

Análise do compartilhamento de vias entre o modal rodoviário e ferroviário por meio de simulação de eventos discretos

Laura Luiza Pereira David (Faculdade Ibmec-MG) davidlaura54@gmail.com

Gisele Tessari Santos (Faculdade Ibmec-MG e Instituto de Educação Tecnológica – IETEC) giseletessari@yahoo.com.br

Resumo:

Sabe-se que o planejamento a longo prazo nas empresas permite sua perenidade. O planejamento de investimentos em infraestrutura é um dos diversos pontos de atuação dessa área dentro de uma empresa. Ele permite analisar quais investimentos são necessários na empresa, além de averiguar se ao desembolsar um determinado valor em investimento a empresa terá um retorno favorável. Este artigo visou analisar a necessidade de investimento em um provável gargalo no cruzamento entre um modal ferroviário e rodoviário por meio de um modelo de simulação de eventos discretos. Ao desenvolver o modelo de simulação, todas as premissas rodoviárias e ferroviárias do trecho, e todo o volume de veículos e de trens esperados tanto na rodovia quanto na ferrovia respectivamente, até 2021, foram considerados. Estes volumes aumentam consideravelmente por ano, e por terem que esperar a passagem de trem, os caminhões e carros que estão em sentido entrada e saída de um porto não poderiam ter grandes interferências em seus processos. Portanto, como fator de decisão sobre a necessidade de investimento, analisou-se a variável fila máxima de veículos a qual não deveria ultrapassar o valor de 40 unidades em fila em ambos os sentidos. Três cenários foram simulados. Os resultados em todos os cenários demonstraram que a fila de veículos que esperam a passagem de trens no cruzamento não ultrapassa 40 unidades, e, portanto, constatou-se que não é necessário um investimento em infraestrutura, como a construção de um viaduto no cruzamento, no período analisado.

Palavras chave: Simulação de eventos discretos, planejamento de transporte, compartilhamento de via.

Crossroad's analysis between a road and a rail by discrete event simulation

Abstract

It is known that the long-term planning allows the business continuity. The investment planning department allows to analyze which investments are necessary in the company, as well as a check if the company's investment has a favorable return. This paper aims to analyze the necessity of an investment in a probable bottleneck at the intersection between a road and a railroad by a discrete event simulation model. During the development of the simulation model, all road and rail assumptions, and the entire volume of vehicles and trains expected until 2021, were considered. Those volumes increase each year, and there is a possible bottleneck at the crossroad, because all vehicles must wait if there is a train crossing the road. Those vehicles are trucks and cars that are going in or out of a port, in which cannot have interferences in their processes. The performance measure used in the system to decide if any investment is needed was the maximum queue of vehicles, that could not exceed the value of 40 of them in queue waiting to go in or out from the port. Three scenarios were simulated. The results in all scenarios showed that the queue of vehicles at the intersection does not exceed 40 units, and therefore, it was

verified that an investment in infrastructure, such as construction of a viaduct at the intersection during the analyzed period was not necessary.

Key-words: Discrete event simulation, transport planning, crossroads.

1. Introdução

A necessidade de planejamento no sistema de transporte no Brasil tem se tornado cada vez mais evidente. De acordo com o Departamento Nacional de Trânsito, entre os anos de 2005 a 2015, a frota brasileira aumentou 116% (DENATRAN, 2017). Esse crescimento vertiginoso exige uma maior eficiência no uso das vias para que o fluxo de veículos flua de maneira contínua.

O trânsito de veículos sem interrupções está diretamente relacionado à capacidade das vias em que eles transitam. Segundo Araujo (2009), “Gargalo é qualquer recurso cuja capacidade é inferior à demanda”. Portanto, planejar o sistema como um todo é importante para que a ocupação de uma via seja menor que sua capacidade, evitando assim, os congestionamentos e os impactos negativos no trânsito causados pelos gargalos.

Uma realidade no Brasil são as soluções paliativas dadas aos problemas de trânsito que não são sanados a longo prazo. Isso ocorre justamente pela falta de planejamento e de investimento em infraestrutura. Em um estudo feito no ano 2000 pela Fundação Getúlio Vargas e pela União Nacional da Construção, o Brasil ficou classificado abaixo de países como Namíbia, Estônia e Hungria em relação à infraestrutura e à vascularização da malha rodoviária (FGV, 2006).

O *U.S. Department of Transportation* (USDOT, 2007) afirma que o planejamento de transporte deve ser um processo cooperativo concebido para promover o envolvimento de todos os usuários do sistema, como a comunidade empresarial, grupos da comunidade de cidadãos, organizações ambientais, os operadores de transporte, os viajantes e o público em geral. Coletar informações relacionadas à população, renda, empresas, indústrias, comércio e aeroportos, auxiliam na análise sobre qual é a ocupação que determinado número de pessoas demanda de um espaço compartilhado.

Segundo a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 1997), o planejamento de transportes é a “atividade que define a infraestrutura necessária para assegurar a circulação de pessoas e mercadorias”. Já Litman (2011), define que o processo de planejamento de transporte, normalmente, estabelece um nível de serviço a ser ofertado e avalia os impactos relacionados aos custos de infraestrutura para o governo, tempos de viagem, congestionamento mínimo, risco de acidentes por quilometro, impactos ambientais, e o custo de utilização do automóvel. Um sistema de transporte eficiente permite crescimento e desenvolvimento da nação, além de disponibilizar recursos e facilitar a mobilidade (VASCONCELOS, 2008).

