

UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE RISCO NO PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE FERROVIÁRIA SOB INCERTEZAS OPERACIONAIS

Grazielle Félix da Silva

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

graziellefelixs@gmail.com

Davi Simões Doro Pereira

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

davi_doro@hotmail.com

Daniel Alvaro Dutra

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

daniel.dutra@vli-logistica.com.br

Carlos Henrique Fernandes de Faria

VLI Logística S.A

Rua Sapucaí, 383, Floresta, Belo Horizonte – MG

faria.c@yahoo.com

Lucas Sirimarco Moreira Guedes

Minerva Foods

Avenida Antônio Manço Bernardes s/nº, Barretos – SP

lucasguedes1510@gmail.com

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia estatística para análise de risco na execução de volumes planejados no transporte ferroviário, considerando incertezas operacionais. A abordagem substitui o modelo determinístico tradicional por uma formulação estocástica baseada em variáveis aleatórias, ajustadas a partir de dados históricos. A capacidade é modelada como uma composição de distribuições de probabilidade via convolução discreta, permitindo derivar curvas de volume executável por fluxo, frota e sistema. Métricas de risco, como o percentil P80, são utilizadas para apoiar decisões operacionais. A metodologia foi aplicada na empresa VLI Multimodal S.A., integrada ao planejamento mensal e anual. A solução permite simular cenários, ajustar premissas e extrair probabilidades de execução, demonstrando ganho de robustez no planejamento logístico e maior visibilidade do risco de subexecução.

PALAVRAS CHAVE. Análise de risco; Planejamento Logístico; Capacidade Ferroviária; Modelagem Estatística de Risco; Planejamento sob Incerteza.

L&T – Logística e Transportes, AS&DS - Análise e Ciência de Dados, EST&AM – PO Analytics em Estatística e Aprendizado de Máquina.

ABSTRACT

This work proposes a statistical methodology for risk analysis in the execution of planned freight volumes in railway transport, considering operational uncertainties. The approach replaces the traditional deterministic model with a stochastic formulation based on random variables fitted to historical data. Capacity is modeled as a composition of probability distributions via discrete convolution, enabling the derivation of executable volume curves by flow, fleet, and system level. Risk metrics such as the P80 percentile are used to support operational decision-making. The methodology was applied at VLI Multimodal S.A., integrated into both monthly and annual planning. The solution allows users to simulate scenarios, adjust assumptions, and extract execution probabilities, demonstrating increased robustness in logistical planning and enhanced visibility into the risk of underperformance.

KEYWORDS. Risk analysis. Logistics Planning. Railway Capacity. Statistical Risk Modeling. Planning under Uncertainty.

L&T – Logistics and Transportation, AS&DS – Data Analysis and Data Science, EST&AM – OR Analytics in Statistics and Machine Learning.

1. Introdução

O planejamento da capacidade ferroviária é uma atividade estratégica para garantir o atendimento à demanda com o uso eficiente de ativos. Entretanto, esse planejamento está sujeito a diversas incertezas operacionais. Tais incertezas afetam diretamente a realização dos volumes planejados, podendo comprometer a eficiência logística e os resultados financeiros.

Diante desse cenário, o gerenciamento de riscos se torna uma disciplina crucial, permitindo que as empresas se antecipem às ameaças, ao invés de apenas reagirem a elas. Parte essencial dessa disciplina é identificar e mensurar os riscos. A estatística oferece as melhores técnicas para uma identificação assertiva e mensuração precisa desses riscos, mas os passos para a aplicação dessas técnicas nos contextos das empresas nem sempre são claros. O objetivo deste trabalho é oferecer uma metodologia para cálculo de probabilidade de cumprimento de um plano de atendimento de demanda no contexto de uma operadora logística ferroviária — e, conseqüentemente, o risco de não cumprimento desse plano.

A qualidade de um plano de atendimento de demanda pode ser aferida utilizando-se diferentes métricas, dentre as quais destacamos duas: (1) a receita esperada da plena execução do plano e (2) a probabilidade de pleno cumprimento do plano. Geralmente, essas métricas são inversamente proporcionais: quanto maior o retorno financeiro que se almeja, menor a probabilidade de execução do plano. O desafio do planejamento estratégico de uma operadora logística ferroviária é traçar um plano de atendimento de demanda que consiga maximizar a receita esperada assumindo o menor risco possível.

A metodologia de cálculo aqui proposta se baseia na análise estatística da performance operacional da operadora logística ferroviária, mas reconhecemos que o risco de não cumprimento de um plano de atendimento de demanda também está associado a fatores de outras naturezas: ambiental, jurídica, financeira, mercadológica, entre outras. Como a performance operacional é um dos fatores internos à operadora logística que mais impactam na probabilidade de execução do seu plano de atendimento de demanda, a vantagem da análise de risco nela baseada é que a empresa possui, e ações de mitigação de risco direcionadas à performance operacional possuem grande impacto na minimização das incertezas associadas ao plano.

