

Modelagem de atividades de drenagem de bacias de contenção em terminais portuários de granéis líquidos

Marco Mendes (USP)

Daniel Mota (USP)



Este trabalho desenvolve um modelo baseado em Processos de Decisão Markovianos (MDP) para otimizar as atividades de drenagem de bacias de contenção em terminais portuários de granéis líquidos. O modelo busca equilibrar custos e benefícios em um ambiente operacional repleto de incertezas, como chuvas, demandas operacionais e níveis de ocupação das bacias. Foram definidos estados discretos para os níveis de água, ações disponíveis ("Drenar" e "Não Drenar"), probabilidades de transição condicionadas a índices pluviométricos e recompensas que refletem a efetividade operacional e as demandas do sistema. O algoritmo de Value Iteration foi utilizado para calcular a política ótima, que orienta decisões para minimizar riscos e maximizar a eficiência. A política foi validada por meio de simulações computacionais, considerando 100 iterações em cenários estocásticos. Os resultados mostram uma predominância do estado "Vazio", indicando que a política ótima favorece a manutenção de bacias em condições seguras. Além disso, a evolução das recompensas acumuladas demonstra que o modelo é capaz de maximizar os benefícios operacionais ao longo do tempo. Este estudo contribui para a literatura ao propor uma abordagem analítica robusta para a gestão de bacias de contenção, promovendo eficiência, sustentabilidade e segurança. Como limitações, destacam-se a consideração de probabilidades fixas e a simplificação no número de estados. Trabalhos futuros podem explorar técnicas de aprendizado por reforço para lidar com cenários mais dinâmicos.

Palavras-chave: Terminais de Granéis Líquidos, Bacias de Contenção, Processos de Decisão Markovianos, Otimização, Gestão Portuária.

1. Introdução

Terminais portuários de graneis líquidos são estruturas especializadas para armazenar e movimentar produtos como químicos e derivados de petróleo. Esses terminais contam com tanques, estações de bombeamento, berços de atracação, plataformas de carregamento e sistemas de recuperação de vapores, entre outros equipamentos essenciais (Notteboom, Pallis & Rodrigue, 2022).

A proteção contra vazamentos e transbordamentos em tanques de armazenamento é estruturada em três níveis: (i) monitoramento e controle com instrumentação e sistemas de gestão; (ii) contenção secundária por barreiras físicas como paredes duplas e bacias; e (iii) manutenção preventiva para assegurar confiabilidade das estruturas (Karan Sotoodeh, 2024).

Neste artigo, o termo “bacias de contenção” refere-se às estruturas físicas, como abóbadas de concreto e barragens impermeáveis, que compõem o segundo nível de proteção. Seu papel é essencial para evitar a contaminação do solo e da água e mitigar riscos de incêndios e explosões, especialmente em terminais com líquidos inflamáveis.

A drenagem representa um desafio, pois as bacias são estruturas abertas sujeitas a chuvas. O acúmulo de água reduz a capacidade de contenção e dificulta o acesso. Drenagens mal programadas geram mobilizações repetidas e custos desnecessários, e muitas vezes não são necessárias.

Este artigo propõe um modelo MDP para apoiar decisões de drenagem em terminais de graneis líquidos, simulando cenários e definindo políticas ótimas com base no equilíbrio entre custos e benefícios.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a revisão bibliográfica sobre bacias de contenção e aplicação de MDPs; a Seção 3 descreve os materiais e métodos utilizados; a Seção 4 traz os resultados e discussões; e a Seção 5 apresenta as conclusões e recomendações futuras.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Bacias de contenção

A ABNT NBR 17505-2 define que a bacia de contenção deve ter volume igual ou superior ao maior tanque cheio, com sobrealtura de 0,20 m e altura máxima de 3,0 m. As paredes podem ser construídas em materiais como terra, aço, concreto ou alvenaria, e devem ser estanques e resistentes à pressão hidrostática. A norma também exige que os sistemas de drenagem tenham

válvulas de bloqueio externas, mantidas fechadas, e que o escoamento seja controlado para evitar contaminações de corpos hídricos.

Já a Resolução CONAMA 398/2008 exige que contenções secundárias façam parte do Plano de Emergência Individual (PEI), com avaliação dos riscos das operações e diretrizes para resposta a vazamentos de óleo em águas sob jurisdição brasileira.

