

DIMENSIONAMENTO DE UM TERMINAL PORTUÁRIO ATRAVÉS DE UM MODELO DE SIMULAÇÃO

Fugiwara, E. S., Mota, D. O., Botter, R. C.

CILIP, Universidade de São Paulo, Brasil
e-mail: erickfugi@usp.br,

RESUMO

A globalização tem como um dos aspectos mais relevantes a competição entre empresas e países, no qual, terminais portuários possuem um papel de destaque em relação a produtividade, tanto na importação quanto exportação. Conforme as economias se desenvolvem e alterações nas rotas comerciais ocorrem, os portos são desafiados quanto a sua capacidade de desenvolvimento a longo prazo, adequando sua capacidade operacional. Esse cenário de competitividade, exige muitas vezes o investimento em infraestrutura portuária, que é essencial para manter de forma eficiente a capacidade portuária em atender à demanda esperada para todos os tipos de carga. Porém, os custos envolvidos nesses investimentos são elevados em ativos de infraestrutura de longo prazo e devem ser feitos apesar de uma variedade de incertezas futuras que podem potencialmente influenciar o desempenho de um porto. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de suporte ao projeto que possa ser utilizada durante o projeto conceitual de um novo terminal a granel seco ou de um já existente. A ferramenta é composta por uma interface, desenvolvida em Microsoft Excel, e pelo modelo integrado (sistema marítimo, de estocagem e de transporte terrestre) de simulação em Anylogic. Ao utilizar um porto multiproduto brasileiro como estudo de caso, este trabalho aprimora o processo de tomada de decisão de investimento para a infraestrutura portuária através da aplicação bem-sucedida da metodologia para o desenvolvimento de uma ferramenta de auxílio na seleção de uma estratégia de investimento ideal para lidar com as restrições de capacidade dentro de um sistema portuário.

Palavras-chave: Simulação. Terminal portuário. Sistema integrado.

1-INTRODUÇÃO

A rede marítima mundial que é composta por milhares de navios navegando pelos mares e portos estrategicamente localizados ao redor do mundo, é essencial para o comércio internacional, uma vez que mais de 80% do volume de mercadorias comercializadas mundialmente é transportado pelo mar (UNCTAD, 2017). Carga marítima de todos os tipos (produtos containerizados desde produtos mais simples como vestuários até os com mais valor agregado como eletrônicos; carga líquida como óleos vegetais e petróleo; carga à granel seca como minérios de ferro e grãos, assim como sucata, vergalhões e chapas) tem origem em um país para exportação, passando por portos antes de chegar ao seu destino. Um sistema portuário é um conjunto de elementos que conectam o mar e a terra para trabalharem juntos e assim lidar com as cargas, que chegam pelos navios na ancoragem e é transferido para o terminal portuário nos berços do porto, assim transportado por ligações intermodais (por exemplo, redes ferroviárias e/ou rodoviárias) para a demanda do consumidor/população. Conforme a economia se desenvolve, rotas comerciais e demandas mudam, o sistema portuário pode precisar se expandir para aumentar sua capacidade e atender ao novo cenário. Porém, o capital requerido para alteração da infraestrutura portuária é enorme e as decisões de investimento devem ser tomadas levando em conta várias incertezas e cenários durante a longa vida útil desses ativos.

Na fase inicial de projeto, menos dados estão disponíveis e vários cenários devem ser analisados. Definir as dimensões principais do terminal necessários para as diversas possibilidades é um processo complexo, uma vez que envolve diversos fatores. Por exemplo, tipos de embarcações, características de tráfego, diversos processos operacionais, além de condições climáticas como chuva, maré etc. Para isso, ferramentas computacionais podem ser muito úteis. Previsões para situações futuras geralmente têm uma incerteza crescente ao longo do tempo. Para explicar as incertezas, podemos incorporar uma distribuição de probabilidades para variáveis específicas. Desta forma, muitas combinações de entrada são incluídas em um único cálculo, resultando em uma análise mais completa e realista.

2-MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho será baseado na modelagem e simulação computacional. O modelo de simulação é usado como uma ferramenta no gerenciamento do porto para determinar os efeitos de diversas mudanças tecnológicas, operacionais e opções de investimento para melhorar o desempenho do sistema, como tempo de espera, tamanho de fila, receita, *demurrage* e outros indicadores (UNCTAD, 1985).

Para a modelagem e simulação, será seguida a abordagem processo-interação. Nesta abordagem, introduzida por Zeigler et al. (2019) e Fishman (2001), o subsistema é virtualmente dividido em classes de elementos relevantes, cada uma com seus atributos típicos. Para todas as classes de elementos ativos, foram definidas as descrições do processo, que descrevem o seu funcionamento em função do tempo. O benefício do uso da abordagem processo-interação é que os processos operacionais do mundo real podem ser traduzidos em descrições de processos, o que permite uma fácil comunicação com os operadores de terminais e permite a avaliação do bom funcionamento dos modelos de simulação com base em revisões de especialistas.

