

**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE  
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI  
FACULTATEA DE INGINERIE MECANICĂ ȘI ELECTRICĂ**

---

---

**TEZĂ DE DOCTORAT  
~ REZUMAT ~**

**CONTRIBUȚII PRIVIND MONITORIZAREA AUTOMATĂ A  
SISTEMELOR DE TRANSPORT PRIN CONDUCTE AL  
PRODUSELOR PETROLIERE**

**Conducător științific:**

**Prof. univ. dr. ing. Nicolae Paraschiv**

**Doctorand:**

**Daniela Dițu (Tudorică)**

---

---

**Ploiești  
2014**

## CUPRINSUL TEZEI DE DOCTORAT

Introducere .....	6
Capitolul 1. Caracterizarea rețelelor pentru transportul produselor petroliere prin conducte.....	9
1.1. Istoricul și dinamica transportului produselor petroliere prin conducte.....	9
1.1.1. Mijloace de transport al produselor petroliere .....	9
1.1.2. Situația transportului prin conducte pe plan internațional .....	12
1.1.3. Situația transportului prin conducte pe plan național.....	17
1.2. Infrastructura rețelelor de transport.....	20
1.2.1. Conducte .....	20
1.2.2. Surse de presiune .....	22
1.2.3. Soluții de depozitare.....	24
1.3. Sarcinile și riscurile transportului prin conducte .....	25
1.3.1. Parametri de calitate ai transportului prin conducte.....	26
1.3.2. Eficiența transportului prin conducte .....	26
1.3.3. Riscurile transportului prin conducte și securitatea mediului .....	26
1.4. Concluzii parțiale .....	29
Capitolul 2. Stadiul actual al realizărilor privind monitorizarea automată a sistemelor de transport al produselor petroliere prin conducte .....	31
2.1. Sisteme de monitorizare automată .....	31
2.1.1. Rolul monitorizării în automatizarea proceselor.....	31
2.1.2. Sisteme de măsurare. Considerații metrologice .....	32
2.1.3. Standarde în metrologia aferentă transportului produselor petroliere prin conducte.....	37
2.1.4. Sisteme SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) .....	40
2.2. Parametri mășurați în procesul de transport prin conducte și traductoare asociate.....	46
2.2.1. Măsurarea presiunii.....	46
2.2.2. Măsurarea debitului.....	48
2.2.3. Măsurarea temperaturii .....	50
2.3. Elemente de procesare utilizate în sisteme moderne de monitorizare .....	51
2.3.1. Evoluția sistemelor de monitorizare.....	51
2.3.2. Automate logice programabile (PLC).....	54
2.3.3. Microcontrollere.....	57
2.4. Sisteme de detecție a scurgerilor din conducte (LDS – Leak Detection System).....	57
2.4.1. Metode de detecție a scurgerilor din conducte.....	58
2.4.2. Criterii de evaluare a performanțelor sistemelor de detecție a scurgerilor.....	62
2.5. Metode moderne de investigare a stării conductelor.....	66

