

5º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Um Modelo de Simulação das Operações de Transporte de Produtos em uma Rede de Dutos

AUTORES:

Deisi Spricigo - deisi@cpgei.ct.utfpr.edu.br

Ricardo Lüders - luders@utfpr.edu.br

INSTITUIÇÃO:

UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 5º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás- 5º PDPETRO, realizado pela a Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás-ABPG, no período de 15 a 22 de outubro de 2009, em Fortaleza-CE. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 5ºPDPETRO.

UM MODELO DE SIMULAÇÃO DAS OPERAÇÕES DE TRANSPORTE DE PRODUTOS EM UMA REDE DE DUTOS

Abstract

Currently in Brazil, there is an extensive pipeline network to transport oil and its derivatives. This transport must be done in an efficient way, minimizing loss, operational costs and the transfer time. The transfer of products between different areas can be made through a single pipeline or a pipeline network. The areas can be ports, refineries, terminals or final customers. There are several studies in literature on scheduling transfer and storage operations of products in a pipeline system. Most of them present optimization models to, for example, obtain the best performance in terms of the transfer in a given time frame, use of resources, energy costs and inventories. Although there are complex optimization and simulation models in this area, there is a growing interest in models that contain fewer details of the fluid-dynamic flow, but that provide more information for operational decision making of a pipeline network. This paper presents a discrete event simulation model in ARENA, which represents the operational behavior of a pipeline network. Transport in pipelines is performed by batches of products with specific volumes and routes. The total time for transfer on a pipeline network comprises since the beginning of the product pumping by the end of its receipt, and there are time intervals in which the product is stopped in the network, awaiting the arrival of new batches that push it, until being fully delivered to the final destination. First, it is proposed a statistical characterization of transportation times on different routes of the network with their probability distributions. There are different operational scenarios, in which the production and demand in each area of the network are changed, what may exert significant influence on the residence time of products in the network. The discrete event simulation of a pipeline network behavior based on parameters obtained from historical data allows evaluating real-world scenarios, considering inherent uncertainties in the operation of the network. This provides greater knowledge and reliability in scheduling operations, which can be optimized to obtain higher profits in the oil industry. The simulation results are compared with data from a real-world pipeline network and the influences of different scenarios of production and demand are evaluated.

Keywords: Operational research, discrete event simulation, oil transportation, pipeline network.

Introdução

Atualmente, no Brasil, os dutos desempenham papel fundamental no transporte de petróleo e seus derivados, interligando áreas de produção, portos, refinarias e centros consumidores. Sistemas de dutos transportam uma grande quantidade de diferentes tipos de petróleo e seus derivados a custos mais baixos que outros tipos de modais (KENJI, 2007). Ainda assim, é possível otimizar este transporte para ter uma redução de custos, conforme apontam estudos recentes (REKLAITIS, 1992; RELVAS, 2006; CAFARO, 2008).

Existem vários trabalhos presentes na literatura sobre a programação da operação de transferência e estocagem de produtos utilizando oleodutos (MÁS e PINTO, 2003). A maioria deles apresenta modelos de otimização para, por exemplo, obter o melhor desempenho em termos de transferência em um horizonte de tempo, utilização de recursos, custos energéticos e inventários. Outros são dedicados para a obtenção da programação ótima para a transferência em dutos (MAGATÃO, 2004). Há também trabalhos que combinam técnicas de otimização e de simulação para o planejamento das operações de transferência da indústria do petróleo (CHENG & DURAN, 2004).

Apesar de existirem modelos sofisticados para representar a transferência dos derivados de petróleo em dutos, particularmente modelos fluido-dinâmicos, há uma necessidade de modelos que

auxiliem na tomada de decisões operacionais. Para uma rede de dutos, por exemplo, várias combinações possíveis no uso dos dutos, gerando rotas interferentes, dificultam a programação das operações.

