

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CABOTAGEM PARA ESCOAMENTO DE GRANÉIS LÍQUIDOS DE PLATAFORMAS OFFSHORE

AUTORES:

Luan da Silva Barbosa¹, João Inácio Soletti², João Paulo Lima de Moraes Barros³

INSTITUIÇÃO:

Bolsista PRH-40 ANP, luanlsb@hotmail.com, ¹Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, ²Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, ³Departamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 9º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. 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 9º PDPETRO.

MODELAGEM E OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE CABOTAGEM PARA ESCOAMENTO DE GRANÉIS LÍQUIDOS DE PLATAFORMAS OFFSHORE

Abstract

Currently, a major challenge for oil companies is to ensure a competitive level of oil production compatible with the resources available to the costs of extraction. Considering that the most significant part of oil extraction over the world occurs in offshore platforms, the aim of this work is to propose a logistics organization model of the transport liquid bulk of offshore platforms, via cabotage, to refineries on the coast that minimizes costs for transport and allocation of ships. In large industries, the transportation activity of raw materials, semi-finished or finished product is on average most of the logistics costs. At first, it performed a literature review to understand the modeling techniques and mathematical programming in transportation logistics. It was observed that the proposed problem is characterized as VRP (Vehicle Routing Problem), a generalization of the "Traveling Salesman Problem". The VRP is classified as NP-hard, in which the computational effort required to solve the mathematical model that is growing exponentially with the number of points to be covered. We selected four oil platforms draining its production to three refineries. It was decided to model the problem with predefined routes having already been optimized by the Matlab software, taking into account the order with minimum distance to each. The decision variables were: time spent for each vessel covering certain route; time each ship was docked; distance traveled for each vessel; number of times each ship traveled the same route; oil volume taken by each ship at a platform; volume of oil discharged in each port refinery; and the possibility of certain oil loading at one compartment of a ship. The objective function was defined as the cost to be minimized associated with time spent and distance traveled. Restriction inequalities have been prepared and the model was implemented and solved in GAMS software using the CPLEX solver. The model was validated from the results obtained.

1. Introdução

O transporte de graneis líquidos de plataformas *offshore* para a costa é realizado via tubulações ou via navios. Para grandes distâncias, torna-se inviável o transporte por tubulações. Devido ao fato de se tratar de grandes volumes, a indústria petrolífera não o realiza por via aérea, pois a receita não compensaria a despesa associado a esta atividade. Desta forma, a cabotagem se torna a alternativa mais sensata para resolver o problema de transporte. O problema de roteamento de veículos, a depender da quantidade de destinos a percorrer, pode ser de grande complexidade, como é o caso do roteamento de navios na indústria de petróleo. É classificado como *NP-hard*, no qual o esforço computacional exigido para a solução do modelo matemático que o representa cresce exponencialmente com o número de pontos a serem percorridos (GAREY e JONHSON, 1999). O presente trabalho teve por objetivo propor um planejamento logístico otimizado para o transporte de petróleo de plataformas *offshore* via cabotagem. Para isso, foram utilizadas técnicas matemáticas de programação linear inteira mista. Para a solução do problema proposto, foi utilizado o *software* GAMS (*General Algebraic Modeling System*), que é um pacote computacional com linguagem de modelagem própria e foi projetado para o desenvolvimento e solução de modelos de programação matemática complexa (BROOKE et al, 1997).

2. Metodologia

A princípio, foram determinados todos os conjuntos e seus parâmetros associados para poder estabelecer o modelo com suas restrições. Em seguida, foram geradas todas as rotas possíveis a serem traçadas pelos navios no *software* Matlab (*Matrix Laboratory*). Com os conjuntos, parâmetros e restrições, o modelo foi colocado em linguagem matemática para poder ser solucionado por meio de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) no *software* GAMS. Foi utilizado o *solver* CPLEX presente no *software* GAMS. O CPLEX apresenta um conjunto de algoritmos de otimização que produzem decisões lógicas e precisas. O algoritmo de *branch and bound*, presente neste *solver*, utiliza técnicas modernas de planos de corte e heurísticas de forma a possibilitar a resolução de problemas com número elevado de variáveis em tempo computacional adequado.

