

PLANEJAMENTO DE ACÚMULO DE PETRÓLEO PARA PARADA DE SUPRIMENTO SOB INCERTEZA DE CONSUMO: ESTUDO DO CASO DO DUTO OSVAT I E REFINARIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

Marcelo Maia Freire de Oliveira

Edílson Fernandes de Arruda

Programa de Engenharia de Produção, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Tecnologia, Bloco F, Sala 103, Ilha do Fundão. Caixa Postal 68507, Rio de Janeiro RJ
21941-972, Brasil

E-mails: marcellomaia@gmail.com, efarruda@po.coppe.ufrj.br

RESUMO

Este artigo trata do planejamento do acúmulo de estoque de petróleo para parada de duto de suprimento de duas refinarias do estado de São Paulo e do consumo de petróleo nestas refinarias durante o acúmulo e durante a parada. Devido à incerteza relacionada à vazão do duto e aos níveis de consumos que podem ser empregados, o processo de acúmulo é estocástico e pode ser descrito por uma cadeia de Markov. Através de métodos determinísticos e probabilísticos, buscou-se obter uma composição de estoque que maximize o valor adicionado pelo processamento e, além disso, uma política de acúmulo de estoque e de processamento que maximize o lucro operacional.

PALAVRAS-CHAVE: Cadeia de Suprimentos; Gestão de estoque; Cadeia de Markov; Processos estocásticos; Política de estoque ótima.

Área principal: Política de estoque.

ABSTRACT

This article deals with a period of non availability of a pipeline that supplies two refineries in the state of São Paulo, Brazil and aims to generate a plan of oil inventory accumulation and oil consumption over the period of accumulation and pipeline shutdown. Due to uncertainties related to the pipeline flow and the consumption levels that can be applied at each refinery, the accumulation process can be characterized as a stochastic process and be described by a Markov Chain. This paper employs deterministic and probabilistic methods to obtain: the composition of oil inventory that maximizes the added value of processing oil, and the accumulation and processing policy that maximizes the operational profit.

PALAVRAS-CHAVE: Supply Chain; Inventory management; Markov Chain; Stochastic Process; Optimum inventory policy.

Main area: Inventory Policy.

I - Introdução

Um sistema de suprimento de petróleo para é geralmente composto de um terminal aquaviário, dutos de petróleo, terminais terrestres e refinarias, com tanques de petróleo espalhados entre os terminais e refinarias. A operação de suprimentos é realizada nas seguintes etapas: navios de petróleo de petróleo atracam terminal aquaviário, onde realiza-se o descarregamento deste petróleo nos tanques do terminal, sendo estocado e preparado para envio (retirada de água associada ao petróleo e homogeneização da mistura em tanque). Posteriormente, o petróleo é bombeamento para os terminais terrestres e destes para as refinarias.

Em particular, o sistema de interesse deste trabalho envolve o suprimento das refinarias Replan e Revap. Localizadas em Paulínia e São José dos Campos, respectivamente, essas refinarias são responsáveis por mais de 30% de toda a capacidade de processamento de petróleo do Brasil e pelo atendimento de boa parte do mercado de derivados dos Estados de São Paulo e Minas Gerais e todos os estados do Centro-Oeste.

Conforme Neiro e Pinto (2004), o suprimento dessas duas refinarias se inicia no mesmo ponto, o terminal aquaviário de São Sebastião, de onde o petróleo é bombeado pelo duto Osvat I para o terminal de Guararema, onde é novamente estocado e preparado. Desse terminal, o petróleo pode ser bombeado para ambas as refinarias, as quais possuem diferentes capacidades de processamento, de estoque e de qualidade requeridas. O duto Osvat I passará por uma parada de 10 dias, porém, devido à capacidade limitada de tanque para estoque de derivados acabados nas refinarias, o processamento de petróleo não deverá ser interrompido no período de parada de duto.

O presente trabalho trata, portanto, da política de estoque e processamento de petróleo antes e durante a parada do duto Osvat 1 e se propõem a elucidar as seguintes questões utilizando técnicas de Pesquisa Operacional determinísticas e probabilísticas: (1) qual o volume e composição estoque em cada refinaria e no terminal terrestre no momento de início de parada? (2) qual o tempo necessário de acúmulo de tal forma a atender ao processamento desejado no período de parada e como este tempo varia em função da carga das refinarias ao longo do período de acúmulo? (3) qual a probabilidade de se obter o estoque desejado frente a diferentes cargas de processamento das refinarias no período de acúmulo? (4) qual a política de estoque e consumo que maximiza o lucro das operações de acúmulo e processamento?

Para responder a estas questões, o trabalho foi dividido em etapas: levantamento dos dados; análise estatística da vazão do duto; construção do modelo de programação linear para determinação do estoque no início da parada; determinação da proporção de cada tipo de petróleo a ser processado e do ganho médio obtido; construção das matrizes de transição do acúmulo de estoque; obtenção dos tempos de acúmulo para ter 95% de probabilidade de se ter o estoque ótimo e o estoque mínimo de petróleo para a parada; determinação do período médio de regime transiente de cada nível de estoque para os diferentes níveis de consumo; determinação da melhor política de estoque e consumo para tempos determinados de acúmulo.

Este artigo é composto desta introdução, de uma breve revisão bibliográfica das teorias utilizadas e de aplicações semelhantes a essa; da descrição dos dados utilizados e dos métodos de pesquisa operacional empregados; e, finalmente, da apresentação dos principais resultados encontrados e conclusão do trabalho.