A infraestrutura de um país é fundamental para seu desenvolvimento econômico. Porém, as atividades econômicas relacionadas ao transporte geram externalidades associadas à impactos positivos e negativos. As externalidades positivas são os ganhos de eficiência para a economia, vantagens sociais da conexão de regiões e vantagens no segmento da atividade econômica. As negativas dizem respeito a congestionamento de tráfego, poluição e acidentes (OLIVEIRA, 2013).

Considerado o modal mais expressivo no transporte de cargas, as rodovias atingem praticamente todos os pontos do território nacional (RIBEIRO, 2002). Mas o espaço urbano é o fator escasso na provisão dos serviços rodoviários de transporte já que se pode constatar uma oferta escassa em recurso e uma demanda em excesso (LACERDA, 2006). A medida que a capacidade viária é ocupada, o tempo de transito dos veículos em viagem aumentam (LACERDA, 2006). As soluções aplicadas às externalidades negativas como congestionamento

de tráfego, ou, aumento no tempo de viagem, estão relacionadas às alternativas que buscam aumentar a capacidade do recurso via, ou, diminuir a ocupação da mesma. No Brasil, as seguintes soluções têm sido propostas: ampliação de vias, rodízio de placas, construção de anéis rodoviários, viadutos, trincheiras e túneis.

A simulação de eventos discretos é uma importante ferramenta que facilita o planejamento de um sistema como um todo e, portanto, pode ser utilizada para a análise e planejamento do compartilhamento de vias a fim de evitar as externalidades negativas. Para Prado (1999), dentre as técnicas disponíveis, a simulação é a mais utilizada na modelagem de sistemas que apresentam gargalos. Esta técnica busca identificar gargalos, ou seja, os possíveis pontos em que a capacidade não é suficiente para atender a demanda. Esses pontos são onde há formação de grandes filas. Esse método tem sido utilizado na análise de vários sistemas reais por auxiliar na tomada de decisão permitindo um melhor dimensionamento entre recursos, demanda e tempos de processo, e, consequentemente, proporcionando um aumento no nível de serviço. A metodologia tem sido utilizada em análises de fluxos de produção em indústrias, em serviços oferecidos por hospitais e bancos, no planejamento logístico e militar, dentre outros (HILL, 2001; LANNONI, 2006; GUNAL, 2010).

Um estudo de simulação pode economizar tempo e recursos financeiros (FREITAS, 2008). Utilizar a simulação de eventos discretos facilita o entendimento sobre a interação das variáveis dentro do sistema, além de ser uma alternativa para teste de novas hipóteses operacionais sem comprometer o funcionamento do sistema. Entretanto, uma dificuldade ao se utilizar este método é a falta de dados dos sistemas reais. Cabe destacar que sem os dados reais é mais difícil afirmar que o modelo de simulação desenvolvido é devidamente válido e pode ser utilizado para análises sobre o sistema real. Assim, para se realizar uma simulação, é preciso de uma base de dados históricos do sistema real ou de um sistema considerado *benchmark*. Obter dados adequados para utilizar no modelo de simulação é geralmente demorado, difícil e dispendioso. Esses problemas são, muitas vezes, a razão que leva a validação do modelo ao fracasso (SARGENT, 2011).

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de simulação para o cruzamento, tecnicamente chamado de passagem em nível, situado entre uma ferrovia e uma estrada de acesso ao Terminal Integrador Portuário Luiz Antônio Mesquita, na região metropolitana de Santos (SP). A partir da simulação, analisar-se-á se a capacidade do recurso “cruzamento” limitando-se o fluxo de veículos que passa por ele de acordo com a quantidade de veículos e trens esperados para os próximos anos. O objetivo com essa simulação é definir para quando um investimento em infraestrutura deve ser provisionado de acordo com o planejamento da infraestrutura necessária para que o cruzamento não seja um gargalo. Para isso, diferentes cenários foram simulados e analisados.

2. Referencial teórico

2.1 Contextualização do problema real

O cruzamento, estudado neste artigo, entre a ferrovia e a estrada de acesso ao porto. Está situado depois da alça da BR-101, da portaria do porto e do início da estrada de acesso ao porto, que passa pelo cruzamento com a ferrovia e continua em direção ao porto.

O porto está em obras de expansão que serão finalizadas em abril de 2017. A expansão levará a um aumento do volume processado pelo porto, consequentemente, um número maior de trens e caminhões entrará no sistema utilizando a ferrovia, o cruzamento e a estrada de acesso ao porto. Isso levantou um ponto de atenção em relação a necessidade de investimento no cruzamento visando um aumento de capacidade.

O fluxo de veículos na estrada de acesso ao porto devem esperar antes ou depois do cruzamento caso tenha algum trem na ferrovia cruzando a estrada de acesso ao porto. O número máximo de 40 veículos em ambos os sentidos é o limite para que os veículos não ocupem a BR-101 e/ou interfiram negativamente algum processo portuário. Considera-se que o cruzamento seja gargalo no sistema se a fila em qualquer sentido ultrapassar 40 veículos.