A seguir, será apresentado na Figura 1 um conjunto de etapas para orientar o desenvolvimento de modelos em um estudo minucioso de simulação (Banks, 2000) (Chung, 2003).



Figura 1 - Passos típicos no estudo através da simulação

Estudo de caso

Para o terminal de estudo em questão, serão consideradas as cargas: Soja, Farelo, Milho, Celulose em fardos, produtos siderúrgicos e fertilizantes.

Como veículos tem-se: navios/barcaças dedicados para cada tipo de carga, com diferentes portes e características; trens/vagões e caminhões, igualmente especializados por tipo de carga.

A área total do terminal é de aproximadamente 6,6 hectares. O terminal conta com um píer com 52 m de largura e três berços de atracação, um berço interno 1, um berço interno, 2, que somam 384 m de extensão e o berço 3, externo, com 264 m de comprimento.

Modelagem

Nesta modelagem será utilizada a Figura 2 como base para descrever os componentes, subsistemas e o sistema terminal avaliado de forma global e integrada.



Figura 2 - Representação de um terminal portuário integrado

A. Subsistema de chegada de navios

Este subsistema contempla desde a chegada de cada navio até o instante anterior ao início de sua operação já devidamente atracado.

1) Navios de cada tipo de carga são gerados consecutivamente até atingirem a demanda esperada para o período de simulação considerado. Segundo Olba et al., (2015), o processo de chegada de navios pode ser abordado utilizando a distribuição exponencial, de Poisson, Erlang-1 ou baseada em dados históricos. No modelo desenvolvido nesse trabalho, para o intervalo entre chegadas consecutivas foi considerado a distribuição exponencial.

2) Os navios entram em fila esperando pelo(s) cais disponível(eis) que podem receber essa carga (cada carga pode ser configurada para cada berço). O regime de atendimento será FIFO (*First-in First-Out*) para o mesmo tipo de carga.

Na Figura 3 são apontados 2 navios, um no berço 2 (interno) e outro no berço 3 (externo).



Figura 3 - Visão superior do terminal

- Berço 1 – para receber navios menores de todas as cargas exceto grãos.
- Berço 2 – preferencialmente para Grãos em função, mas que pode receber também qualquer das outras cargas e portes de navios até Panamax;
- Berço 3 – externo com uso preferencial para siderúrgicos, mas cujos navios podem também ocupar o 1 e o 2. Celulose e Fertilizantes poderiam também atracar no 3, mas em janelas sem navios siderúrgicos. Grão não utilizarão esse berço.

A Figura 4 apresenta a modelagem no ambiente do Anylogic.

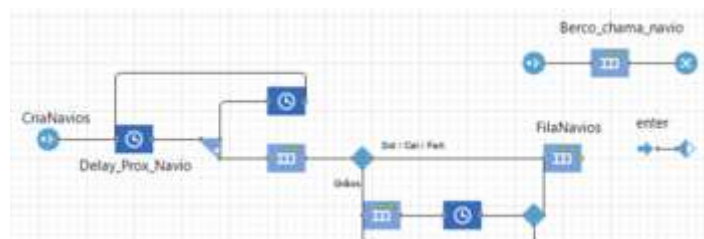


Figura 4 - Chegada de navios no Anylogic

B. Subsistema de transbordo de carga

Este subsistema contempla as operações do terminal que recebe um ou mais tipos de carga.

Os navios que são liberados para o berço, passam pela verificação se eles sofrem a restrição de maré na entrada. Iniciando então a atracação, seguida pela pré-operação e então a operação com a verificação de incidência de chuva. Terminada a carga do navio, haverá uma operação de pós-operação e depois o navio executa manobras de desatracação e navegação até a liberação do cais para outro navio respeitando as restrições de maré de saída. O atendimento dos navios em um berço no modelo é ilustrado na Figura 5 abaixo.



Figura 5 - Operações e restrições dos navios no Anylogic

C. Subsistema de armazenagem

Este subsistema contempla silos e armazéns para Soja, Farelo e Milho e faz a interligação entre os subsistemas. Na primeira fase (armazenagem em silos) não haverá operação de farelo.

D. Subsistema de despacho e recepção terrestre

Contempla a chegada de caminhões com diferentes cargas e comboios ferroviários com graneis.

São gerados caminhões de fertilizantes, de siderúrgicos e de celulose a partir do momento que o navio já atraca e com o início de operação autorizado. No caso dos graneis, são gerados caminhões com antecedência mínima e máxima em relação ao navio designado para aquele lote de carga. Os caminhões saem de um ponto de espera, vão para as portarias, depois para balança de entrada e em seguida entram no terminal se dirigindo ao cais onde está o navio. Para graneis, eles esperam para ser atendidos em um dos tombadores. Existe interferência da linha férrea na frente a portaria que

pode impactar na entrada e na saída de caminhões do terminal. Na Figura 6, temos a geração dos comboios que ficarão esperando espaço no terminal.