2. Revisão de Literatura

O planejamento da capacidade ferroviária é amplamente abordado por modelos determinísticos que utilizam parâmetros operacionais, como número de ativos, tempo de ciclo e disponibilidade da frota. Trabalhos como [Bojovic et al., 2010; Yaghini e Khandaghabadi, 2012; Barros, 2013; Hungerlander e Steininger, 2018] propõem fórmulas clássicas de dimensionamento baseadas em premissas fixas, com o objetivo de estimar o volume máximo de carga transportável. Embora amplamente utilizados, esses modelos não incorporam as incertezas operacionais, como flutuações na demanda, variações em ciclos ou indisponibilidades inesperadas.

Em resposta a essas limitações, trabalhos mais recentes ressaltam a importância de integrar a variabilidade ao processo de planejamento. Weik et al. [Weik, 2020] e Lai et al. [Lai e Chen, 2017] destacam que a capacidade efetiva difere da capacidade nominal, sobretudo em ambientes sujeitos a interrupções e falhas. Esses autores sugerem que, para aumentar a robustez do planejamento, é necessário modelar explicitamente os riscos e incertezas.

Uma abordagem frequentemente adotada para esse fim é a simulação estocástica orientada a eventos discretos, como abordado em [Faria et al., 2024; Marinov e Viegas, 2011; Tan et al., 2004; Li e Li, 2008]. Embora eficazes, essas técnicas tendem a exigir alto custo computacional e complexidade na implementação, o que pode dificultar sua integração em rotinas operacionais de planejamento.

Como alternativa mais leve, surgem metodologias baseadas em modelagem estatística de variáveis aleatórias. Silva [Silva et al., 2017] propõe, no contexto do planejamento energético, a

substituição de parâmetros fixos por distribuições ajustadas a dados históricos, utilizando o Teorema do Limite Central (TLC) para estimar o risco agregado de não atendimento à demanda. Embora adequada para variáveis independentes e homogeneamente distribuídas, essa abordagem encontra limitações no contexto ferroviário, onde as variáveis operacionais frequentemente apresentam correlação.

Para contornar essas restrições, alguns autores recorrem à convolução estatística para compor distribuições agregadas de variáveis aleatórias. Os trabalhos [Mukherjee, 2011; Guifrida et al., 2007] demonstram a aplicabilidade da convolução, inclusive em sistemas logísticos, como ferramenta para agregar incertezas de forma consistente e com menor custo computacional do que simulações completas. Também no contexto de tratamento de incertezas no setor logístico sem trazer simulações a eventos discretos, como o trabalho [Gołebiowski et al., 2023] que aplica simulações de Monte Carlo para quantificar o risco de subexecução em função da indisponibilidade de ativos.

Este trabalho se posiciona nesse contexto intermediário, ao propor uma metodologia que preserva a estrutura clássica de dimensionamento, mas substitui os parâmetros determinísticos por variáveis estocásticas representadas por suas funções densidade de probabilidade. A partir dessas distribuições, a capacidade é composta por convoluções discretas, resultando em uma modelagem estatística leve, realista e apropriada para análise de risco no planejamento da capacidade ferroviária.

3. Método

O método proposto substitui abordagens determinísticas por uma estrutura probabilística que incorpora a variabilidade operacional, permitindo estimativas mais robustas para o planejamento da capacidade sob incerteza. A modelagem fundamenta-se na análise estatística da capacidade de execução em volume, condicionada à disponibilidade efetiva dos ativos logísticos, limitada por variáveis operacionais, incluindo o tempo de ciclo logístico, o peso médio útil por vagão, a disponibilidade de frota e o número de dias úteis no horizonte de planejamento. Essas variáveis determinam, em conjunto, a capacidade efetiva de giro dos ativos e, consequentemente, a quantidade de carga que pode ser movimentada com os recursos disponíveis.

Neste artigo, o foco recai especificamente sobre a análise de risco associada à disponibilidade da frota de vagões, por ser um dos principais fatores limitantes da capacidade operacional dos sistemas ferroviários estudados. No entanto, a metodologia aqui proposta é suficientemente geral e pode ser prontamente estendida para tratar, de forma análoga, a disponibilidade de locomotivas ou outros ativos logísticos, respeitando as particularidades operacionais de cada tipo de recurso.

3.1. Capacidade de Execução de Volume com Base na Disponibilidade de Ativos

Calcular a capacidade de execução no transporte ferroviário envolve estimar o volume máximo de carga movimentável em um período, dado um conjunto de ativos — especialmente vagões e locomotivas — e restrições operacionais. O tema é recorrente na literatura, devido ao elevado custo de capital envolvido na aquisição e manutenção de material rodante e à necessidade de seu uso eficiente [Bojovic et al., 2010; Yaghini e Khandaghabadi, 2012; Hungerlander e Steininger, 2018].

O dimensionamento da capacidade de execução com base na frota de vagões disponíveis é realizado por *fluxo*, sendo este definido como a unidade de demanda do sistema, composta pela tripla *origem-destino-mercadoria*. Cada fluxo representa uma cadeia logística individual, que pode eventualmente ser subdividida também por cliente e é atendido exclusivamente por uma única frota de vagões, previamente definida em função de critérios operacionais, técnicos ou contratuais.

