum și secvența și cadența de elaborare a răspunsurilor) și a fost verificată corectitudinea scalării valorilor furnizate de traductori.

Pentru a facilita scrierea programelor de control și comandă încărcate în PLC-uri, au fost apoi determinate constantele de timp ale liniilor de măsurare (timpii de stabilizare și de resetare după intrări de tip impuls și treaptă) și de răspuns (timpii de ajustare și de latență a reglajelor după comenzi de tip rampă și sinusoidale) în instalația pilot supusă automatizării. Au fost astfel identificate regimurile tranzitorii, importante în automatizarea proceselor lente. În aceste scopuri au fost utilizate facilitățile de temporizare ale PLC-urilor și regimuri de dozare a reactivilor.

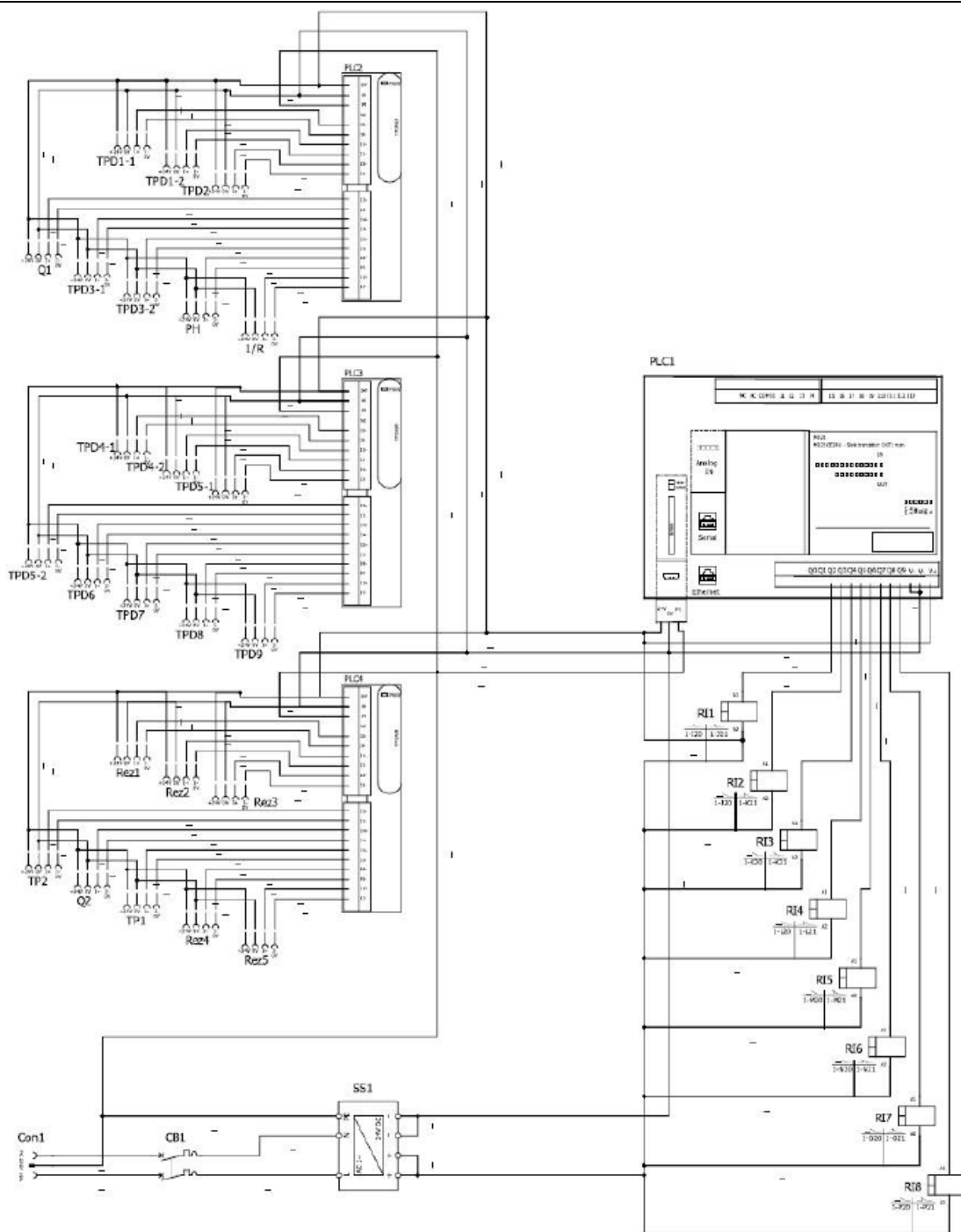


Figura 18. Schema subansamblului de control și comandă dezvoltat pentru deservirea vasului de reacție al instalației de obținere a suspensiilor coloidale de collagen.