Figura 6 - Geração de caminhões no Anylogic

Os processos que os caminhões passam dentro do terminal é apresentado na Figura 7.

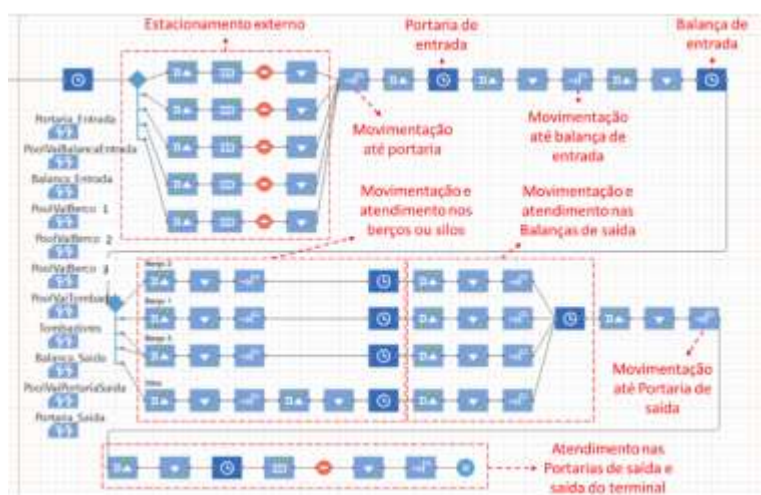


Figura 7 - Operações dos caminhões dentro do terminal no Anylogic

No modal ferroviário, são gerados comboios de granéis vegetais com antecedência mínima e máxima em relação ao navio designado para aquele lote de carga. Após entrarem no terminal, são desmembrados em conjuntos de vagões e posicionados em linhas ferroviárias paralelas. Cada conjunto de vagões é levado ao ponto de descarga que descarrega até 3 vagões por vez (3 moegas). Terminada a descarga, esse conjunto de vagões é posicionado numa linha de vagões vazios a espera dos demais conjuntos para recompor o comboio destinado ao terminal e posteriormente entregue de volta à administradora ferroviária. No Anylogic, esse subsistema é apresentado na Figura 8.



Figura 8 - Operações ferroviárias no Anylogic

Premissas

Várias suposições foram consideradas ao desenvolver o modelo conforme listado abaixo:

- 1) Os espaços de espera em todas as pistas dentro do porto são projetados como filas.
- 2) Os tempos de serviço são em sua maioria estocásticos.
- 3) Todos os caminhões de entrada são considerados do mesmo comprimento.
- 4) A velocidade dos caminhões foi dada em relação ao tempo, baseado na distância.
- 5) Alguns dados foram simplificados, como os tempos de manutenção preventiva e corretiva, quebras e outros fatores. Esses pontos foram considerados dentro dos tempos de operação e produtividade dos equipamentos e processos.
- 6) O terminal portuário opera 24 horas por dia nos 7 dias da semana.

Dados de Entrada

Os dados a serem utilizados já foram enviados pelo terminal. Para tanto foram preenchidas abas de uma planilha EXCEL enviada anteriormente, sendo as abas existentes:

(1) Demanda não sazonal, (2) Demanda Sazonal, (3) Dados de cais, (4) Dados de trens, (5) Dados caminhões, (6) Outros dados, (7) Dados de Silos-Armazéns, (8) Indicadores – Os indicadores são respostas do simulador e foram discutidos com o terminal.

- 1) Demandas (Ramp-up)

A Tabela 1 apresenta as demandas projetadas para serem atendidas entre 2023 e 2029.

Tabela 1 - Matriz de cargas (mtpa)

	DEMANDA [toneladas] (INPUT)						
	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
SOJA	575,386	1,398,416	1,763,635	1,913,544	2,028,181	2,072,271	2,204,544
MILHO	207,614	504,584	636,365	690,456	731,819	747,729	795,456
FARELO	-	-	-	868,000	1,840,000	1,880,000	2,000,000
SIDERURGICO (Vergalhão)	155,000	178,000	200,000	150,000	150,000	150,000	150,000
SIDERURGICO (Bobina)	2,398,000	2,599,000	2,800,000	2,800,000	2,800,000	2,800,000	2,800,000
CELULOSE	368,000	384,000	400,000	300,000	300,000	300,000	300,000
FERTILIZANTES	600,000	700,000	800,000	735,000	670,000	600,000	600,000
TOTAL	4,304,000	5,764,000	6,600,000	7,457,000	8,520,000	8,550,000	8,850,000

2) Distribuição da safra de grãos em função da sazonalidade

Como foi dito, os grãos possuem a característica da sazonalidade, essa influência é definida através da distribuição da demanda anual nos 12 meses utilizando porcentagem (Tabela 2).