Denote-se por $\mathcal{W}$ o conjunto das frotas de vagões disponíveis no sistema e por $\mathcal{F}$ o conjunto de fluxos a serem atendidos. Cada frota $w \in \mathcal{W}$ pode ser alocada a um subconjunto de fluxos $\mathcal{F}_w \subseteq \mathcal{F}$, isto é, uma mesma frota pode atender a múltiplos fluxos.

A variável de interesse é o volume total $V_{w,f}$ (em toneladas) que a frota w consegue movimentar no fluxo f ao longo do período de planejamento T (em dias). Essa capacidade é função dos seguintes parâmetros: o número de vagões da frota $N_{w,f}$ alocados ao fluxo f , a disponibilidade física da frota Φ_w , que é expressa como fração do total bruto efetivamente operacional, o horizonte de planejamento é representado por T , o peso útil médio por vagão no fluxo f é denotado por P_f , expresso em toneladas, o tempo médio no fluxo f indicado por C_f , o volume máximo que a frota w pode movimentar no fluxo f durante o período T é representado por $V_{w,f}$. A capacidade de movimentação da frota w no fluxo f é então dada por:

$$V_{w,f} = \frac{N_{w,f} \cdot \Phi_w \cdot T \cdot P_f}{C_f} \quad (1)$$

Em sistemas com múltiplos fluxos e múltiplas frotas de vagão, a capacidade total de movimentação da frota w é obtida pela soma das capacidades individuais em cada fluxo $f \in \mathcal{F}_w$:

$$V_w = \sum_{f \in \mathcal{F}_w} V_{w,f} \quad (2)$$

E a capacidade total do sistema ferroviário considerando todas as frotas disponíveis é:

$$V_{\text{total}} = \sum_{w \in \mathcal{W}} V_w = \sum_{w \in \mathcal{W}} \sum_{f \in \mathcal{F}_w} \frac{N_{w,f} \cdot \Phi_w \cdot T \cdot P_f}{C_f} \quad (3)$$

Essa formulação permite avaliar a capacidade de execução de carga no sistema ferroviário considerando a alocação de frotas específicas a diferentes fluxos, respeitando suas características operacionais e limitações técnicas. As estimativas de $V_{w,f}$ constituem a base para os modelos estocásticos e análises de risco apresentados nas seções seguintes deste trabalho.

3.2. Transformação Estocástica da Equação de Capacidade Logística

A equação de capacidade logística apresentada na seção anterior, seja útil como ponto de partida, ela não incorpora a variabilidade observada nas operações reais, que decorre de múltiplos fatores logísticos e ambientais.

Para capturar a incerteza inerente ao sistema propõe-se a reformulação estocástica do modelo, substituindo os parâmetros determinísticos por *variáveis aleatórias* representadas por suas *funções densidade de probabilidade* (PDFs), ajustadas a partir de séries históricas. Essa abordagem trata-se de uma análise probabilística estática, baseada em propriedades marginais das variáveis, sem recorrer a modelos de simulação dinâmica ou interações temporais complexas entre os parâmetros. Esse procedimento permite derivar não apenas uma estimativa média de capacidade, mas uma distribuição de probabilidade do volume executável, que pode ser usada para análise de risco e apoio à decisão.

O primeiro passo consiste na identificação das variáveis que exercem maior influência sobre a capacidade de execução e que apresentam, comprovadamente, variabilidade estatística significativa em sua série histórica. Entre elas, destacam-se: o tempo total de ciclo logístico do fluxo (C_f) e o peso útil médio por composição (P_f), ambas fortemente sujeitas a incertezas operacionais, climáticas e estruturais. Por outro lado, variáveis como a disponibilidade física da frota e o número efetivo de vagões alocados por fluxo serão tratadas nesta etapa como parâmetros determinísticos, com base em valores médios históricos ou planejados, assumidos como constantes no horizonte de análise. Essa decisão foi motivada pela menor variabilidade observada nessas variáveis, que demonstraram comportamento mais estável em comparação com as demais. No entanto, é importante ressaltar que a metodologia proposta é plenamente extensível para incorporar também essas

variáveis como aleatórias, caso se deseje realizar uma análise mais abrangente da incerteza. O tratamento de Φ_w e $N_{w,f}$ como variáveis com distribuição de probabilidade pode ser feito seguindo os mesmos procedimentos descritos nesta seção, sem exigir alterações estruturais no modelo. Assim, a abordagem estocástica aqui apresentada permanece geral e flexível, permitindo sua expansão conforme o nível de detalhamento requerido nas análises futuras.

As séries dados históricos dessas variáveis são então submetidas a uma etapa de tratamento estatístico, que inclui a remoção de outliers utilizando o método da distância interquartil (Interquartile Range – IQR), de forma a evitar distorções nos ajustes.