A.2.1.4 - Proiectarea sistemului informatic și al rețelelor

Sistemul informatic asociat instalației de automatizare include toate căile de procesare a informației tehnologice, începând cu liniile de achiziție analog-digitală (conversia ADC și eventual separarea galvanică) și de condiționare numerică a semnalelor (prin filtrare, scalare, compresie) și încheind cu cele de post-procesare (analiză Fourier, analiză wavelets, analiză multirezolutivă) și stocare a datelor numerice (compresie wavelets, securizare prin cifrare). Pentru a fi încadrate conceptual în sistemul informatic al instalației, componentele de procesare digitală trebuie să

include microcontrollere, iar componentele analog-digitale să recurgă la procesoare digitale de semnal (DSP-uri, *digital signal processors*).

Sistemele de achiziție de date oferă posibilitatea măsurării și prelucrării informației ce se regăsește atât în semnalele analogice cât și în cele digitale. Semnalele digitale acceptate la intrare pot proveni de la diverse dispozitive cu regim de funcționare on/off (butoane, contacte ale releelor, surse de semnal compatibile TTL etc.). Semnalele analogice pot proveni de la instrumente de măsurare, de la senzori sau de la traductori (spre exemplu de presiune, poziție sau temperatură) cu ieșire în curent sau tensiune, ori de la generatoare de semnal. Neputând fi direct procesate decât de DSP-urile cu interfață analogică, se preferă ca semnalele analogice să fie convertite în semnale digitale, pentru care există o largă gamă de algoritmi de pre- și post-procesare.

Administrarea tehnică a proceselor industriale poate fi reprezentată sub forma unei piramide a acțiunilor, segmentată în niveluri funcție de complexitatea proceselor vizate (Figura 19). Conducerea și supravegherea proceselor sunt indisolubil legate, fiind aplicate prin intermediul instalațiilor de automatizare cu funcții cibernetice, funcții implementate în virtutea unor algoritmi numerici puși în operă de aplicații informatice și de interfețe om-mașină.

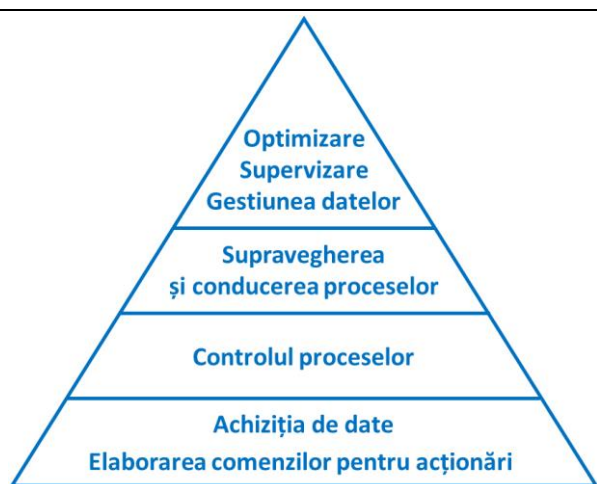


Figura 19. Piramida acțiunilor de conducere și administrare a proceselor industriale.

Principalele funcții ale unei aplicații informatice destinate supravegherii și conducerii proceselor industriale complexe sunt:

- achiziționarea de date și emiterea de comenzi / reacții / reglaje în timp real;
- modelarea în regim dinamic a stărilor proceselor și aplicarea de corecții prin acțiuni de tip *feed-back* și/sau *feed-forward*, ori anticipativ / predictiv;
- comunicarea cu procesul administrat prin măsuri de control reactive și preventive;
- semnalizarea stărilor și incidentelor;
- gestionarea situațiilor critice prin atenționări și alarme;
- comunicarea cu aplicațiile destinate prelucrării și gestionării datelor și informațiilor;
- interfațarea cu utilizatorul (fie acesta om sau mașină, ori sistem informatic);
- emiterea și gestionarea rapoartelor;
- sistematizarea, compresia și stocarea datelor;
- elaborarea de cunoștințe (*know-how*) prin tehnici de *data mining* și *machine learning*.