Visto isso, visa-se analisar o nível de ocupação do cruzamento e o número de veículos em fila a fim de permitir um planejamento para determinar quando um possível investimento em infraestrutura será necessário. Uma solução para diminuir esta ocupação será a construção de um viaduto para que os veículos não esperem a passagem do trem.

2.2 Simulação de eventos discretos

Simular é a tentativa de representar algo real. Segundo Shannon (1976), a simulação é o processo para desenvolver um modelo do sistema real e conduzi-lo a experimentos com o propósito de analisar o comportamento do sistema e avaliar as melhores estratégias para operá-lo. Já Kelton (2009), se refere à simulação como um amplo grupo de métodos que visam permitir representação do sistema real utilizando softwares computacionais.

As ocorrências ou os processos neste sistema real são chamados de eventos. Eles interferem no tipo de simulação a ser utilizada. Para Silva (2009), os eventos para utilizarmos a simulação discreta podem ser acontecimentos como a chegada de caminhões programada ou não, e que nos modelos discretos as variáveis mantêm um comportamento ao longo de um intervalo de tempo com alterações em momentos bem definidos e conhecidos do tempo.

Ingalls (2008) defende que o poder da simulação de eventos discretos para as demais simulações, ou a principal diferença é que a simulação de eventos discretos tem a habilidade de imitar as dinâmicas de um sistema real. Já para Shannon (1976), é uma ferramenta disponível para planejamento e controle de eventos complexos.

A simulação pode ser aplicada em várias áreas como sistemas de manufatura, sistemas públicos ou sistemas que oferecem serviços (BANKS, 1998). Encontra-se na literatura, o método de simulação de eventos discretos aplicado à otimização de serviços de saúde (GUNAL, 2010), em análises da logística de sistemas de suprimentos (LANNONI, 2006), em simulação de fluxo de passageiros em um aeroporto (GUIZZI, 2009), em problemas de modelos militares (HILL, 2001), em simulação do transporte logístico de petróleo bruto (CHENG, 2004), entre outros.

3. Metodologia

As análises dos resultados da simulação de eventos discretos pelo software Arena, neste trabalho, buscam identificar se a construção de um viaduto no cruzamento é necessária. O primeiro passo para construir um modelo que simule o sistema real foi desenvolver um fluxograma que contenha todos os processos que utilizam o recurso cruzamento. O cruzamento é utilizado pelo fluxo dos produtos enxofre, rocha e fosfato que saem do porto via caminhão, por carros de passeio tanto de funcionários como de visitantes, e pelos trens que passam na ferrovia.

Os fluxogramas foram divididos por tipo de elementos que requisitam o recurso e o sentido que eles transitam. Sendo assim, tem-se o grupo de trens importação, grupo de trens exportação, grupo de carros/caminhões importação, e grupo de carros/caminhões exportação.

O fluxo de trens foi dividido em dois grupos de acordo com a direção que eles passam no cruzamento. O sentido é importação se o trem está no sentido porto-país ou exportação se o sentido for país-porto. A rota é a mesma para ambos os fluxos de trem porém elas tem o sentido invertido.

Dentro desse sistema, considerando o sentido exportação, o trem percorre uma distância de 3 km entre sua origem e o cruzamento, e de 13 km entre o cruzamento e seu destino. Na importação, por ser o sentido oposto, o trem percorre 13km entre sua origem e cruzamento, e 3km entre cruzamento e seu destino.

Durante esse percurso em ambos os sentidos, o recurso ferroviário, que tem a capacidade de um trem por vez, é utilizado. A velocidade permitida entre a origem e o destino é de 25 km/h, e de 10 km/h durante o cruzamento. A distância do cruzamento tem por base o comprimento do trem (1,5 km) e a margem de segurança (0,1 km) para a parte inicial e final do trem.

O recurso ferroviário tem a capacidade de 1 trem, e ele é ocupado durante o tempo total necessário para percorrer 17,7 km considerando a velocidade necessária em cada trecho. O recurso cruzamento é ocupado durante o tempo que o trem precisa para percorrer 1,7 km considerando a velocidade de 10 km/h e o recurso ferroviário é ocupado durante o tempo que o trem precisa para percorrer 16km a uma velocidade de 25km/h. Os recursos serão desocupados quando o tempo de ocupação estiver completo.

A seguir pode-se observar na figura 1 o fluxograma de trens no sentido exportação. O fluxograma de trens no sentido importação é igual ao da figura 1 se diferenciando apenas pela ordem em que os processos estão dispostos, uma vez que eles são os mesmos em sentidos opostos.