Tabela 2 - Distribuição da safra de grãos em função da sazonalidade

	JANEIRO	FEVEREIRO	MARÇO	ABRIL	MAIO	JUNHO	JULHO	AGOSTO	SETEMBRO	OUTUBRO	NOVEMBRO	DEZEMBRO
SOJA	0.0%	5.0%	10.0%	15.0%	17.5%	17.5%	15.0%	10.0%	5.0%	5.0%	0.0%	0.0%
MILHO	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	10.0%	20.0%	25.0%	25.0%	20.0%
FARELO	0.0%	5.0%	10.0%	15.0%	17.5%	17.5%	15.0%	10.0%	5.0%	5.0%	0.0%	0.0%

A demanda mensal é influenciada negativamente devido à essa característica sazonal dos grãos, sendo exigida uma capacidade de atendimento maior em certas épocas do ano.

3) Frota de navios

Os dados da distribuição de classe de navios para cada tipo de produto (Tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição da frota de navios

DWT Min	20,000	40,001	50,001	148,024	181,578	220,000	350,001
DWT Max	40,000	50,000	80,000	174,805	198,152	250,000	400,000
LOA	~175m	>200m	>201m e <294m	>294m			
PRODUTO	HandySize	HandyMax	Panamax	CapeSize	LargeCape	VLOC	Valemax
SOJA			100%				
MILHO			100%				
FARELO			100%				
SIDERÚRGICO (Vergalhão)	100%						

SIDERÚRGICO (Bobina)	100%						
CELULOSE	100%						
FERTILIZANTES	70%	30%					

Cenários

Além da variação das demandas que devem ser atendidas em cada ano de avaliação do estudo, foram selecionados alguns outros parâmetros para a geração dos cenários. Na Tabela 4, eles são apresentados com os valores a serem variados e os adotados inicialmente.

Tabela 4 - Parâmetros para geração de cenários

	Variação	Inicial
Número de tombadores [#]	2 ou 3	2
Tamanho da janela de atendimento (antecedência prevista de chegada de caminhões para um navio) [dias]	4 ou 8	4
Número de silos (30.000 ton) [#]	3 ou 4	3
Número de armazéns (80.000 ton) [#]	1 ou 2	0
Produtividade nominal dos berços [tph]	2.000 ou 3.000	2.000
Tempo de operação nos tombadores [min]	8 ou 10	10

- A partir de 2026, iniciará a operação ferroviária para recebimento de farelo com pelo menos 1 armazém para essa operação.

Para cenários alternativos, serão exploradas as variações dos valores dos parâmetros apresentados.

3-RESULTADOS Y DISCUCCIÓN

Para o cenário base, foram rodadas apenas os anos de 2023 a 2025 devido ao fato de que a infraestrutura do cenário base já apresentava níveis de serviço baixos, como os tempos em fila dos navios de grãos e tempos em fila fora do terminal pelos caminhões. (Tabela 5).

Tabela 5 - Principais resultados do cenário base

ANO	CENÁRIO BASE		
	2023	2024	2025
Grãos - Rodo (prod 1 e 2)	783,000	1,903,000	2,400,000
Soja - Rodo (prod 1)	575,386	1,398,416	1,763,635
Milho - Rodo (prod 2)	207,614	504,584	636,365
Farelo - Ferro (prod 3)	0	0	0
Export Steel - Vergalhão (prod 4)	155,000	178,000	200,000
AMV - Bobinas (prod 5)	2,398,000	2,599,000	2,800,000
Celulose (prod 6)	368,000	384,000	400,000
Fertilizante (prod 7)	600,000	700,000	800,000
Demanda Total	4,304,000	5,764,000	6,600,000
JANELA [dias]	4	4	4
TOMBADORES [#]	2	2	2