II - Revisão Bibliográfica

2.1 Programação Linear

Conforme Hillier e Lieberman (2010), a programação linear usa modelos matemáticos para descrever e otimizar problemas matemáticos de forma genérica que envolvem recursos limitados e atividades que competem entre si. O adjetivo linear significa que todas as funções matemáticas desse modelo são necessariamente lineares. A palavra programação, no caso, é um sinônimo de planejamento. Portanto, a programação linear envolve o planejamento de atividades para obter

um resultado ótimo, isto é, um resultado que atinja o melhor objetivo especificado (dado o modelo matemático) entre todas as alternativas viáveis.

2.2 Processos Estocásticos e Cadeia de Markov

Segundo Hillier e Lieberman (2010), um processo estocástico é definido como um conjunto de variáveis aleatórias X_t , o qual representa uma característica mensurável de interesse no instante t . O processo estocástico descreve o comportamento de um sistema operando ao longo do tempo. Este trabalho trata de um processo estocástico em tempo discreto com um espaço de estados finito, o qual possui simplificada a seguinte estrutura:

- Cada estado $\{0, 1, 2, \dots, M\}$ representa uma categoria mutuamente exclusiva,
- A variável aleatória X_t representa o estado do sistema no instante t ;
- O processo estocástico $\{X_t\} = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_n\}$ fornece a representação matemática de como o estado do sistema físico evolui ao longo do tempo.

Segundo Lawler (1995), a cadeia de Markov é uma abordagem analítica que permite o tratamento de processos estocásticos considerando a hipótese de que esta represente este processo. A propriedade fundamental das cadeias de Markov é de que a transição do estado presente para o estado futuro depende somente do estado atual. Portanto, um processo estocástico é uma cadeia de Markov, uma vez em determinado estado, a transição para outro estado for independente do passado, dado que o presente é conhecido.

As probabilidades condicionais $P\{X_{t+1} = j / X_t = i\}$ são chamadas de probabilidades de transição e são estacionárias se não se alteram ao longo do tempo. Uma matriz de transição representa todas as probabilidades de transição de um estado i (linha) para um estado j (coluna) e deve respeitar as regras representadas pelas equações 1 e 2:

$$P_{ij} \geq 0 \quad \text{para todo } i \text{ e } j: n=0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

$$\sum_{j=0}^M P_{ij} = 1 \quad \text{para todo } i: n=0, 1, 2, \dots \quad (2)$$

Os estados da cadeia de Markov podem ser classificados em transiente, recorrente ou absorvente:

Estado transiente – é o estado que, após nele ter entrado, existe a possibilidade de jamais retornar a esse estado novamente. Ou seja, esse estado não está acessível a todos os demais estados;

Estado recorrente – é o estado que, após nele ter entrado, o processo com certeza retornará a ele. Portanto um estado somente será recorrente se não for transiente;

Estado absorvente – é o estado que, uma que tenha sido alcançado, o processo jamais deixará esse estado novamente.

Segundo Brémaud (1991) pode-se obter a duração média do regime transiente dado que se inicie em um estado i , que significa a duração média esperada em que o a cadeia estará no estado transiente até alcançar o estado absorvente. Uma cadeia composta apenas de estados transiente, leva um tempo finito para atingir tal estado e, para calculá-lo a partir de um estado i , deve-se separar a matriz de transição em sub-matrizes contendo os estados transientes (T), estados transientes aos estados absorventes (R) e absorventes (A) como apresentado abaixo:

$$P = \begin{bmatrix} T & R \\ 0 & A \end{bmatrix}$$

Obtém-se a matriz E por $E = (I - T)^{-1}$. Cada termo da matriz obtida é chamado de e_{ij} . A duração média do regime transiente a partir do estado i pertencente a T é então obtido pela equação 3:

$$d_i = \sum_{j \in T} e_{ij} \quad (3)$$

Em particular, essa análise é fundamental para o presente trabalho, no qual, a partir de um estoque inicial transiente, pretende-se acumular estoque de modo a se atingir um alvo absorvente (estoque acumulado a ser utilizado durante a parada de duto). Outra análise igualmente

importante, é a política ótima de consumo e estoque considerando um processo de decisão de Markov, o qual Segundo Hillier e Lieberman (2010), tomando-se a decisão para cada estado possível da Cadeia de Markov considerando-se todas as possíveis alternativas disponíveis naquele estado.

2.3 Aplicações semelhantes da literatura

O estudo de política ótima de estoque e produção dentro de uma cadeia de suprimentos possui uma vasta gama de publicações. Jung ET al. (2008) utilizam um modelo de programação linear para determinar estoque de segurança ao longo de uma cadeia multi-estágio sob restrição de capacidade. Em particular, considerar a incertezas em modelos de produção e estoque é um tema comum de publicações atuais, Abboud (2001) aplica um modelo de Cadeia de Markov de tempo discreto considerando aleatoriedade de tempo e frequência de reparos da produção. Boute ET al. (2007), a partir da representação de um processo markoviano, minimiza os impactos de variação de demanda dentro de uma cadeia de suprimentos suavizando o efeito de propagação da incerteza na cadeia. Yin ET al. (2002) propõem aplicar política markoviana de controle de estoque na indústria de papel considerando a distribuição de probabilidade de demanda para construção das probabilidades de transição. Giannoccaro e Pontrandolfo (2002), Jung et al. (2004), Margono et al. (2007) e Schwartz et al. (2006) utilizam otimização baseada em simulação para determinar políticas ótimas de controle de estoque na gestão de cadeias de suprimentos. Contudo, não se encontrou exemplos de política de estoque considerando especificamente a necessidade de acúmulo para período de interrupção de suprimento tal como apresentado neste artigo.