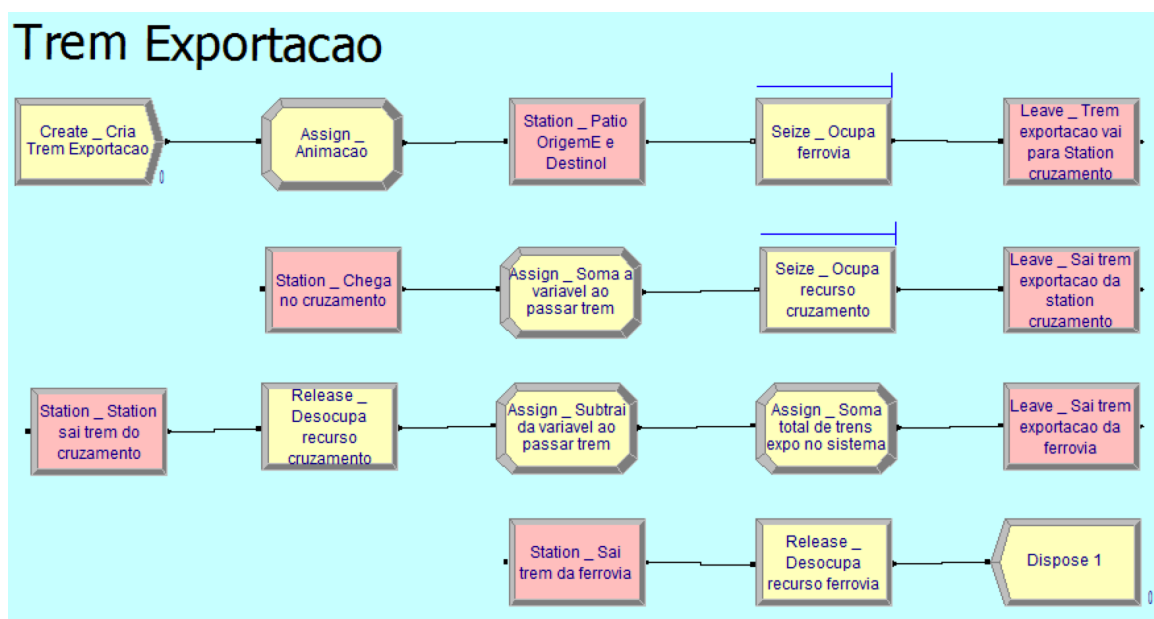


Figura 1 – Fluxo de trens no sentido exportação

Os *inputs* do modelo tiveram como base os dados previstos por meio do estudo realizado pelas operadoras ferroviárias que utilizam a ferrovia. Neste estudo, é exposta a quantidade de pares de trens por dia. Os resultados deste estudo são 16,3 pares em 2017, 18,9 pares em 2019 e 19,6 pares em 2021.

O fluxo de carros e caminhões também tem a mesma rota e são separados pelo sentido exportação que é a chegada dos veículos e importação que é a saída.

O recurso compartilhado nesse sistema é o cruzamento que é ocupado por 12 segundos tanto por caminhões quanto pelos carros. Esse tempo foi obtido por meio de observações do sistema real. Por se tratar de uma estrada duplicada, não existem o impedimento que os veículos no sentido exportação travem os veículos do sentido importação e vice-versa.

Observa-se na figura 2 o fluxograma de carros e caminhões no sentido exportação. O fluxograma de carros e caminhões no sentido importação é igual ao da figura 2 alterando-se apenas o sentido dos processos.