2.5.1. Roboți de inspecție a conductelor (pig) .....	66
2.5.2. Conducte inteligente .....	67
2.6. Realizări pe plan național privind monitorizarea automată a procesului de transport prin conducte .....	69
2.7. Concluzii parțiale .....	70
Capitolul 3. Contribuții privind modelarea și simularea procesului de transport al produselor petroliere prin conducte .....	71
3.1. Noțiuni generale privind curgerea fluidelor prin conducte .....	71
3.1.1. Noțiuni și mărimi caracteristice mișcării fluidelor prin conducte.....	71
3.1.2. Clasificarea mișcării fluidelor .....	75
3.2. Abordarea sistemică a procesului de curgere prin conducte .....	78
3.3. Modelarea și simularea curgerii în regim staționar a produselor petroliere prin conducte .....	82
3.3.1. Ecuația de conservare a masei .....	82
3.3.2. Ecuația de conservare a impulsului.....	84
3.3.3. Ecuația de conservare a energiei .....	85
3.3.4. Coeficientul de pierdere de sarcină hidraulică .....	86
3.4. Contribuții privind modelarea și simularea curgerii în regim nestaționar a produselor petroliere prin conducte .....	95
3.4.1. Ipoteze simplificatoare ale modelului .....	96
3.4.2. Rezolvarea numerică a ecuațiilor de conservare .....	97
3.4.3. Condiții inițiale și la limită.....	102
3.4.4. Simulator numeric pentru curgerea nestaționară prin conducte.....	104
3.4.5. Validarea modelului curgerii .....	112
3.5. Concluzii parțiale .....	113
Capitolul 4. Contribuții privind dezvoltarea unui sistem de monitorizare automată a procesului de transport al produselor petroliere prin conducte .....	115
4.1. Facilități oferite de microcontrollere pentru a fi incluse în dispozitivele de automatizare .....	115
4.2. Familii de microcontrollere.....	120
4.3. Realizarea practică a unui sistem cu microcontroller pentru achiziția de date .....	125
4.3.1. Arhitectura sistemului de achiziție de date SDMAPT .....	125
4.3.2. Structura unității centrale de control .....	126
4.3.2.1. Starter Kit-ul PIC32MX795F512L-80I/PT .....	127
4.3.2.2. Placa de extensie I/O DM320002 .....	130
4.3.2.3. Placa de interfață.....	131
4.3.3. Structura unităților mobile .....	133
4.3.4. Integrarea unităților în sistemul distribuit de achiziție a datelor SDMAPT .....	136

4.4. Dezvoltarea unei aplicații web pentru monitorizarea și controlul sistemului cu microcontroller SDMAPT .....	137
4.4.1. Stiva TCP/IP Microchip.....	137
4.4.2. Realizarea aplicației web pentru monitorizarea și controlul sistemului SDMAPT.....	141
4.5. Contribuții la simularea sistemului distribuit de monitorizare și realizarea unei aplicații de nivel înalt pentru centralizarea și monitorizarea datelor .....	149
4.5.1. Dezvoltarea unor pagini web pentru transmisia datelor de la sistemul cu microcontroller la o aplicație de nivel înalt .....	150
4.5.2. Simularea sistemului distribuit de monitorizare automată a procesului de transport prin conducte SDMAPT v.1 .....	150
4.5.2.1. Arhitectura sistemului de monitorizare dezvoltat .....	151
4.5.2.2. Simularea funcționării a trei unități distribuite de control .....	152
4.5.2.3. Aplicația AMAPT-DLS pentru centralizarea datelor de la sistemele cu microcontroller .....	154
4.6. Utilizarea sistemului SDMAPT v.1 pentru detectarea și localizarea scurgerilor din conducte .....	157
4.6.1. Detectarea scurgerii prin metoda modelării tranzitorii în timp real (RTTM) .....	158
4.6.2. Localizarea scurgerii și estimarea diametrului spărturii prin metodele analiza presiunii și echilibrul de volum .....	161
4.6.3. Evaluarea performanțelor sistemului SDMAPT v.1 și ale aplicației AMAPT – DLS pentru detectarea și localizarea scurgerilor din conducte.....	166
4.7. Concluzii parțiale .....	171
Capitolul 5. Concluzii generale, sinteză a contribuțiilor originale, direcții posibile de continuare a cercetărilor .....	172
5.1. Concluzii generale .....	172
5.2. Sinteza a contribuțiilor originale.....	175
5.3. Direcții posibile de continuare a cercetărilor .....	176
Bibliografie .....	177
Notații folosite .....	182
Glosar de termeni și mărci înregistrate .....	183
Index de figuri.....	187
Index de tabele .....	189
ANEXE.....	190
Anexa 1. Exemple de traductoare utilizate în sistemele de transport al produselor petroliere prin conducte .....	190
Anexa 2. Facilități oferite de microcontrollerul Microchip PIC32MX795F512L .....	192
Anexa 3. Modulele de radio-frecvență XBee și XBee-PRO, descriere și specificații .....	194
Anexa 4. Codul C# al aplicației de simulare a funcționării sistemelor cu microcontroller .....	196
Anexa 5. Codul C# al aplicației de monitorizare automată AMAPT-DLS.....	203

**Cuvinte cheie:** monitorizare, sistem automat, microcontroller, conducte, modelare, scurgere, detectare, localizare.

## **Rezumat**

Transportul prin conducte reprezintă cel mai utilizat, eficient și sigur mijloc de transport al produselor petroliere. Îndeplinirea obiectivelor de calitate, eficiență și securitate pentru acest proces poate fi realizată inclusiv prin soluții performante de monitorizare automată.

