SIMULAÇÃO APLICADA À LOGÍSTICA MARÍTIMA DE PETRÓLEO E DERIVADOS

Guilherme de Freitas Silva
Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
guilherme.f.silva@petrobras.com.br

André Luís Nunes Mello
Petróleo Brasileiro SA – Petrobras
Av. Henrique Valadares, 28 – Centro, Rio de Janeiro – RJ, 20231-030
almello@petrobras.com.br

Igor Tona Peres
Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea, Rio de Janeiro - RJ, 22451-900
igor.peres@puc-rio.br

RESUMO

A logística do *downstream* da Petrobras desempenha um papel crucial na rentabilidade da Companhia. Ela é responsável por garantir que os produtos explorados, produzidos e comercializados pela empresa cheguem, de forma eficiente e segura, aos seus destinos. Desse modo, o uso de técnicas analíticas adequadas para suporte à decisão, dentre elas, a simulação, se torna de grande valia. Este artigo aplica um framework de Simulação de Eventos Discretos (SED) adaptado da literatura em um caso real da Petrobras, sobre a entrega de bunker (combustível marítimo), via barcaças, em um terminal marítimo. Diversos cenários futuros de crescimento de demanda foram gerados e comparados, testando a frota disponível e demonstrando, assim, a eficácia de SED bem aplicada na melhoria da tomada de decisão em logística. A pesquisa é de natureza exploratória e utiliza tanto fontes secundárias quanto primárias.

PALAVRAS CHAVE. Simulação de Eventos Discretos, Logística Marítima do *Downstream*, Framework.

Tópicos (Simulação, Logística e Transportes)

ABSTRACT

The downstream logistics of Petrobras plays a crucial role in the Company's profitability. It is responsible for ensuring that the products explored, produced, and commercialized by the company reach their destinations efficiently and safely. Thus, the use of appropriate analytical techniques for decision support, including simulation, becomes highly valuable. This article applies a Discrete Event Simulation (DES) framework adapted from literature to a real case at Petrobras, concerning the delivery of bunker (marine fuel) via barges at one terminal. Various future demand growth scenarios were generated and compared, testing the available fleet and thus demonstrating the effectiveness of well-applied DES in improving decision-making in logistics. The research is exploratory in nature and uses both secondary and primary sources.

KEYWORDS. Discrete Event Simulation, Maritime Logistics of Downstream, Framework.

Paper topics (Simulation, Logistics and Transports)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

1. Introdução

De acordo com [Branski 2015], a logística marítima comercial (ou do downstream) de petróleo e derivados envolve o transporte, via embarcações de diversos portes, e a armazenagem em terminais e outras estruturas, de petróleo cru e seus derivados, como bunker, gasolina e diesel, para venda no mercado interno e externo. Esta atividade é altamente complexa, devido à natureza estocástica dos tempos e movimentos envolvidos, além da interdependência entre diversos sistemas e componentes. Entre esses componentes estão os trabalhadores, incluindo operadores de veículos, técnicos dos terminais, analistas e *traders*; os veículos, que neste caso são variados tipos de embarcações; as estruturas portuárias e equipamentos; e os sistemas e equipes de TI. Consequentemente, há um grande volume de capital envolvido. Além disso, conforme [Silva 2004], o valor da carga transportada e os riscos associados, como vazamentos que causam danos ambientais e explosões que podem resultar em perdas de vidas humanas, tornam essa logística ainda mais crítica.

Desse modo, torna-se imperativo o uso de técnicas analíticas para suporte às tomadas de decisão na logística marítima do *downstream*, com embasamento e segurança. Sendo assim, a Simulação de Eventos Discretos (SED) apresenta-se como uma técnica bastante útil para este campo do conhecimento. Entretanto, analistas de logística mais acostumados com as técnicas mais tradicionais, utilizando modelos matemáticos determinísticos em planilhas, slides e outras ferramentas similares podem considerar, em um primeiro momento, simulação algo complexo e de difícil execução, mesmo gestores podem querer recorrer ao departamento de Tecnologia da Informação (TI) da empresa em busca de apoio. Por isso, faz-se fundamental a identificação de um framework para uso de SED em logística que permita que um analista de negócios comum possa, com um conhecimento básico de algum software comercial pronto para uso, como Arena®, começar a utilizar simulação, sem perder o rigor necessário para se chegar a conclusões assertivas.

Na Petrobras, especificamente, a simulação de operações logísticas marítimas comerciais justifica-se também pelas cifras envolvidas no setor, correspondendo a aproximadamente 15% do Opex da companhia, aproximadamente US$3 bilhões/ano – além do Capex potencial, com uma única embarcação podendo custar dezenas de milhões de dólares. Ademais, some-se a isso a utilização de softwares prontos para uso disponíveis no mercado e de um framework (testado na empresa) de acordo com o rigor científico, em termos de simulação de eventos discretos (SED), que possibilita ainda realizar este trabalho de maneira eficiente, com agilidade e poupando recursos humanos.

Portanto, utilizar simulação para analisar os problemas de logística marítima do *downstream* da empresa permite um suporte à decisão baseado em dados e de forma muito mais segura que uma simples análise "*what if*" em planilhas, haja vista que com SED é possível aplicar a variabilidade típica dos sistemas reais. Entretanto, sem um framework adequado no qual se basear, o analista pode incorrer em empreendimentos não frutíferos, como, por exemplo, querer abordar um escopo amplo ou complexo demais, ou ainda tomar decisões a partir de cenários não validados. Por isso, é fundamental usar a ferramenta certa e do modo certo, ou seja, com um bom framework guiando o processo.