III - Dados de Entrada e Métodos

Nesta seção, são detalhados: os dados de entrada do problema; o tratamento estatístico da vazão do duto Osvat I; a construção do modelo de programação linear do estoque ótimo para paradas e da matriz de transição e, por fim, o modelo de programação inteira para determinação da política ótima de estoque e consumo para o casos de duração ilimitada ou definida.

3.1 Dados Físicos do Sistema

A capacidade de estocagem das refinarias e do terminal considerados no sistema em análise, capacidade mínima e máxima de processamento de cada refinaria são tabela 1:

Tabela 1: Capacidade de estocagem, processamento mínimo e máximo dos locais considerados

Local	Capacidade de estocagem (mil m ³)	Carga mínima (mil m ³ /d)	Carga Máxima (mil m ³ /d)
Replan	795	62	66
Revap	460	38	42
Term. Guararema	190		
Total	1445	100	108

O volume de petróleo bombeado por dia no duto Osvat I foi coletados ao longo do ano de 2012, descartando-se os dias em que ocorreram testes, manutenções ou problema operacionais que limitaram a vazão do duto. Adotou-se como unidade de tempo semana, devido ao fato e o período de acúmulo de petróleo estar na ordem de centenas de dias. Uma vez preparados os dados, obteve-se a distribuição de probabilidade Gaussiana de valor médio de 778,4 mil m³/semana e desvio padrão de 13,5 mil m³/semana.

3.2 Dados dos Petróleos

Os petróleos a serem acumulados e processados nas refinarias foram separados em sete tipos conforme suas propriedades físico-químicas: condensado, extra-leve, leve, médio, rat-craç, pesado e extra-pesado. Cada tipo de petróleo gera um perfil de rendimentos de derivados em uma determinada refinaria (em função da composição do petróleo e condição operacional). Há interesse especial na fração convertida a diesel, que consiste de um derivado de petróleo obtido em frações de temperatura de destilação entre 200 e 400°C, pois se trata do derivado de maior

demanda nacional e a produção destas duas refinarias atende à demanda relacionada à produção agrícola dos estados de São Paulo, Minas Gerais e da região Centro-Oeste. O valor adicionado pelo processamento de cada tipo de petróleo é obtido pelo valor de venda dos derivados menos o custo de aquisição da matéria prima. A tabela 2 apresenta os dados referentes mencionados.

Tabela 2: Valor adicionado pelo processamento, rendimento em diesel e limites de processamento mínimo e máximo de cada tipo de petróleo em cada refinaria.

Tipo	Valor (u.m. / mil m ³)		Rendimento em Diesel (% carga)		Limite de processamento (%carga)			
	Replan	Revap	Replan	Revap	mínimo		máximo	
					Replan	Revap	Replan	Revap
Condensado	55,3	47,5	5%	6%	-	20%	20%	40%
Extra-Leve	55,5		13%	12%	-	-	100%	100%
Leve	56,7		17%	17%	20%	-	100%	100%
Médio	55,5	50,8	15%	15%	30%	30%	100%	100%
Rat-Craq	56,0		13%	13%	-	-	100%	100%
Pesado		46,8	12%	11%	-	10%	100%	25%
Extra-Pesado	65,7	73,0	9%	8%	20%	10%	30%	15%

3.3 Determinação de estoque ótimo no início da parada

Para determinação do estoque (volume total e por tipo de petróleo) a ser acumulado para consumo no período de parada foi feito um modelo de programação linear, resolvido no software Xpress, cuja função objetivo era de maximização do valor gerado pelo processamento de petróleo em 10 dias. A tabela 3 apresenta os parâmetros e variáveis utilizados.

Tabela 3: Índices, parâmetros e variáveis do modelo linear

Termo	Tipo	Descrição	Unidade
PlantCap(j)	parâmetro	Capacidade máxima de processamento de cada refinaria	mil m ³ /d
ProdValue(i,j)	parâmetro	Valor gerado pelo petróleo do tipo i na refinaria j	u.m. / mil m ³
DslYield(i,j)	parâmetro	Rendimento em diesel de cada tipo de petróleo i na refinaria j	% da carga
CspMin(i,j)	parâmetro	Fração mínima na carga do petróleo do tipo i na refinaria j	% da carga
CspMax(i,j)	parâmetro	Fração máxima na carga do petróleo do tipo i na refinaria j	% da carga
Dias	parâmetro	10 - número de dias de parada	Dias
Diesel	Parâmetro	150	mil m ³
Consumption(i,j)	variável	Consumo do petróleo do tipo i na refinaria j	mil m ³

A função objetivo é dada pela equação 4:

$$\max z = \sum_i \sum_j Consumption(i, j) * ProdValue(i, j) \quad (4)$$

As restrições impostas são: atendimento à produção mínima de diesel (equação 6), máximo de processamento de cada refinaria (equação 7), processamentos mínimo e máximo de cada tipo de petróleo por refinaria (equações 5 e 9, respectivamente) e não negatividade (10):

$$\sum_i \sum_j Consumption(i, j) * DslYield(i, j) \geq Diesel \quad (5)$$

$$\sum_i Consumption(i, j) \leq PlantCap(j) * Dias \quad (6)$$

$$Consumption(i, j) \geq CspMin(i, j) * \sum_j Consumption(i, j) \quad (7)$$

$$Consumption(i, j) \leq CspMax(i, j) * \sum_j Consumption(i, j) \quad (8)$$

$$Consumption(i, j) \geq 0 \quad (9)$$

3.4 Estados de Transição, Matriz de Transição e Tempo médio do regime transiente

Dado o volume total de petróleo indicado pela otimização descrita, se definiu a quantidade de estados que a matriz de transição deveria possuir para representar a distribuição de probabilidade do estoque acumulado ao longo das semanas, considerando que cada estado representa um intervalo específico de petróleo estocado. Os estados de transição da Cadeia de Markov foram obtidos para diferentes valores de processamento de petróleo das refinarias do sistema (de 100 a