În acest context, prezenta teză de doctorat își propune să aducă unele contribuții referitoare la problematica monitorizării automate complexe a sistemelor de transport al produselor petroliere prin conducte. Obiectivele generale vizate în cadrul lucrării se referă la următoarele aspecte:

- analiza stadiului actual al realizărilor referitoare la monitorizarea automată a sistemelor de transport al produselor petroliere prin conducte;
- cercetări privind abordarea sistemică a procesului de transport prin conducte;
- elaborarea și testarea unor modele de simulare asociate sistemelor de transport;
- dezvoltarea unui sistem automat de monitorizare automată a procesului de transport al produselor petroliere prin conducte;
- utilizarea sistemului de monitorizare propus în detectarea și localizarea scurgerilor din conducte.

Activitatea de cercetare în vederea realizării tezei de doctorat a avut la bază următoarele etape:

- o cuprinzătoare documentare cu privire la domeniul monitorizării automate a sistemelor de transport prin conducte;
- activități de cercetare practică în laboratoarele de hidraulică ale Departamentului Forajul Sondelor, Extracția și Transportul Hidrocarburilor din cadrul Universității Petrol-Gaze din Ploiești;
- vizite efectuate la compania S.C. Conpet S.A. Ploiești, care au contribuit la formarea convingerii că eficiența procesului de transport depinde de felul în care acesta este cunoscut și condus. Cu ocazia discuțiilor purtate în cadrul acestor vizite, autorul a luat cunoștință de realizările actuale privitoare la monitorizarea procesului de transport (sistemul SCADA implementat în cadrul companiei Conpet), precum și de limitele existente în prezent în acest domeniu, cu precădere cele legate de detectarea și localizarea scurgerilor din conducte.

Lucrarea este structurată în cinci capitole, care vor fi descrise succint în cele ce urmează.

**Capitolul 1** caracterizează pe scurt rețelele pentru transportul produselor petroliere prin conducte. În ceea ce privește sarcinile și riscurile asociate transportului, este argumentat faptul că îndeplinirea celor trei categorii de obiective aferente unui proces tehnologic (calitate, eficiență, securitate) se poate realiza numai în condițiile unei conduceri performante, susținută inclusiv de monitorizarea automată.

**Capitolul 2** este destinat analizei stadiului actual al realizărilor privitoare la monitorizarea automată a sistemelor de transport al produselor petroliere prin conducte. Sunt prezentate tehnologii semnificative referitoare la sistemele de măsurare, precum și implementarea sistemelor moderne de monitorizare bazate pe elemente de procesare precum automate logice programabile sau microcontrollere. O atenție deosebită este acordată sistemelor de detecție și localizare a scurgerilor din conducte (LDS – Leak Detection System), prin prezentarea diferitelor metode de detecție, precum și a criteriilor de evaluare a performanțelor sistemelor LDS.

**Capitolul 3** abordează modelarea și simularea procesului de transport al produselor petroliere prin conducte. În prima secțiune a capitolului sunt prezentate pe scurt câteva noțiuni și

mărimi specifice produselor petroliere și mișcării acestora prin conducte. În subcapitolul care abordează din punct de vedere sistemic procesul de transport, ca subsistem al unui sistem automat, sunt identificați parametrii aferenți procesului, sunt prezentate noțiuni privind modelarea matematică a acestuia și sunt identificate proprietățile sistemului automat considerat. În același capitol 2 sunt prezentate ecuațiile ce modelează procesul de curgere prin conducte, în regim staționar și în regim dinamic. În ambele cazuri, sunt prezentate aplicații dezvoltate și implementate de către autoare într-un mediu vizual de programare, aplicații destinate simulării curgerii produselor petroliere prin conducte.

