

**Frederico dos Santos Liporace**

**Planejadores para transporte  
em polidutos**

**TESE DE DOUTORADO**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA  
Programa de Pós-graduação em  
Informática**

Rio de Janeiro  
Setembro de 2005

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Frederico dos Santos Liporace**

## **Planejadores para transporte em polidutos**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Informática

Orientador: Prof. Ruy Luiz Milidiú

Rio de Janeiro  
Setembro de 2005



**Frederico dos Santos Liporace**

**Planejadores para transporte em polidutos**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Informática Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Ruy Luiz Milidiú**

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Casanova**

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Arndt Von Staa**

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Géerson Gomes Cunha**

COPPE/UFRJ

**Prof. Raul César Baptista Martins**

Consultor independente

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico —  
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 14 de Setembro de 2005

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Frederico dos Santos Liporace**

Graduou-se no ano de 1992 em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Obteve o título de mestre no ano de 1995 em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro.

#### Ficha Catalográfica

Liporace, Frederico dos Santos

Planejadores para transporte em polidutos/ Frederico dos Santos Liporace; orientador: Ruy Luiz Milidiú. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2005.

120 f. ; 30 cm

1. Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática - Teses. 2. Inteligência artificial. 3. Arcabouços de software. 4. Simulação a eventos discretos. 5. Planejamento automático I. Milidiú, Ruy Luiz. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

A minha família, em especial esposa e filhos pelo apoio e paciência com o marido e pai muitas vezes estressado e sem tempo, principalmente durante a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador e amigo Prof. Ruy Milidiú, por compartilhar sua experiência e conhecimento nos últimos anos.

Aos membros da banca examinadora, pelos valiosos comentários incorporados ao texto final desta tese.

Ao pessoal do Laboratório de Engenharia de Algoritmos e Redes Neurais, em especial a Artur Alves Pessoa, Raúl Renteria e José Alberto Sardinha, pelo ambiente agradável e sempre propício a discussões de alto nível.

À equipe da Petrobras pela apresentação e discussão do problema que motivou minha pesquisa, em especial para Luiz Fernando Bernardo e Mariza Aires (CENPES) , Luís Barreto, Napoleão, Édson Ivanouskas e Luís Ignácio (Transpetro).

A Joerg Hoffman e Stephan Edelkamp pelo trabalho conjunto na criação do benchmark do Pipesworld.

Ao CNPq pela bolsa concedida para os estudos.

## Resumo

Liporace, Frederico dos Santos; Milidiú, Ruy Luiz. **Planejadores para transporte em polidutos**. Rio de Janeiro, 2005. 120p.

Tese de Doutorado — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Oleodutos têm um papel importante no transporte de petróleo e de seus derivados, pois são a maneira mais eficaz de transportar grandes volumes por longas distâncias. A motivação deste trabalho é que uma parte não negligenciável do preço final de um derivado de petróleo é influenciada pelo custo de transporte. Apesar disso, apenas alguns autores trabalharam neste problema específico, a maioria utilizando técnicas de programação inteira. Este trabalho analisa a utilização de técnicas de inteligência artificial, arcabouços de software e simulação discreta orientada a eventos para a construção de planejadores automáticos capazes de lidar com instâncias reais de problemas de transporte em oleodutos. A primeira contribuição dessa tese é a especificação de um novo domínio para problemas de planejamento, denominado PIPESWORLD. Este domínio é inspirado no problema de transporte em oleodutos e especificado em PDDL. Por sua estrutura original, ele foi incorporado ao benchmark oficial da “4th International Planner Competition”. Mesmo sendo uma simplificação do problema original, o PIPESWORLD se mostra um domínio bastante desafiador para o estado da arte dos planejadores. É demonstrado também que problemas de decisão derivados de diversas configurações do PIPESWORLD são NP-Difíceis. A segunda contribuição dessa tese é o arcabouço de software de código livre PLANSIM. Este arcabouço incorpora uma máquina de busca que pode utilizar diversas estratégias, e define uma estrutura que facilita a construção de planejadores automáticos baseados em busca heurística direta que utilizam como modelo do processo a ser planejado simuladores orientados a eventos discretos. A terceira contribuição da tese é a instanciação do PLANSIM para a construção de um planejador automático capaz de tratar instâncias reais de planejamento de transporte em oleodutos, denominado PLUMBER 2. A utilização de técnicas de simulação discreta orientada a eventos para a representação do modelo do sistema a ser planejado permite que este seja bastante fiel ao problema original. Isto somado ao uso do PLANSIM facilita a construção de planejadores capazes de lidar com instâncias reais.