A conformidade com normas técnicas e boas práticas de gestão é essencial para garantir que as bacias cumpram seu papel na proteção ambiental e na segurança das operações em terminais portuários de granéis líquidos.

A Figura 1 apresenta um conjunto de tanques de armazenamento localizados dentro de uma bacia de contenção com paredes de alvenaria. É possível verificar outros componentes da instalação como escadas, guarda-corpos e tubulação do sistema de combate a incêndio na cor vermelha passando por cima das paredes da bacia e também com os anéis de resfriamento ao topo ou meio dos tanques.

Figura 1 - Tanques de armazenamento de granéis líquidos dentro de uma bacia de contenção.



Fonte: Adaptado de Karan Sotoodeh (2024)

Os aspectos técnicos são importantes porque a drenagem das bacias de contenção trata-se de um processo crítico do ponto de vista normativo, ambiental e de segurança, devendo ser incorporados ao modelo quando possível; caso contrário, o tomador de decisão deve ser informado.

2.2. MDPs em sistemas industriais e ambientais

Os Processos de Decisão Markovianos (MDPs) são modelos matemáticos que descrevem decisões sequenciais sob incerteza, com base em estados, ações, probabilidades de transição e

recompensas. O objetivo é definir uma política que maximize os ganhos ao longo do tempo (Puterman, 1994).

Em ambientes industriais, os MDPs têm sido usados na otimização de inventário e transporte (Zhao et al., 2010), no controle de gêmeos digitais (De Giacomo et al., 2023) e na alocação dinâmica de berços portuários com técnicas de aprendizado por reforço (Lv et al., 2024). Também foram aplicados em manutenção de sensores navais com cadeias de Markov em tempo contínuo (Dagkinis et al., 2023).

No campo ambiental, destacam-se aplicações em gestão de águas pluviais (Liu et al., 2019) e em simulações estocásticas de precipitação (Van den Eijnden et al., 2024). Essas abordagens visam equilibrar custos operacionais e impactos ambientais.

Apesar do uso crescente em setores diversos, a aplicação de MDPs em drenagem de bacias de contenção ainda é pouco explorada. Este trabalho contribui ao propor um modelo analítico voltado à tomada de decisão nesse contexto, promovendo segurança e eficiência operacional

3. Materiais e métodos

3.1. Contexto e definição do problema

As bacias de contenção em terminais de granéis líquidos têm papel crítico na mitigação de riscos ambientais e operacionais, armazenando vazamentos de tanques e tubulações. Por serem abertas, acumulam água da chuva, reduzindo sua capacidade e podendo inviabilizar o acesso seguro.

A decisão de executar ou adiar a drenagem envolve incertezas climáticas, operacionais e econômicas. Mobilizações são ineficientes se chove novamente, enquanto omissões podem comprometer a contenção em situações críticas.

Esse contexto, marcado por decisões sequenciais e variáveis estocásticas, é adequado para modelagem por Processos de Decisão Markovianos (MDPs), que permitem simular cenários, avaliar políticas e otimizar recursos e riscos.

3.2. Estrutura e formulação do modelo MDP

O modelo proposto para a drenagem de bacias de contenção em terminais de granéis líquidos foi desenvolvido em Python e estruturado como um Processo de Decisão Markoviano (MDP), capaz de representar decisões sequenciais sob incertezas climáticas e operacionais. Ele é composto por cinco elementos principais: estados (condições do sistema), ações (decisões disponíveis), probabilidades de transição (mudanças entre estados), recompensas (custos e

benefícios das ações) e a política (estratégia ótima de decisão). Esses componentes são detalhados a seguir, considerando as particularidades do problema.

Estados (S). Representam as possíveis condições do sistema em determinado momento, servindo de base para as decisões e transições. No contexto da drenagem, os estados correspondem aos níveis de água na bacia, discretizados em cinco faixas conforme a capacidade ocupada. O conjunto de estados (S), que descreve o nível acumulado, é definido como:

$$S = \{s_1, s_2, s_3, s_4, s_5\}, \quad (1)$$

onde:

s_1 = Vazio: a bacia está completamente vazia, sem água acumulada.

s_2 = Baixo: o nível de água acumulada está maior que 0% e até 5% da capacidade.

s_3 = Moderado: o nível de água acumulada está maior que 5% e até 10% da capacidade.

s_4 = Alto: o nível de água acumulada está maior que 10% e até 20% da capacidade.

s_5 = Cheio: o nível de água acumulada está maior de 20% da capacidade.