O transporte em uma rede de dutos é diferente de outros tipos de transporte, principalmente quanto à dificuldade em estimar de forma precisa o tempo que um produto leva desde a saída da origem até a chegada no destino. Bateladas dos produtos são introduzidas na rede através do bombeio em uma determinada vazão, mas para serem totalmente entregues no destino, é necessário que existam bateladas subsequentes para empurrá-las, já que os dutos devem operar sempre cheios. Um modelo de simulação a eventos discretos é uma boa forma de representar adequadamente este sistema (LIMA, 2002).

A proposta deste trabalho é apresentar um modelo de simulação a eventos discretos em ARENA, que utiliza dados históricos dos tempos de transporte para caracterizar diferentes rotas e dados de volumes transportados para caracterizar cenários de uma rede de dutos complexa. Os resultados obtidos com a simulação são então comparados com dados de um sistema real.

A seguir, será apresentada a metodologia utilizada, que contém as particularidades dos problemas em redes de dutos, a obtenção dos dados históricos, o desenvolvimento do modelo de simulação e a caracterização dos cenários. São então mostrados e discutidos os resultados obtidos, assim como as conclusões deste trabalho.

Metodologia

O uso de dutos para a transferência de petróleo ou derivados é feito interligando duas (único duto) ou mais áreas (rede de dutos). As áreas podem ser portos, refinarias, terminais ou clientes finais. Dada a eficiência do uso dos dutos como meio de transporte para petróleo ou derivados, há uma grande preocupação em melhorar a operação deste transporte de modo que sejam minimizadas as perdas, os custos operacionais ou, ainda, o tempo de transferência (BOSCHETTO, 2006).

O tempo total de transferência em uma rede de dutos compreende desde o início do bombeio do produto até o final de seu recebimento, sendo que há intervalos de tempo em que o produto fica parado na rede, esperando a chegada de uma nova batelada que o empurre. Bateladas são volumes de produtos com rotas determinadas a seguir. O interesse deste trabalho é avaliar estatisticamente esse tempo total de permanência na rede, de acordo com diferentes rotas que as bateladas podem seguir.

Na Figura 1 é apresentado um grafo da rede estudada neste trabalho. A rede possui 13 órgãos (produtores e consumidores) e 18 dutos, compreendendo 9 diferentes rotas utilizadas. A definição das rotas utilizadas, incluindo origem, destino e a sequência de dutos utilizada é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Definição das rotas.

Rota	Origem	Destino	Dutos
1	J	L	15
2	J	M	16,17
3	J	K	14, 13, 11, 10
4	B	A	1
5	B	D	2, 4, 6
6	B	G	2, 3, 8, 9
7	B	F	2, 5
8	L	C	12, 7
9	M	K	18, 13, 11, 10