Em seguida, são aplicadas técnicas de ajuste de PDFs. São testadas distribuições paramétricas como Normal, Gama, Lognormal e Beta, bem como distribuições empíricas, sendo selecionada a função que apresenta melhor desempenho segundo os critérios de aderência estatística Kolmogorov-Smirnov, Anderson-Darling, AIC e BIC. O procedimento de ajustar uma distribuição teórica aos dados — em vez de trabalhar diretamente com as frequências empíricas — visa representar o processo estocástico subjacente de forma mais parcimoniosa e robusta. A PDF ajustada atua como uma função suavizada, que filtra o ruído amostral e torna a variável aleatória mais tratável do ponto de vista analítico. Além disso, permite generalizações, inferência estatística e integração com outras variáveis aleatórias por meio da convolução. Após o ajuste, cada variável determinística x é transformada em uma variável aleatória $\tilde{x}$, associada à sua respectiva função densidade $f_{\tilde{x}}(x)$.

A convolução é a operação matemática que permite combinar distribuições de variáveis aleatórias relacionadas por soma ou produto. Quando lidamos com variáveis aleatórias independentes, como no caso da decomposição do tempo de ciclo em parcelas operacionais, a soma de variáveis aleatórias exige a convolução das respectivas distribuições. Em termos gerais, No caso de variáveis discretas, como frequentemente ocorre com dados operacionais extraídos de séries históricas, a convolução é representada por:

$$(p_X * p_Y)(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} p_X(k) \cdot p_Y(n - k) \quad (4)$$

Neste estudo, adota-se a convolução discreta, adequada à natureza empírica dos dados analisados, e à estrutura dos histogramas derivados das séries históricas.

O tempo de ciclo logístico, em particular, é tratado com maior granularidade. Em vez de considerar o ciclo total como um único bloco, ele é decomposto nas oito parcelas operacionais $c_{f,1}$ a $c_{f,8}$, representando as diferentes etapas logísticas (formação, carregamento, trânsito, descarregamento, retorno, etc). Assim, a convolução do volume por fluxo é aplicada em duas etapas principais: primeiro, para compor o ciclo logístico total como a soma das oito parcelas operacionais; e, depois, para compor o volume. A modelagem do tempo de ciclo total é feita por:

$$\tilde{C}_f = \sum_{i=1}^8 \tilde{c}_{f,i} \quad (5)$$

onde cada parcela $\tilde{c}_{f,i} \sim \mathcal{D}_{c_i}(f)$ é modelada por uma distribuição individual. A distribuição $f_{\tilde{C}_f}(c)$ é obtida por convolução das distribuições das parcelas $\tilde{c}_{f,i}$, assumindo independência ou, se necessário, ajustando correlações empíricas

O volume executável de cada fluxo passa então a ser modelado como:

$$\tilde{V}_{w,f} = \frac{N_{w,f} \cdot \Phi_w \cdot T \cdot \tilde{P}_f}{\tilde{C}_f} \quad , \quad \tilde{P}_f \sim \mathcal{D}_P(f), \quad \tilde{C}_f \sim \mathcal{D}_C(f). \quad (6)$$

A função densidade de $\tilde{V}_{w,f}$, denotada $f_{\tilde{V}_{w,f}}(v)$, é obtida por propagação de incertezas a partir das distribuições de entrada. A partir das distribuições de volume por fluxo, calcula-se o volume total por frota w , sendo a PDF $f_{\tilde{V}_w}(v)$ derivada pela convolução das PDFs dos fluxos atendidos pela frota w :

$$\tilde{V}_w = \sum_{f \in \mathcal{F}_w} \tilde{V}_{w,f} \quad (7)$$

Finalmente, a capacidade total estocástica do sistema ferroviário é expressa como a soma das capacidades de todas as frotas:

$$\tilde{V}_{\text{total}} = \sum_{w \in \mathcal{W}} \tilde{V}_w \quad (8)$$

Essas composições de variáveis aleatórias implicam convoluções sucessivas de PDFs, tornando possível derivar a distribuição do volume total executável. A distribuição $f_{\tilde{V}_{\text{total}}}(v)$ resultante representa a função densidade do volume total executável do sistema. Essa distribuição será utilizada nas próximas etapas para a extração de métricas de risco, e para a análise de confiabilidade da capacidade em diferentes cenários operacionais. No entanto, a análise de risco não se restringe à PDF do volume total. A mesma abordagem pode ser aplicada às distribuições de volume por fluxo ($f_{\tilde{V}_{w,f}}(v)$), por frota ($f_{\tilde{V}_w}(v)$), ou ainda a qualquer agrupamento específico de fluxos, corredores ou clientes, conforme a necessidade da análise. Dessa forma, a extração de métricas de risco, como os percentis operacionais, pode ser realizada em qualquer nível de agregação que se revele relevante para a tomada de decisão, permitindo uma avaliação mais granular e personalizada da confiabilidade da capacidade operacional em diferentes cenários.