Ações (A). São as decisões disponíveis em cada estado, determinando a evolução do sistema.

Neste modelo, há duas ações possíveis relacionadas à drenagem, conforme o conjunto:

$$A = \{a_1, a_2\} \quad (2)$$

a_1 = Drenar: escoar o volume acumulado para o sistema de tratamento ou descarte.

a_2 = Não drenar: manter o volume na bacia, aguardando melhores condições.

Algumas premissas foram adotadas quanto as ações.

- A ação “Drenar” só será possível se o estado inicial for diferente do estado “Vazio”;
- Ao drenar, o sistema retorna ao estado “Vazio”, assumindo escoamento completo.

Probabilidades de Transição ($P(s' | s, a)$). Representam a dinâmica do sistema, indicando a chance de transição de um estado $s \in S$ para um próximo estado $s' \in S$, dado que uma ação $a \in A$ foi executada. Essas probabilidades são representadas pela função:

$$P(s' | s, a): S \times A \rightarrow [0,1], \quad (3)$$

onde:

$P(s' | s, a)$ = é a probabilidade de transição do estado s para o estado s' , dada a ação a .

$\sum_{s' \in S} P(s' | s, a) = 1$, garantindo que a soma das probabilidades a partir de s seja igual a 1.

Neste estudo, as probabilidades de transição foram determinadas com base em dois parâmetros: as condições climáticas e seu impacto nos níveis das bacias. Para isso, foram analisados dados pluviométricos do Porto de Santos (SP), extraídos do site da Prefeitura com medições diárias de 2024 (SANTOS, 2025). O índice máximo registrado foi de 151 mm e o mínimo de 0 mm. A Tabela 1 apresenta a classificação adotada.

Tabela 1 - Análise de frequência por índice pluviométrico diário (mm) da cidade de Santos-SP, Brasil, e classificação das condições climáticas do modelo

Índice pluviométrico (mm)	Condições climáticas	Frequência absoluta	Frequência relativa (%)
0 mm	Sem chuva	205	56,01%
Maior que 0 e até 5 mm	Fraca	73	19,95%
Maior que 5 e até 20 mm	Moderada	50	13,66%
Maior que 20 e até 151 mm	Forte	38	10,38%
Total	-	366	100,00%

Fonte: Autor (2025)

Com base na frequência das chuvas e na classificação adotada, foi possível estimar as probabilidades de ocorrência. Para definir as probabilidades de transição, atribuiu-se a cada condição climática um impacto percentual no nível da bacia, indicando quantos estados o sistema pode avançar em cada cenário. A Tabela 2 apresenta esses valores.

Tabela 2 - Aumento no nível das bacias (%) por condição climática e impacto na transição dos estados

Condições climáticas	Aumento no nível das bacias (%)	Impacto na transição dos estados
Sem chuva	0,00%	0 estado
Fraca	5,00%	1 estado
Moderada	10,00%	2 estados
Forte	30,00%	3 estados

Fonte: Autor (2025)

Algumas premissas foram adotadas quanto a transição dos estados:

- O estado inicial do modelo é o estado “Vazio”;
- A evolução dos estados segue de s_1 até o s_5 , exceto quando a ação de “Drenar” é executada;
- chuvas intensas podem provocar transições múltiplas, como de “Vazio” diretamente para “Cheio”.

A matriz de transição para uma ação P_a descreve como o sistema evolui entre os estados $S =$

$\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$, quando uma ação $a \in A$ é aplicada. Cada elemento $P(s_j | s_i, a)$ representa a probabilidade de transição de s_i para s_j , dada a ação a . A matriz pode ser representada por:

$$P_a = \begin{bmatrix} P(s_1 | s_1, a) & P(s_2 | s_1, a) & \dots & P(s_n | s_1, a) \\ P(s_1 | s_2, a) & P(s_2 | s_2, a) & \dots & P(s_n | s_2, a) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P(s_1 | s_n, a) & P(s_2 | s_n, a) & \dots & P(s_n | s_n, a) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Após serem definidos os estados, as ações, as probabilidades de ocorrência de condições climáticas, o impacto nos estados e as premissas, foram então determinadas as matrizes de transição do modelo, sendo uma para cada ação, onde:

$$P_{\text{Não drenar}} = \begin{bmatrix} 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 & 0 \\ 0 & 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 \\ 0 & 0 & 0.5601 & 0.1995 & 0.2404 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5601 & 0.4399 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$P_{\text{Drenar}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 & 0 \\ 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 & 0 \\ 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 & 0 \\ 0.5601 & 0.1995 & 0.1366 & 0.1038 & 0 \end{bmatrix}$$