108 mil m³/d) durante o período de acúmulo, e então, o acúmulo médio esperado é obtido como na equação 10:

$$\text{Acúmulo médio} = \text{Vazão média duto} - \text{Processamento} * 7 \quad (10)$$

Com este acúmulo médio, se obtinha (ainda sem considerar o fenômeno probabilístico) a duração esperada em semanas para se acumular o volume ótimo de petróleo conforme a equação 11:

$$\text{Duração Determinística} = \frac{\text{Estoque otimizado}}{\text{Acúmulo médio}} \quad (11)$$

A probabilidade da transição entre os estados é obtida: 1-definindo-se intervalos de vazão do duto, 2-normalizando os valores de mínimo (V_{mín}) e máximo (V_{máx}) de cada intervalo e 3-obtendo a probabilidade de cada intervalo via distribuição de probabilidade de conforme as equações 12. Considerou-se como corte que a soma da probabilidade dos intervalos fosse maior que 0,999.

$$P(V_{\text{mín}} < \text{Vazão} < V_{\text{máx}}) = P(\text{Vazão} < V_{\text{máx}}) - P(\text{Vazão} < V_{\text{mín}}) \quad (12)$$

Importante mencionar que, uma vez atingido o estoque desejado, a probabilidade de se manter neste estado é igual a 1 (o estado é absorvente). Uma vez obtidas probabilidades de transição entre os estados, gerou-se a matriz de transição da cadeia de Markov e a matriz de transição da semana n foi, então, obtida pela potência n da matriz da transição inicial. Para cada matriz de transição inicial obtida, calculou-se o tempo médio de regime transiente.

3.5 Cálculo da política ótima de consumo de estoque

Construiu-se um modelo de programação inteira, resolvido no software Xpress, para determinar o melhor consumo e aumento de estoque ao longo do período de acúmulo, tendo em conta o consumo durante a parada, o tempo médio de regime transiente de cada estado para os diferentes níveis de processamento durante o acúmulo e o custo de estoque do volume acumulado. O tempo de permanência média no estado i é dado pela diferença de tempo de regime transiente do estado i+1 e o tempo de regime transiente do estado i.

Neste modelo, se considera o ganho unitário de processo de petróleo obtido anteriormente, o qual decresce ao longo do acúmulo de estoque, pois quanto mais próximo o estoque estiver da capacidade de estocagem, mais difícil é realizar misturas de petróleos que atendem aos requisitos de qualidade. Este fenômeno foi caracterizado por um decrescimento linear a partir do estoque de 540 mil m³ até chegar a 5% do valor inicial quando estiver com 1080 mil m³ estocados, pois neste patamar é possível ocorrer processamento de mistura de petróleos que não respeitem limites de projeto, gerando produtos desenquadrados. O custo unitário de estoque é igual a 2% do ganho unitário de processamento de petróleo. A tabela 4 apresenta os parâmetros e variáveis utilizados:

Tabela 4: Índices, parâmetros e variáveis do modelo linear

Termo	Tipo	Descrição	Unidade
I	Índice	Estado de transição (1, 2, ... 60)	
J	Índice	processamento de petróleo (1, 2, ... 9)	
TimeState(i,j)	parâmetro	Tempo médio de regime transiente de estado i para processamento j	Semanas
Process(j)	parâmetro	Vazão de cada processamento j	mil m ³ /d
Profit(i)	parâmetro	Ganho unitário de cada estado i	u.m. / mil m ³
Storage(i)	parâmetro	Estoque do estado i	mil m ³
Cost(i)	parâmetro	Custo de estoque de cada estado i	% da carga
MinimunStorage	parâmetro	1000	mil m ³
MaximunStorage	parâmetro	1080	mil m ³
Days	parâmetro	7	dias / semana
StorageState	parâmetro	18 – volume acumulado a cada estado	mil m ³
ProfitUnit	parâmetro	Ganho unitário	u.m. / mil m ³
Decision(i,j)	variável	Decisão do processamento j a cada estado i	

A função objetivo é dada pela equação 13:

$$\max z = \sum_i \sum_j Decision(i, j) * Process(j) * Profit(i) * TimeState(i, j) * Days + \sum_i \sum_j Decision(i, j) * StorageState * ProfitUnit - \sum_i \sum_j Decision(i, j) * Cost(i) * TimeState(i, j) * Days \quad (13)$$