2.1 Geração do Modelo

Para a aplicação do modelo, foi criado um cenário hipotético onde se tem um conjunto de 3 portos referentes a 3 refinarias próximas a cada um deles, e um conjunto de 4 plataformas *offshore* espalhadas pelo mar. Dado um horizonte máximo de 30 dias para cada navio a ser utilizado, o modelo consistiu em representar a produção de dois diferentes tipos de óleo provenientes de cada plataforma sendo transportados para as refinarias para serem processados, com o menor custo referente à logística de transporte. Foram disponibilizados 4 navios cujas especificações estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações dos navios disponíveis

Navio	Velocidade média (km/h)	Capacidade de carga (m³)	Vazão de carga e descarga (m³/h)
Navio01	20	33000	3500
Navio02	17	34000	3000
Navio03	14	37000	4000
Navio04	14	37000	6000

Cada navio é dividido em compartimentos de volumes iguais: o Navio01 e o Navio02 têm 9 compartimentos, já o Navio03 e o Navio04 têm 10 compartimentos.

Foram atribuídas três parcelas de custo, em unidades monetárias (u.m.), para cada navio: custo de atracação associado ao tempo que o navio permanece parado fazendo carga ou descarga dos graneis líquidos; custo por distância percorrida nas rotas traçadas; custo por tempo de operação durante o percurso. Os dados de custo estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2. Custos associados dos navios

Navio	Por tempo de operação (u.m./dia)	Por tempo de atracação (u.m./dia)	Por distância percorrida (u.m./km)
Navio01	7500	5900	7
Navio02	8000	6000	7
Navio03	7500	5800	8
Navio04	8100	5800	8

Foi considerado um conjunto de quatro plataformas cuja produção será escoada para três refinarias no prazo de 30 dias. As plataformas produzem dois tipos de óleo diferentes, cada uma produz somente um tipo. Cada refinaria processará uma determinada quantidade de cada tipo de óleo. Ao serem carregados nos navios, os dois tipos de óleo não podem se misturar em um mesmo compartimento. A necessidade de escoamento de cada plataforma está disposta na Tabela 3, e as quantidades de óleo a ser processado por cada refinaria estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 3. Demanda de escoamento de óleo de cada plataforma

Plataforma	Volume de óleo (m³)	
	Óleo A	Óleo B
P1	525000	0
P2	0	300000
P3	420000	0
P4	0	75000

Tabela 4. Quantidade de óleo processado por cada refinaria

Refinaria	Volume de óleo (m³)	
	Óleo A	Óleo B
E1	570000	90000
E2	150000	405000
E3	225000	557000

A geração das rotas foi feita segundo a metodologia utilizada na dissertação “Planejamento e distribuição de derivados de petróleo via transporte marítimo” (SOLETTI, 2006). O número de rotas possíveis cresce exponencialmente com o número de pontos a percorrer. Vendo a Tabela 5, é possível entender como se dá o cálculo do número de rotas possíveis.

Tabela 5. Cálculo do número de rotas possíveis

Cenário	Refinaria de origem	P1	P2	P3	P4	P5	Refinaria de origem	Nº de rotas possíveis
1	1	x	x	x	x	x	1	$2^5 - 1 = 31$
2	1	x	x	x	x		1	$2^4 - 1 = 15$
3	1	x	x	x			1	$2^3 - 1 = 7$
4	1	x	x				1	$2^2 - 1 = 3$
5	1	x					1	$2^1 - 1 = 1$

O x é uma variável binária, sendo 1, se o navio passa pela plataforma Pn, ou 0 caso contrário. O modelo considera que o navio parte de um porto de refinaria, realiza a rota passando pelas plataformas e retorna para o porto de refinaria de origem. Ainda, para cada uma das rotas possíveis de cada cenário existem k! ordens de parada possíveis, sendo k o número de plataformas em que ocorrer parada. Por exemplo, a rota em que ocorrer parada em três plataformas (uma rota possível do cenário 3) pode ter 3! = 6 ordens de parada possíveis: P1:P2:P3; P1:P3:P2; P2:P1:P3; P2:P3:P1; P3:P1:P2; P3:P2:P1.