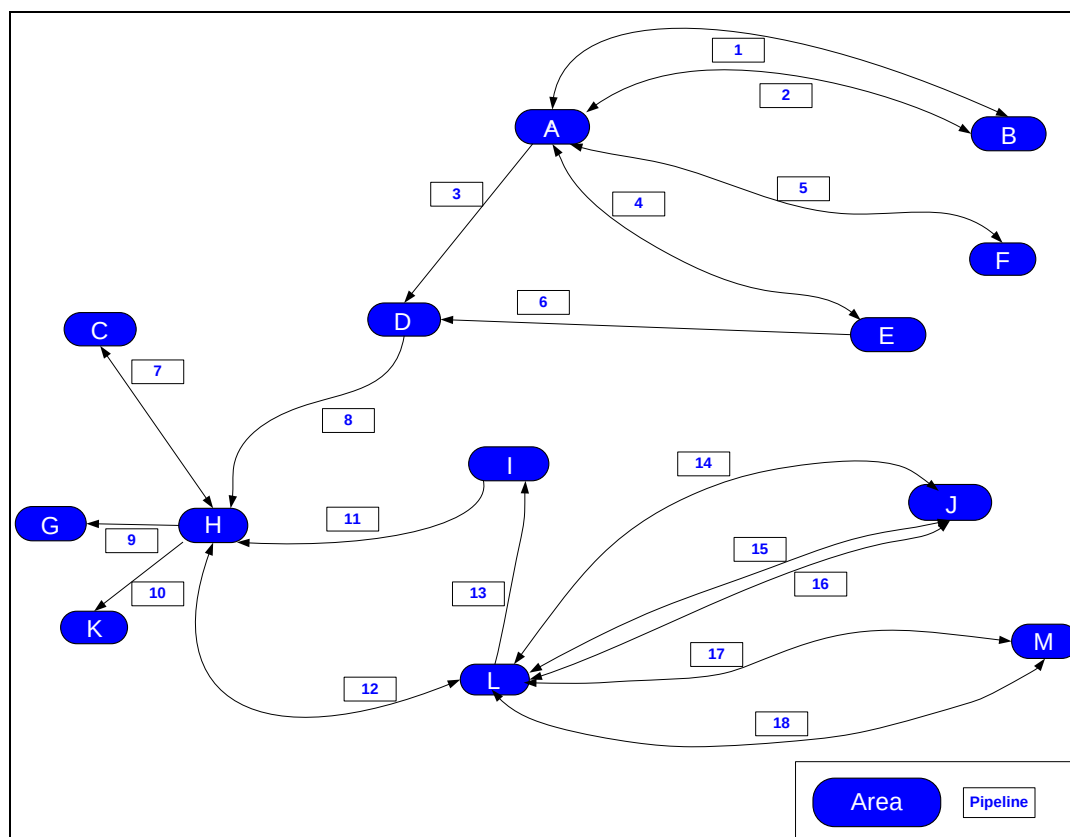


Figura 1 – Representação da rede de dutos.

No modelo proposto, o tempo de transporte em cada rota da rede de dutos é uma variável estocástica caracterizada por dados históricos. Para a obtenção destes dados, foram coletadas as informações de volume, tempo inicial de bombeio e tempo final de recebimento de todas as bateladas transportadas nas rotas de interesse. A partir destes dados, foi possível calcular o tempo de transporte médio por unidade de volume e ajustar distribuições de probabilidade para cada rota, conforme apresentado na Tabela 2. Este ajuste foi feito com o auxílio da ferramenta *Input Analyzer* do Arena.

Os dados históricos utilizados contemplam bateladas de 4 cenários diferentes. Um cenário é um período de operação que, neste caso, corresponde a um mês.

Tabela 2 – Tempo médio de transporte e distribuições de probabilidade ajustadas para cada rota.

Rota	Nº Bateladas	Tempo Médio (h/1000m ³)	Desvio Padrão	Distribuição	Expressão
1	48	5.6	2.3	Normal	NORM(5.57, 2.27)
2	23	14.6	6.1	Weibull	2.5 + WEIB(13.67, 35.5)
3	24	17.7	8.4	Normal	NORM(17.68, 8.38)
4	18	2.0	0.7	Triangular	TRIA(1.00, 1.08, 4.00)
5	44	5.8	1.8	Lognormal	1.83 + LOGN(4.03, 1.75)
6	28	7.4	3.0	Normal	NORM(7.40, 2.95)
7	100	7.5	5.3	Lognormal	LOGN(7.52, 5.67)
8	7	6.7	5.7	Lognormal	1.00 + LOGN(5.50, 5.42)
9	10	29.5	15.2	Beta	8.83 + 55.17 * BETA(13.07, 21.67)

Estes dados, apresentados na Tabela 2, foram utilizados em um trabalho anterior, que será publicado no XLI SBPO – Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, em que foi possível concluir que os tempos de transporte representados por variáveis estocásticas podem ser utilizados para simular as operações da rede e obter boas estimativas do tempo de recebimento dos produtos no destino. No

presente trabalho, além de caracterizar as rotas através dos tempos de transporte, serão caracterizados os cenários de acordo com o volume transportado em cada rota, sendo possível analisar a relação entre volume transportado e tempo de transporte por rota.