O primeiro termo da função objetivo está relacionado com o ganho obtido pelo nível de processamento escolhido em cada estado levando em consideração a duração que este estado teria neste nível de processamento. O segundo termo relaciona-se com o ganho obtido pelo estoque acumulado, ou seja, o ganho no período de parada do duto. Finalmente, o terceiro termo trata do custo de estoque a cada estado de acúmulo considerando-se a duração média de cada estado transiente. As restrições impostas são: volume acumulado máximo e mínimo (equações 14 e 15), somente um nível de processamento por estado (equações 16 e 17) e não negatividade (18):

$$\sum_i \sum_j Decision(i, j) * StorageState \geq MinimumStorage \quad (14)$$

$$\sum_i \sum_j Decision(i, j) * StorageState \leq MaximumStorage \quad (15)$$

Para os estados entre 1 e 56 (até no mínimo 1000 mil m³ de petróleo acumulado)

$$\sum_j Decision(i, j) = 1 \quad (16)$$

Para estados entre 57 e 60 (estoque entre 1000 e 1080 mil m³)

$$\sum_j Decision(i, j) \leq 1 \quad (17)$$

$$Decision(i, j) \geq 0 \quad (18)$$

IV - Resultados

4.1 Estoque ótimo para início da parada

Obteve-se como resultado financeiro o valor gerado de 61.488 unidades monetárias, com carga de 66 e 42 mil m³/d para Replan e Revap, respectivamente, ou seja, 56,9 u.m./mil m³ processado e produção de diesel de 98 e 52 mil m³ na Replan e Revap, respectivamente. O volume indicado de cada tipo de petróleo a ser consumido no período de parada é dado na tabela 5:

Tabela 5: Processamento de petróleo (mil m³) ótimo para o período de parada do duto Osvat 1

Tipo de Petróleo	Replan	Revap	Total
Condensado	0	84	84
Extra-leve	0	0	0
Leve	330	115	445
Médio	198	126	324
Rat-Craq	0	0	0
Pesado	0	42	42
Extra-pesado	132	53	185
Total	660	420	1080

4.2 Matriz de Transição da Cadeia de Markov

Neste item, é apresentado um exemplo de como as probabilidades de transição foram obtidas. Dado o volume ótimo encontrado para o início da parada de 1080 mil m³, os estados de transição foram definidos de tal forma a obter uma matriz de transição 60 x 60 com cada intervalo de estoque igual a 18 mil m³. Supondo um consumo de petróleo de 714 mil m³ por semana (102 mil m³/d), temos um acúmulo médio de 64,4 mil m³ por semana e um período de acúmulo esperado de 16,8 semanas. O valor da probabilidade de transição é obtido considerando a distribuição Gaussiana da vazão do duto e o nível de processamento das refinarias, conforme tabela 6.

Tal como apresentado na tabela, se pode concluir que o estado que se atinge com maior probabilidade que a partir do estado 0 é o estado 3 e que não há probabilidade de se manter no

estado zero. A probabilidade de se atingir um estado $i+n$ a partir de um estado i é igual à de se atingir um estado $i+n+1$ a partir de $i+1$. Desta forma, os valores da última coluna da tabela 6 se repetem para todos os estados até que o intervalo de 1062 a 1080 mil m^3 seja atingido, no qual o estoque permanece até o início da parada. A partir do consumo de petróleo acima de 104 mil m^3/d , há probabilidade de diminuição de estoque de uma semana para a semana posterior.

Tabela 6: Probabilidades de transição para o caso de processamento de 102 mil m^3/d

Intervalos			Intervalo normalizado		Probabilidade de transição entre estados		
i	Mín	Máx	Min Z	Max Z	P(x<Min Z)	P(x<Max Z)	P(Min Z<x<Max Z)
0	714	732	-4,77	-3,43	0%	0%	0%
1	732	750	-3,43	-2,10	0%	2%	2%
2	750	768	-2,10	-0,77	2%	22%	20%
3	768	786	-0,77	0,56	22%	71%	49%
4	786	804	0,56	1,89	71%	97%	26%
5	804	822	1,89	3,23	97%	100%	3%
6	822	840	3,23	4,56	100%	100%	0%

4.3 Acúmulo de Estoque

Resumidamente, as figuras 1 a 3 apresentam como varia a probabilidade se alcançar o estoque desejado de 1080 mil m^3 e o estoque mínimo antes da parada de 1000 mil m^3 para os casos de processamento de 100, 104 e 108 mil m^3/d . Assim, se pode observar claramente o efeito do nível de processamento durante o acúmulo no tempo necessário para se ter a probabilidade de 95% de se obter o acúmulo desejado.

É importante mencionar que em todos os casos, exceto para processamento de 108 mil m^3/d , o estado de estoque igual 1080 mil m^3 é absorvente. No caso da exceção, têm-se dois estados recorrentes, o de estoque igual a 1080 e igual a 1062 mil m^3/d com probabilidade em estado estável de 91% e 9%, respectivamente.

A tabela 7 apresenta, para cada nível de processamento de petróleo, o tempo de acúmulo calculado somente com a média da vazão do duto, a duração média do estado transiente e a primeira semana do período de acúmulo que apresenta probabilidade maior que 95% de se alcançar o estoque desejado segundo o processo estocástico proposto e o desvio entre a primeira e terceira métrica.