SILOS [#]		3	3	3
ARMAZÉNS [#]		0	0	0
TAXA CN [tph]		2000	2000	2000
TEMPO TOMBADOR [min]		10	10	10
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navios de Grãos	horas	29.4	122.8	346.8
Tempo_em_FilaporBerco (Média) Navio Geral	horas	10.1	9.2	19.6
Tempo em Fila Entrada (Média) Caminhão	minutos	701.9	3040.3	8766.8
Carga Total Transportada - Soja	ton	575,386	1,346,267	1,697,867
Carga Total Planejada - Soja	ton	575,392	1,346,272	1,697,888
Carga Total Transportada - Milho	ton	253,190	498,417	666,940
Carga Total Planejada - Milho	ton	253,216	556,736	716,960
Carga Total Transportada - AMB (Vergalhão)	ton	155,000	178,000	200,000
Carga Total Planejada - AMB (Vergalhão)	ton	155,000	178,000	200,000
Carga Total Transportada - AMV (Bobina)	ton	2,364,545	2,565,690	2,776,551
Carga Total Planejada - AMV (Bobina)	ton	2,398,000	2,599,000	2,800,000
Carga Total Transportada - Celulose	ton	368,000	384,000	400,000
Carga Total Transportada - Fertilizantes	ton	667,648	735,677	833,191
Carga Total Planejada (ton) - Fertilizantes	ton	667,648	775,678	874,443
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Soja	horas	39.0	143.5	374.6
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Milho	horas	8.2	65.4	296.2
Ocupação Berço 1	%	15.46%	19.79%	14.54%
Ocupação Berço 2	%	34.40%	40.45%	47.09%
Ocupação Berço 3	%	44.93%	53.04%	49.17%
Ocupação das Portaria_Entrada	%	11.36%	15.61%	17.80%
Ocupação das Balanca_Entrada	%	11.36%	15.61%	17.81%
Ocupação dos Tombadores	%	18.66%	43.28%	53.41%
Ocupação das Balanca_Saida	%	11.40%	15.65%	17.85%
Ocupação da Portaria de Saída	%	11.40%	15.65%	17.85%
Giros no Silo 1	#	15	26	31
Giros no Silo 2	#	14	23	29
Giros no Silo 3	#	3	19	28
Taxa de Chegada de caminhões de soja por navio na janela	cam/hora	17.027	17.530	17.829
Taxa de Atendimento de caminhões	cam/hora	12	12	12
Índice de Congestionamento (durante a janela de recepção)	#	1.419	1.461	1.486
Demanda Total transportada - Grãos	%	100.0%	96.9%	97.9%
Demanda Total transportada - Siderúrgicos	%	98.7%	98.8%	99.2%
Demanda Total transportada - Outros	%	100.0%	96.6%	96.8%

A partir do cenário base é possível observar o aumento substancial que ocorre na ocupação dos tombadores já no cenário 2024, indicando que muito provavelmente essa operação de descarga rodoviária seja um gargalo do sistema sob as condições iniciais. Isso se confirma a partir do fato de que o atendimento às demandas de grãos começa a ficar prejudicada a partir deste ano, com a demanda de milho atendida estando cerca de 11% abaixo da esperada já em 2024;

Os tempos em fila das embarcações também aumenta, mostrando como ruídos no sistema de descarga podem gerar problemas na outra ponta, no sistema de embarque, e como os subsistemas estão todos interligados;

Além disso, os tempos em fila dos caminhões na entrada do terminal também aumenta substancialmente. Na verdade, os tempos apresentados nem são representativos, mas sim o fato de



que eles refletem a formação de filas que nunca serão dissipadas, as chamadas “filas infinitas”, uma vez que as taxas de atendimento são menores que as taxas de chegada, como mostram os resultados.

Outro parâmetro importante de ser observado é a quantidade de giros nos silos. Para os cenários de 2024 e 2025, o aumento da demanda de grãos faz com que o subsistema de armazenagem comece a se tornar uma restrição para o sistema, mostrando que provavelmente a instalação do quarto silo comece a se tornar necessária neste horizonte de planejamento;

A espera para formação das cargas de grãos também aumenta muito e pode impactar nas esperas dos navios gerando prejuízos para o terminal.

No entanto, é importante observar que em termos de portaria e balanças, as ocupações são baixas, portanto, o sistema está bem dimensionado até a demanda de 2025.

O cenário base de 2023 (2.000 tph nos berços, 2 tombadores com operação de 10 minutos por caminhão, 3 silos) atende a demanda até 2024 com alguma penalização de filas de navios, mas deve-se atentar ao fato de que entre 2023 e 2024 a demanda de grãos aumenta substancialmente (em quase 3 vezes) o que indica que se esse aumento de demanda não se concretizar nesse período, o cenário base 2023 estará adequado.

- Cenários alternativos

Inicialmente foi realizado a simulação do cenário base a partir do ano de 2023 até 2025, onde o sistema já apresentava limitações. Devido a isso, não há necessidade de continuar as simulações para os anos seguintes.

Como observado nos resultados do cenário base, aparentemente a operação com três silos comece a restringir a capacidade do terminal. Visando observar se há melhoria no nível de serviço do sistema, foram simulados os cenários de 2024 e 2025 com o acréscimo do quarto silo de armazenagem e os resultados comparativos de 2024 são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Inclusão do 4ºsilo de armazenagem

ANO		2024 Base	2024
JANELA	dias	4	4
TOMBADORES	#	2	2
SILOS	#	3	4
TAXA CN	tph	2000	2000
TEMPO TOMBADOR	min	10	10
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navios de Grãos	hr	407.48	125.68
Tempo_em_FilaporBerco (Média) Navio Geral	hr	12.87	14.95
Tempo em Fila Entrada (Média) Caminhão	hr	153.2	55.3
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Soja	hr	5.9	2.1
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Milho	hr	9.8	2.1
Número total de navios atendidos	#	161	163
Giros no Silo 1	#	25	20
Giros no Silo 2	#	23	20
Giros no Silo 3	#	20	16
Giros no Silo 4	#	0	16

É possível observar que, em 2024, com o acréscimo do quarto silo os giros se reequilibram, as filas de caminhões diminuem (embora ainda estejam em níveis altos) e, principalmente, os tempos de espera por carga diminuem. Fazendo o porto atender mais navios ao longo do ano.