Sendo assim, o presente artigo estabeleceu a seguinte pergunta de pesquisa: "Como um analista comum pode usar simulação, de maneira adequada, na logística marítima do *downstream* da Petrobras para resolver problemas de escopo reduzido?".

Em conformidade com a pergunta de pesquisa, estabelece-se o seguinte objetivo geral: identificar um Framework de Simulação de Eventos Discretos útil para logística marítima do *downstream* na Petrobras, em problemas de escopo reduzido (ou localizados, ou ainda, específicos) a partir de softwares prontos para uso. Nesse contexto, para alcançar o objetivo geral de pesquisa, os objetivos específicos do presente trabalho são: conceituar simulação de eventos discretos (SED)

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

e softwares prontos para uso, ou de prateleira, neste contexto; conceituar Logística Marítima do downstream; identificar o Framework; aplicar SED com dados e demanda reais da empresa.

Considerando o objetivo central do trabalho, a pesquisa assume natureza exploratória, que segundo [Gil 2002] pode se manifestar como uma pesquisa bibliográfica ou estudo de caso, com fins de entender melhor o objeto de pesquisa. Para isso, utilizará fontes secundárias de dados, principalmente a estrutura de simulação apresentada por [Manuj et al. 2009], mas sem deixar de lado também outros autores relevantes para o campo, como [Bienstock 1994], [Banks 1998] e [Law 2006]. Além disso, utilizará também fonte primária, que será uma base de dados dos sistemas da empresa, extraída e tratada no formato de planilha Excel®. Esta base contém dados de movimentações de entregas de Bunker, via barcaças, no terminal B, ao longo de quase quatro anos. A análise deste caso real da empresa será por meio de um framework de SED na logística, que especifica cada passo a ser tomado e sua ordem.

Para isso, o trabalho está dividido nas seguintes seções: Seção 1- (Introdução): com contextualização do tema e metodologia de trabalho; Seção 2- (Referencial Teórico): contendo a conceituação de simulação de eventos discretos e de logística marítima do *downstream* de acordo com a literatura; Seção 3- (Framework): em que será identificado e explicado o passo a passo necessário para a correta aplicação de simulação dentro do contexto; Seção 4- (Resultados): aplicação do framework em um problema real da Petrobras; Seção 5- (Conclusões): considerações finais e sugestões de novas pesquisas.

2 – Referencial Teórico

De acordo com [Branski 2015], a cadeia de suprimentos da indústria do petróleo pode ser classificada em dois segmentos distintos: *upstream* e *downstream.* No primeiro encontram-se atividades como: exploração, desenvolvimento, produção e transporte. No segundo: refino, comercialização e transporte. Percebe-se que em ambos o transporte (e armazenagem) são elementos em comum, desse modo, é importante diferenciar a logística de produção, mais relacionada ao *upstream*, da logística de comercialização, foco deste trabalho, mais voltada ao *downstream*.

Para operar as plataformas de petróleo são necessários centenas de itens, desde os mais simples até os mais complexos, como máquinas e equipamentos, e isto exige toda uma logística própria, com armazéns especializados e diversos tipos de embarcações de apoio [Jacoby 2012]. Esta atividade de apoio à produção não limita, mas caracteriza a logística de exploração e produção, em que também é possível utilizar simulação, mas não é foco deste trabalho.

Já no *downstream,* de acordo com [Shah e Ierapetritou 2011] a estrutura logística é composta por terminais para armazenamento de matéria prima, unidades de produção e de mistura, refinarias, terminais intermediários e terminais para armazenamento dos produtos finais. Desse modo, caracteriza-se uma logística diferente da primeira, voltada à comercialização de petróleo e derivados, que poderão ser movimentados por diversos modais, entre eles, o marítimo, foco deste trabalho.

Segundo [Tudorica 2014], os meios utilizados para o transporte de petróleo e derivados são: rodovias (caminhões), ferrovias (trens), água (embarcações) e dutos. Ainda de acordo com este trabalho, em termos mundiais, os dutos são os mais utilizados, no entanto, ficam restritos ao transporte dentro das massas de terra. Quando se considera o transporte entre continentes, os grandes líderes são os navios, transportando grandes volumes com eficiência operacional e econômica.

Localizado o transporte marítimo do *downstream* na indústria do petróleo e dada a relevância desta atividade, cabe agora caracterizar a Simulação de Eventos Discretos (SED) que, para [Babulak 2010] é a representação de um sistema do mundo real, simulando sua dinâmica evento por evento e gerando relatórios detalhados de performance. Nos últimos anos esta técnica

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

tornou-se uma das principais nas ferramentas computacionais de apoio à decisão, dado a evolução do poder computacional.

Para [Fishman 2001], existem diversas formas de se analisar um sistema, a simulação é uma delas e, além disso, existem diversas formas de se simular, sendo simulação de eventos discretos uma delas, conforme mostra a Figura 1 a seguir.