Figura 1: variação da probabilidade de para processamento de 100 mil m^3/d durante o acúmulo

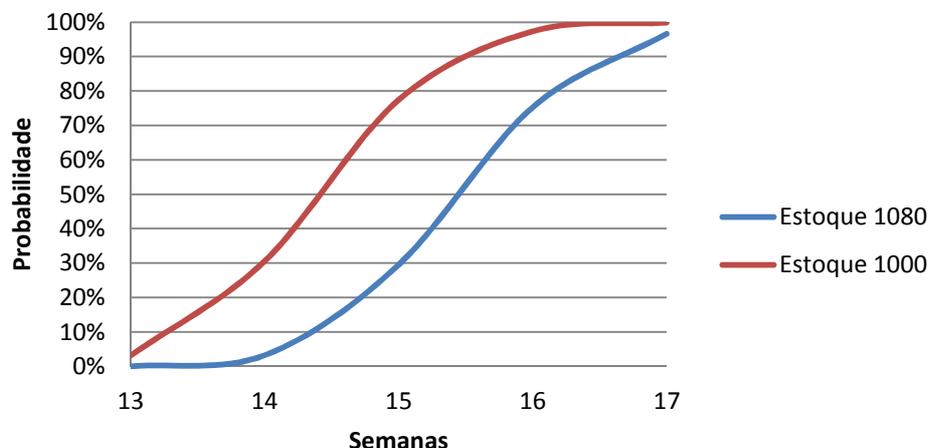


Figura 2: variação da probabilidade para processamento de 104 mil m³/d durante o acúmulo

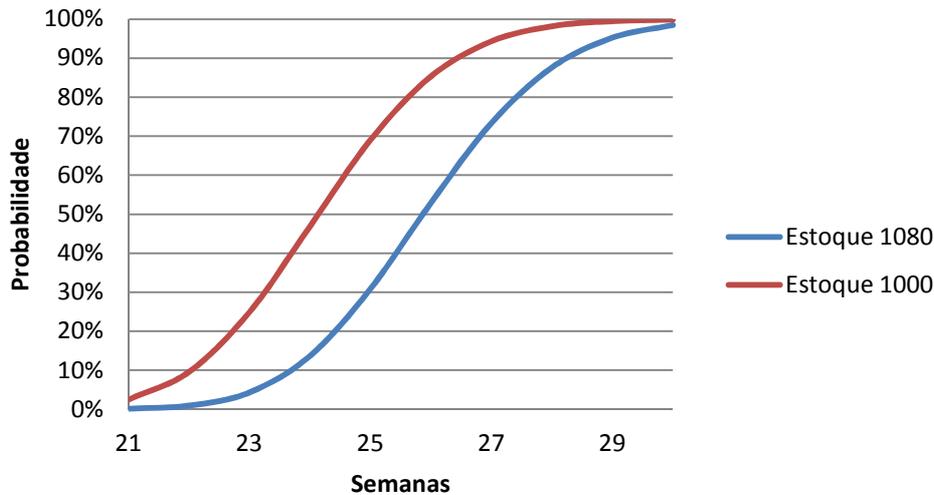


Figura 3: variação da probabilidade para processamento de 108 mil m³/d durante o acúmulo

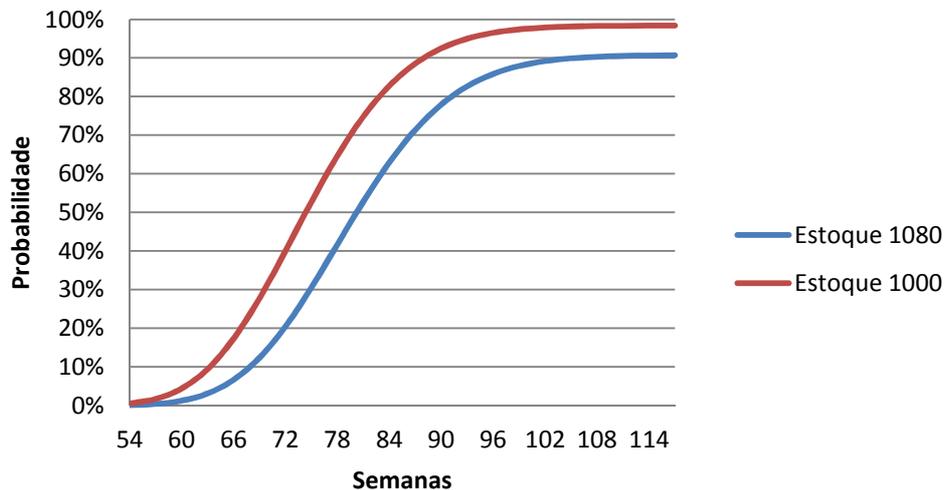


Tabela 7: Variação do acúmulo médio, duração determinística e estocástica do período de acúmulo para os diferentes valores de Processamento de petróleo

Processamento (mil m ³ /d)	Acúmulo médio (mil m ³ /d)	Duração Determinística (semanas)	Duração média do estado transiente (semanas)	Duração estocástica (semanas)	Desvio
100	11,2	14	16	17	23%
101	10,2	15	17	19	26%
102	9,2	17	19	21	25%
103	8,2	19	23	25	33%
104	7,2	21	26	29	35%
105	6,2	25	32	36	45%
106	5,2	30	40	45	52%
107	4,2	37	52	64	74%
108	3,2	48	74	-	-