3.3. Avaliação de Risco Baseada na Distribuição de Volume

A etapa final da metodologia consiste na extração de métricas de risco a partir da distribuição de probabilidade do volume executável, previamente obtida por meio da composição estocástica das variáveis operacionais. Essa distribuição não representa apenas um valor esperado, mas um espectro de possíveis volumes, cada um com sua probabilidade associada. Com isso, é possível realizar uma análise de risco estatisticamente fundamentada, incorporando incertezas diretamente no processo de planejamento da capacidade logística.

Diferentemente de abordagens baseadas em valores determinísticos, a presente metodologia permite derivar, a partir da PDF do volume $\tilde{V}$, medidas de confiabilidade, como percentis operacionais e valores críticos associados a probabilidades mínimas de atendimento. Em vez de perguntar “qual será o volume transportado?”, pergunta-se, por exemplo “qual o volume que posso planejar com ao menos 80% de chance de execução?”. Essa mudança de perspectiva está na essência da análise de risco quantitativa.

A métrica central adotada neste estudo é o percentil de sobrevivência de ordem p , com destaque para o P80. Tal métrica é definida não como o ponto abaixo do qual estão 80% das observações, mas sim como o menor volume x_p tal que a probabilidade de executar um volume acima desse valor seja maior ou igual a p . Assim, utiliza-se a função de sobrevivência $\bar{F}_V(x)$, complementar à função de distribuição acumulada (CDF):

$$\bar{F}_V(x) = P(V > x) = 1 - F_V(x) \quad (9)$$

Assim, o percentil de risco P80 é obtido como:

$$x_{P80} = \inf \{x \in \mathbb{R} : \bar{F}_V(x) \leq 0,80\} \quad \text{ou, equivalentemente,} \quad F_V(x_{P80}) = 0,20 \quad (10)$$

Essa definição é consistente com a lógica de planejamento baseada em confiabilidade mínima: deseja-se garantir que, com pelo menos 80% de probabilidade, será possível entregar um volume superior ou igual a x_{P80} . A métrica x_{P80} representa, portanto, o maior volume planejável com risco de subexecução controlado.

A metodologia proposta é totalmente parametrizável, permitindo a adaptação da análise ao perfil de risco da organização. A escolha do percentil de referência pode ser ajustada conforme o grau de aversão ao risco ou os requisitos específicos do cenário operacional. Por exemplo, o uso do $P70$ está associado a uma estratégia mais agressiva, em que se assume um risco maior de subexecução em troca de um volume planejado mais elevado. Por outro lado, o $P90$ corresponde a uma abordagem conservadora, recomendada para situações críticas ou contratos com alto custo de falha, em que se busca garantir maior confiabilidade na entrega planejada. Dessa forma, a seleção do percentil passa a ser uma decisão gerencial, informada por critérios técnicos e estratégicos.

A decisão sobre qual percentil utilizar é eminentemente gerencial e depende do apetite ao risco, das consequências associadas ao não atendimento da meta e da criticidade do cenário operacional analisado.

Embora a função de sobrevivência seja aqui utilizada para extrair percentis associados a limites inferiores de confiabilidade, o conceito é análogo ao *Value at Risk* (VaR), amplamente utilizado no setor financeiro. O VaR de ordem α representa a perda máxima esperada com probabilidade $1 - \alpha$ em um dado horizonte de tempo. Aplicado ao contexto logístico ferroviário, o VaR se traduz no volume mínimo garantido com uma dada probabilidade. Formalmente, para uma variável aleatória contínua X que representa a perda, o VaR de ordem α é definido como:

$$VaR_{\alpha}(X) = \inf \{x \in \mathbb{R} : P(X \leq x) \geq \alpha\} \quad (11)$$

No contexto desse trabalho, em vez de perdas financeiras, estamos interessados na não execução do volume planejado. Portanto, a variável de interesse é o volume executado, e o VaR representa, nesse caso, o *volume mínimo garantido com uma probabilidade α* . Especificamente, o percentil $P80$ corresponde ao $VaR_{20\%}$ da variável volume, já que se define como o maior volume planejável cuja probabilidade de execução é superior a 80%:

$$VaR_{20\%}(V) = x_{P80} \quad \text{tal que} \quad P(V \leq x_{P80}) = 0,20 \quad (12)$$

Neste modelo, o VaR opera como um instrumento de quantificação de risco operacional, traduzindo incertezas estocásticas em valores críticos para suporte à decisão. Ele permite determinar limites seguros de volume a serem utilizados em contratos, projeções de capacidade ou dimensionamentos logísticos, com base em níveis explícitos de confiança.

Esse tipo de abordagem fornece uma base quantitativa para decisões de alocação de capacidade, definição de compromissos contratuais e avaliação de robustez operacional. A extração de percentis pode ser realizada não apenas sobre a PDF do volume total, mas também sobre distribuições parciais — por fluxo, por frota, por cliente ou por agrupamentos logísticos definidos. Essa flexibilidade permite adequar a análise ao nível de granularidade requerido e realizar comparações entre diferentes componentes da malha ferroviária ou alternativas de planejamento.