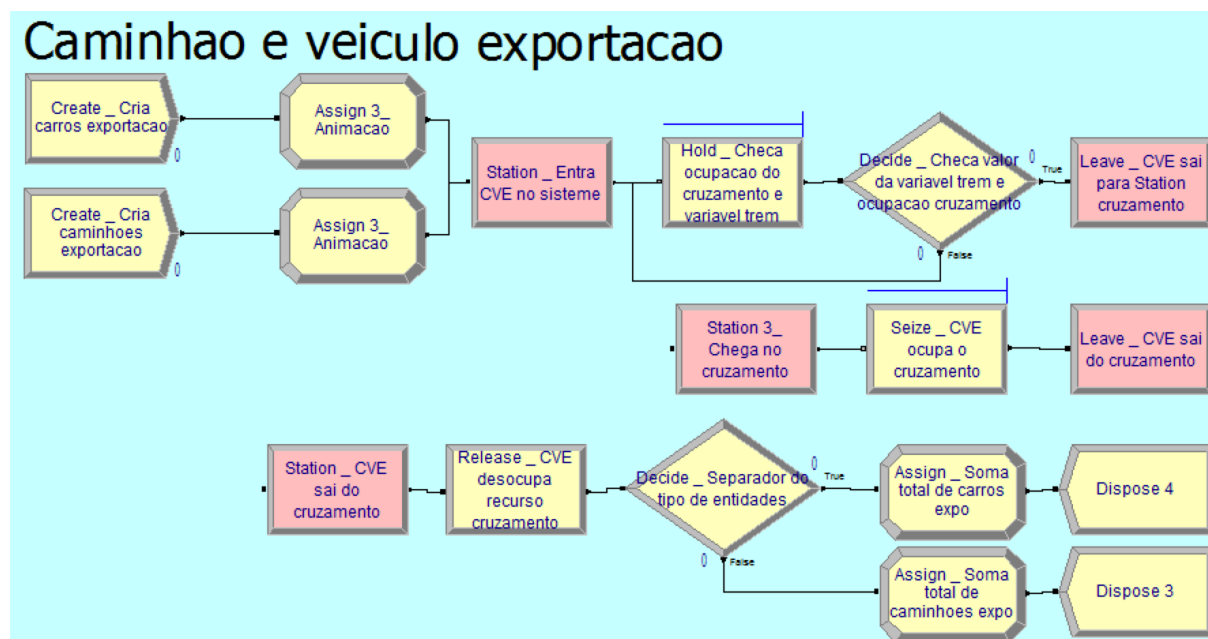


Figura 2 – Fluxo de carros e caminhões no sentido exportação

Os *inputs* para o fluxo de caminhões tiveram como base o volume de produtos processados no porto e a capacidade média de 25 toneladas por caminhão. O volume processado no porto é definido pelo Plano de Negócios da empresa, que é um documento desenvolvido e dimensionado sobre a demanda esperada de produtos para os próximos anos, e a capacidade dos ativos.

O cálculo do intervalo de chegada de caminhões por dia foi realizado a partir do volume de produtos esperado no mês de maior demanda, da capacidade média do caminhão, e do número de caminhões necessários para transportar esse volume. Essa taxa do mês de maior pico foi representada por uma curva exponencial e fixada para todos os meses do ano, respeitando o comportamento esperado dentro das 24 horas do dia de um porto.

O *input* para o fluxo de carros teve por base as observações no porto. De acordo com essas observações, espera-se em média cerca de 50 a 60 carros por dia. E esse número é o esperado até o ano de 2021.

Considerando que o porto está em processo de expansão com finalização das obras em 2017, o modelo que simulou o sistema real para o ano de 2017 foi validado utilizando-se dados históricos de 2015 dos processos que não se alteraram. Portanto, para a validação, utilizaram-se os dados relacionados ao volume dos produtos via rodoviário realizado pelo porto no ano de 2015, o número de carros de passeio que circulavam no mesmo ano e o dado histórico de 3 pares de trens dia que circulavam na margem esquerda em 2015.

A amostra piloto foi rodada com estes dados com um tempo total de simulação igual a 365 dias e 1 replicação. A partir da amostra piloto, calculou-se o número adequado de replicações considerando um intervalo de confiança de 95% de acordo com a expressão a seguir:

$$n^* = \left\lceil n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil \quad (1)$$

em que,

h^* = precisão desejada;

h = precisão da amostra piloto;

n^* = número de replicações necessárias;

n = número de replicações da amostra piloto.

Após definir o número de replicações adequado, o modelo foi simulado novamente a fim de checar se o número de caminhões, carros e pares de trens dia gerados pelo sistema condizem com os dados históricos disponíveis. Após a validação do modelo, este foi utilizado para simular os cenários atuais e futuros.

As premissas como distância entre os pátios ferroviários, a velocidade permitida em cada trecho, e o tempo de ocupação do recurso foram as mesmas por tipo de entidade em todos os cenários.

Os parâmetros de entrada foram o intervalo entre chegadas de trens, obtido no estudo da ferrovia até 2021; o intervalo de caminhões, refere-se a demanda para os próximos anos até 2021 e a capacidade dos caminhões; e o intervalo de carros, que se manterão com uma média total entre 50 e 60 carros esperados por dia até 2021. Todos os parâmetros de intervalo de chegada utilizados em cada cenário são referentes ao ano da simulação.

As principais medidas de desempenho do sistema coletadas e analisadas foram a fila máxima de carros e caminhões no cruzamento que não pode exceder 40 veículos, e a fila de trens no cruzamento que deve ser igual à zero. Assim, garante-se que o trânsito de trens é preferencial ao de carros e caminhões, e que a fila de caminhões é menor que o limite de veículos em fila. Adicionalmente, desejou-se saber a taxa de ocupação do cruzamento.

O primeiro cenário foi definido como cenário base, no qual simulou-se o modelo com os *inputs* do ano de 2017 e 2019. Os demais cenários seriam definidos a partir da análise das saídas do seu anterior. Visa-se chegar ao cenário em que a fila de veículos em qualquer sentido ultrapassasse 40 unidades utilizando os dados previstos até 2021. E se na simulação do ano de 2021 o cruzamento não se apresentar como um gargalo, com uma das fila maior que 40 veículos, será necessário estressar o sistema e descobrir o seu limite.

Os resultados dos diferentes cenários foram utilizados para sugerir um melhor dimensionamento dos processos, e concluir se mesmo com um sistema melhor dimensionado o investimento em um viaduto é necessário.

4. Resultados e discussão

4.1 Validação do modelo

A validação do modelo consiste em verificar se o sistema computacional é confiável para representar o sistema real. Para isso, compararam-se os dados de saída em relação ao número de trens, carros, caminhões nos sentidos exportação e importação gerados pelo modelo de simulação com os dados históricos observados em 2015, e calcula-se o erro relativo com a seguinte equação:

$$\% \text{ erro} = \frac{|X_0 - X|}{X_0} \times 100 \quad (2)$$

em que,

$\% \text{ erro}$ = Erro ou desvio relativo percentual;

X_0 = Valor desejado;

X = Valor obtido por meio da simulação.