Abilitatea definitorie a sistemelor și aplicațiilor informatice destinate supravegherii și conducerii proceselor industriale complexe este reprezentată de *triada măsurare / răspuns / acțiune în timp real*. În sens ingineresc, sintagma „lucru în timp real” exprimă capacitatea unui sistem (în speță, informatic (digital) ori cibernetic (analog-digital)) de a răspunde în timpi scurți (de ordinul nano- sau cel mult micro-secundelor) la variații măsurate ori la evenimente apărute, prin intermediul unor reacții elaborate în baza unor algoritmi (implementați informatic și/sau electronic) predefiniți ori cu auto-învățare. Așadar, „timpul real” este asociat timpului de reacție eficace, timp în care dinamica (evoluția temporală sau spațio-temporală) a un sistem cibernetic sau

a unei instalații supusă controlului automatizat se modifică semnificativ (evident) sub efectul unui semnal (de măsurare ori de comandă).

În mod paradoxal, și sistemele tehnologice cu dinamică lentă (cu timpi lungi de reacție) beneficiază de avantajele lucrului în timp real. În cazul lor, nu reacția dinamică este vizată, ci abilitatea de a elabora, evalua și aplica strategii de decizie privind corecțiile neceare. Respectivle strategii vizează parcurgerea tuturor etajelor piramidei acțiunilor de administrare și conducere a proceselor (prezentate în Figura 19). Mai mult decât atât, ele includ parcurgerea repetată, în ambele sensuri, a acțiunilor și măsurilor de conducere, cu scopul asigurării și validării reacțiilor printr-un proces de învățare automată (din speța inteligenței artificiale).

Schema simplificată a sistemului de achiziție și prelucrare în timp real a datelor, asociat instalației de automatizare concepută și dezvoltată în cadrul proiectului REMEDIAL este prezentată în Figura 20. Funcțiile sistemului în cauză sunt:

- culegerea datelor de urmărire tehnologică;
- procesarea algoritmică a datelor;
- constituirea și actualizarea unei baze de date tehnologice exploatabile informatic;
- elaborarea strategiilor de conducere automată a proceselor tehnologice;
- aplicarea acțiunilor de corecție necesare, în etapele de operare adecvate controlului;
- supravegherea în timp real a aplicării corecțiilor și (eventual) a răspunsurilor sistemului condus în regim automat.

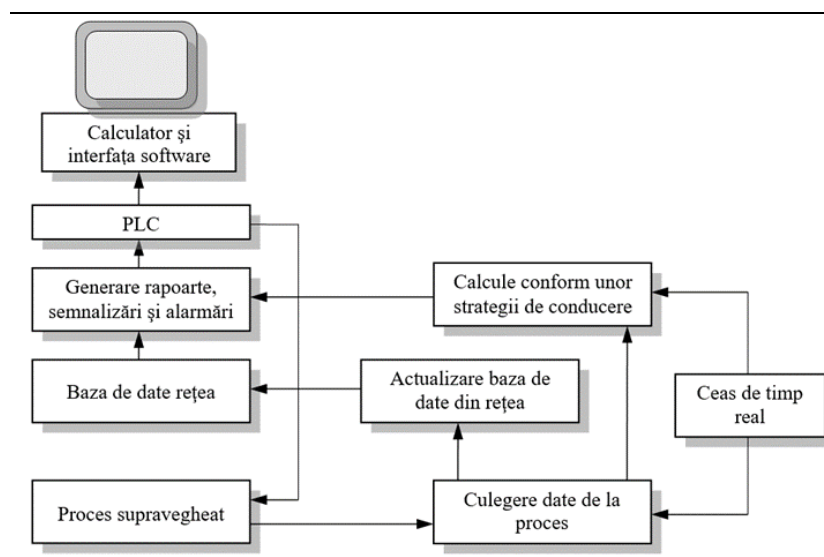


Figura 20. Structura sistemului de achiziție și prelucrare în timp real a datelor, asociat instalației de automatizare ce face obiectul proiectului REMEDIAL.