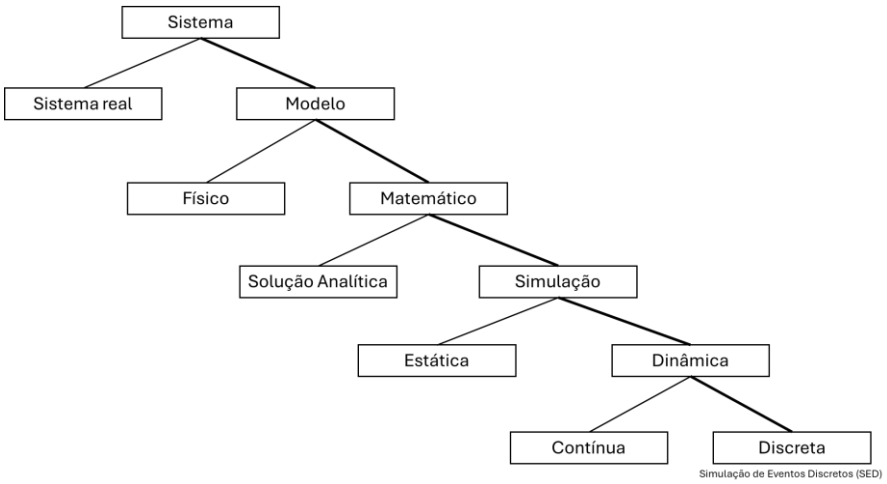


Fig. 1. Formas de estudar um sistema – Adaptado de [Fishman 2001]

Nota-se na Figura 1 que um sistema pode ser analisado por experimentos com e sem modelagem. Quando modelos são usados, eles podem ser físicos ou matemáticos, sendo que estes últimos se desdobram ainda em analíticos e de simulação. Simulação por sua vez, pode ser estática (Monte Carlo) ou dinâmica, sendo esta última do tipo contínuo ou discreto (caso em estudo), caracterizando a Simulação de Eventos Discretos (SED).

A partir do momento que se entende que é possível e recomendável utilizar Simulação de Eventos Discretos (SED) para estudar determinado sistema, o analista precisa escolher qual ferramenta utilizar. Neste sentido, existem basicamente três caminhos possíveis: softwares comerciais prontos para uso, como Arena ® e Pró-Model ®; Softwares *open-source*, como Salabim e JaamSim; Modelos proprietários, desenvolvidos internamente por grandes indústrias. Para [Lang 2021], softwares de simulação *open-source* podem ser uma boa alternativa para pequenas e médias empresas, mas ainda estão muito restritos à academia e a um pequeno grupo de desenvolvedores, não encontrando ainda aplicações práticas em engenharia industrial e logística. Desse modo, entende-se que os softwares prontos para uso representam excelente custo-benefício, em termos de recursos necessários para uso e aplicações possíveis, na logística do *downstream* da Petrobras.

[Manuj et al. 2009] propõem um Framework de oito passos para aplicar simulação em logística e cadeia de suprimentos com rigor científico:

Passo 1: Formular o problema/Declarar o objetivo do modelo com precisão/Envolver partes interessadas e especialistas na formulação do problema => **Passo 2:** Especificar variáveis independentes e dependentes/Definir variáveis independentes/Definir variáveis dependentes => **Passo 3:** Desenvolver e validar o modelo conceitual/Especificar suposições, algoritmos e componentes do modelo/Realizar uma revisão estruturada com especialistas => **Passo 4:** Coletar dados/Definir requisitos de dados/Estabelecer fontes para coleta de dados => **Passo 5:** Desenvolver e verificar o modelo baseado em computador/Desenvolver um fluxograma detalhado/Escolher o ambiente de programação/Envolver um programador independente/Verificar a saída do modelo em comparação com cálculos manuais => **Passo 6:** Envolver especialistas no assunto/Realizar uma revisão estruturada/Verificar a razoabilidade dos resultados/Realizar validação dos resultados, se possível/Realizar análise de sensibilidade => **Passo 7:** Realizar simulações/Especificar o tamanho

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

da amostra, ou seja, o número de replicações independentes/Especificar a duração da execução e o período de aquecimento/Realizar execuções de simulação => **Passo 8:** Analisar e documentar os resultados/Estabelecer técnicas estatísticas apropriadas/Documentar os resultados.

Por fim, ressaltando a relevância que Simulação de Eventos Discretos vem adquirindo na logística, [Bottani et al. 2024] concluem, em sua revisão da literatura, na qual analisa 900 artigos, que SED na logística tem adquirido maturidade científica e pode se esperar que adquira o *status* de campo de pesquisa autônomo no futuro.

3 – Framework

A partir do referencial teórico e dos testes práticos com um problema real, é identificado o seguinte Framework para Simulação de Eventos Discretos na Logística, que será aplicado na logística marítima do *downstream* na Petrobras, em problemas de escopo reduzido a partir de softwares prontos para uso:



Fig. 2. Framework de SED na Logística – Adaptado de Manuj *et al* (2009)

As etapas destacadas em azul claro são recursivas, ou seja, podem ser cíclicas conforme a necessidade, por exemplo, é possível escolher outras variáveis, melhores candidatas, para serem analisadas o que leva à necessidade de rever os passos seguintes. Além disso, após o resultado do cenário alternativo gerado pode ser necessária a criação de outros cenários. Observação: na etapa de validar o modelo, é necessário fazer ajustes até o modelo ser estatisticamente validado, antes que se possa passar para a etapa seguinte.

Detalhamento do Framework:

1. Analisar se a demanda se enquadra no **escopo** previamente definido para trabalhos dessa natureza, ou seja, neste caso específico: *"1 local, 1 produto, 1 veículo"* – problemas de escopo reduzido.
2. Desenhar **modelo conceitual** do problema (fluxograma de processos) para adquirir o nível de conhecimento necessário sobre a operação a ser simulada.
3. A partir do modelo conceitual, definir as diversas **variáveis** do trabalho: entrada, saída, aleatórias, de decisão. Além disso, quais **indicadores** serão utilizados para comparar os diversos cenários.
4. Análise e **tratamento da base de dados** de uma amostra suficientemente grande da operação real, verificando, por meio da análise de quartis, se existem outliers e os expurgando quando se julgar necessário.
5. A partir da base tratada, gerar as **distribuições de probabilidade** das variáveis aleatórias por meio do Input Analyzer do Arena®.
6. Criar o **modelo de simulação no ARENA®** no cenário base, buscando replicar a operação real existente.
7. A partir de uma variável de saída relevante, fazer **testes estatísticos** (Teste T ou Teste Z, a depender do tamanho da amostra) a fim de **validar a aderência do modelo** à realidade no cenário base – fazer ajustes, caso necessário.
8. Assim que o cenário base estiver validado, construir o(s) **cenário(s) alternativo(s)**.
9. **Comparar os cenários**: base x alternativo(s), por meio dos indicadores definidos anteriormente.
10. Gerar **relatório final** com a análise realizada, principalmente as implicações da comparação de cenários, mas incluindo tudo que for pertinente à demanda.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