O sistema foi simulado com os seguintes parâmetros: duração de 365 dias (considerando 24 horas por dia) e 8 replicações. O número de replicações foi calculado de acordo com a equação (1), considerando um intervalo de confiança de 95% para todos os indicadores de tempo dos veículos em fila no sistema. Esse número de replicações garantiu uma precisão dos indicadores analisados menor que 10% da média amostral.

A quantidade média de entidades criadas por meio da simulação foi confrontada com os dados históricos a fim de calcular o erro relativo por meio da equação (2). Observe os resultados de 2015 nas tabelas 1, 2 e 3 a seguir:

-	Exportação			Importação		
Ano	# Caminhões Simulados	# Caminhões Real 2015	Erro Relativo %	# Caminhões Simulados	# Caminhões Real 2015	Erro Relativo %
2015	76.244	72.360	5,37%	76.254	72.360	5,38%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 1 – Erro relativo entre o número de caminhões nos sentidos importação e exportação em 2015

-	Exportação			Importação		
Ano	# Carros Simulados	# Carros Real 2015	Erro Relativo %	# Carros Simulados	# Carros Real 2015	Erro Relativo %
2015	21.224	21.600	1,74%	21.163	21.600	2,02%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 2 – Erro relativo entre o número de carros nos sentidos importação e exportação em 2015

-	Exportação			Importação		
Ano	# Trens Simulados	# Trens Real 2015	Erro Relativo %	# Trens Simulados	# Trens Real 2015	Erro Relativo %
2015	1.090	1.080	0,95%	1.097	1.080	1,06%

Fonte: Elaboração própria

Tabela 3 – Erro relativo entre o número de trens nos sentidos importação e exportação em 2015

Observou-se que o erro relativo percentual anual foi inferior a 5,5% em relação à criação de caminhões, inferior a 2% em relação à criação de carros e inferior a 1,7% em relação à criação de trens. Todos inferiores a 10% que é o parâmetro de referência da empresa.

Utilizou-se também, da animação do modelo de simulação no software arena para a validação. Observou-se que a animação dos processos do modelo de simulação condizem com os processos observados e esperados no cruzamento.

Portanto, pode-se considerar o modelo válido para representar a realidade do sistema real, visto que a animação do modelo condizia com os processos do sistema, e que os erros relativos

obtidos são valores aceitáveis de acordo com o padrão trabalhado pela empresa.

4.2 Resultados do cenário base

O cenário base consistiu, primeiramente, na simulação do modelo utilizando os dados de 2017 como *inputs* e, posteriormente, os dados de 2019. Ambas simulações foram feitas conforme descrito na metodologia.

Observou-se que as quantidades de carros, caminhões e trens que passam pelo cruzamento condizem com as quantidades dessas mesmas entidades previstas no orçamento de 2017 da empresa com um desvio relativo anual inferior a 7,42%. O menor desvio relativo anual observado foi em relação ao número de carros sendo inferior a 2,2%.

De acordo com esse cenário de 2017 e suas criações, temos como saída a ocupação média anual do cruzamento de 30%, e o número máximo de veículos em fila igual a 23 na exportação e 21 na importação.

Portanto, constata-se por meio dos resultados da simulação do ano 2017 que o cruzamento ainda não é considerado um gargalo por não ter excedido sua capacidade de fila máxima de 40 veículos. Assim, conclui-se que neste ano o investimento em obras de aumento de capacidade não é ainda necessário.

Simulou-se, então, o modelo considerando as taxas de geração de caminhões e trens previstas para o ano de 2019. Os resultados das criações de caminhões e carros que passam pelo cruzamento apresentam um desvio relativo inferior a 5,3%. Entretanto, o desvio relativo referente ao número de trens foi em torno de 20%. Vale lembrar que a contagem de criações utilizada no cálculo do desvio compara o número de trens simulados e previstos está situada após o cruzamento, portanto, são contabilizados todos os trens que passam pelo cruzamento e não todos criados pelo sistema.

Sabe-se que de acordo com o orçamento de 2019, o número esperado de trens são 18,9 pares por dia, e com a simulação obteve-se uma média de apenas 15 pares por dia que passam pelo cruzamento e uma média de 18,9 pares criados por dia.

Portanto, conclui-se que a capacidade da ferrovia entre os pátios origem e destino não permite a passagem de mais do que 15 pares de trens por dia no cruzamento. Uma vez que, ao diminuir o intervalo entre as criações o número de trens criados aumentam, mas o número de trens que passam pelo cruzamento se estabiliza em 15 pares por dia, e a fila de trens na origem importação e origem exportação, esperando para passar pela ferrovia, aumenta significativamente. E confirma-se que a capacidade da ferrovia limita o fluxo de trens no cruzamento ao calcular a divisão entre as horas operacionais da ferrovia e o tempo que um trem gasta para percorrer o trecho.

Mesmo com o número de trens estagnados em 15 pares por dia no modelo de 2019, e não 18,9 pares como esperado no estudo da ferrovia, impossibilitando a análise do escopo principal do projeto, que visa analisar o cruzamento com o aumento de trens e caminhões durante os próximos anos. Há no modelo um aumento no número de caminhões e, portanto, observa-se que a ocupação média anual do cruzamento é de 32,4% e que a fila máxima é igual a 28 na exportação e 22 na importação.