A Tabela 6 mostra as distâncias entre as plataformas de petróleo e a Tabela 7 mostra as distâncias entre as plataformas e as refinarias.

Tabela 6. Matriz de distâncias entre plataformas.

Distância (km)				
	P1	P2	P3	P4
P1	0	37,4	90,7	77,1
P2	37,4	0	59,8	86,1
P3	90,7	59,8	0	89,6
P4	77,1	86,1	89,6	0

Tabela 7. Matriz de distâncias entre plataformas e refinarias.

Distância (km)			
	E1	E2	E3
P1	44	63,1	117,7
P2	48,9	84,6	121
P3	107,6	106,2	105,6

P4	120	29,4	41,3
----	-----	------	------

No presente trabalho, para poder inserir as rotas como parâmetros na programação linear do modelo de otimização, as ordens de parada foram pré-estabelecidas utilizando-se programação no *software* Matlab. O programa foi elaborado de forma geral para qualquer quantidade de origens (refinarias) e destinos (plataformas). Inserindo-se no programa as matrizes de distâncias (Tabelas 6 e 7) entre os pontos do cenário, as distâncias de todas as rotas possíveis são calculadas (soma dos percursos: refinaria de origem-plataformas-refinaria de origem), distinguindo-se também as diferentes ordens de parada para uma rota possível. Com isso, o programa já fornece as rotas com ordens de parada de distância mínima, diminuindo consideravelmente o número efetivo de rotas possíveis no modelo de programação linear. Sendo 3 o número de refinarias de origem e 4 o número de plataformas de destino, obteve-se um cenário com 45 rotas possíveis: $3 \times (2^4 - 1) = 45$.

2.2 Estruturação Matemática do Modelo

Nesta seção será apresentada a estrutura do modelo em linguagem matemática.

2.2.1 Índices

e : representa a refinaria; n : representa o navio; r : representa a rota; p : representa a plataforma; c : representa o compartimento do navio; o : representa o óleo.

2.2.2. Conjuntos

E : Conjunto das refinarias; N : Conjunto dos navios; R : Conjunto das rotas; P : Conjunto das plataformas; C : Conjunto dos compartimentos; O : Conjunto dos óleos.

2.2.3. Parâmetros

v_n : Velocidade média do navio n (km/h); cap_n : Capacidade máxima de volume de carga de graneis no navio n (m³); ct_n : Custo por tempo de operação do navio n (u.m./dia); cd_n : Custo por distância percorrida pelo navio n (u.m./km); ca_n : Custo por tempo que o navio n permanece atracado (u.m./dia); vaz_n : Vazão de carga e descarga do navio n (m³/h); h : Horizonte de tempo de trabalho para cada navio (dias); $q_{e,o}$: Quantidade de óleo o que deve ser processada pela refinaria e (m³); $ext_{p,o}$: Quantidade de óleo o extraído (produzido) pela plataforma p (m³); $comp_{n,c}$: Capacidade do compartimento c do navio n (m³); $rotref_{r,e}$: Designação da refinaria e na rota r ; $a_{r,(p \text{ ou } dist)}$: Designação da plataforma p na rota r e designação da distância de percurso $dist$ atribuída à rota r .

2.2.4. Variáveis de Decisão

$tempop_{n,r}$: Tempo que o navio n leva para percorrer a rota r (dias); $tempat_{n,r}$: Tempo que o navio n permanece atracado nas plataformas da rota r (dias); $tempat_{n,r}$: Tempo total do navio n na rota r (dias); $disttot_{n,r}$: Distância total percorrida pelo navio n na rota r (km); $z_{n,r}$: Número de vezes que o navio n percorre a rota r ; $vole_{o,e}$: volume de óleo o a ser processado pela refinaria e ; $volp_{n,r,o,p}$: volume de óleo o que o navio n leva da plataforma p na rota r ; $x_{o,c,n,r}$: variável binária, 1 se o óleo o está no compartimento c do navio n ao percorrer a rota r , e 0 caso contrário.