4 – Resultados

A demanda envolvia o fornecimento, no terminal B, de dois tipos de combustível marítimo (bunker) – *Marine Fuel Oil* (MFO) e *Marine Gas Oil* (MGO). A solicitação consistia em testar a capacidade existente de transporte em barcaças destinada ao atendimento do mercado local para os próximos anos, com expectativas, pela área Comercial, de aumento expressivo da demanda. Foram analisados os seguintes cenários alternativos de aumento de demanda: 4x, 8x e 12x, ou seja, a frota atual foi testada em condições de demanda por bunker na região aumentada de quatro a doze vezes. A frota testada era composta por duas Barcaças-Tanque (BT): BT PC, com capacidade de 3200 toneladas de MFO, e BT FX, com capacidade de 1550 toneladas de MFO e 515 toneladas de MGO. A base de dados utilizada incluía movimentações de 44 meses de operações.

Identificou-se que atendia ao escopo, conforme etapa 1, haja visto que envolvia apenas um terminal, terminal B, um produto, bunker (apesar de dois subtipos, MFO e MGO) e um tipo de veículo (barcaça). Sendo assim, pode-se seguir para a etapa 2, ou seja, desenhar o modelo conceitual do problema, após análise inicial exploratória e conversas com especialistas, chegou-se ao modelo que segue, na figura 3, desenvolvido por meio do software Bizagi ®.

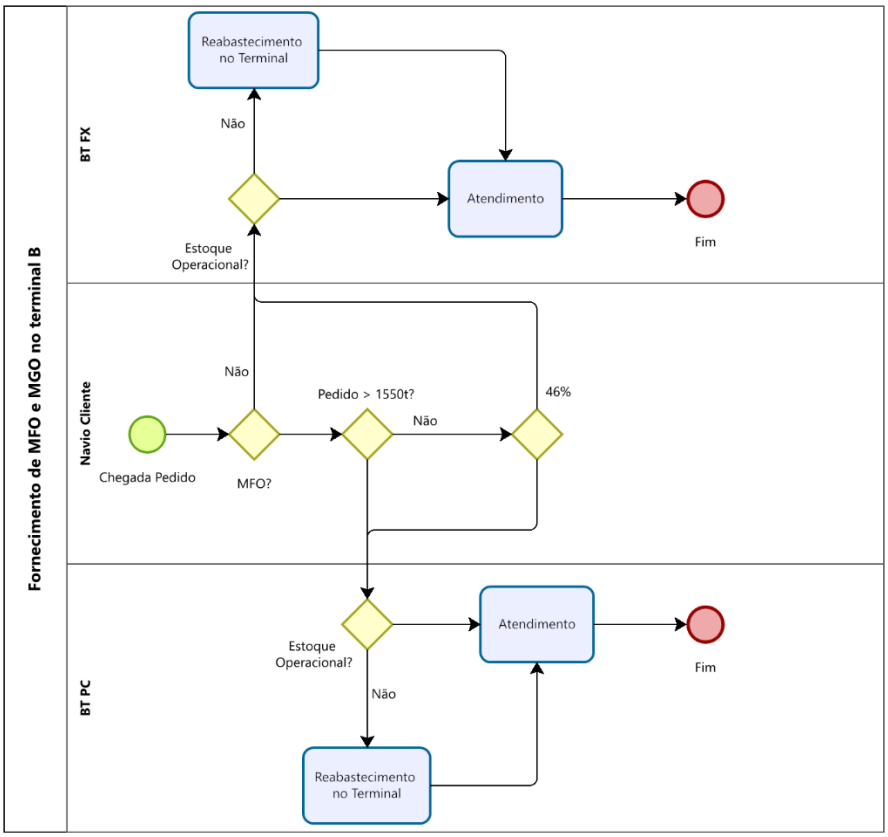


Fig. 3: modelo conceitual

Conforme pode ser observado, tudo começa com a chegada do pedido pelo Navio Cliente, com frequência e lote de pedido aleatórios. A solicitação pode ser por MFO ou MGO, os clientes consomem ambos, em frequências e quantidades geralmente distintas entre os produtos. Caso a solicitação não seja de MFO, somente a BT FX consegue atender, caso seja, ambas têm capacidade, entretanto para pedidos de MFO acima de 1550 toneladas, apenas a BT PC consegue suprir. Para pedidos menores, pela análise da base, percebeu-se que, nestes casos, 46% das vezes o atendimento era feito pela BT FX. Na sequência, os processos em cada uma das barcaças são semelhantes: verifica-se a existência de estoque operacional para atender o pedido, observou-se, na prática, que, geralmente, as barcaças não atendem até chegar seu estoque a zero, elas reabastecem antes disso,

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

desse modo, considerou-se estoque operacional esse valor médio no reabastecimento, variável de ajuste que foi muito importante na validação estatística do modelo. Desse modo, caso a barcaça tenha estoque operacional para atender o pedido, ela o fará, caso não, ela primeiramente seguirá para o reabastecimento, até sua capacidade máxima, no terminal e, somente após isso, fará o atendimento do pedido, finalizando assim este processo.