Conclui-se que, a simulação do cenário base de 2019, assim como no de 2017, o cruzamento não é considerado gargalo no sistema uma vez que a fila máxima não ultrapassa a capacidade de 40 veículos.

4.3 Cenário 1 – Aumento da capacidade da ferrovia

Considerando os resultados da simulação do cenário base não foi possível chegar ao objetivo do trabalho. Nem concluir que há um gargalo no cruzamento devido à preferência do trânsito de trens na ferrovia, ou definir para quando um investimento em infraestrutura deve ser provisionado para que a fila de veículos seja inferior a 40. Portanto, neste cenário, simulou-se um aumento na capacidade de ferrovia já que ela estava limitando a capacidade média de 15 trens por dia no cruzamento.

Ao aumentar a capacidade da ferrovia para que ela atenda a demanda de trens prevista no cruzamento para os próximos anos. Simulou-se o modelo com os dados de 2019 e 2021 a fim de verificar os reais reflexos que o aumento de número de trens e caminhões causa na taxa de ocupação do cruzamento.

Uma das formas utilizadas na prática para o aumento da capacidade da ferrovia é a construção de pátios de cruzamento. Os pátios de cruzamento se instalados exatamente entre a origem e o destino da ferrovia duplicam a capacidade da mesma. Assim, enquanto anteriormente um trem deveria esperar em fila um outro passar por toda a ferrovia para depois seguir viagem, depois da construção do pátio de cruzamento, os trens, um na origem e outro no destino, podem se deslocar ao mesmo tempo e com velocidade semelhante até o pátio de cruzamento. Ao chegar no meio do trecho, onde o pátio está, há uma linha duplicada que permitirá que os trens em sentidos diferentes possam passar ao mesmo tempo. O cálculo de aumento na capacidade da ferrovia se baseia na teoria de Colson (KRUEGER, 1999). A representação desse aumento de capacidade com a criação do pátio pode ser feita no modelo de simulação com a diminuição dos tempos de trânsito pela metade, então o trem não utilizará na média 40 minutos para percorrer todo o trecho, mas sim 20 minutos.

Após o aumento da capacidade da ferrovia foi simulado o ano de 2019 e observou-se que o modelo gerou as quantidades adequadas de veículos e trens, apresentando um desvio relativo anual inferior à 5,1% na criação das entidades. Com a taxa média anual de ocupação igual a 38,1%, e as filas máximas com 25 veículos na exportação e 24 na importação.

Logo, o cruzamento não é um gargalo em 2019. Então, simulou-se o modelo considerando os dados de 2021 conforme descrito na metodologia, e a melhoria de capacidade na ferrovia. Os resultados das criações no cruzamento apresentaram um desvio relativo inferior à 5,4% e, portanto, as criações do modelo estão adequadas. Quanto às análises das saídas, tem-se a taxa de ocupação de 41% e as filas máximas de veículos na exportação de 28 e na importação de 31. Conclui-se que, considerando os dados previstos no orçamento da empresa até o ano de 2021, o cruzamento ainda não é um gargalo já que fila de veículos não supera 40 unidades, e nenhum investimento em infraestrutura será necessário.

4.4 Cenário 2 – Estressando o sistema

Este cenário tem como objetivo saber quando o cruzamento será um gargalo uma vez que os demais cenários não apresentaram ele como tal. Para isso, utilizou-se os dados do ano de 2021 para os carros e caminhões e observou-se um desvio inferior a 5,61% nessas criações. E aumentou-se gradativamente o número de pares de trem até que o cruzamento fosse considerado um gargalo. Neste cenário, assim como no anterior, a capacidade da ferrovia foi aumentada para que ela não limite a quantidade de trens gerada durante a simulação.

Neste cenário, a quantidade de trens para que o cruzamento passe a ser um gargalo deve ser uma média de 58 pares de trens por dia. Este valor é maior que o dobro do valor previsto pelas operadoras ferroviárias, no seu estudo de pares de trens diários na ferrovia, para o ano de 2037.

Ao aumentar o número de pares de trens para 58, a taxa de ocupação do cruzamento atingiu um valor médio anual de 94,4%, e o número máximo de veículos em fila chegou a 40 no sentido exportação e a 41 no sentido importação, ultrapassando, portanto, o espaço disponível para o estacionamento prejudicando as operações portuárias.

5. Conclusão

A partir da simulação, analisaram-se se a capacidade do recurso “cruzamento” limita o fluxo de veículos que passa por ele de acordo com a quantidade de veículos e trens previstos no orçamento da empresa de 2017 a 2021. O objetivo foi definir o ano que um investimento em infraestrutura deveria ser provisionado. Para isso, diferentes cenários foram simulados e analisados.