4. Aplicação da Metodologia no Planejamento Logístico da VLI

A metodologia proposta neste estudo, foi desenvolvida e aplicada no processo de planejamento logístico na VLI, empresa brasileira de logística integrada. Esta seção descreve o processo de implementação da abordagem estocástica de análise de capacidade na rotina de planejamento da empresa, detalhando os mecanismos técnicos da ferramenta, a interação com os usuários, os resultados obtidos e as perspectivas de evolução da aplicação.

A VLI — Valor da Logística Integrada — é uma operadora logística multimodal que atua em diversos segmentos, com destaque para o transporte ferroviário de commodities e produtos industriais. Com uma malha ferroviária extensa e operações complexas, a VLI enfrenta desafios significativos na gestão eficiente de sua capacidade. A metodologia de análise de risco aqui proposta foi incorporada aos seus processos regulares de planejamento em dois horizontes distintos: o planejamento mensal, que envolve a definição da capacidade operativa para o mês subsequente; e o planejamento anual, responsável por antecipar, com maior antecedência, a viabilidade de atendimento das demandas para o ano seguinte. Em ambos os casos, o objetivo é suportar a tomada de decisão com maior rigor estatístico e previsibilidade.

A aplicação da metodologia tem como principais objetivos aumentar a confiabilidade das projeções de capacidade, fornecer suporte quantitativo à tomada de decisão logística e, sobretudo, permitir a mensuração explícita do risco de subexecução dos volumes planejados. Ao transformar os parâmetros operacionais em distribuições de probabilidade e gerar curvas estocásticas de volume, a ferramenta fornece ao usuário final uma visão probabilística dos limites operacionais, permitindo ajustes proativos em função do perfil de risco da organização ou do contrato analisado.

4.1. Interação do Usuário com a Ferramenta

A aplicação da metodologia de análise de risco de execução de volumes na VLI foi operacionalizada por meio do desenvolvimento de uma ferramenta computacional em linguagem *Python*, com interface interativa baseada na biblioteca *Streamlit*, disponibilizada via ambiente web. O sistema foi concebido para ser utilizado diretamente por analistas de planejamento logístico, promovendo a aplicação prática dos conceitos estatísticos e estocásticos desenvolvidos neste estudo. A interação com o usuário é elemento central da arquitetura funcional da ferramenta, permitindo a personalização da análise com base em dados operacionais históricos, cenários projetados e decisões estratégicas específicas.

O primeiro passo do processo consiste no carregamento dos principais insumos de entrada, que incluem: (i) a definição dos fluxos logísticos que serão analisados, (ii) a escolha dos grupos de frota ferroviária que atenderão a esses fluxos, e (iii) a inserção da disponibilidade planejada de ativos, como vagões e locomotivas, por mês de operação. Além disso, o usuário pode incluir informações relativas às previsões de demanda por fluxo e volumes pretendidos de aceite, fundamentais para a análise comparativa entre capacidade disponível e necessidade projetada. A seleção dos dados históricos utilizados como base para ajuste das distribuições é realizada de maneira parametrizável, permitindo, por exemplo, a exclusão de outliers, a escolha do período amostral e a aplicação de filtros operacionais.

Essas configurações são realizadas na tela inicial da ferramenta, ilustrada na Figura 1. Nela, o usuário define se a análise será conduzida em horizonte mensal ou anual, qual percentual de risco será adotado como referência (por exemplo, P70, P80 ou P90), e qual volume máximo deverá ser considerado no cenário de planejamento.

Uma das principais funcionalidades da ferramenta consiste na possibilidade de visualização e edição das distribuições de probabilidade associadas às premissas operacionais do modelo. Na ferramenta o usuário tem acesso às PDFs geradas com base em séries históricas, para variáveis como tempo de trânsito, tempo em pátio, peso médio útil por vagão, entre outras. Além de visualizar os histogramas e curvas PDFs, é possível editar os parâmetros das distribuições, permitindo a simulação de melhorias futuras (por exemplo, redução de tempo de ciclo ou aumento de peso médio). A Figura 2 apresenta a comparação entre a distribuição histórica observada e uma curva PDF ajustada pelo usuário com premissas otimizadas.

Finalizada a etapa de parametrização, o sistema gera automaticamente as distribuições de volume executável por fluxo, por frota, por agrupamento logístico (como corredores), e para o

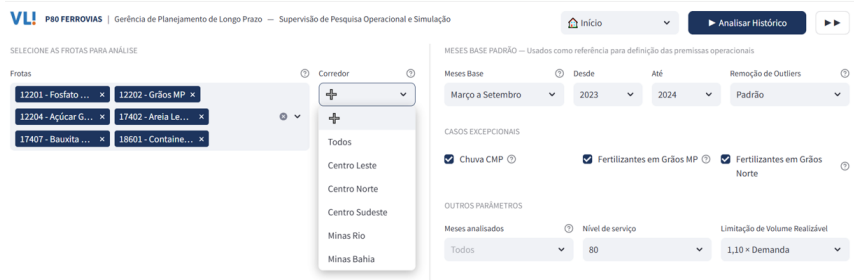


Figura 1: Tela inicial da ferramenta: seleção de fluxos, frota, período base e parâmetros de análise de risco.

