



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA
13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA (3)

APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO NA AVALIAÇÃO DE RISCOS DE
PRAZO EM PROJETOS METROFERROVIÁRIOS



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

INTRODUÇÃO

Projetos metroferroviários estão entre os empreendimentos de infraestrutura mais complexos da engenharia. São projetos multidisciplinares e de elevado nível técnico, envolvendo diferentes tipos de recursos, podendo ser influenciados por fatores operacionais, regulatórios, ambientais e, inclusive, políticos.

São projetos lineares que, ao longo de toda a malha prevista, atravessam diversas regiões, utilizando áreas de diferentes municípios, com aspectos ambientais, geotécnicos e socioeconômicos distintos, que impactam diretamente na execução do empreendimento.

Considerando projetos desta magnitude e particularidade, o processo de planejamento acaba por segmentar entregáveis, de forma a limitar e especificar os fatores que influenciam cada trecho, padronizando, assim, o entendimento dos aspectos de cada parte do projeto em questão. Esta divisão visa agrupar segmentos e entregas que apresentem condições semelhantes, garantindo maior uniformidade e facilitando o processo de planejamento executivo.

Na etapa de planejamento, toda a execução é traduzida em tarefas em um cronograma, no qual são definidas produtividades específicas, bem como estimadas as durações das atividades de acordo com as particularidades de cada trecho analisado. O gerenciamento de cronograma é uma das ferramentas fundamentais para o gerenciamento de projeto como um



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

todo, sendo capaz de antecipar riscos de prazo e permitir a visão do Caminho Crítico¹ do projeto, que por si só já possibilita o correto gerenciamento na maior parte dos projetos de engenharia.

Em megaprojetos² influenciados por diferentes fatores, internos e externos, e que normalmente possuem horizonte de implantação superiores a cinco anos, a abordagem determinística representa apenas um cenário possível de execução, assumindo premissas fixas para a duração de atividades, disponibilidade de recursos e demais condicionantes do empreendimento.

Embora essas premissas sejam fundamentadas em dados históricos, índices de produtividade, restrições de recursos e análises detalhadas de risco, permanecem incertezas inerentes ao processo construtivo que podem alterar significativamente o desempenho do cronograma, seja antecipando ou postergando a conclusão das atividades.

Nesse contexto, a Simulação de Monte Carlo surge como uma abordagem complementar ao planejamento tradicional de projetos, promovendo uma análise probabilística do cronograma, incorporando incertezas e variabilidade das durações das tarefas a serem executadas. A metodologia avalia um número elevado de cenários por meio de distribuições de

¹ O Caminho Crítico (Critical Path Method – CPM) é uma técnica de análise de projetos que visa identificar a sequência de atividades que determina a menor duração possível do projeto e que, caso atrasadas, impactam diretamente na entrega final do cronograma (KELLEY JR.; WALKER, 1959).

² Megaprojetos são empreendimentos de grande escala, caracterizados por elevados investimentos, elevada complexidade técnica e organizacional, múltiplas partes interessadas e impactos econômicos e sociais significativos, demandando longos períodos de planejamento e implantação (FLYVBJERG, 2014; PRIEMUS; FLYVBJERG; VAN WEE, 2008).



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

probabilidade, possibilitando uma análise mais realista dos marcos de projeto e ampliando a capacidade de avaliação e antecipação de riscos de prazo. A simulação de Monte Carlo possibilita, inclusive, identificar atividades potencialmente críticas e sensíveis que, embora não estejam identificadas no Caminho Crítico, apresentam elevada sensibilidade para influenciar o prazo global do empreendimento.

Este artigo apresenta a aplicação prática da Simulação de Monte Carlo na avaliação de riscos e oportunidades de prazo do projeto do Trem Intercidades (TIC), empreendimento metroferroviário com prazo de implantação aproximado de sete anos e composto por mais de 20 mil atividades, abrangendo desde o desenvolvimento dos projetos executivos até o comissionamento final e o início da operação comercial. O objetivo é demonstrar como a utilização de um modelo probabilístico pode aumentar a confiabilidade das previsões de prazo, apoiar a tomada de decisão e contribuir para a definição de estratégias de mitigação de riscos em projetos de infraestrutura de grande porte.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO

A Simulação de Monte Carlo é um método probabilístico utilizado para estimar resultados de um processo ou problema influenciado por eventos e variáveis que não podem ser definidos com precisão. Baseia-se na avaliação de múltiplos cenários randômicos, cujo resultado apresenta uma distribuição de probabilidades do referido processo, considerando todas as incertezas existentes dentro do escopo.

Foi desenvolvida na década de 1940 durante o Projeto Manhattan, programa norte-americano que visava a pesquisa e construção das primeiras armas nucleares. O matemático Stanislaw Ulam, ao estudar problemas relacionados à difusão de nêutrons, percebeu que as variáveis envolvidas no processo eram extremamente complexas e era impossível de serem resolvidas por métodos analíticos convencionais.