2.2.5. Função Objetivo

A função objetivo a ser minimizada, dada pela Eq.(1), associa as parcelas de custo por tempo que os navios permanecem atracados, de custo por tempo de operação que os navios gastaram percorrendo as rotas e de custo por distância percorrida.

$$\text{Min obj} = \sum_{n \in N} \sum_{r \in R} tempat_{n,r} ca_n + tempop_{n,r} ct_n + disttot_{n,r} cd_n \quad (1)$$

2.2.6. Restrições

Cumprimento da programação de quantidade de óleo a ser processado pela refinaria:

$$vole_{o,e} = q_{e,o}, \forall o \in O, \forall e \in E \quad (2)$$

Cumprimento da demanda a ser escoada da produção das plataformas:

$$\sum_{n \in N} \sum_{r \in R} volp_{n,r,o,p} = Ext_{p,o}, \forall p \in P | a_{r,p} = 1, \forall o \in O \quad (3)$$

Tempo de viagem segundo a velocidade média do navio e distância percorrida:

$$z_{n,r} \frac{(a_{r,dist})}{24v_n} = tempop_{n,r}, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (4)$$

Tempo de atracação segundo a vazão de carga e descarga do navio e volume carregado:

$$\frac{2}{24} \sum_{o \in O} \sum_{p \in P | a_{r,p}=1} \frac{volp_{n,r,o,p}}{vaz_n} = tempat_{n,r}, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (5)$$

Tempo total. A Eq.(6) calcula o tempo total gasto por determinado navio em determinada rota:

$$temptot_{n,r} = tempop_{n,r} + tempat_{n,r}, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (6)$$

Cumprimento da demanda de escoamento de produção das plataformas para as refinarias em um tempo menor ou igual ao horizonte de tempo preestabelecido:

$$\sum_{r \in R} temptot_{n,r} \leq h, \forall n \in N \quad (7)$$

Distância total percorrida:

$$z_{n,r} a_{r,dist} = distot_{n,r}, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (8)$$

Volume de carga por rota:

$$\sum_{o \in O} \sum_{\substack{p \in P \\ a_{r,p}=1}} volp_{n,r,o,p} = z_{n,r} cap_n, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (9)$$

Unicidade de tipo de óleo em um mesmo compartimento:

$$\sum_{o \in O} x_{o,c,n,r} \leq 1, \forall c \in C, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (10)$$

Carga somente em rotas percorridas:

$$x_{o,c,n,r} \leq z_{n,r}, \forall o \in O, \forall c \in C, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (11)$$

Distribuição da carga nos compartimentos:

$$\sum_{\substack{p \in P \\ a_{r,p}=1}} volp_{n,r,o,p} \leq \sum_{c \in C} comp_{n,c} x_{o,c,n,r}, \forall o \in O, \forall n \in N, \forall r \in R \quad (12)$$

Volume transportado é igual a volume a ser processado:

$$(13)$$

$$vole_{o,e} \leq \sum_{n \in N} \sum_{\substack{r \in R \\ rotnref_{r,e}=1}} \sum_{p \in P} volp_{n,r,o,p} a_{r,p}, \forall o \in O, \forall e \in E$$

3. Resultados e Discussão

O modelo pode ser utilizado para diversos cenários diferentes, bastando alterar os valores dos parâmetros, pois foi estruturado de forma generalizada. A validação desse modelo foi baseada em um estudo de caso, utilizando os dados aproximados encontrados na literatura.

Os 4 navios disponíveis foram utilizados na solução do estudo de caso. Todos os navios realizaram cada uma das rotas traçadas apenas uma vez. A Tabela 8 mostra a designação das plataformas e refinarias para as rotas resultantes já indicando a ordem de parada em cada uma delas, tendo em vista que o navio sempre volta para a refinaria de origem a cada rota.

Observa-se que o Navio01 gasta o maior tempo pois é o mais utilizado para traçar as rotas. É o navio de maior velocidade média (20 km/h) e também o de menor custo por tempo de operação de viagem (7500 u.m./dia). Já o Navio04 gasta o segundo maior tempo (18,66 dias). É o navio de maior capacidade de carga (3700 m³) e maior vazão de carga e descarga (6000 m³/h).