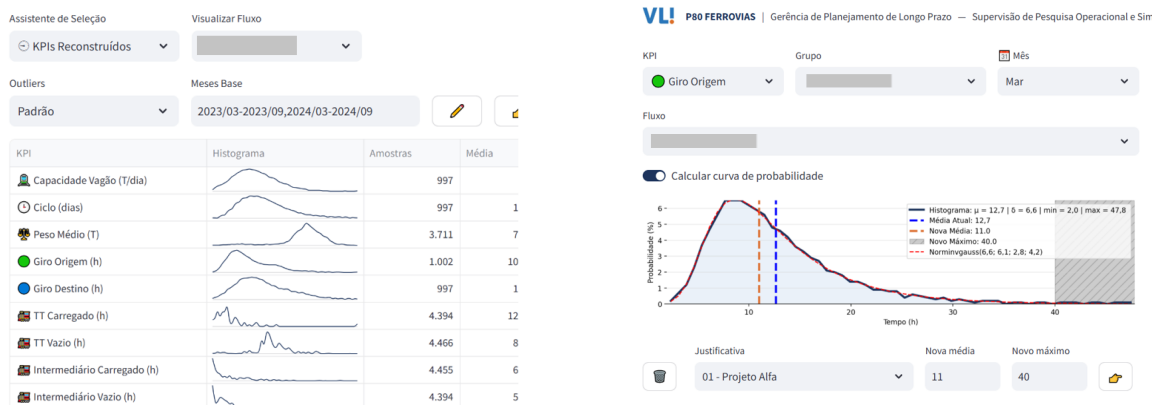


Figura 2: Distribuições de probabilidade por premissa: à esquerda, curvas empíricas históricas; à direita, curva PDF ajustada pelo usuário da com premissas de melhoria da variável.

sistema como um todo. A análise de risco é conduzida sobre essas PDFs, possibilitando a extração de percentis como $P70$, $P80$, $P90$, conforme definido pelo usuário. Também é possível inserir um volume-alvo fixo e obter a probabilidade de execução associada, funcionalidade crítica para avaliar a viabilidade de planos operacionais e compromissos contratuais.

Os resultados podem ser exportados diretamente para formatos de *Excel* e *PowerPoint*, possibilitando integração com demais processos corporativos. A Figura 3 apresenta a estratificação mensal do volume sob risco por grupo de frota, ao longo do horizonte anual. Para fins de confidencialidade dos dados da VLI, os valores de volume foram substituídos por marcadores neutros, conforme prática de proteção de informações estratégicas.

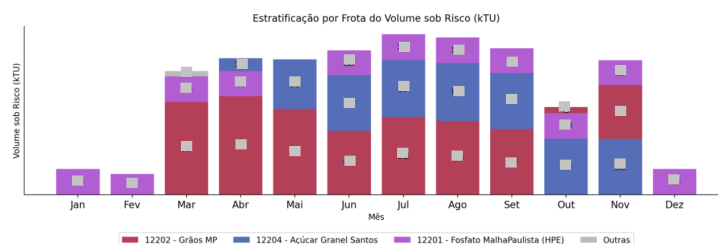


Figura 3: Estratificação mensal do volume sob risco por grupo de frota. Valores de volume foram ocultados por questões de confidencialidade.

Do ponto de vista estatístico, a Figura 3 permite observar a contribuição relativa de

cada frota ao volume sob risco em cada mês do horizonte anual. Esse tipo de análise possibilita identificar gargalos localizados, períodos de maior exposição operacional, e oportunidades para redistribuição de capacidade entre frotas. A visualização empilhada por cor segmenta as demandas por produto, enquanto os marcadores ocultam seletivamente os volumes exatos, sem comprometer a interpretação qualitativa da distribuição de risco.

A Figura 4 apresenta a distribuição de probabilidade do volume anual total da VLI. A curva de sobrevivência (em vermelho) descreve a probabilidade acumulada de execução de cada volume, enquanto as colunas coloridas representam a densidade da distribuição, codificadas em zonas de confiabilidade: verde (alta), amarelo (intermediária) e vermelho (baixa). A linha tracejada vermelha marca o volume do percentil P80, com pelo menos 80% de chance de execução, enquanto a linha azul representa o volume-alvo, com apenas 36,5% de probabilidade, evidenciando o risco entre meta e capacidade estatística. Essa representação gráfica quantifica o risco de subexecução, sendo útil para decisões baseadas em métricas de confiabilidade, e a omissão de valores absolutos se justifica pela proteção de dados.

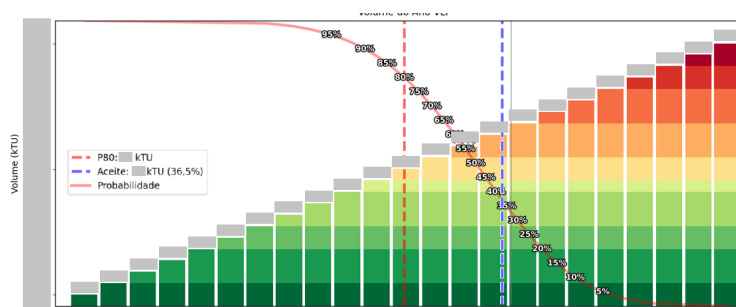


Figura 4: Análise de risco do volume anual planejado da VLI.