Para o ano de 2025, além do acréscimo do quarto silo, também foi verificado o efeito da inclusão do terceiro tombador. O sistema apresentou significativa melhora em relação ao cenário base: menor espera por carga, menores filas de caminhões, mais veículos atendidos e melhores níveis de serviço como verificado na Tabela 7.

Tabela 7 - Inclusão do 4º silo e 3º tombador

ANO		2025 Base	2025	2025
JANELA	dias	4	4	4
TOMBADORES	#	2	3	3
SILOS	#	3	3	4
TAXA CN	tph	2000	2000	2000
TEMPO TOMBADOR	min	10	10	10
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navios de Grãos	hr	1 017.02	411.3	57.73
Tempo_em_FilaporBerco (Média) Navio Geral	hr	9.02	11.23	8.64
Tempo em Fila Entrada (Média) Caminhão	hr	381.6	176.0	33.7
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Soja	ton	928.9	462.46	72.87
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Milho	ton	1 457.62	223.71	2.21
Número total de navios atendidos	#	172	180	178
Número total de caminhões atendidos	#	173 118.00	184 026.00	182 612.00
Ocupação das Portaria_Entrada	%	16.43%	17.45%	17.33%
Ocupação das Balanca_Entrada	%	16.43%	17.45%	17.32%
Giros no Silo 1	#	25	30	26
Giros no Silo 2	#	25	28	26
Giros no Silo 3	#	22	26	19

Giros no Silo 4	#	0	0	19
Ocupação dos Tombadores	%	65.21%	53.52%	51.02%
Ocupação das Balança_Saida	%	16.47%	17.50%	17.38%
Ocupação da Portaria de Saída	%	16.46%	17.50%	17.36%

Para uma melhor avaliação do sistema no cenário previsto para o ano de 2025, o de maior demanda, foram testadas outras três melhorias: aumento na taxa de produtividade nos berços (de 2.000 para 3.000 tph), aumento da janela de antecedência para os caminhões (ao invés de 4 dias, 8 dias para formação da carga) e redução do tempo no tombador, de 10 para 8 minutos.

Considerou-se que tais análises seriam mais importantes para este cenário de 2025 por se tratar do cenário com piores indicadores no cenário base e com maiores restrições no atendimento aos caminhões e, conseqüentemente, atendimento da demanda total de navios.

Nas simulações já apresentadas para 2025 foi possível observar que o índice de congestionamento do sistema de recepção aos caminhões continua próxima de 100%, o que pode representar uma forte restrição ao atendimento da demanda. Além disso, as filas de caminhões na entrada do terminal continuavam muito altas e qualquer paralisação operacional pode fazer com que os navios fiquem muito tempo no terminal, gerando o pagamento de multas.

Os resultados da Tabela 8 mostraram que alterar a janela de atendimento de caminhões representa somente trocar o problema de um lado para outro e não diminuem as filas na entrada do terminal. Percebe-se, também, pouco impacto com o aumento da taxa de produtividade dos berços. (com 2000 tph e considerando o coeficiente de perdas, a capacidade de carregamento dos navios é muito maior que a capacidade de recepção rodoviária).

Tabela 8 - Melhorias de taxa dos berços, aumento da janela de antecedência rodoviária e operação no tombador

ANO		2025 Base	2025	2025	2025	2025	2025
JANELA	dias	4	4	8	8	8	8
TOMBADORES	#	2	3	3	3	3	3
SILOS	#	3	4	4	4	4	4
TAXA CN	tph	2000	2000	2000	3000	2000	3000
TEMPO TOMBADOR	min	10	10	10	10	8	8
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navios de Grãos	hr	1 017.02	57.73	46.9	63.39	40.08	44.5
Tempo_em_FilaporBerco (Média) Navio Geral	hor	9.02	8.64	15.89	10.18	14.85	10.03
Tempo em Fila Entrada (Média) Caminhão	hr	381.6	33.7	42.6	47.7	39.0	40.1

Taxa de Chegada de caminhões de soja por navio na janela	Cam / hr	17.8	17.9	8.9	8.9	8.9	8.9
Taxa de Atendimento de caminhões	Cam / hr	12	18	18	18	22.5	22.5
Índice de Congestionamento (durante a janela de recepção)	%	148.7%	99.3%	49.7%	49.7%	39.7%	39.7%

O acréscimo de um silo e um tombador causam grande impacto, pois reduzem o tempo de espera dos navios por produtos de soja e milho (Tabela 9). O tempo de operação do tombador também é uma variável importante para atender os caminhões sob bons níveis de serviço.

Tabela 9 - Melhorias de taxa dos berços, aumento da janela de antecedência rodoviária e operação no tombador (cont.)