Recompensas ($R(s,a)$). Representam os benefícios ou custos associados à execução de uma ação $a \in A$ em um estado $s \in S$, orientando o modelo na busca por decisões que maximizem os resultados ao longo do tempo. São definidas pela função:

$$R(s, a): S \times A \rightarrow \mathbb{R} \quad (5)$$

onde:

$R(s, a)$ = valor atribuído ao par (s, a) , que pode ser positivo (recompensa) ou negativo (punição).

$\mathbb{R}$ = conjunto dos números reais.

As recompensas podem ser organizadas em uma matriz R , em que cada elemento corresponde ao valor $R(s, a)$:

$$R = \begin{bmatrix} R(s_1, a_1) & R(s_1, a_2) & \cdots & R(s_1, a_m) \\ R(s_2, a_1) & R(s_2, a_2) & \cdots & R(s_2, a_m) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R(s_n, a_1) & R(s_n, a_2) & \cdots & R(s_n, a_m) \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde:

n = número de estados ($s_1, s_2, \dots, s_n$)

m = número de ações ($a_1, a_2, \dots, a_m$)

No modelo proposto, as recompensas são definidas por dois fatores: a efetividade da drenagem e a demanda operacional. Esses elementos refletem a eficiência do sistema e os custos ou benefícios associados à segurança das operações.

As recompensas por efetividade avaliam se a ação tomada — “Drenar” ou “Não drenar” — contribui para manter a bacia em condição operacional segura. Ações ineficazes recebem penalizações, enquanto ações eficazes geram benefícios. As matrizes de recompensas por efetividade foram construídas com base no impacto esperado de cada ação, conforme apresentado a seguir:

$$R_{Drenar} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 20 & -20 & -50 & -70 & -100 \\ 50 & -5 & -20 & -50 & -70 \\ 70 & 30 & -5 & -20 & -50 \\ 100 & 50 & 0 & -5 & -20 \end{bmatrix}$$

$$P_{Não drenar} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 20 & -50 & -70 & -100 \\ 0 & 0 & -25 & -50 & -70 \\ 0 & 0 & 0 & -25 & -50 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -100 \end{bmatrix}$$

As matrizes de efetividade penalizam ações inadequadas, como não drenar em estados críticos (ex.: “Cheio”), e atribuem notas entre -100 e 100 conforme critérios de risco e eficiência definidos pelo autor. Quando o estado inicial é “Vazio”, não há recompensas nem penalizações por efetividade.

A demanda operacional é modelada como evento estocástico, com 70% de chance de ausência e 30% de ocorrência. Essa variável influencia diretamente as recompensas finais, pois atividades críticas podem depender do acesso à bacia, e estados elevados podem representar riscos ou inviabilizar operações. As recompensas associadas à demanda são dadas por:

$$R_{sem\ demanda} = [50, 20, -10, -20, -50]$$

$$R_{com\ demanda} = [100, 50, -40, -60, -200]$$

A recompensa final $R_{final}(s, s')$ é calculada pela soma ponderada da recompensa por efetividade com as recompensas por demanda operacional, considerando suas respectivas probabilidades:

$$R_{final}(s, s') = R_{efetividade}(s, s') + [P(Sem\ demanda) \times R_{sem\ demanda}(s) + P(Com\ demanda) \times R_{com\ demanda}] \quad (7)$$

onde:

s = estado inicial.

s' = estado final.

$P(Sem\ demanda) = 0,7$ que representa a probabilidade de ausência de demanda operacional

$P(Com\ demanda) = 0,3$ que representa a probabilidade de ocorrência de demanda operacional

$R_{efetividade}(s, s')$ = recompensa associada à efetividade da ação tomada e os estados inicial e final.

$R_{sem\ demanda}(s)$ = recompensa pela ausência de demanda no estado s .

$R_{com\ demanda}(s)$ = recompensa pela presença de demanda no estado s .