## Palavras-chave

Inteligência Artificial, Arcabouços de Software, Simulação a Eventos Discretos, Planejamento Automático, Sequenciamento em Oleodutos.

## Abstract

Liporace, Frederico dos Santos; Milidiú, Ruy Luiz. **Pipeline Transportation Planners**. Rio de Janeiro, 2005. 120p. PhD. Thesis — Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pipelines have an important role in oil and its derivatives transportation, since they are the most effective way to transport high volumes through long distances. The motivation for this work is that a non negligible part of the final price for those products are due to transportation costs. Few authors have addressed this problem, with most of the previous work using integer programming techniques. This work analyses the use of Artificial Intelligence techniques, discrete event simulators and software frameworks for building automated planners that are able to deal with real-world oil pipeline transportation instances. The first contribution of this thesis is the specification of a new planning domain called PIPESWORLD. This domain is inspired by the oil pipeline transportation problem, and is defined in PDDL. Due to its original structure, the PIPESWORLD domain has been incorporated to the 4th International Planning Competition benchmark. Even being a simplification of the original problem, PIPESWORLD instances in the benchmark are challenging to state of art solvers. It is also shown that decision problems based on PIPESWORLD configurations are NP-Hard. The second contribution of this thesis is the PLANSIM open-source framework. This framework incorporates a search engine that may use several different strategies, and defines a structure that facilitates the construction of automated planners based on heuristic forward search that use discrete event simulators as the model for the process to be planned. The third contribution of this thesis is a PLANSIM instantiation that results in an automated planner able to deal with real-world oil pipeline transportation instances, called PLUMBER 2. The use of discrete event simulation techniques for the model of the system to be planned allows this model to be very close to the original problem. This, in conjunction with PLANSIM usage, facilitates the construction of planners that are able to cope with real-world instances.

## Keywords

Artificial Intelligence, Software Frameworks, Discrete Event Simulators, Automated Planning, Pipeline Scheduling.

## Conteúdo

1	Introdução	<b>12</b>
2	Transporte em polidutos e abordagens para seu planejamento	<b>14</b>
2.1	Oleodutos, polidutos e gasodutos	14
2.2	O processo de transporte em oleodutos	15
2.3	Planejamento e escalonamento	20
2.4	Problema de planejamento em redes de oleodutos	21
2.5	Revisão bibliográfica	22
2.6	Abordagem proposta	23
3	Pipesworld 1 e 2	<b>26</b>
3.1	A linguagem PDDL	26
3.2	Pipesworld 1	27
3.3	Pipesworld 2	42
3.4	Conclusões	44
4	Resultados da IPC-4	<b>46</b>
4.1	A Competição Internacional de Planejamento	46
4.2	O benchmark Pipesworld utilizado no IPC-4	47
4.3	Análise dos resultados	51
4.4	Conclusões	66
5	Análise de complexidade	<b>68</b>
5.1	Revisão bibliográfica	68
5.2	Restrição de interface com número variável de produtos	69
6	A primeira versão do Plumber	<b>74</b>
6.1	Planejamento como busca, a abordagem clássica	74
6.2	Arquitetura	80
6.3	Resultados	83
6.4	Conclusões	87
7	PLANSIM, um arcabouço para agentes planejadores	<b>91</b>
7.1	Estrutura do arcabouço	92
7.2	Exemplo de instanciação	100
8	A segunda versão do Plumber	<b>102</b>
8.1	Definição do problema	102
8.2	Instanciação do PLANSIM	103
8.3	O simulador a eventos discretos, SOL	103
8.4	Ações	105
8.5	Heurísticas	106
8.6	Objetivos	109
8.7	Refinamento dos eventos do simulador	109