O modelo em Arena é composto por blocos interconectados, cada um com uma função específica em relação às entidades do modelo. O modelo proposto tem uma estrutura bastante simples, na qual o bloco principal é um bloco de processo. Um esquema do modelo é mostrado na Figura 2.

As entidades que entram na rede são as bateladas de produtos a serem bombeadas. Ao passarem pelo bloco “*Read data*”, as seguintes informações são tomadas como atributos das entidades: Código; Produto; Volume; Rota; Tempo inicial de bombeio.

Cada entidade é então processada de acordo com suas informações (volume, rota e tempo inicial de bombeio). As outras informações são utilizadas apenas para fins de relatório e apresentação, mas não têm influência no resultado da simulação.



Figura 2 – Esquema do modelo em Arena.

O bloco “*Process entities*” é composto por vários outros blocos, cuja representação pode ser vista na Figura 3. Neste submodelo do bloco “*Process entities*”, as bateladas seguem para suas rotas pré-determinadas, caracterizadas pelas distribuições de probabilidades do seu tempo de transporte, implementado no modelo como um tempo de atraso.

O bloco “*Record data*”, mostrado na Figura 2, é usado para gravar os atributos de cada batelada, que são aqueles citados anteriormente na entrada das bateladas, mas agora também é gravado o tempo em que as bateladas deixaram o bloco “*Process entities*”, que corresponde ao tempo final de recebimento, ou seja, o momento que as bateladas foram entregues no destino.

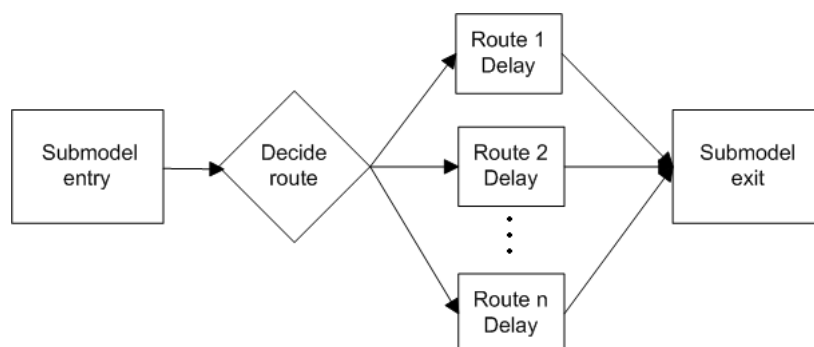


Figura 3 – Submodelo do bloco “*Process entities*”, referente à escolha das rotas.

Para testar o modelo, foram escolhidas bateladas de duas operações particulares, que não pertencem ao conjunto de dados históricos. Um cenário escolhido apresenta características semelhantes às dos cenários utilizados para a construção do modelo, e será chamado de Cenário Teste 1. O outro cenário, Cenário Teste 2, apresenta um comportamento bem diferente, pois algumas rotas não foram utilizadas.

A escolha desses cenários para testar o modelo tem o objetivo de analisar a influência do carregamento das rotas nos tempos de transporte, ou seja, verificar se para uma quantidade transportada diferente da dos cenários utilizados como dados históricos o tempo de transporte também será diferente. Assim, é possível identificar se o modelo de simulação é válido para o cenário a ser testado ou não.

A caracterização dos cenários, com base nos volumes transportados em cada rota, é apresentada na Tabela 3. Através dessa tabela, é possível comparar os volumes do Cenário Teste 1 e do Cenário Teste 2 com a faixa de volumes dos cenários dos dados históricos. Os volumes do Cenário Teste 1 estão quase todos dentro da faixa dos dados históricos ou bem próximos dos limites, sendo esperado então um comportamento parecido das rotas, com tempos de transporte próximos. Já o Cenário Teste 2 apresenta volumes bem diferentes, estando fora da faixa dos dados utilizados para a construção do modelo em todas as rotas.