Na sequência, na etapa 3, é necessário definir as variáveis e indicadores. As variáveis de entrada incluem a frequência de chegada de pedidos (dias), a quantidade pedida (toneladas), o tempo de atendimento da BT ao cliente (dias) e o tempo de reabastecimento da BT no terminal (dias). As variáveis de saída possíveis são filas, tempo nas filas, número de pedidos em fila, utilização das BTs, estoque nas BTs (variável de validação do modelo) e *lead-time* (variável de decisão e indicador).

Na etapa de tratamento da base de dados, etapa 4, partiu-se de uma base inicial com 1025 registros e 17 variáveis (Embarcação de bunker, Tanque, Embarcação Abastecida, Produto, Data e hora início, Data e hora término, Quantidade Programada, Unidade, Volume Ambiente, Volume Litros a 20ºC, Massa Kg, Local de Entrega, Tipo Operação, Data Prevista Entrega, Tp VGM, Agente, Armador) para três bases, MFO PC (Marine Fuel Oil na BT PC), MFO Flexal (Marine Fuel Oil na BT FX) e MGO (que é entregue somente pela BT FX) cada uma com 8 variáveis (Data Início, Data Término, Massa Ton, Tipo Operação, Data Pedido, F pedidos, t abast, Estoque BT) e 815 registros no total.

Foram feitos os seguintes tratamentos para se chegar a isso: na coluna produto, agrupou-se MF180, MF380, VLSFO e VLSFOSLV em MFO, haja visto que todos são tipos de MFO. Em Tipo Operação, transformou-se “Abast Barcaca” em “Atendimento”, representando a entrega de produto ao cliente e as demais operações cadastradas (CG, CG Transbordo e DG) em “Reabastecimento”, representando a operação de buscar produto no terminal. Selecionou-se somente as colunas de interesse, quais foram: Embarcação de Bunker, Produto, Data Início, Data Término, Massa kg, Tipo Operação, Data Prevista Entrega. Mudou-se o nome da coluna Embarcação de Bunker para BT e considerou-se a Data Prevista Entrega como o momento de chegada do pedido, alterando assim o nome da coluna para Data Pedido. Transformou-se ainda Massa Kg para Massa Ton. Por fim, separou-se em três bases distintas conforme o produto e barcaça. Todas estas operações foram feitas no Power Query e Tabelas do Excel®.

Na sequência, no Excel®, inseriu-se três colunas calculadas: frequência de chegada dos pedidos (F pedidos) – Dias entre um pedido e outro; Tempo de abastecimento BT ao cliente (t abast) – Dias entre Data Término e Data Início; Estoque de cada BT ao fim de cada atendimento (estoque BT) – Balanço de massa em toneladas, em que o estoque de cada barcaça aumenta com operações de Reabastecimento, enquanto reduz nas operações de Atendimento. Por fim, foi feita análise crítica dos outliers extremos das colunas calculadas e da coluna Massa (t) por meio da análise de quartis, em que os outliers extremos superiores são calculados por: 2ºQ + 3*IQR (1) e os inferiores por 2ºQ – 3*IQR (2), em que Q é quartil e IQR é o intervalo interquartil.

Após o tratamento da base, foram geradas as distribuições das variáveis aleatórias do modelo, na etapa 5, por meio do uso da ferramenta Input Analyzer, do ARENA®. Pode se observar o resultado na figura abaixo.

Estatísticas / Variáveis	Frequência MFO (dias)	Frequência MGO (dias)	Massa MFO (t)	Massa MGO (t)
Nº Pontos	512	107	528	112
Mínimo	0	0	22,5	9
Máximo	19	19,6	1800	425
Média	3,16	4,47	496	69
Desvio Padrão	3,16	4,64	381	76,3
Distribuição	Gama	Exponencial	Lognormal	Weibull
Expressão	-0.001 + GAMM(3.74, 0.845)	-0.001 + EXPO(4.47)	22 + LOGN(493, 490)	9 + WEIB(56.4, 0.892)
Erro quadrático	0,6%	0,4%	1,1%	3,6%
P-value Kolmogorov	11,1%	>15%	12,8%	2,9%

Fig. 4: Distribuições de probabilidades

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

Além das quatro principais distribuições apresentadas na figura acima, que são as frequências de pedidos, em dias, e as quantidades pedidas, em toneladas, obteve-se ainda as distribuições de tempo de abastecimento por pedido, também em dias, para cada barcaça e tipo de produto. Este tempo compreende as etapas de conexão da barcaça no cliente, transferência do produto e desconexão. MFO PC: LOGN(0.143,0.112); MFO FX: LOGN(0.117,0.0742); MGO: LOGN(0.0521,0.0299). Observação: a todas elas foram acrescentados ainda 0,25 dia, ou 6 horas, tempo arbitrado como duração média do deslocamento entre clientes, ou cliente – terminal.

O Input Analyzer seleciona automaticamente a "melhor curva" com base naquela que tiver o menor erro quadrático. No entanto, é importante observar também o "Teste de Kolmogorov-Smirnov" e verificar se a curva indicada tem *P-value* maior que 5% (nível de significância considerado) - indicando a boa aderência da curva aos dados reais. Observação: O tempo no terminal para reabastecimento não é determinado por distribuição de probabilidades no modelo e sim por uma função linear que leva em consideração dados de vazão das barcaças acrescido de um valor fixo de 0,48 dia, arbitrado.