**Capitolul 4** evidențiază contribuțiile autoarei referitoare la dezvoltarea unui sistem de monitorizare automată a procesului de transport al produselor petroliere prin conducte, respectiv propunerea unui sistem cu o structură parțial distribuită, care utilizează drept unități distribuite de control, sisteme cu microcontroller. În subcapitolele 4.3 și 4.4 se prezintă sistemul de achiziție a datelor SDMAPT, proiectat și realizat de către autoare. Acest sistem îndeplinește funcția de monitorizare a unui proces ipotetic de transport, care include măsurarea temperaturii, presiunii și a debitului în mai multe puncte, cu transmisia datelor la un sistem central. Sistemul SDMAPT conține o unitate centrală de control (un sistem cu microcontroller Microchip PIC32MX) care primește date de la două unități mobile subordonate, printr-o comunicație wireless, realizată cu ajutorul unor module de radio-frecvență XBee. Pe unitățile mobile există câte trei senzori - pentru presiune, debit și temperatură.

Având în vedere că o caracteristică a procesului de transport prin conducte este distribuția sa pe suprafețe largi, în subcapitolul 4.5 este propus un sistem distribuit de monitorizare automată a procesului de transport (SDMAPT v.1), constituit din mai multe unități distribuite de control de tip SDMAPT. Pentru acest sistem de monitorizare este implementată o aplicație de nivel înalt (numită AMAPT-DLS) care centralizează și monitorizează în timp real datele primite de la unitățile distribuite. Aplicația conține și un modul important care permite sistemului SDMAPT v.1 să funcționeze ca un sistem LDS (Leak Detection System). Pentru detectarea scurgerilor din conductă se propune o metodă bazată pe modelarea tranzitorie în timp real (RTTM – Real Time Transient Modeling) – prin utilizarea modelului matematic al curgerii prin conducte prezentat în capitolul 3 al lucrării. Pentru localizarea scurgerii și estimarea diametrului spărturii sunt utilizate metode bazate pe analiza presiunii și respectiv a echilibrului de volum.

**Capitolul 5** evidențiază principalele concluzii, o sinteză a contribuțiilor lucrării, la care se adaugă posibile direcții de continuare a cercetărilor în acest domeniu.

Abstract of doctoral thesis entitled

**CONTRIBUTIONS TO THE AUTOMATIC MONITORING OF PIPELINE SYSTEMS FOR PETROLEUM PRODUCTS TRANSPORTATION**

Doctoral student:

math. **DIȚU (TUDORICĂ) DANIELA**

Doctoral advisor:

prof. **NICOLAE PARASCHIV**

**CONTENT**

Introduction.....	6
Chapter 1.Characterization of networks for pipeline transportation of petroleum products.....	9
1.1. History and dynamics of pipeline transportation.....	9
1.1.1. Methods for petroleum products transportation.....	9
1.1.2. International pipeline transport.....	12
1.1.3. National pipeline transport.....	17
1.2. Pipeline transport infrastructure.....	20
1.2.1. Pipes.....	20
1.2.2. Sources of pressure.....	22
1.2.3. Storage solutions.....	24
1.3. Tasks and risks of pipeline transport.....	25
1.3.1. Quality parameters of pipeline transport.....	26
1.3.2. Pipeline transport efficiency.....	26
1.3.3. Risks of pipeline transport and environmental security.....	26
1.4. Partial conclusions.....	29
Chapter 2. Current status of the achievements on the automatic monitoring of pipeline systems for petroleum products transportation.....	31
2.1. Automatic monitoring systems.....	31
2.1.1. Role of monitoring in process automation.....	31
2.1.2. Measurement systems. Metrological considerations.....	32
2.1.3. Standards in metrology of pipeline transportation of petroleum products.....	37
2.1.4. SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition).....	40
2.2. Measured parameters in the pipeline and associated transducers.....	46
2.2.1. Pressure measurement.....	46
2.2.2. Flow measurement.....	48
2.2.3. Temperature measurement.....	50
2.3. The processing elements used in modern monitoring systems.....	51
2.3.1. Evolution of monitoring systems.....	51