A capacidade de interação, edição, simulação e exportação de resultados faz da ferramenta um instrumento robusto de apoio à decisão, conectando fundamentos estatísticos e técnicas de modelagem estocástica com as exigências práticas do planejamento ferroviário da VLI.

5. Conclusão

Este trabalho propôs uma metodologia estatística para análise de risco no planejamento ferroviário sob incertezas operacionais, com foco na execução de volumes planejados. A abordagem combina a estrutura clássica de dimensionamento logístico com modelagem estocástica, substituindo parâmetros determinísticos por variáveis aleatórias ajustadas a dados históricos. Por meio da convolução discreta dessas distribuições, são derivadas funções densidade de probabilidade do volume executável, viabilizando a quantificação da confiabilidade operacional em múltiplos níveis.

A métrica central adotada, o percentil P80, mostrou-se eficaz para suportar decisões em contextos incertos, permitindo identificar o maior volume cuja chance de execução seja estatisticamente aceitável. A metodologia foi aplicada na VLI, integrando-se aos planejamentos mensal e anual da empresa por meio de uma ferramenta computacional interativa. A aplicação prática demonstrou o valor da metodologia como apoio à decisão, facilitando simulações, ajustes de premissas, comparação de cenários e exportação de resultados.

A proposta destaca-se pela leveza computacional e flexibilidade analítica, oferecendo uma alternativa eficiente a modelos pesados de simulação dinâmica. A ferramenta permite ao usuário editar distribuições, simular melhorias operacionais e incorporar visões prospectivas, viabilizando não apenas análises de risco, mas também projeções de impacto estratégico para novos projetos e negócios. Como limitações, destaca-se a dependência de históricos representativos e a necessidade de suposições sobre independência entre variáveis.

Como desenvolvimentos futuros, propõe-se integrar esta abordagem a outras análises de capacidade, como a de locomotivas, portos e terminais, via permanente, permitindo uma avaliação conjunta e probabilística da capacidade logística total. A generalização do modelo para múltiplos elos da cadeia de transporte ampliaria sua utilidade como instrumento de planejamento integrado e gestão de riscos em ambientes logísticos complexos.

Referências

- Barros, J. M. F. M. (2013). Avaliação comparativa de métodos de cálculo de capacidade de tráfego ferroviário. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Bojovic, N., Boskovic, B., Milenkovic, M., e Sunjic, A. (2010). A two-level approach to the problem of rail freight car fleet composition. *Transport*, 25(2):186–192.
- Faria, C. H. F. d., Almeida, J. F. F., e Pinto, L. R. (2024). Simulation–optimisation approach for sustainable planning of intermodal logistics in the brazilian grain export industry. *Decision Analytics Journal*, 10:100388.
- Gołebowski, M., Góra, M., e Bolzhelarskyi, R. (2023). Risk assessment in railway rolling stock planning. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 25(1):33–42.
- Guiffrida, A. L., Jaber, M. Y., e Karns, L. A. (2007). A convolution algorithm for evaluating supply chain delivery performance. *International Journal of Production Economics*, 110(1–2):44–54.
- Hungerlander, P. e Steininger, S. (2018). Fleet sizing and empty freight car allocation. In Springer, editor, *Operations Research Proceedings 2018*, p. 285–290.
- Lai, Y.-C. e Chen, Y.-J. (2017). Evaluating service risk in railway capacity utilization using expected recovery time. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 7(4):217–232.
- Li, Y. e Li, R. (2008). Simulation and optimization of the power station coal-fired logistics system based on witness simulation software. In *2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System*, p. 394–398, Guangzhou, China. IEEE.
- Marinov, M. e Viegas, J. (2011). A mesoscopic simulation modelling methodology for analyzing and evaluating freight train operations in a rail network. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1):516–539.
- Mukherjee, D. (2011). Application of convolution in individual risk model with non-i.i.d. data. *Institute of Actuaries of India*.
- Silva, G., Guedes, L., Emery, L., Lisboa, A., Vieira, D., Saldanha, R., e Daniell, A. (2017). Minimização do custo e do risco de déficit no planejamento da matriz elétrica. Master's thesis, Ciudad del Este, Paraguai. Apresentado no XVII ERIAC – Desenvolvimento de sistemas elétricos e economia.
- Tan, A., Bowden, R., e Zhang, Y. (2004). Virtual simulation of statewide intermodal freight traffic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1873(1):53–63.
- Weik, N. (2020). *Long-Term Capacity Planning of Railway Infrastructure – A Stochastic Approach Capturing Infrastructure Unavailability*. PhD thesis, ETH Zurich.
- Yaghini, M. e Khandaghabadi, Z. (2012). A hybrid metaheuristic algorithm for dynamic rail car fleet sizing problem. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6):4127–4138.