A diferença nos volumes transportados de um cenário para outro se deve à diminuição ou até mesmo interrupção do fornecimento de produtos por alguns órgãos produtores.

Tabela 3 – Caracterização dos cenários segundo o volume transportado em cada rota.

Rota	Dados históricos			Cenário Teste 1	Cenário Teste 2
	Vol min (m ³)	Vol med (m ³)	Vol max (m ³)	Vol (m ³)	Vol (m ³)
1	106512	120500	134488	139000	3663
2	22388	37096	51803	40000	0
3	22123	25583	29042	26682	21600
4	25500	37700	49900	36400	60000
5	116746	139289	161832	147600	63897
6	75268	85846	96423	84000	58600
7	249429	270200	290971	356091	0
8	19814	43750	67686	75000	0
9	6355	19320	32285	32400	129570

Resultados e Discussão

Os resultados das simulações para cada cenário são apresentados na Tabela 4 e são comparados com dados reais.

Tabela 4 – Comparação entre a simulação e o cenário real.

Rota	Cenário Teste 1					Cenário Teste 2				
	Nº bateladas	Resultado Simulação		Cenário Real		Nº bateladas	Resultado Simulação		Cenário Real	
		Tempo Médio (h/1000m ³)	Desvio padrão	Tempo Médio (h/1000m ³)	Desvio padrão		Tempo Médio (h/1000m ³)	Desvio padrão	Tempo Médio (h/1000m ³)	Desvio padrão
1	14	5.7	0.8	4.6	1.1	1	6.6	X	2.4	X
2	4	13.4	1.4	17.4	3.9	0	X	X	X	X
3	7	19.7	2.4	13.2	4.6	3	16.2	1.7	6.0	2.2
4	4	2.3	0.4	1.9	0.5	6	2.2	0.3	2.2	0.6
5	12	6.0	0.5	5.4	0.8	6	6.0	0.8	7.3	4.7
6	6	7.7	0.8	6.9	2.8	4	7.5	0.9	12.8	3.7
7	23	7.1	1.9	3.9	2.0	0	X	X	X	X
8	3	7.2	2.9	7.5	8.1	0	X	X	X	X
9	4	30.3	4.3	22.5	4.8	16	32.7	5.0	7.6	2.2

A partir da análise dos resultados apresentados na Tabela 4, de um modo geral, os tempos médios simulados do Cenário Teste 1 ficaram próximos dos tempos reais para a maioria das rotas, enquanto para o Cenário Teste 2 a diferença foi bem maior, como já era esperado. Vale lembrar que, apesar de algumas médias serem diferentes, é necessário considerar o desvio padrão e comparar o intervalo obtido. Obviamente, quanto menor o desvio padrão, mais comportada é a rota, apresentando tempos de transporte mais próximos para cada batelada.

Porém, a influência dos volumes transportados nos tempos não é bem clara. Para alguns casos, um volume próximo levou a ocorrência de um tempo próximo, como para as rotas 4, 5 e 6 do Cenário Teste 1. Mas em outros casos, mesmo o volume transportado sendo parecido, como na rota 3, os tempos resultantes da simulação foram bem diferentes dos tempos dos Cenários Reais.

Por outro lado, eram esperados tempos bem distintos quando os volumes transportados eram significativamente diferentes, o que não aconteceu em todos os casos. A rota 4, do Cenário Teste 2, apresenta um volume bem maior que nos outros cenários, mas mesmo assim apresentou praticamente o mesmo tempo de transporte.