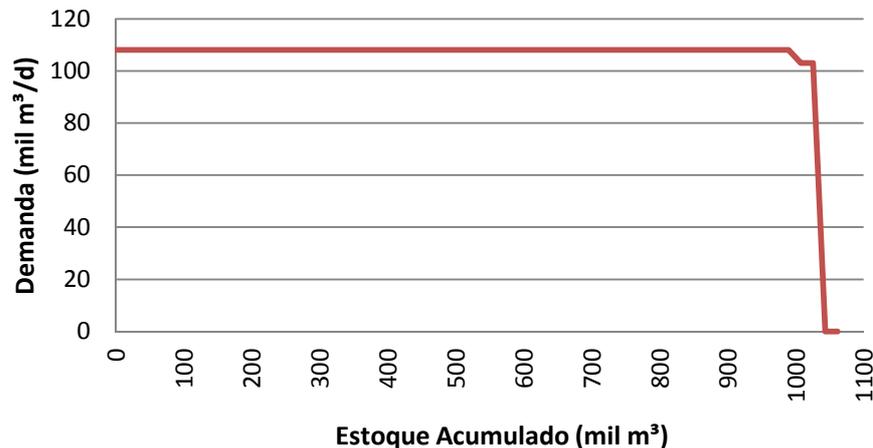
Os resultados apresentados na tabela 7 confirmam a influência da carda de processamento durante o período de acúmulo no tempo necessário para alcançar a probabilidade de 95% de estar no estoque desejado. Podemos verificar como o efeito da incerteza sobre a vazão do duto é maior

à medida que a taxa de acúmulo vai diminuindo, tornando mais imprecisa o cálculo determinístico de tempo necessário para acúmulo.

4.4 Política Ótima de Acúmulo e Estoque – Decisão Markoviana

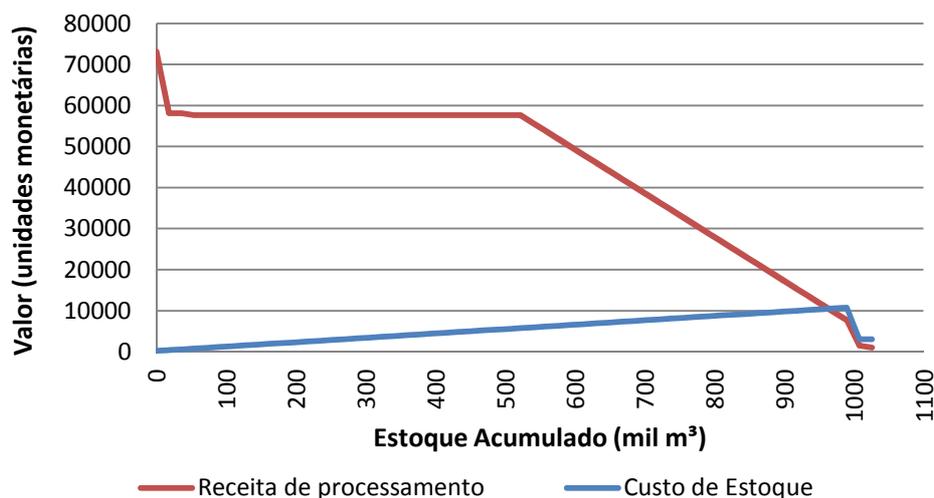
A figura 4 apresenta a política ótima de consumo a ser feita.

Figura 4: política ótima de consumo e estoque sem limite de duração de acúmulo



Como podemos observar na figura 4, a vazão indicada pela política ótima é operar a 108 mil m³/d de processamento das duas refinarias (ou seja, em carga máxima) até que se acumule 990 mil m³ (estado 56), acumula-se mais 36 mil m³ tendo como consumo 103 mil m³, finalizando o acúmulo com volume de 1026 mil m³. Desta forma, ficam disponíveis 102,6 mil m³/d de parada para ser consumido pelas refinarias. A duração total do período de acúmulo fica em 76 semanas, gerando um lucro operacional de 2,3 milhões de unidades monetárias. Essa política indicada já era esperada, uma vez que se gera mais ganho quanto maior for o consumo de petróleo. O custo estimado é geralmente muito menor do que o ganho em cada estado, conforme mostra a figura 5.

Figura 5: Receita de processamento e custo de estoque ao longo do acúmulo

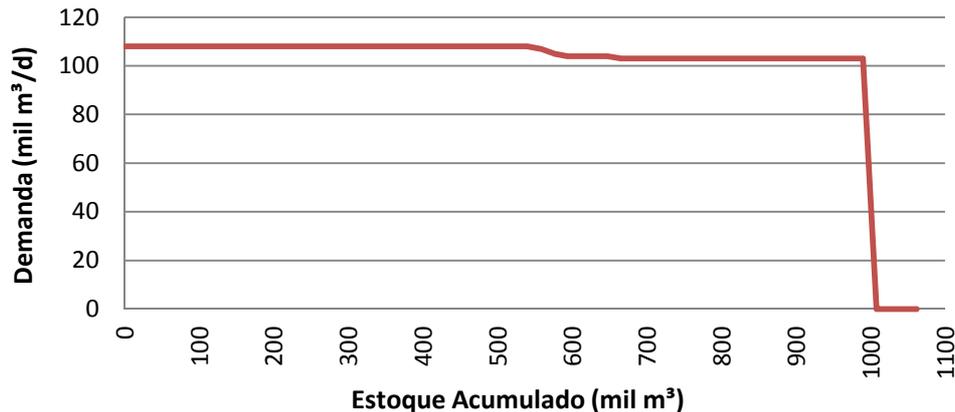


Como se pode observar na figura 5, a partir do volume acumulado 972 mil m³ (estado 55) o custo de estoque passa a superar o ganho de consumo, que decresce com o acúmulo de estoque, conforme explicado anteriormente. A indicação de acumular estoque além do mínimo e tendo o custo de estoque acima do ganho de consumo se deve ao fato de haver o ganho de consumo durante a parada do duto. A duração de 76 semanas para acúmulo é bastante alta e de difícil controle pois, ao longo de um ano e meio, eventos não previstos (disponibilidade de

equipamentos, restrições de processamento e alta do preço de petróleo) podem ocorrer, levando a lucros operacionais menores do que o esperado.