Na sequência, na etapa 6, criou-se o modelo em ARENA®, conforme a figura abaixo.

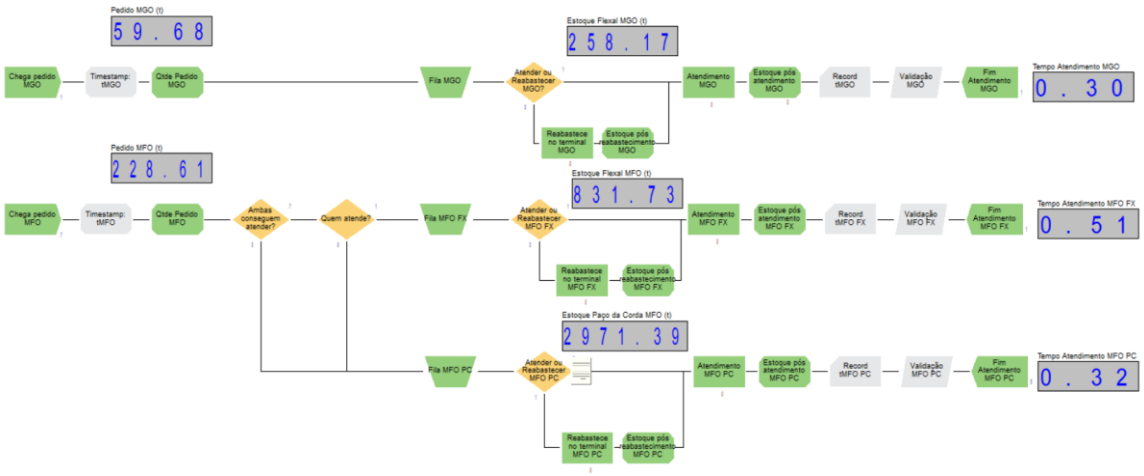


Fig. 5: Modelo no ARENA®

Como pode ser visto na figura acima, existem dois módulos *create* que reproduzem a frequência de chegada de pedidos, um para MGO e outro para MFO, conforme as distribuições calculadas na etapa anterior. Na sequência foi colocado um *Timestamp* para registrar o momento da chegada dos pedidos e próximo ao fim das sequências existem os módulos *Record*, que registram o momento da finalização de atendimento dos pedidos e calculam este tempo de ciclo, ou *lead-time*, tempo entre a chegada do pedido e seu atendimento, importante indicador de nível de serviço e variável de decisão.

Na sequência, se aplicam módulos *Assign,* representando o tamanho dos pedidos, conforme as curvas de distribuição de probabilidades calculadas anteriormente. Após isso, existe uma etapa importante de alocação do pedido ao recurso, no caso do MGO, só existe um possível, a barcaça FX, já no caso do MFO são necessários dois *Decides* para definir qual barcaça vai atender o pedido, o primeiro é para verificar se o tamanho do pedido é menor ou igual a 1550 toneladas, caso em que ambas poderiam atender, e o seguinte é um simples *"2-way by Chance"*, em que 46% dos pedidos que chegam a esse módulo são direcionados para atendimento via FX e o restante para a PC, conforme se observou nos dados das operações realizadas.

Após a atribuição de recurso realizada, observam-se *Decides* para verificar a existência de estoque operacional disponível para atendimento do pedido ou se será necessário reabastecimento no terminal antes. Observou-se, na prática, que as barcaças não realizam atendimento até finalizar os estoques, elas reabastecem antes disso, a definição deste estoque de reabastecimento é

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

fundamental para a validação do modelo, que é feita justamente a partir do estoque nas barcaças após cada atendimento. Depois dessa decisão, a barcaça pode atender ou reabastecer, respeitando as distribuições e valores definidos anteriormente para isso, em ambos os casos existe um *Assign* na sequência para atualizar o estoque existente, no caso de reabastecer, os estoques retornam a 100% da capacidade.

Por fim, existem módulos *ReadWrite* para registrar em uma planilha Excel® externa o estoque em cada barcaça após cada atendimento, importante para a etapa seguinte, de validação, e registrar o *lead-time* de cada pedido, que será importante na análise de cenários. Seguido a isso, tem-se os *Disposes,* finalizando as lógicas. Para além da modelagem lógica, foram inseridos no modelo *displays* para se acompanhar algumas variáveis-chave durante a simulação, como o tamanho dos pedidos, os estoques de produtos nas barcaças e os tempos de atendimento.

Para finalizar a etapa 6, de modelagem no ARENA®, foram definidos os parâmetros de replicação do modelo. Levando em consideração que foi analisado um sistema não terminal, ou seja, em que as operações ocorrem 24 horas por dia, definiu-se como cinco o número de replicações, duração de 365 dias de cada replicação, com período de aquecimento de 20 dias e unidade de tempo base em dias.

Na etapa 7, para validar estatisticamente o modelo, é comparada alguma variável de saída dele com esta mesma variável gerada nos dados reais. No caso do projeto, foi escolhido o estoque restante em cada barcaça após cada atendimento, a hipótese testada é de igualdade das médias, presumindo variâncias equivalentes, o teste utilizado foi o Teste-t. Neste teste, para validação, cada *P-value* (uni-caudal e bi-caudal) deve ser maior que 5%. Abaixo segue a figura 6 com exemplo desta validação para MFO na BT PC.