Tabela 8. Designação das refinarias e plataformas em cada rota com indicação de ordem de parada.

		Refinarias			Plataformas			
		E1	E2	E3	P01	P02	P03	P04
Rotas	Rota001	1ª e 3ª			2ª			
	Rota002	1ª e 3ª				2ª		
	Rota003	1ª e 4ª			2ª	3ª		
	Rota004	1ª e 3ª					2ª	
	Rota005	1ª e 4ª			2ª		3ª	
	Rota006	1ª e 4ª				2ª	3ª	
	Rota016		1ª e 3ª		2ª			
	Rota017		1ª e 3ª			2ª		
	Rota018		1ª e 4ª		2ª	3ª		
	Rota019		1ª e 3ª				2ª	
	Rota023		1ª e 3ª					2ª
	Rota024		1ª e 4ª		2ª			3ª
	Rota025		1ª e 4ª			2ª		3ª
	Rota027		1ª e 4ª				2ª	3ª
	Rota031			1ª e 3ª	2ª			
	Rota032			1ª e 3ª		2ª		
	Rota034			1ª e 3ª			2ª	
	Rota038			1ª e 3ª				2ª
	Rota039			1ª e 4ª	2ª			3ª
	Rota040			1ª e 4ª		2ª		3ª
	Rota041			1ª e 5ª	3ª	4ª		2ª
	Rota042			1ª e 4ª			2ª	3ª

O tempo total para o uso de cada navio ficou dentro do horizonte pré-estabelecido de 30 dias, sendo o maior tempo de uso 24,74 dias e o menor, 7,76 dias.

O volume de cada tipo de óleo transportado por cada navio respeitou as respectivas restrições de capacidade para cada um dos navios e correspondeu à demanda total de escoamento das plataformas.

O volume de cada tipo de óleo transportado para as refinarias pelos navios correspondeu à restrição de quantidade programada de óleo a ser processado por cada uma delas.

Os dados estatísticos do modelo e o resumo de resolução estão descritos nas Tabelas 9 e 10.

Tabela 9. Dados estatísticos

Dados estatísticos	
Equações Individuais	6685
Variáveis Individuais	5947
Variáveis Discretas	3780
Tempo de geração	0.047s
Tempo de execução	0.047s

Tabela 10. Resumo de resolução

Resumo de resolução	
Tipo	PIM
Direção	Minimizar
Solucionador	CPLEX
Iterações	1906
Solução	391,749.92

4. Conclusões

Como mostrado na Tabela 9, o modelo apresentou como resultado da função objetivo (solução ótima) de 391,749.92 u.m, que representa o custo necessário para o planejamento logístico proposto pelo resultado do modelo. Como mostrado na Tabela 10, o modelo possui um elevado número de equações e variáveis, requerendo um elevado número de iterações, o que enaltece a complexidade dos modelos e que justifica a recorrência de *softwares* e solucionadores específicos para a resolução desses tipos de problemas. Com o modelo matemático proposto, de maneira geral, foi possível simular um planejamento logístico e atender os objetivos propostos para este trabalho, visto que: foi possível otimizar a utilização dos navios para transporte de petróleo de plataformas *offshore*; foi possível cumprir o prazo de uso de cada navio dentro do horizonte de tempo pré-determinado; foi possível minimizar o tempo de viagem dos navios e consequentemente os custos por transporte.

5. Agradecimentos

Agradecemos ao PRH-40 pela viabilização da pesquisa.

6. Referências Bibliográficas

- Brooke, A.; Kendrick, D.; Meeraus, A. GAMS: Sistema geral de modelagem algébrica. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- Garey, M. R.; Jonhson, D.S. Computers And Intractability – A Guide to the Theory of NP-Completeness. New York: W.H.Freeman, 1999.
- Soletti, L. Planejamento e distribuição de derivados de petróleo via transporte marítimo. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal de Alagoas, Maceió.