Între etapele importante ale funcționării sistemului descris în Figura 20 se regăsesc:

- condiționarea analogică a semnalelor măsurate de traductorii instalației automatizate (prin amplificare, filtrare, scalare, conversie tensiune – curent etc.);
- achiziționarea semnalelor asociate variabilelor tehnologice supuse supravegherii (recurgând la module de achiziție și conversie analog – digitală);
- condiționarea digitală a semnalelor achiziționate (prin filtrare numerică, modelare parametrică, analiză spectrală, compresie etc.);
- procesarea / analiza semnalelor convertite în serii de timp, inclusiv prin modelare și transformare în spațiul stărilor (în virtutea reprezentării în planul z , Re/Im);
- elaborarea de decizii privind controlul parametrilor tehnologici și aplicarea respectivelor decizii prin intermediul reguletoarelor analog-digitale și/sau numerice;
- verificarea și supravegherea efectelor acțiunilor de control aplicate, prin procesarea datelor de achiziție obținute pe filiera mai sus descrisă;
- înregistrarea, afișarea și stocarea datelor de urmărire și control tehnologic.

Un exemplu de înregistrare a datelor (asociate variabilelor tehnologice) prelevate prin intermediul instalației de automatizare dezvoltată în cadrul proiectului REMEDIAL este prezentat în Figurile 21 (expresia numerică) și 22 (expresia grafică / vizuală / de interfațare cu utilizatorul).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1	Timp	pv1	sv1	rv1	pv2	sv2	rv2	pv3	sv3	rv3	pv4	sv4	rv4	pv5	sv5	rv5	pv6	sv6	rv6	pv7	sv7	rv7
2	7/11/2023 15:36	999	180	140.2	99.2	140	104.4	119.8	170	110.9	24.7	100	16.5	91.6	170	19.9	25.4	100	32.8	799.5	890	20
3	7/11/2023 15:36	999	180	140.3	99.2	140	104.6	119.7	170	110.6	24.7	100	16.5	91.6	170	19.7	25.4	100	32.5	800.2	890	20.2
4	7/11/2023 15:37	999	180	140.5	99.2	140	104.7	119.6	170	110.4	24.7	100	16.7	91.5	170	19.9	25.4	100	32.5	802	890	20.2
5	7/11/2023 15:38	999	180	140.2	99.2	140	104.9	119.6	170	110.3	24.7	100	16.5	91.5	170	19.9	25.4	100	32.6	803.4	890	20.2
6	7/11/2023 15:38	999	180	140.2	99.1	140	104.6	119.6	170	110.4	24.8	100	16.5	91.5	170	19.9	25.4	100	32.5	804.7	890	20
7	7/11/2023 15:39	999	180	140.2	99.1	140	104.6	119.6	170	110.3	24.8	100	16.5	91.5	170	19.7	25.4	100	32.6	806.2	890	20.2
8	7/11/2023 15:39	999	180	140.2	99.1	140	104.6	119.6	170	110.3	24.8	100	16.7	91.5	170	19.9	25.4	100	32.6	807.7	890	20.2
9	7/11/2023 15:40	999	180	140.2	99.1	140	104.6	119.5	170	110	24.9	100	16.5	91.5	170	19.7	25.4	100	32.6	809.2	890	20

Figura 21. Modalitatea de reprezentare și stocare numerică a datelor de urmărire tehnologică și de control automat.

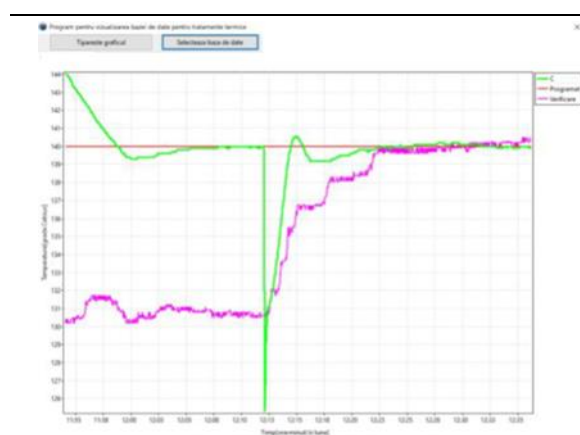


Figura 22. Modalitatea de reprezentare vizuală a datelor de urmărire tehnologică și de control automat, destinată semnalizării către utilizator a evoluției proceselor măsurate și reglate.

Această modalitate este aplicabilă atât datelor în curs de achiziționare / elaborare (în regim on-line), cât și datelor stocate în baza de date (în regim off-line).