2.3.2.	PLCs.....	54
2.3.3.	Microcontrollers.....	57
2.4.	LDS – Leak Detection Systems .....	57
2.4.1.	Methodsofpipelineleak detection .....	58
2.4.2.	Criteria forperformance evaluationofleak detectionsystems.....	62
2.5.	Modern methodsof investigating thecondition ofthe pipes .....	66
2.5.1.	Pipeline inspection robots(pigs).....	66
2.5.2.	Intelligentpipes.....	67
2.6.	National achievements in automatic monitoring of pipelines .....	69
2.7.	Partial conclusions .....	70
Chapter 3. Contributions regardingthe modeling andsimulation oftransportof petroleum productsby pipeline.....		71
3.1.	General terms offluid flowthrough pipes .....	71
3.1.1.	Conceptandphysical quantitiesof fluidmovementthrough pipes .....	71
3.1.2.	Classification offluidmovement.....	75
3.2.	Systemic approach tothe processflowthrough pipes .....	78
3.3.	Modeling and simulation ofsteadyflowof petroleum productsby pipeline.....	82
3.3.1.	Mass conservation equation .....	82
3.3.2.	Momentum conservation equation.....	84
3.3.3.	Energy conservation equation.....	85
3.3.4.	Hydraulicloss coefficient .....	86
3.4.	Contributionsregarding the modelingand simulation ofnon-steady stateflowpetroleum productspipeline.....	95
3.4.1.	Simplifying hypothesesof the model.....	96
3.4.2.	Solvingnumericallythe equationsof conservation .....	97
3.4.3.	Initialand boundaryconditions.....	102
3.4.4.	NumericalSimulatorforunsteadyflowthrough pipes .....	104
3.4.5.	Flowmodel validation .....	112
3.5.	Partial conclusions .....	113
Chapter 4. Contributions to thedevelopment of a systemfor monitoringthe processof transportingpetroleum productsby pipeline.....		115
4.1.	Microcontrollersfacilitiesto be includedin theautomation devices.....	115
4.2.	Familyofmicrocontrollers.....	120
4.3.	Practical implementationof amicrocontrollersystemfor data acquisition.....	125
4.3.1.	Architecture of data acquisitionsystem SDMAPT .....	125
4.3.2.	The structure of thecentral control unit.....	126
4.3.2.1.	Starter Kit PIC32MX795F512L-80I/PT .....	127
4.3.2.2.	Extension Board I/O DM320002 .....	130



4.3.2.3. The interface board .....	131
4.3.3. The structure of themobile units .....	133
4.3.4. Integrationof distributedunits in data acquisitionsystemSDMAPT .....	136
4.4. Developa web applicationto monitor and controlmicrocontroller systemSDMAPT .....	137
4.4.1. TCP/IP Microchip Stack .....	137
4.4.2. Developingweb applicationfor monitoringand control ofSDMAPT.....	141
4.5. Contributions to thedistributedsystem simulationfor monitoring anddevelopment of ahigh-levelapplicationsfor centralizingand monitoring data.....	149
4.5.1. Developingwebsites fordata transmissionfromthemicrocontrollersystem to a high-level application.....	150
4.5.2. Simulation of automaticdistributed monitoringsystemSDMAPTv.1 .....	150
4.5.2.1. The architecture ofthe monitoring systemdeveloped .....	151
4.5.2.2. Simulation ofthreeunits distributedcontrol.....	152
4.5.2.3. AMAPT-DLS applicationfor centralizingdata frommicrocontrollersystems.....	154
4.6. Use ofSDMAPTv.1for detecting and locatingleaks inpipelines .....	157
4.6.1. Leakdetectionusing real timetransientmodeling method(RTTM).....	158
4.6.2. Location ofleakageandleakdiameterestimationusing the methodsanalyzepressure andvolumebalance.....	161
4.6.3. Evaluation ofsystem performanceSDMAPTv.1/AMAPT-DLSfor detecting and locatingleaks inpipelines .....	166
4.7. Partial conclusions .....	171
Chapter 5. General conclusions, summary ofcontributions,possible directionsfor furtherresearch.....	172
5.1.General conclusions .....	172
5.2.Summary of contributions.....	175
5.3.Possible directions for further research.....	176
Bibliography .....	177
Notations.....	182
Glossaryandtrademarks.....	183
Indexof Figures .....	187
Indexof Tables .....	189
APPENDIX.....	190
APPENDIX 1. Examples oftransducersusedin transportationof petroleum productsby pipeline .....	190
APPENDIX 2. Facilitiesoffered by themicrocontrollerMicrochip PIC32MX795F512L .....	192
APPENDIX 3. XBeeandXBee-PRORF modules, description and specifications .....	194
APPENDIX 4. C#code for simulationof themicrocontroller .....	196
APPENDIX 5. C#code for the applicationAMAPT-DLS.....	203

**Keyword:** monitoring, automatic, microcontroller, pipeline, modeling, leak detection, location

## Summary

Pipeline transport is the most common, effective and safe means of transporting petroleum products. Achieving quality, efficiency and safety of this process can be performed including automatic monitoring performance solutions.