As matrizes finais de recompensa para cada ação após aplicação dos cálculos apresentados, são representadas por:

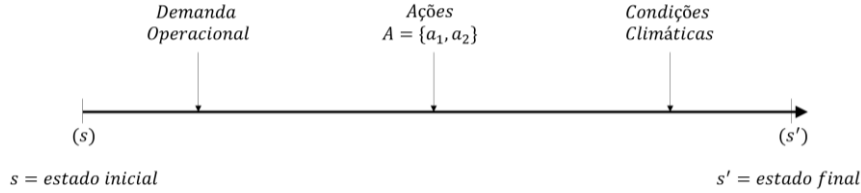
$$R_{final_drenar} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 49 & 9 & -21 & -41 & -71 \\ 31 & -24 & -39 & -69 & -89 \\ 38 & -2 & -37 & -52 & -82 \\ 5 & -45 & -95 & -100 & -115 \end{bmatrix}$$

$$R_{final_não\ drenar} = \begin{bmatrix} 65 & 65 & 65 & 65 & 65 \\ 29 & 49 & -21 & -41 & -71 \\ -19 & -19 & -44 & -69 & -89 \\ -32 & -32 & -32 & -57 & -82 \\ -95 & -95 & -95 & -95 & -195 \end{bmatrix}$$

A Figura 2 representa o fluxo temporal do modelo, em que a seta indica a evolução do sistema de um estado inicial (s) para um estado final (s'). Três fatores influenciam essa transição: (i) a demanda operacional, modelada como evento estocástico; (ii) as ações ($A = \{a_1, a_2\}$), que refletem a decisão de “Drenar” ou “Não drenar”; e (iii) as condições climáticas, que alteram o

volume da bacia conforme a intensidade da chuva. Esse fluxo sintetiza a interação entre os componentes do modelo e sua dinâmica ao longo do tempo.

Figura 2 - Linha temporal do modelo MDP para drenagem de bacias de contenção



Fonte: Autor (2025)

Política ótima $\pi^*(s)$. A política (π) define a ação a ser tomada em cada estado, e o objetivo de um MDP é encontrar a política ótima (π^*) que maximize o valor esperado das recompensas acumuladas ao longo do tempo. Esse processo utiliza as funções de valor dos estados $V(s)$ e das ação $Q(s, a)$, detalhadas a seguir.

A função $V(s)$ representa o valor esperado total das recompensas ao iniciar no estado s e seguir uma política específica (π). No contexto do modelo, ela estima o benefício acumulado de começar em um determinado nível da bacia (como “Vazio” ou “Cheio”) e adotar uma política de drenagem ou não drenagem:

$$V^\pi(s) = E\left[\sum_{t=0}^{\infty} \gamma^t R(s_t, a_t) \mid s_0 = s, \pi\right] \quad (8)$$

onde:

γ = fator de desconto ($0 < \gamma \leq 1$) que pondera recompensas futuras.

$R(s_t, a_t)$ = recompensa ao executar a ação a_t no estado s_t .

E = valor esperado considerando todas as transições possíveis.

A função $Q(s, a)$ representa o valor esperado de executar a ação a no estado s , considerando tanto a recompensa imediata quanto os benefícios futuros nos estados resultantes. No modelo, ela mede o impacto de “Drenar” ou “Não drenar” em cada estado, levando em conta as condições climáticas e a demanda operacional. Sua definição é:

$$Q(s, a) = \sum_{s'} P(s' \mid s, a) [R(s, a, s') + \gamma V(s')] \quad (9)$$

onde:

$P(s' \mid s, a)$ = probabilidade de transição de s para s' , dado que a ação a foi tomada;

$R(s, a, s')$ = recompensa imediata pela transição entre estados.

A política ótima $\pi^*(s)$ é definida como a ação que maximiza $Q(s, a)$ para cada estado:

$$\pi^*(s) = \arg \max_a Q(s, a) \quad (10)$$

Os resultados obtidos para $V(s)$, $Q(s, a)$, e $\pi^*(s)$ são apresentados na próxima seção.