Comunicarea între componentele sistemului de control și supraveghere a derulării proceselor în instalația pilot a companiei Sanimed se realizează prin intermediul a două rețele cu protocoale dedicate. Prima rețea este una specializată (*proprietary*), axată pe o magistrală locală, de tip client/server, specifică instalațiilor de automatizare, prin care microcontrollerele comunică în timp real. Cea de-a doua este o rețea de uz industrial general, care facilitează protocolul de comunicare industrială Modbus, de tip master/slave, larg aplicat pentru transmiterea ultrarapidă a datelor pe o magistrală Ethernet TCP/IP, între controlere logice programabile (PLC-uri), cu rolul de slave, și sisteme informatice (*system-on-a-chip* cu DSP, sau chiar PC-uri) care rulează sisteme de operare de nivel înalt, cu rolul de master. Sistemele informatice rulează trei tipuri de aplicații: (i) de modelare statistico-matematică, (ii) de interfațare cu utilizatorul și respectiv (iii) de stocare și administrare a datelor de urmărire tehnologică și de control și reacție. Dacă sunt corespunzător interfațate, respectivele sisteme informatice pot juca și rolul de regulatoare numerice.

După ce a fost constituită, testarea rețelei de comunicație de date între cele trei controllere logice programabile asociate instalației pilot și computerul dispecer (rețea de tip Modbus – TCP/IP), a confirmat capacitatea canalului de comunicare de a asigura conducerea în timp real a proceselor de achiziționare a datelor și a celor de control automat, prin intermediul aplicației software instalată în sistemul informatic.

Testarea sistemului de achiziționare a datelor sub controlul sistemului informatic a urmărit parametrizarea funcționării în timp real căilor de intrare, prin stabilirea mărimii fluxului de date necesar și a timpilor de pre- și post-procesare a datelor de urmărire tehnologică. La final s-a realizat și testarea căilor de emisie și transmitere a comenzilor către efectorii instalației de automatizare, atât dinspre sistemul informatic, cât și dinspre PLC-uri. Au fost determinate valorile intervalelor de timp necesare pentru actualizarea datelor de măsurare și de comandă / control, intervale care au fost apoi utilizate pentru proiectarea aplicației software care rulează pe sistemul informatic (cu rol

de dispecer al funcționării PLC-urilor, de interfațare cu utilizatorul și de stocare și administrare a datelor).

Cu scopul urmăririi parametrilor tehnologici de interes pentru procesele de obținere a suspensiilor coloidale colagenice a fost dezvoltată o aplicație care citește variabile furnizate de PLC-uri prin protocol Modbus TCP/IP, iar apoi le afișează sub o formă grafică rapid accesibilă utilizatorului. Figura 23 prezintă interfața grafică a aplicației în cauză.

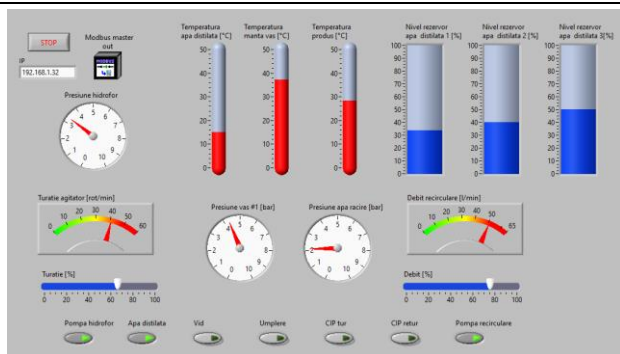


Figura 23. Interfața grafică dezvoltată în mediul de programare și control LabView cu scopul afișării datelor de urmărire tehnologică și de control al gospodăriei de apă purificată.

A.2.1.5 - Realizarea sistemului informatic și al rețelelor

Automatizarea instalației pilot este realizată în sistem distribuit, cu ajutorul a trei automate programabile care comunică prin protocol Modbus TCP/IP prin rețeaua Ethernet locală, rețea la care este conectat și calculatorul dispecer, pe care rulează aplicațiile software și serverul de baze de date. Rețeaua are structura prezentată în Figura 24. Ea conține un switch cu opt porturi, la care sunt conectate PLC-urile, calculatorul dispecer și rețeaua internet.

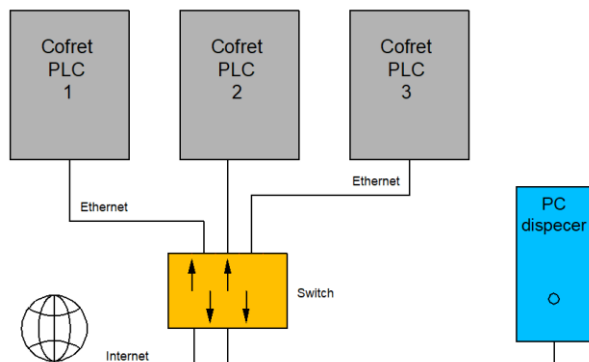


Figura 24. Structura sistemului informatic și topologia rețelei care asigură interconectarea componentelor.