Em cada cenário os resultados obtidos por meio das simulações e análises permitem concluir que:

- a) A análise do cruzamento por meio de um modelo de simulação de eventos discretos foi viável e relevante para prever os possíveis gargalos do sistema nos próximos anos;
- b) No cenário base as principais conclusões são que nos anos de 2017 e 2019 com o número médio de trens limitado a 15 pares, o cruzamento não se apresenta como um gargalo no sistema. Obteve-se uma taxa de ocupação do cruzamento de 30,3% em 2017 e 32,4% em 2019. E uma fila máxima de 23 em 2017 e 28 em 2019;
- c) No cenário 1, alterou-se a capacidade ferroviária. Considerou-se, em 2019, uma média de 19 pares de trens que resultou em uma taxa de ocupação do cruzamento de 38,1% e uma fila máxima de 25 veículos. E em 2021, com uma média de 20 pares de trens, obteve-se a taxa de ocupação de 41,6% com a fila máxima de 31 veículos;
- d) Quanto ao cenário 2, realizou-se o estresse do sistema uma vez que até o ano de 2021 o cruzamento não é considerado um gargalo, ou seja, a fila máxima é inferior à 40 veículos. Utilizou-se as mesmas premissas e parâmetros do ano de 2021 e aumentou-se o número de trens. Observou-se que o número de pares de trens que passam pelo cruzamento deve ser igual ou maior que uma média de 58 pares por dia para que a fila fosse superior a 40 unidades, implicando, assim, a necessidade de investimento.

Como conclusão final, tem-se que a técnica de simulação de eventos discretos se mostrou adequada e eficaz para o estudo do comportamento do sistema analisado. A eficácia desta técnica foi comprovada por meio da validação do modelo de simulação que teve por base dados históricos da empresa.

Referências

ANTP – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. *Transporte Humano: Cidades com Qualidade de Vida*. São Paulo: ANTP, 1997.

ARAUJO, M.A. *Administração de produção e operações – Uma abordagem prática*. Rio de Janeiro: Brasport, 2009.

BANKS, J. *Handbook of simulation – Principles, methodology, advances, applications, and practice*. Georgia: Institute of Technology, 1998.

CHENG, L.; DURAN, A.M. *Logistics for world-wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control*. Computers & Chemical Engineering. Vol.28, n.6–7, p.897-911, 2004.

DENATRAN. Departamento Nacional de trânsito , disponível em:

<<http://www.denatran.gov.br/index.php/estatistica/237-frota-veiculos>>. Acesso em: 16 de Março de 2017.

FGV – FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. *A Construção do Desenvolvimento Sustentado: A importância da construção na vida econômica e social do país*. São Paulo: FGV Projetos e União Nacional da Construção, 2006.

FREITAS F., P. J. *Introdução à modelagem e simulação de sistemas: com aplicações em Arena..* 2. ed. Florianópolis: Visual Book, 2008.

GUIZZI, G.; MURINO, T.; ROMANO, E. *A Discrete Event Simulation to model Passenger Flow in the Airport Terminal.* Mathematical Methods and Applied Computing. Vol.2, n.1, p.427-434, 2009.

GUNAL, M.M.; PIDD, M. Discrete event simulation for performance modelling in health care: a review of the literature. Journal of Simulation. Vol.4, n.1, p.42-51, 2010.

HILL, R.R.; MILLER, J.O.; MCINTYRE, G.A. *Simulation analysis: applications of discrete event simulation modeling to military problems.* 33rd conference of Winter simulation, 2001.

INGALLS, G.R. *Introduction to Simulation.* 40th Winter Simulation Conference, 2008.

KELTON, W.D.; SADOWSKY, R.P.; SADOWSKY D.A. *Simulation with Arena..* 5 Ed. Boston: McGraw-Hill, 2009.

KRUEGER, H.; *Parametric modeling in rail capacity planning.* 31st Winter Simulation Conference. New York, 1999.

LACERDA, S.M. *Precificação de congestionamento e o transporte coletivo urbano.* Ministério do Desenvolvimento, indústria e comércio exterior. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, 2006.

LANNONI, A.P.; MORABITO, R. *A discrete simulation analysis of a logistics supply system.* Elsevier. Vol.42, n.3, p.191-210, 2006.

LITMAN, T. *Introduction to multi-modal transportation planning Vol.15.* Victoria: Victoria transport policy institute, 2011.

OLIVEIRA, A.V.M.; TUROLLA, F.A. *Financiamento da infraestrutura de transportes.* Journal of transport literature Vol.7, n.1 , p.103-126, 2013.

PRADO, D.S.D. *Usando Arena em Simulação. Série Pesquisa Operacional.* Volume 3. Editora DG-Desenvolvimento Gerencial. Belo Horizonte: Falconi, 1999.

RIBEIRO, P.C.C.; FERREIRA, K.A. *Logística e transportes: Uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro.* XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção em Curitiba, 2002.

SHANNON, R.E. *Systems simulation. The Art and Science..* IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Vol.6, n.10, p.723-724, 1976.

SARGENT, R.G. *Verification and validation of simulation models.* Winter Simulation conference, 2011.

SILVA, A.K.; BOTTER, R.C. *Method for assessing and selecting discrete event simulation software applied to the analysis of logistic systems.* Journal of Simulation. Vol.3, n.2, p.95-106, 2009.

USDT, United States department of transportation. *The transportation planning process key issues – a briefing book for transportation decision makers, officials, and staff.* U.S.: Federal Highway Administration, 2007.

VASCONCELOS, G.M.; BASSO, L. *Sistemas de transportes brasileiros: origens, estado atual e desafios.* Jovens pesquisadores Mackenzie. Vol.5, n.8, p.141-158, 2008.