8.8	Resultados	110
8.9	Conclusões	112
9	Conclusão e trabalhos futuros	114
	Referências Bibliográficas	115

## Lista de Figuras

2.1	Exemplo de rede de oleodutos	16
3.1	Exemplo de instância do Pipesworld	28
3.2	Exemplo de instância com reversão	38
3.3	Solução para a instância de reversão	38
3.4	Solução para a instância de interface	39
3.5	Instância com restrição de tancagem apertada	40
3.6	Solução trivial para a instância de tancagem	40
3.7	Solução para instância com tancagem apertada	40
3.8	Instância com várias opções de roteamento	41
3.9	Solução da instância de roteamento	41
3.10	Solução que utiliza ciclos	42
4.1	Topologias de rede utilizadas no IPC-4 (a) e uma rede real (b)	48
4.2	Grafo de interface de produtos do benchmark do IPC-4	49
4.3	<i>notankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos, grupo 1	52
4.4	<i>notankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos, grupo 2	52
4.5	<i>notankage</i> , tempo de execução, ótimos	53
4.6	<i>notankage</i> , número de ações	53
4.7	<i>notankage</i> , makespan	54
4.8	<i>tankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos, grupo 1	55
4.9	<i>tankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos, grupo 2	56
4.10	<i>tankage</i> , tempo de execução, ótimos	56
4.11	<i>tankage</i> , número de ações	57
4.12	<i>tankage</i> , makespan	57
4.13	<i>temporal-no-tankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos	58
4.14	<i>temporal-no-tankage</i> , tempo de execução, ótimos	59
4.15	<i>temporal-no-tankage</i> , número de ações	59
4.16	<i>temporal-no-tankage</i> , makespan	60
4.17	<i>temporal-tankage</i> , tempo de execução, sub-ótimos	61
4.18	<i>temporal-tankage</i> , tempo de execução, ótimos	62
4.19	<i>temporal-tankage</i> , número de ações	62
4.20	<i>temporal-tankage</i> , makespan	63
4.21	<i>temporal-no-tankage-deadlines</i> , tempo de execução, sub-ótimos	64
4.22	<i>temporal-no-tankage-deadlines</i> , makespan	65
5.1	Exemplo de grafo de interface	70
5.2	Estado inicial do problema S-PPI	70
5.3	Exemplo de construção das bateladas em II. $G$ é mostrado na esquerda, enquanto o conjunto	
6.1	Exemplo de procedimento de busca direta no Pipesworld	75
7.1	Estrutura geral do PLANSIM	93
7.2	Gerenciamento do espaço de estados visitados	94
7.3	Implementação das estratégias de busca	96

7.4	Interface para simulador a eventos discretos	98
7.5	Objetivos, planos e funções heurísticas	98
7.6	Instância de um problema de planejamento	99
7.7	Instanciação do PLANSIM para solução do Blocksworld	100
8.1	Instanciação do Plumber 2 a partir do PLANSIM	103
8.2	Exemplo de rede de oleodutos	106
8.3	Exemplo de perfil de tancagem	107
8.4	Outro estado para a rede de oleodutos	108

## Lista de Tabelas

6.1	Comparação do tempo de execução, Plumber x FF	84
6.2	Comparação do tamanho do plano, FF x Plumber	85
6.3	Instâncias sem tancagem resolvidas	86
6.4	Instâncias com tancagem resolvidas	86
6.5	Tamanho do plano, sem tancagem, som. de distâncias	87
6.6	Tamanho do plano, sem tancagem, som. de distâncias mp	88
6.7	Tamanho de plano, tancagem, som. de distâncias	89
6.8	Tamanho do plano, tancagem, som. de distâncias mp	90