Surge então, outra questão a ser analisada, que é a influência da quantidade de dutos que compõe as rotas no tempo de transporte. Por exemplo, a rota 4 apresentou tempos simulados bem próximos do real para os dois cenários, provavelmente por ser composta por apenas um duto, enquanto as rotas 3 e 9, que são formadas por uma sequência de 4 dutos apresentaram tempos mais distantes do esperado. Isso significa que quanto maior a quantidade de dutos que compõe uma rota, maior é a variabilidade dos tempos de transporte nesta, devido à interferência das outras rotas, tornando-se mais difícil prever o tempo de recebimento dos produtos no destino.

Conclusões

No presente trabalho foi proposto um modelo de simulação a eventos discretos do comportamento operacional de uma rede de dutos, a partir da caracterização de rotas por tempos de transporte estocásticos. Assim, o comportamento da rede pode ser simulado para diferentes cenários, obtendo o tempo aproximado de recebimento dos produtos em seus destinos. Os cenários testados foram caracterizados de acordo com os volumes movimentados em cada rota, para fornecer um embasamento para a interpretação dos resultados da simulação, indicando se o modelo é capaz de prever o comportamento do cenário em questão.

A vantagem deste modelo é a possibilidade de analisar o comportamento das bateladas de produtos, tendo uma estimativa do tempo que irão permanecer na rede, sem a necessidade de simular todas as operações simultâneas da rede e podendo avaliar as características de cada rota apropriadamente.

A caracterização dos cenários de acordo com os volumes transportados não foi suficiente para analisar a influência do carregamento da rota no tempo de transporte. Porém, foi possível perceber que o tempo de transporte é influenciado pela quantidade de dutos que compõe as rotas, havendo uma variabilidade maior devido à interferência de outras rotas.

Em trabalhos futuros deve ser definida uma boa forma de caracterização dos cenários e poderão ser utilizados os tempo de transporte de cada rota em um modelo de otimização, capaz de fornecer uma melhor programação das operações em redes de dutos.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo (ANP) e da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do Programa de Desenvolvimento de Recursos Humanos para o setor de petróleo, gás natural e biocombustíveis - UTFPR/PRH10.

Referências Bibliográficas

- Boschetto, S.N.** Otimização das operações de terminais petrolíferos usando técnicas de pré-processamento. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- Cafaro, D., Cerdá, J.** Dynamic scheduling of multiproduct pipelines with multiple delivery due dates. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 728-753, 2008.
- Cheng, L., Duran, M. A.** Logistics for world-wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, p. 897-911, 2004.
- Chwif, L., Medina, A.** Modelagem e Simulação de Eventos Discretos - Teoria & Aplicações, 2ª edição, Leonardo Chwif, 2007.
- Freitas Filho, P.J.** Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações Arena. 2ª edição. Florianópolis: Visual Books, 2001.
- Kelton, W. D. Sadowski, R. P. Sturrock, D. T.** Simulation with Arena. 3rd edition, McGraw-Hill, 2004.
- Kenji, M. H.** Otimização da programação de curto prazo de duto bidirecional de derivados de petróleo. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- Lima, C.A.A.** Riscos de atrasos na cadeia logística de petróleo. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- Magatão, L., Arruda, L. V. R., Neves Jr., F.** A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, p. 171-185, 2004.
- Más, R., Pinto, J.M.** A mixed-integer optimization strategy for oil supply in distribution complexes. *Optimization and Engineering*, v. 4 (2003) pp.23-64.
- Pinto Jr., O.P.F.** Desenvolvimento de uma ferramenta de análise de decisão para suprimento de refinarias de petróleo através de uma rede de oleodutos. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- Reklaitis, G. V.** Overview of scheduling and planning of batch process operations, *Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Batch Processing Systems*, Antalya, Turkey, p. 660-705, 1992.
- Relvas, S., Matos, H. A., Barbosa-Póvoa, A. P. F. D., Fialho, J., Pinheiro, A. S.** Pipeline scheduling and inventory management of a multiproduct distribution oil system. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 45, p. 7841-7855, 2006.