Por esta razão, foi feito um teste para obter a política ótima limitando o período de acúmulo a um ano (52 semanas) – figura 6. Nesta política, se opera em consumo máximo até o estado 31, a 107 mil m³/d no estado 32, a 105 mil m³ no estado 33, a 104 mil m³ até o estado 37 e a 103 mil m³ até o estado 56 para garantir o estoque mínimo na parada. O lucro operacional obtido foi de 1,89 milhões de unidades monetárias. Comparando as duas políticas, temos um lucro semanal de 36,5 mil unidades monetárias para o caso limitado e 30,4 no ilimitado.

Figura 6: política ótima de consumo e estoque com limite de duração de acúmulo



V- Conclusão

Este trabalho obteve sucesso ao buscar utilizar ferramentas de Pesquisa Operacional para elucidar questões envolvidas com o sistema em estudo, principalmente quando utiliza de métodos probabilísticos para lidar com as incertezas envolvidas. Somente desta forma foi possível gerar uma proposta de política de estoque e consumo que levasse em conta os ganhos e riscos envolvidos. Isso evidencia a melhor qualidade de tomada de decisão quando se opta por analisar o problema proposto como um processo estocástico

Foi verificada a grande influência do nível de processamento de consumo no tempo necessário para obter o acúmulo desejado e a relevância de se considerar a distribuição de probabilidade da vazão do duto. O impacto dessa consideração torna-se ainda mais relevante quando a vazão de consumo se aproxima da vazão média do duto e a obtenção da duração de acúmulo deterministicamente torna-se cada vez mais imprecisa.

A comparação entre tempo de acúmulo obtido deterministicamente, tempo médio de estado transiente e tempo de acúmulo estocástico (probabilidade acima de 95% de estar no nível desejado de estoque) mostrou ser uma comparação bastante rica para compreender o efeito dos fatores probabilísticos envolvidos. Também é interessante notar o custo (tempo) necessário para se chegar ao patamar de 95% de probabilidade para os casos de carga de processamento de consumo acima de 105 mil m³.

A obtenção de uma política ótima de consumo e estoque via processo de decisão de Markov mostrou-se relevante como meio de subsidiar decisão levando em conta necessidade de acúmulo, ganhos e custos operacionais e ganho do estoque acumulado para parada. Ficou evidente o impacto das considerações de diminuição de ganho de processamento de petróleo e de custo de estoque e indica-se que estes itens sejam explorados em trabalhos futuros.

Por fim, a comparação entre a política com tempo ilimitado e a política limitada a um ano é interessante, pois deixa claro que, apesar do ganho total maior da política ilimitada, o ganho semanal da política limitada é maior. Propor uma política de consumo e estoque que maximize o

ganho semanal ao invés do ganho total parece, portanto, ser uma abordagem interessante e indica-se como uma questão a revista em outros estudos.

VI - Bibliografia

ABBOUD, N. E., *A discrete-time Markov production-inventory model with machine breakdowns*, Computer & industrial Engineering, Volume 39, Pag. 95 – 107, 2001.

BRÉMAUD, P., *Markov Chains, Gibbs Fields, Monte Carlo Simulation and Queues*, Springer, New York, USA, 1998.

BOUTE, R. N., DISNEY, S. M., LAMBRECHT, M. R., VAN HOUTT, B., *An Integrated Production and Inventory Model to Dampen Upstream Demand Variability in the Supply Chain*, European Journal of Operational Research, Volume 178, Pag. 121 – 142, 2007.

GIANNOCCARO, I., PONTRANDOLFO, P., *Inventory Management in Supply Chain: a Reinforcement Learning Approach*, Int. J. Production economics, Volume 78, Pag. 153 – 161, 2002.

HILLIER, F. S., LIEBERMAN, G. J., *Introdução à Pesquisa Operacional*, oitava edição, McGraw Hill, Porto Alegre, Brasil, 2010.

JUNG, J. Y., BLAU, G., PEKNY, J. F., REKLAITIS, G. V., EVERSDYK, D., *A Simulation base Optimization Approach to Supply Chain Management under Demand Uncertainty*, Computers and Chemical Engineering, Volume 8, Pag. 2087 – 2106, 2004.

JUNG, J. Y., BLAU, G., PEKNY, J. F., REKLAITIS, G. V., EVERSDYK, D., *Integrated safety stock management for multi-stage supply chains under production capacity constraints*, Computers and Chemical Engineering, Volume 32, Pag. 2570 – 2581, 2008.

LAWLER, G. F., *Introduction to Stochastic Processes*, First Edition, Chapman & Hall Probability Series, London, UK, 1995.

MARGONO, E., SAMSATLI, N., SHAH, N., *Generic Modeling and Simulation of Stock Levels in Supply Chain*, 17th European Symposium on Computer Aided Process Engineering, 2007.

NEIRO, S. M. S., PINTO, J. M., *A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains*, Computers and Chemical Engineering, Volume 28, Issues 6-7, Pag. 871 -896, 2003.

SCHWARTZ, J., WANG, W., RIVERA, D., *Simulation-based Optimization of Process Control for Inventory Management in Supply Chains*, Automatica, Volume 42, Pag. 1311 – 1320, 2006.

YIN, K. K., LIU, H., JOHNSON, N. E., *Markovian Inventory Policy with Application to the Paper Industry*, Computers and Chemical Engineering, Volume 26, Issues 10, Pag. 1399 – 1413, 2002.