Teste-t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes

	Observado	*Simulado*
Média	1.423	1.479
Variância	713.282	738.737
Observações	336	335
Variância agrupada	725.991	
Hipótese da diferença de média	0	
gl	669	
Stat t	-0,854	
P(T<=t) uni-caudal	0,197	
t crítico uni-caudal	1,647	
P(T<=t) bi-caudal	0,394	
t crítico bi-caudal	1,964	

Fig.6: Validação do modelo

Percebe-se que a média do estoque na BT PC após cada atendimento nos dados históricos é de 1.423 toneladas de MFO, com variância de 713.282 toneladas, enquanto para os dados simulados, obteve-se média de 1.479 toneladas e variância 738.737 toneladas. Com um P uni-caudal de 19,7% e um P bi-caudal de 39,4%, ambos acima de 5%, tem-se, assim, a validação da hipótese nula de que as médias dos estoques são estatisticamente iguais. Portanto, modelo validado para este caso. O mesmo procedimento foi aplicado para MFO na FX e para MGO, validando assim o modelo por completo.

Na etapa 8, de construção de cenários alternativos, no caso do projeto, a frota existente foi testada em condições de aumento de demanda, em linha à solicitação da Comercial, em 4x, 8x e 12x, respectivamente. Foi feito isso aumentado as frequências de chegada dos pedidos, tanto de MGO quanto de MFO, multiplicando as distribuições de chegada dos pedidos por 1/4, 1/8 e 1/12, respectivamente. Poderiam ser construídos tantos cenários quanto necessários, conforme a

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

necessidade do negócio, inclusive simulando outras variações no sistema que não somente demanda.

Na etapa 9, de comparação dos cenários alternativos com o base, a análise é feita por meio do(s) indicador(es) escolhido(s) na etapa 3 - Definir Variáveis e Indicadores. Neste caso, o *Lead Time*, ou seja, quanto tempo (em horas) um pedido leva para ser atendido, desde que é aberto até sua finalização, com a entrega do produto. Esse indicador é importante neste caso, pois é um reflexo do nível de serviço. Segue na figura abaixo um resumo das principais estatísticas (mínimo, 1º quartil, média, 3º quartil, máximo e desvio padrão) do *Lead Time*, em horas, para cada produto e barcaça, nos cenários base, 4x, 8x e 12x.



MFO BT PC	Mínimo	1ºQ	Média	3ºQ	Máximo	Desvio Padrão
Base	6,5	7,9	9,7	11,0	24,6	2,6
4x	6,3	8,4	11,8	13,7	37,3	5,0
8x	6,4	8,8	15,4	19,5	50,3	8,7
12x	6,7	12,4	27,3	33,5	106,8	20,2

MFO BT FX	Mínimo	1ºQ	Média	3ºQ	Máximo	Desvio Padrão
Base	6,6	7,7	9,4	10,3	21,8	2,5
4x	6,5	8,0	10,4	11,3	23,7	3,5
8x	6,6	8,6	14,6	17,9	58,3	9,0
12x	6,6	8,9	15,5	20,0	48,1	8,1

MGO BT FX	Mínimo	1ºQ	Média	3ºQ	Máximo	Desvio Padrão
Base	6,2	6,8	7,7	7,8	16,9	1,5
4x	6,3	6,9	8,5	8,7	23,5	2,8
8x	6,2	7,3	11,4	13,9	33,9	5,5
12x	6,3	10,3	25,9	38,6	82,6	18,0

Fig.7: Comparação dos cenários

Da figura, percebe-se que não existe diferença significativa nos intervalos mínimos de *lead time* entre os cenários, todos eles entre 6h e 7h, o que faz sentido porque o mínimo reflete uma condição de início de sistema, momento em que as filas ainda não se acumularam e não afetaram o indicador. As demais estatísticas já começam a evidenciar, conforme esperado, uma deterioração clara no nível de serviço, com uma tendência aparentemente exponencial de alta entre os cenários, com um pedido tendo que esperar, em média, até 27,3 horas para ser atendido e um tempo máximo de até 106,8h – ambos para MFO na BT PC, no cenário de demanda aumentada em 12 vezes.

É interessante notar que o único ponto que parece não seguir a tendência é o valor de máximo para MFO na BT FX, em que o valor é maior no cenário de 8x (58,3h) do que no de 12x (48,1h), o que parece contraintuitivo, mas apenas evidencia a natureza estocástica não determinística do sistema estudado. Em todos os casos, a diferença média entre os tempos de ciclo (*lead time*) entre os cenários de aumento de demanda e o cenário base variam de até 2,1h (4x), até 5,7h (8x) e até 18,2h (12x).

[Goldsman et al. 2007] definem que o estudo de um sistema via simulação, geralmente é realizado com o objetivo de comparar dois ou mais *design* de sistemas e isso pode ser feito de algumas formas, sendo uma delas a comparação das estatísticas dos cenários (ou sistemas) alternativos com o cenário base, que representa o estado atual do sistema. Percebe-se que é

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

exatamente isto que é feito tanto na etapa 9 quanto será feito com mais profundidade na última etapa.

Na 10ª etapa do Framework é necessário realizar uma análise crítica das implicações da comparação de cenários, a fim de subsidiar a tomada de decisão. Desse modo, percebe-se que o lead time da frota atual aumenta de maneira exponencial, conforme o aumento de demanda ocorre.

Para um cenário de demanda 4x maior, as diferenças de *lead time*, quando comparado ao cenário base, não parecem ser tão significativas, aumentando, em média, apenas de 0,8h a 2,1h. Nos demais cenários, a variação já parece se tornar mais proibitiva, o que indicaria a necessidade de aumento da frota, seja contratando mais barcaças de porte semelhante ao das atuais, ou contratando outras barcaças de porte maior, ambas condições que, indicando necessidade, poderiam e deveriam ser também simuladas e testadas.