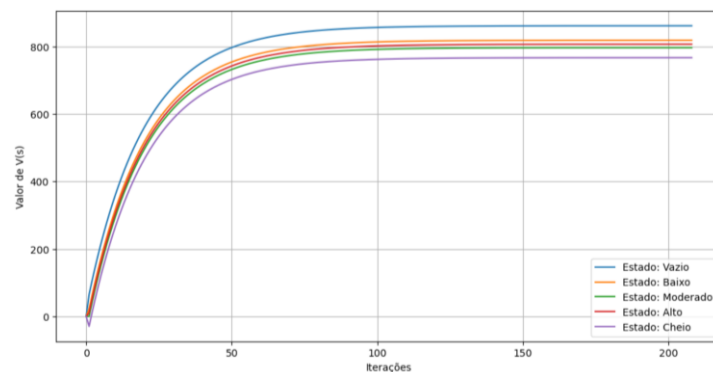
4. Resultados e discussões

Este tópico apresenta os resultados obtidos com o modelo desenvolvido, com foco na eficácia da política ótima e na contribuição dos valores $V(s)$ e $Q(s, a)$, para a tomada de decisão. As análises incluem: (i) evolução dos valores $V(s)$, ao longo das iterações do algoritmo de *Value Iteration*, (ii) influência dos valores de ação $Q(s, a)$ na política ótima; e (iii) desempenho da política em simulações. Os resultados são discutidos com foco na eficiência operacional e mitigação de riscos.

A evolução dos valores $V(s)$ permite observar como os estados convergem ao longo do processo iterativo. Cada estado (“Vazio”, “Baixo”, “Moderado”, “Alto”, “Cheio”) foi atualizado com base nas recompensas, probabilidades de transição e fator de desconto. O fator de desconto adotado foi $\gamma = 0,95$, que valoriza recompensas futuras e $\theta = 0,001$ como critério de convergência, encerrando o processo quando a variação entre iterações se torna insignificante.

A Figura 3 mostra a evolução dos valores $V(s)$. Inicialmente, os valores crescem rapidamente com a incorporação das recompensas. A convergência ocorre após 209 iterações, indicando estabilidade da função de valor e definição da política ótima. Os valores finais foram: Vazio = 861,33; Baixo = 818,45; Moderado = 796,42; Alto = 806,77; e Cheio = 766,80.

Figura 3 - Evolução dos valores $V(s)$ ao longo das iterações para os estados do sistema



Fonte: Autor (2025)

A convergência dos valores $V(s)$ indica que a política ótima está alinhada à maximização das recompensas acumuladas, equilibrando custos e benefícios operacionais. Os estados “Vazio” e “Baixo” apresentaram os maiores valores, refletindo maior eficiência e menor risco. Já o estado “Cheio” teve o menor valor, evidenciando alto risco e custos associados a ações corretivas. Isso confirma a coerência da política ótima com os objetivos operacionais do sistema.

A função $Q(s, a)$ detalha o impacto de cada ação em um estado, combinando recompensas imediatas e valores futuros. A Tabela 3 apresenta os valores de $Q(s, a)$ por iteração, evidenciando rápida estabilização após a primeira iteração, o que reflete a boa definição das recompensas e probabilidades no modelo.

Tabela 3 - Valores de $Q(s, a)$ por estado e ação ao longo das iterações

Estado (s), Ação (a)	Iteração 1 - $Q(s, a)$	Iteração 2 - $Q(s, a)$
s = "Vazio", a = "Drenar"	818,266871	818,266871
s = "Vazio", a = "Não drenar"	861,334474	861,334474
s = "Baixo", a = "Drenar"	818,450474	818,450474
s = "Baixo", a = "Não drenar"	777,027431	777,027431
s = "Moderado", a = "Drenar"	796,419974	796,419974
s = "Moderado", a = "Não drenar"	691,989205	691,989205
s = "Alto", a = "Drenar"	806,767474	806,767474
s = "Alto", a = "Não drenar"	681,728312	681,728312
s = "Cheio", a = "Drenar"	766,800474	766,800474
s = "Cheio", a = "Não drenar"	533,459571	533,459571

Fonte: Autor (2025)

Os valores finais de $Q(s, a)$, destacados na Tabela 3, indicam o impacto relativo das ações em cada estado. No estado “Vazio”, a ação “Não drenar” apresenta o maior valor esperado (861,33), sugerindo que evitar drenagem nesse nível traz o melhor benefício acumulado. Nos estados “Baixo”, “Moderado” e “Alto”, a ação “Drenar” tem valores superiores (818,45; 796,42; 806,77), refletindo maior eficiência em evitar acúmulo progressivo. Já no estado “Cheio”, “Não drenar” tem valor significativamente inferior (533,46), evidenciando os riscos da inação.