ANO		2025 Base	2025	2025	2025	2025	2025
JANELA	dias	4	4	8	8	8	8
TOMBADORES	#	2	3	3	3	3	3
SILOS	#	3	4	4	4	4	4
TAXA CN	tph	2000	2000	2000	3000	2000	3000
TEMPO TOMBADOR	min	10	10	10	10	8	8
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Soja	horas	928.9	72.87	59.17	80.19	51.01	56.64
Tempo_Aguard_Carga (Média) Navio - Milho	horas	1 457.62	2.21	1.89	1.81	0.02	0.02
Ocupação Berço 1	%	15.82%	16.00%	13.41%	17.84%	15.51%	19.32%
Ocupação Berço 2	%	44.53%	45.23%	46.72%	42.73%	47.38%	40.60%
Ocupação Berço 3	%	49.74%	48.52%	49.81%	44.75%	47.31%	46.14%
Ocupação das Portaria_Entrada	%	16.4%	17.3%	17.1%	17.4%	17.4%	17.5%
Ocupação das Balanca_Entrada	%	16.4%	17.3%	17.1%	17.4%	17.4%	17.5%
Ocupação dos Tombadores	%	65.2%	51.0%	51.6%	53.6%	43.8%	45.2%
Ocupação das Balanca_Saida	%	16.5%	17.4%	17.2%	17.4%	17.4%	17.6%
Ocupação da Portaria de Saída	%	16.5%	17.4%	17.2%	17.4%	17.4%	17.5%

A partir desses resultados iniciais, foram construídos 11 diferentes conjuntos de cenários, considerando agora, além das variações/análises de sensibilidade apresentadas na fase anterior (janela de formação da carga, número de tombadores e silos, taxa de produtividade do carregamento e tempo de ciclo dos tombadores), a inclusão da operação de descarga ferroviária.

Para o sistema ferroviário, foram considerados até dois armazéns, com capacidade para armazenagem de 80.000 toneladas de grãos cada, adicionados à simulação dos grupos de cenários de G a K, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 - Grupo e cenários simulados

CONFIGURAÇÃO	A Cen. Base	B		C		D		E		F		G	H	I	J	K
ANOS	2023 ~ 2025	2023 ~ 2025	2026 ~ 2029	2023 ~ 2025	2026 ~ 2029	2023 ~ 2025	2026 ~ 2029	2023 ~ 2025	2026 ~ 2029	2023 ~ 2025	2026 ~ 2029	2027 ~ 2029	2027 ~ 2029	2027 ~ 2029	2027 ~ 2029	2027 ~ 2029

JANELA [dias]	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8	8	4	8	8	8	8
TOMBADORES	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SILOS	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
ARMAZÉNS	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	2	2	2	2	2
TAXA CN [tph]	2000	2000	2000	2000	2000	3000	3000	2000	2000	3000	3000	2000	2000	3000	2000	3000
TEMPO TOMBADOR [min]	10	10	10	10	10	10	10	8	8	8	8	10	10	10	8	8

Estes grupos de cenários foram ainda subdivididos de acordo com a demanda a ser movimentada. Tal estratégia é utilizada para que se verifique a partir de que momento as intervenções devem ser realizadas no terminal. Foram simulados, ao final, 53 diferentes cenários, considerando as características apresentadas anteriormente para os grupos de A até K e as demandas sugeridas para os anos de 2023 a 2029.

Como poderá ser observado, nem todos os anos foram simulados para todos os grupos de cenários. Isso aconteceu porque quando se observa que a demanda já não é atendida por um cenário menos restrito, sabe-se que ela continuaria não sendo atendida, ou sendo atendida sob níveis de serviço inadequados quando considerados cenários com mais restrições.

Dentre os diversos indicadores gerados pelo modelo, considera-se que o tempo de espera para a formação da carga do navio é importante e pode representar restrições significativas. Avaliar não só a demanda atendida em cada cenário, mas também sob quais condições ela é atendida é essencial para se determinar a capacidade dele.

Os resultados serão apresentados consolidados na Figura 9, que apresenta para cada simulação (demanda/grupo de cenário) qual a demanda atendida para cada um dos tipos de produtos e qual o tempo médio de espera para formação de cargas, um indicador considerado importante e restritivo ao nível de serviço da operação. Em cada “coluna” do gráfico é possível identificar a demanda movimentada (eixo da esquerda – gráficos de barras) e o tempo médio de espera para formação das cargas (eixo da direita – gráfico de linha). Uma boa forma de avaliar o gráfico é, primeiramente, observar a demanda atendida no cenário e, em seguida, observar se para atender essa demanda o tempo de espera foi muito alto. Um cenário pode ser considerado adequado quando a demanda atendida for satisfatória e em paralelo os navios não esperaram um tempo tão significativo para formação da carga.