In this context, this thesis aims to provide some contributions on the issue of automatic monitoring complex system transport petroleum products by pipeline. The general objectives concerned in this paper refer to the following:

- analyze the current state of the achievements on the automatic monitoring system transport petroleum products by pipeline;
- research on systemic approach to process pipeline;
- development and testing simulation models associated transport systems;
- development of automatic monitoring the process of transporting petroleum products by pipeline;
- using the proposed monitoring system detecting and locating leaks in pipelines.

Research to achieve the thesis was based on the following steps:  
- A comprehensive documentary about the automatic monitoring of pipeline systems;  
- Practical research laboratories of the Department of Hydraulic Well Drilling, Extraction and transportation of hydrocarbons from the Petroleum-Gas University of Ploiesti;  
- Visit to the company SC Conpet S. A. Ploiesti, which have contributed to the belief that the efficiency of transport depends on how it is known and managed. Discussions held during these visits, the author became aware of the current achievements concerning the transportation process monitoring (SCADA system implemented in the company Conpet), and the limitations that currently exist in this area, especially those related to the detection and locating leaks in pipelines.

The paper is structured in five chapters, which will be described briefly below.

**Chapter 1** briefly characterizes networks for the transport of oil through pipelines. Regarding the tasks and risks associated transport is argued that the achievement of the three objectives related to a technological process (quality, efficiency, security) can be achieved only if performance leadership supported including automatic monitoring.

**Chapter 2** is intended for the analysis of the current state of achievements regarding automatic monitoring systems for pipeline transportation of petroleum products. Significant technologies are presented on the measurement systems and the implementation of modern systems based on processing elements such as programmable logic computers or microcontroller. Particular attention is paid to systems of detection and localization of leaks in pipes (LDS - Leak Detection System) by presenting different detection methods and performance evaluation criteria for LDS systems.

**Chapter 3** presents the modeling and simulation of transport of petroleum products by pipeline. The first section of the chapter summarizes some concepts and specific quantities of petroleum products and their movement through pipelines. In section addressing systemic approach of the transport process, as a subsystem of an automated system, are identified related process parameters, are presented notions on its mathematical modeling and system properties are identified. The next sections present the equations that models the flow through pipes, the steady and dynamic conditions. In both cases, are presented applications developed and implemented by the author in a visual programming environment for simulation of petroleum products flow.

**Chapter 4** highlights the contributions of the author on the development of a system for monitoring the process of transporting petroleum products by pipeline, with the proposal of a distributed system with a partial structure, using as distributed control units systems with microcontroller. In subsections 4.3 and 4.4 is presented SDMAPT data acquisition system designed and implemented by the author. This system monitors the transport of a hypothetical process that includes measuring temperature, pressure and flow at several points, the data transmission to a central system. SDMAPT system includes a central control unit (a microcontroller Microchip PIC32MX) which receives data from two mobile units subordinated through a wireless communication accomplished using XBee RF modules. The mobile units have three sensors - pressure, flow and temperature.

Since a characteristic of process pipeline is distributed to large area, in Section 4.5 was proposed a distributed system for automatic monitoring of the transport process (SDMAPT v.1) consisting of several units distributed control SDMAPT type. For this monitoring system is implemented an application (called AMAPT-DLS) that centralizes and monitors real-time data from distributed units. The application also includes a module enabling SDMAPT v.1 system to function as an LDS (Leak Detection System). For leak detection in pipeline is proposed a method based on real-time transient modeling (RTTM - Real Time Transient Modeling) - using the mathematical model of flow through pipes presented in Chapter 3. To locate the leak and for the leak diameter estimation are used methods based on the analysis of pressure and volume balance respectively.

**Chapter 5** highlights the general conclusions, a summary of the thesis contributions and possible directions for further research in this area.