PLC-urile sunt racordate la instalația pilot prin intermediul (i) traductorilor conectați la intrările analogice, (ii) elementelor de confirmare a unor stări binare, conectate la intrările digitale și al releelor de comandă a efectorilor (ventile electrice, vane pneumatice, motoare electrice, sisteme de semnalizare etc.), conectate la ieșirile digitale. Liniile de alimentare cu energie electrică a componentelor și conexiunile la buclele locale de reglare completează topologia instalației.

A.2.1.6 - Proiectarea și elaborarea aplicațiilor software dedicate (PLC, HMI, comunicații, interfațare, procesare)

Conducerea procesului tehnologic de obținere a suspensiilor coloidale colagenice este asigurată prin controlul automatizat, monitorizarea în timp real și stocarea datelor de urmărire tehnologică. Acțiunile de monitorizare, interfațare și stocare a informațiilor sunt asigurate de o aplicație software care rulează pe computerul dispecer. Figura 25 prezintă amplasarea acestui din

urmă computer. Componentele software dezvoltate pentru a rula pe respectivul computer sunt: (i) aplicația dispecer, care include și consola de operare, (ii) o aplicație de baze de date cu unica funcție de a stoca datele de urmărire tehnologică, (iii) o aplicație dedicată generării de rapoarte de operare care prezintă, în diverse formate tipizate, valorile variabilelor stocate în baza de date și (iv) o aplicație pentru supravegherea procesului tehnologic derulat în instalația pilot, care detectează situațiile critice predefinite și emite semnalări și alarme.

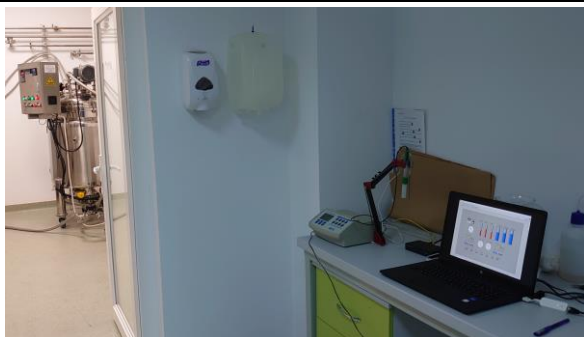


Figura 25. Computerul dispecer, prin intermediul căruia este controlată și administrată funcționarea instalației pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice, în secțiile productive ale companiei Sanimed.

Automatele programabile (TM221CE40R, Schneider Electric SE, Franța) au fost programate utilizând aplicația software *EcoStruxure™ Machine Expert*, furnizată de compania Schneider Electric. Codul încărcat în PLC-uri a fost scris în limbajul de programare grafică *Ladder Diagram*. Programele în cauză conțin logica de conducere a proceselor derulate în instalația pilot, regimurile de funcționare și buclele de reglare automată.

Componentele funcționale ale programelor de control și comandă au fost descrise recurgând la formalismul mașinilor de stare, sau al automatelor finite (*finite-state machine*). O mașină de stare este definită prin (i) variabilele de intrare – ieșire, (ii) prin mulțimea stărilor posibile ori permise, (iii) prin starea inițială predefinită și (iv) prin tranzițiile induse de modificarea valorii variabilelor de intrare, tranziții care declanșează schimbarea stării curente a mașinii. Stările mașinii sunt definite de configurația ieșirilor acesteia la un moment dat, fiind asociate stărilor procesului controlat. Mașina de stare poate fi descrisă prin diagrame de stări și prin tabele de stări și tranziții, descrise în limbajele UML (*Unified Modeling Language*), SDL (*Specification and Description Language*), ori prin alte variante de reprezentare grafică, mai puțin standardizate.

Aplicația *EcoStruxure™ Machine Expert* emite rapoarte asupra programelor scrise. Un astfel de raport poate cuprinde: lista de materiale utilizate, configurația hardware și software și simbolurile utilizate în program. O secțiune a unui raport asupra programării PLC-ului care deservește coloana de diafiltrare a instalației pilot este prezentată în Figura 26.