A Tabela 4 apresenta a política ótima gerada pelo modelo, que define a ação recomendada para cada estado, com base na maximização de $Q(s, a)$. O padrão identificado está alinhado às práticas operacionais:

- Em “Vazio”, a política recomenda “Não drenar”, pois não há ganho em esvaziar uma bacia já vazia;

- Para os estados “Baixo”, “Moderado” e “Alto”, a política aponta para “Drenar”, com vantagem nos valores de $Q(s, a)$;
- No estado “Cheio”, a drenagem é imprescindível, dada a penalização associada à omissão.

Esses resultados demonstram a consistência da política ótima com os objetivos de minimizar riscos e maximizar a eficiência das operações portuárias.

Tabela 4 - Comparação dos valores finais de $Q(s, a)$ para cada estado e ação, e a política ótima $\pi^*(s)$

Estado (s)	$Q(s, \text{"Drenar"})$	$Q(s, \text{"Não drenar"})$	Política ótima ($\pi^*(s)$)
Vazio	818,27	861,33	Não drenar
Baixo	818,45	777,03	Drenar
Moderado	796,42	691,99	Drenar
Alto	806,77	681,73	Drenar
Cheio	766,80	533,46	Drenar

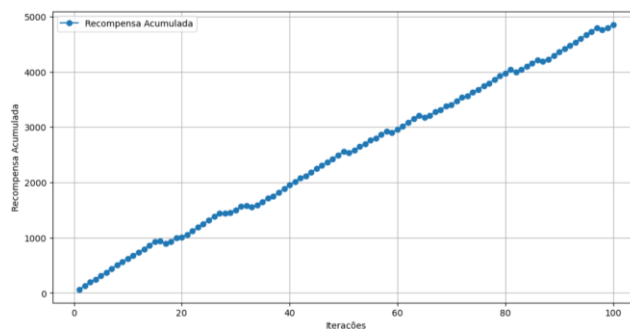
Fonte: Autor (2025)

Para validar o modelo MDP, foi realizada uma simulação computacional com 100 iterações, com o objetivo de avaliar o comportamento do sistema sob decisões orientadas pela política ótima. A simulação considerou variações nas condições climáticas e nas demandas operacionais ao longo de um horizonte temporal, permitindo verificar a eficácia do modelo na otimização das ações e no gerenciamento das incertezas do sistema.

A simulação foi conduzida em etapas sequenciais, iniciando com a escolha aleatória de um estado entre os cinco possíveis (“Vazio” a “Cheio”), mantendo as probabilidades climáticas e de demanda conforme os parâmetros do modelo. A cada iteração, a ação ótima foi determinada com base na política derivada e o próximo estado foi calculado considerando os efeitos da ação (“Drenar” ou “Não drenar”), das chuvas simuladas e da presença ou ausência de demanda. As recompensas foram acumuladas ao longo de 100 ciclos, com registro detalhado de cada etapa: estado atual, ação executada, condição climática, demanda, estado seguinte, recompensa individual e acumulada.

A Figura 4 apresenta a evolução da recompensa acumulada ao longo das iterações. O crescimento consistente observado no gráfico confirma a eficácia da política ótima em maximizar os ganhos esperados, otimizando as decisões de drenagem frente às incertezas do sistema.

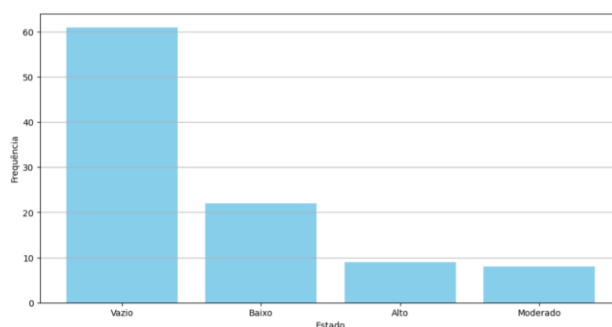
Figura 4 - Evolução das recompensas acumuladas ao longo da simulação



Fonte: Autor (2025)

A Figura 5 mostra a distribuição dos estados visitados ao longo da simulação. O estado “Vazio” foi o mais frequente, refletindo a predominância da ação “Drenar” nos estados intermediários e altos. Esse padrão é coerente com a política ótima, que busca manter os níveis da bacia em condições operacionais seguras. A baixa ocorrência dos estados “Alto” e “Cheio” reforça a eficácia do modelo na prevenção de situações críticas.