A sensibilidade de qual o nível aceitável de aumento no *lead time* para a frota atual sem que haja incremento nesta é algo que cabe aos tomadores de decisão e depende, também, de outras análises que fogem ao escopo do trabalho de simulação, como pesquisas de mercado, por exemplo, buscando avaliar o *lead time* de possíveis concorrentes e o nível de satisfação dos clientes.

Por fim, outro ponto interessante de análise é que, geralmente, em qualquer outro mercado, aumentos de 4x, 8x ou 12x na demanda são valores extremamente expressivos, mas, no caso deste trabalho, havia novos projetos na empresa, próximos ao terminal B em análise, que indicavam a possibilidade real de que o primeiro cenário pudesse ocorrer, os demais são extrapolações deste estudo, a fim de enriquecer a análise. Além disso, percebe-se que o sistema reage incrivelmente bem a uma demanda quadruplicada, o que não parece ser algo normalmente esperado também, mas se justifica quando se analisa o nível de utilização das barcaças no cenário base, que gira em torno de apenas 6%, isso porque elas não são simplesmente modais de transporte, mas também tancagem flutuante, pois atendem um terminal distante dos centros produtores, com abastecimento espaçado e, por vezes, irregular, fator este que também deve ser levado em consideração na tomada de decisão.

5 – Conclusões

Este artigo identificou um framework de simulação de eventos discretos para logística, útil para aplicação na Logística Marítima do *downstream* da Petrobras, para problemas de escopo reduzido e utilizando softwares de prateleira. Entende-se que o objetivo geral foi alcançado ao permitir a identificação de um framework que atende às necessidades da empresa, sem deixar de lado o rigor científico necessário.

Respondendo à pergunta de pesquisa: Como um analista comum pode usar simulação, da maneira correta, na logística marítima do *downstream* da Petrobras para resolver problemas de escopo reduzido? – Ao adquirir, pelo menos, conhecimento básico em algum dos softwares prontos para uso de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado, como, por exemplo, o Arena® e, a partir disso, se guiar por um framework fundamentado na literatura da área e testado na prática da empresa.

Os resultados obtidos neste estudo indicam que a frota atual de barcaças-tanque no terminal B é capaz de atender a demanda crescente por combustíveis marítimos (bunker) até um certo ponto. A análise dos cenários de aumento de demanda em 4x, 8x e 12x revelou que, embora o sistema consiga lidar com um aumento de demanda de até quatro vezes sem grandes impactos no *lead time*, cenários de demanda mais elevados resultam em uma deterioração significativa no nível de serviço.

Em resumo, este estudo fornece uma base sólida para a tomada de decisão estratégica em relação à capacidade de atendimento do terminal B. Sendo que, a expansão da frota deve ser considerada para cenários de demanda superiores a 4x, e a empresa deve continuar monitorando o mercado e ajustando suas operações para manter um nível de serviço competitivo.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br

A disponibilidade ilimitada de produto no terminal é uma simplificação que foi adotada no modelo e pode ser considerada uma limitação do estudo. Como sugestão de aplicação futura, poderia ser modelado também o estoque disponível na tancagem do terminal e a variação estocástica desta disponibilidade.

Referências

BABULAK, Eduard; WANG, Ming. Discrete event simulation. **Aitor Goti (Hg.): Discrete Event Simulations. Rijeka, Kroatien: Sciyo**, p. 1, 2010.

BANKS, Jerry (Ed.). **Handbook of simulation: principles, methodology, advances, applications, and practice**. John Wiley & Sons, 1998.

BIENSTOCK, Carol Cook. **The effect of outsourcing and situtational characteristics on physical distribution transportation efficiency**. Virginia Polytechnic Institute and State University, 1994.

BRANSKI, Regina Meyer. Logística na cadeia do petróleo: uma revisão sistemática. **Revista ANPET: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes, Ouro Preto, MG**, p. 915-927, 2015.

BOTTANI, Eleonora et al. Exploring the maturity of Discrete-event simulation in logistics: is this a new research domain?. In: **Proceedings of the 26th International Conference on Harbor, Maritime and Multimodal Logistic Modeling & Simulation, Tenerife**. 2024.

FISHMAN, George S. **Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis**. New York: Springer, 2001.

GOLDSMAN, David; NELSON, Barry L.; BANKS, Jerry. Comparing systems via simulation. **Handbook of simulation**, p. 273-306, 1998.

JACOBY, David. **Optimal Supply Chain Management in Oil, Gas, and Power Generation**. PennWell Corporation, 2012.

LANG, Sebastian et al. Open-source discrete-event simulation software for applications in production and logistics: An alternative to commercial tools?. **Procedia Computer Science**, v. 180, p. 978-987, 2021.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David; KELTON, W. David. **Simulation modeling and analysis**. New York: Mcgraw-hill, 2007.

MANUJ, Ila; MENTZER, John T.; BOWERS, Melissa R. Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 39, n. 3, p. 172-201, 2009.

SILVA, P. R. **Transporte marítimo de petróleo e derivados na costa brasileira: estrutura e implicações ambientais**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

SHAH, Nikisha K.; LI, Zukui; IERAPETRITOU, Marianthi G. Petroleum refining operations: key issues, advances, and opportunities. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 50, n. 3, p. 1161-1170, 2011.

TUDORICA, Daniela. A comparative analysis of various methods of gas, crude oil and oil derivatives transportation. **International Journal of Sustainable Economies Management (IJSEM)**, v. 3, n. 1, p. 16-25, 2014.

DOI: 10.59254/sbpo-2025-212577
https://proceedings.science/p/212577?lang=pt-br