Used	Address	Symbol	Comment
X	%I0.0	COM_FILTR_BACKFLUSH	Comanda mod: filtrare/backflush diafiltrare
X	%I0.1	POMPA_ON_OFF	Pompa on/off diafiltrare
X	%IW1.0	TRAD_PRES_1	Traductor presiune 1 diafiltrare
X	%IW1.1	TRAD_PRES_2	Traductor presiune 2 diafiltrare
X	%IW1.2	TRAD_PRES_3	Traductor presiune 3 diafiltrare
X	%IW1.3	TRAD_PH	Traductor pH modificare pH
X	%Q0.0	CFF	Contactator pompa filtrare diafiltrare
X	%Q0.1	EVE	Electromagnet vana evacuare diafiltrare
X	%Q0.2	EVS_TUR	Electromagnet vana splare tur diafiltrare
X	%Q0.3	EVS_RETUR	Electromagnet vana spalare retur diafiltrare
X	%Q0.4	EVVID	Electromagnet vana vid diafiltrare
X	%Q0.5	EVAD	Electromagnet vana apa distilata diafiltrare
X	%Q0.6	C_REG_M_A	Comanda regim manual/automat diafiltrare
X	%Q0.7	LMP	Lampa martor pompa in functiune diafiltrare
X	%Q0.8	EVAD_PH	Electromagnet vana apa distilata modificare pH

Figura 26. Segment al secțiunii de descriere a simbolurilor utilizate în redactarea programelor în limbajul *Ladder Diagram*, pentru secvența de instrucțiuni implementată în PLC-ul care deservește coloana de diafiltrare din structura instalației pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice.

Bibliografie

- [1] Zhou J., Xing L., Wen C., *Adaptive Control of Dynamic Systems with Uncertainty and Quantization*, CRC Press, Boca Raton (FL, USA), **2021**.
- [2] Duffie N.A., *Control Theory Applications for Dynamic Production Systems. Time and Frequency Methods for Analysis and Design*, John Wiley & Sons Inc., Hoboken (NJ, USA), **2022**.
- [3] (a) Livinț Ghe., *Teoria sistemelor*, Rotaprint I.P. Iași, **1993**; (b) Goraș L., *Semnale, circuite și sisteme*, Editura “Gh. Asachi”, Iași, **1994**.
- [4] (a) Erban R., Chapman S.J., *Stochastic Modelling of Reaction-Diffusion Processes*, Cambridge University Press, Cambridge (UK), **2020**; (b) Cherniha R., Serov M., Pliukhin O., *Nonlinear Reaction-Diffusion-Convection: Lie and Conditional Symmetry, exact Solutions and Their Applications*, CRC Press, Boca Raton (FL, USA), **2018**.
- [5] Hariharan G., *Wavelet Solutions for Reaction–Diffusion Problems in Science and Engineering*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore (Singapore), **2019**.
- [6] Yu Q., Lei T., Tian F., Hou Z., Bu X., *Predictive Learning Control for Unknown Nonaffine Nonlinear Systems. Theory and Applications*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore (Singapore), **2023**.
- [7] Califano C., Moog C.H., *Nonlinear Time-Delay Systems. A Geometric Approach*, Springer Nature Switzerland AG, Cham (Switzerland), **2021**.
- [8] Gu Y., Li C., *State Space Systems with Time-Delays Analysis, Identification, and Applications*, Editor: Zhu Q.M., Elsevier Science, Amsterdam (The Netherlands), **2023**.
- [9] Durbin J., Koopman S.J., *Time Series Analysis by State Space Methods* (Second Edition), Oxford University Press, Oxford (UK), **2012**.
- [10] (a) Hagiwara J., *Time Series Analysis for the State-Space Model with R/Stan*, Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore (Singapore), **2021**; (b) Shumway R.H., Stoffer D.S., *Time Series: A Data Analysis Approach Using R*, CRC Press, Boca Raton (FL, USA), **2019**; (c) Krispin R., *Hands-On Time Series Analysis with R: Perform Time Series Analysis and Forecasting Using R*, Packt Publishing Ltd., Birmingham (UK), **2019**; (d) Ramasubramanian K., Singh A., *Machine Learning using R with Time Series and Industry-based Use Cases in R* (Second Edition), APress, New Delhi (India), **2019**.
- [11] R Core Team (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
- [12] <https://cran.r-project.org/web/packages/statespacer/index.html>
- [13] Smith S.W., *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing* (Second Edition), California Technical Publishing, San Diego (CA, USA), **1999**.