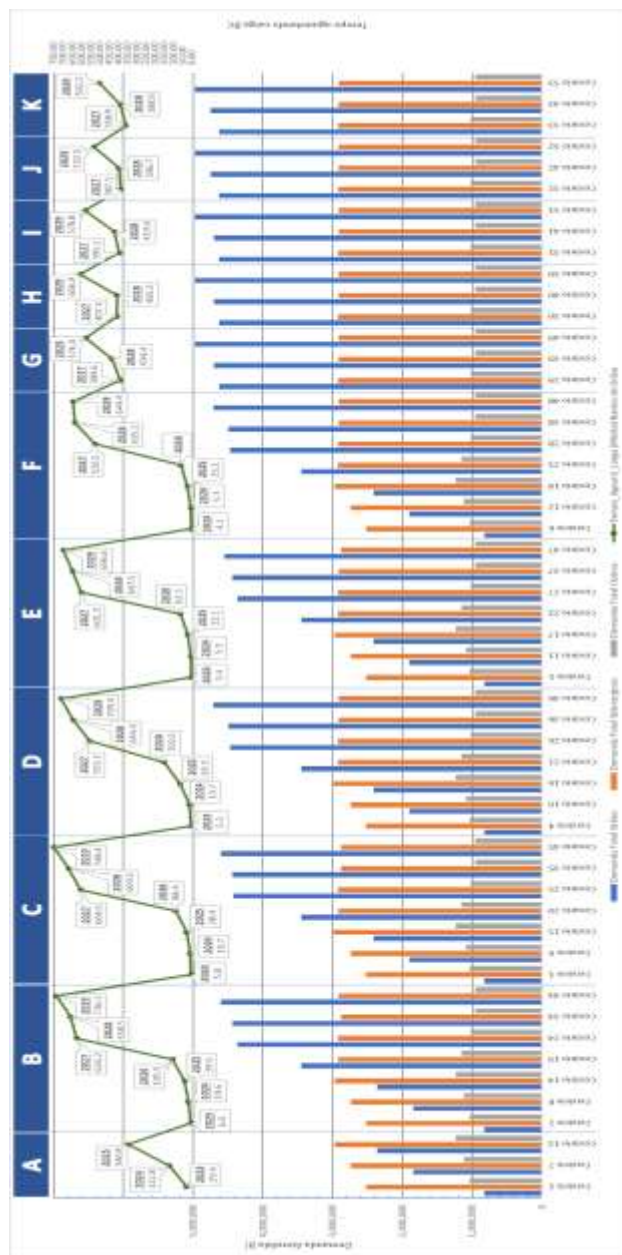


Figura 9 - Gráfico comparativo dos grupos de cenários

Podemos tomar como exemplo a simulação do grupo F em 2028 (3 tombadores, 4 silos e 1 armazém para recepção ferroviária conforme tabela de combinações): nesse cenário 94.6% da demanda total de grãos atendida é de 4,5 mtpa, e para isso os navios aguardam 635,2 horas.

É possível observar que em todos os cenários a demanda anual proposta foi atendida, mas muitas vezes apresentando penalidades ao nível de serviço. As demandas previstas para a partir de 2027 só são atendidas sob níveis menos restritivos de tempo de espera a partir do momento em que a ferrovia entra em operação (grupos de cenários de G até K).

4-CONCLUSÕES

O estudo de caso, representa possíveis problemas que outros terminais portuários semelhantes possam estar sofrendo. Para esse, foi observado que o tempo de espera para formação de carga dos navios é talvez a maior restrição operacional em termos de nível de serviço. Para que esse indicador tenha melhor desempenho, é fundamental que se planeje adequadamente a armazenagem dos produtos, especialmente os grãos, de modo a permitir que haja um buffer adequado. Sendo importante também destacar que o sistema, na verdade, é um conjunto de outros subsistemas integrados e, portanto, não se pode deixar de observar as operações de recepção e descarga dos grãos. Por fim, o terminal tem potencial de aumento de capacidade caso medidas sejam tomadas para que haja a melhora do subsistema de armazenagem, pois as ocupações dos berços estão adequadas.

5- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BANKS, J. (2000). Introduction to simulation. *winter simulation conference proceedings*, pp. 9-16.
2. Chung, C. (2003). *Simulation modeling handbook a practical approach*. CRC Press.
3. Fishman, G. (2001). *Discrete event simulation. Modeling, programming, and analysis*. New York: Springer-Verlag.
4. Olba, X., Daamen, W., Vellinga, T., & Hoogendoorn, S. (2015). Simulating the port wet infrastructure: review and assessment. *Transportation Research Procedia*, vol. 10, pp. 683-693.
5. UNCTAD. (1985). *Port Development - A handbook for planners in developing countries*. New York: United Nations Publications.
6. UNCTAD. (2017). *Review of Maritime Transport 2017*. From https://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2017_en.pdf (acessado 20.07.2021)
7. Zeigler, B., Muzy, A., & Kofman, E. (2019). *Theory of modeling and simulation: discrete event & iterative system computational foundations*. Academic Press.