Figura 5 - Distribuição dos estados (s) visitados durante a simulação



Fonte: Autor (2025)

Os resultados confirmam a capacidade da política ótima em minimizar penalidades associadas a estados críticos e maximizar os benefícios operacionais. A consistência entre os resultados simulados e a estratégia definida valida a robustez do modelo como ferramenta de apoio à decisão na gestão de bacias de contenção em terminais de granéis líquidos.

5. Conclusões e recomendações

Este estudo contribui com a aplicação dos Processos de Decisão Markovianos (MDPs) na gestão de drenagem em bacias de contenção, um tema ainda pouco explorado. Ao contrário de Liu et al. (2019), focado em drenagem urbana, ou Lv et al. (2024), aplicados à alocação de recursos portuários, o presente modelo foca em decisões operacionais específicas de terminais de granéis líquidos, incorporando variáveis estocásticas como chuvas e demandas.

A política ótima derivada oferece suporte à tomada de decisão, permitindo reduzir riscos, atender regulamentações ambientais e otimizar o uso de recursos em operações portuárias.

Como limitações, destaca-se o uso de probabilidades fixas e a simplificação no número de estados e ações. Pesquisas futuras podem explorar o uso de aprendizado por reforço profundo e a modelagem de múltiplas bacias interligadas.

Em síntese, o modelo desenvolvido fornece uma base analítica robusta para decisões em contextos operacionais complexos e podendo ser expandido a cenários industriais similares.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Parte 2: Armazenagem em tanques, vasos e recipientes portáteis. NBR 17505-5. Outubro de 2022 BRASIL.

Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 398, de 11 de junho de 2008. Dispõe sobre o conteúdo mínimo do Plano de Emergência Individual para incidentes de poluição por óleo em águas sob jurisdição nacional, e orienta sua elaboração. Diário Oficial da União, Brasília, DF, n. 111, 12 jun. 2008. Seção 1, p. 101-104.

Dagkinis, I. K., Psomas, P. M., Platis, A. N., & Dragović, B. (2023). Modelling of the availability for the ship integrated control system sensors. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 9, 100119. DOI: 10.1016/j.clscn.2023.100119.

De Giacomo, G., Favorito, M., Leotta, F., Mecella, M., Silo, L. (2023). Digital twin composition in smart manufacturing via Markov decision processes. *Computers in Industry*, 149, 103916. DOI: 10.1016/j.compind.2023.103916.

Notteboom, T., Pallis, A., Pallis, A., Rodrigue, J.-P., & Rodrigue, J.-P. (2022). *Port Economics, Management and Policy* (1st ed.). Routledge. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429318184>

Karan Sotoodeh, Chapter 2 - Storage tank types and components, Editor(s): Karan Sotoodeh, *Storage Tanks Selection, Design, Testing, Inspection, and Maintenance*, Elsevier, 2024, Pages 35-63, ISBN 9780443239090, <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23909-0.00003-5>.

Karan Sotoodeh, Chapter 3 - Storage tank emission management, 2024, Editor(s): Karan Sotoodeh, *Storage Tanks Selection, Design, Testing, Inspection, and Maintenance*, Elsevier, 2024, Pages 65-100, ISBN 9780443239090, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23909-0.00006-0>

Liu, G., Chen, L., Shen, Z., Xiao, Y., & Wei, G. (2019). A fast and robust simulation-optimization methodology for stormwater quality management. *Journal of Hydrology*, 576, 520–527. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.073.

Lv, Y., Zou, M., Li, J., Liu, J. (2024). Dynamic berth allocation under uncertainties based on deep reinforcement learning towards resilient ports. *Ocean and Coastal Management*, 252, 107113. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2024.107113.

Puterman, M.L. (1994) *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons Ltd., New York. DOI: 10.1002/9780470316887

SANTOS. *Pluviometria - Tabela*. Prefeitura de Santos. Disponível em: <https://www.santos.sp.gov.br/?q=pluviometria-tabela>. Acesso em: 13 jan. 2025.

Van den Eijnden, A. P., et al. (2024). CON-SST-RAIN: Continuous Stochastic Space–Time Rainfall generation based on Markov chains and transposition of weather radar data. *Journal of Hydrology*. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.129840.

Zhao, Q. H., Chen, S., Leung, S. C. H., Lai, K. K. (2010). Integration of inventory and transportation decisions in a logistics system. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(6), 913–925. DOI: 10.1016/j.tre.2010.03.001.