A.2.2. Diseminarea rezultatelor

Proiectul REMEDIAL are un vădit caracter aplicativ, derivat din spiritul competiției PTE (transfer la operatorul economic). Drept consecință, rezultatele diseminabile obținute sunt de factură inginerescă și constau în algoritmi, proceduri și date experimentale asociate operării instalației pilot din dotarea companiei Sanimed. Respectiv rezultate au fost transpuse în articole transmise spre analiză și publicare, cu *acknowledgement* menționat, în următoarele periodice:

1. The Scientific Bulletin of University POLITEHNICA Bucharest, Series B (<https://www.scientificbulletin.upb.ro/>); ISSN 1454-2331:
Zorila F.Z., Alexandru M., Dumbrava A.S., Baltac A.S., Mihalici Cutrubinis M., Marinas I.C., Angheloiu M., Maier S.S., *Optimizing the staining of SDS-PAGE gels and highlighting the main protein chains of collagen after gamma irradiation in different dose and temperature conditions*. (În revizuire în vederea publicării.)

2. Proceedings of 2023 International Conference on Hydraulics and Pneumatics – HERVEX, November 8-10, Băile Govora, Romania; ISSN 1454-8003:
Blejan R., Blejan M., Ionescu A., *Implementing the functionality of electrohydraulic actuated machines by programmable logic controller programmed using finite-state machine*; https://fluidas.ro/hervex/proceedings2023/_140-144.pdf
3. ISB-INMA TEH International Symposium 2023, 5-6 October 2023, Bucharest; ISSN 2537-3773 (online);
<https://isbinmateh.inma.ro/wp-content/uploads/2023/12/vol-simp-2023-29-nov.pdf>
Rădoi R.I., Dumitrescu C., Ilie I., Barbu V., Duran B., Cismaru M., *Data acquisition system for analyzing the thermodynamic performance of an air-water heat pump*.

II. Sumar al progresului și al rezultatelor obținute în etapa 2023 a proiectului

Etapă 2023 a proiectului REMEDIAL a vizat (i) realizarea fizică a instalației de automatizare asociată instalației pilot pentru obținerea suspensiilor coloidale colagenice în cadrul companiei Sanimed International Impex S.R.L., (ii) dezvoltarea algoritmilor asociați controlului și conducerii proceselor tehnologice prin intermediul respectivei instalații de automatizare și (iii) dezvoltarea aplicațiilor software dedicate exploatarei instalației (codurile *Ladder Diagram* pentru PLC-uri și scripturile LabView pentru computerul dispecer al instalației). Activitățile s-au derulat în conformitate cu planul de activități asumat la contractare și cu acordul ferm de colaborare stabilit între compania Sanimed și partenerul în proiect, Institutul de Cercetări pentru Hidraulică și Pneumatică - București. Instalația de automatizare a fost realizată și testată cu succes.

III. Rezumatul etapei 2023 a proiectului

Utilizând componentele achiziționate de compania Sanimed, partenerul IHP a realizat fizic instalația de automatizare, iar apoi au fost dezvoltate, în comun, aplicațiile software dedicate exploatarei acesteia. În paralel, în cadrul companiei Sanimed au fost dezvoltați algoritmi necesari implementării controlului automat al instalației de obținere a suspensiei coloidale colagenice, în vederea creșterii reproductibilității caracteristicilor șarjelor succesive de forme colagenice.

Instalația de automatizare concepută și realizată în cadrul proiectului REMEDIAL include trei subansambluri dezvoltate în jurul unor controllere logice programabile, asociate vasului de reacție, bateriei de filtre și respectiv sistemului de diafiltrare ce se regăsesc în componența instalației pilot din secțiile productive ale companiei Sanimed. Componentele software dedicate operării instalației au fost dezvoltate recurgând la aplicații și tehnici de programare specifice PLC-urilor și respectiv computerelor.

Asigurarea transparenței în derularea proiectului este susținută de pagina WEB a acestuia. Cu scop de diseminare a realizărilor, pornind de la datele experimentale și informațiile obținute în cadrul etapei 2023 a proiectului REMEDIAL au fost întocmite trei lucrări științifice cu caracter ingineresc.

5 decembrie 2023

Director de proiect,
Conf. dr. ing. Stelian Sergiu Maier