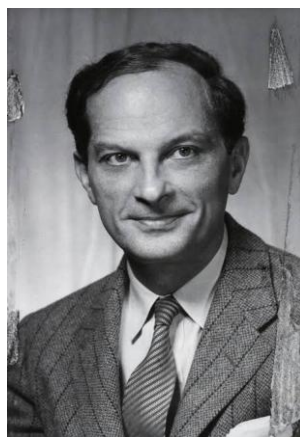


Figura 1 - Stanislaw Ulam.

Inspirado pela análise de probabilidades em jogos de cartas, Ulam propôs a avaliação de um grande número de experimentos aleatórios (METROPOLIS; ULAM, 1949), alterando os valores de cada uma das variáveis (dentro de um parâmetro pré-estabelecido) em cada experimento.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Desta forma, entendeu que poderia estimar o processo estudado com base nos resultados de cada um dos experimentos. Posteriormente, em colaboração com John von Neumann e Nicholas Metropolis, o método foi formalizado e recebeu o nome de "Monte Carlo", em referência ao cassino localizado em Mônaco, um dos cassinos mais conhecidos até então.

Desde então, a Simulação de Monte Carlo se tornou uma das principais técnicas de modelagem de incertezas e análise de riscos, sendo amplamente empregada em áreas como física, finanças, economia, engenharia e gerenciamento de projetos, sendo principalmente utilizada em ambientes onde há um elevado número de incertezas e as análises remontam a cenários de longo prazo.

No contexto da gestão de projetos, a técnica permite incorporar as incertezas associadas às estimativas de prazo e custo, gerando distribuições probabilísticas que auxiliam na avaliação da probabilidade de cumprimento de prazos e no suporte à tomada de decisão. Em projetos de infraestrutura, caracterizados por elevado grau de complexidade e grande quantidade de variáveis interdependentes, a aplicação do método tem se mostrado particularmente relevante para a análise quantitativa de riscos em cronogramas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

PROJETO TIC

O Trem Intercidades (TIC) – Eixo Norte é um projeto ferroviário de passageiros do Governo do Estado de São Paulo para conectar a capital paulista ao município de Campinas, com uma parada no município de Jundiaí. É o projeto de implantação do primeiro trem de média velocidade (que pode chegar até 140km/h) do Brasil, tendo uma extensão total de 101 km, percorridos em até 64 minutos e com previsão de início de operação em 2031.



Figura 2 – Trem TIC. Fonte: TIC

O empreendimento faz parte do escopo da Concessão da TIC Trens, empresa privada responsável pela modernização, operação e manutenção da Linha 7 – Rubi do Trem Metropolitano de São Paulo, além da implantação do TIC e do TIM – Trem Intermunicipal.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 3 - Mapa da Concessão. Fonte: TIC

De acordo com a Agência de Transportes do Estado de São Paulo – ARTESP, a concessão da TIC Trens prevê um investimento de R\$ 13,48 bilhões e pode beneficiar mais de 15 milhões de pessoas ao longo dos 30 anos de concessão previstos contratualmente (SÃO PAULO, [s.d.]).

O TIC passará por 11 municípios, aproveitando e modernizando parte da infraestrutura existente de ferrovias, que remonta do início do século XX, mas mantendo o aspecto histórico da linha.

É um projeto altamente complexo e inovador, com um grande número de stakeholders envolvidos, elevada quantidade de interferências e compatibilizações com a infraestrutura existente, promovendo a modernização da rede ferroviária, mas garantindo o aspecto histórico da linha. É um empreendimento de grande extensão e com prazo comprimido, sendo necessário um nível de planejamento muito acima dos utilizados usualmente em projetos de engenharia.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

DIAGNÓSTICO

Conforme citado anteriormente, o projeto TIC é um projeto altamente complexo e de elevado nível técnico, envolvendo a necessidade de compatibilização de diferentes disciplinas e a gestão de múltiplos stakeholders.

Para garantir um maior controle e maior assertividade no planejamento da implantação, o projeto foi segmentado em 3 (três) grandes trechos, sendo eles:

1. Trecho I – Implantação do TIC e modernização da Linha 7 entre Barra Funda e Francisco Morato;
2. Trecho II - Implantação do TIC e modernização da Linha 7 entre Francisco Morato e Jundiaí;
3. Trecho III – Implantação do TIC e TIM e revitalização da Linha de Carga entre Jundiaí e Campinas.

Cada um dos trechos supracitados possui características, níveis de complexidade, riscos e interferências distintos, que foram consideradas durante nos cálculos do planejamento de intervenções a serem realizadas

Para os Trechos I e II, os principais aspectos, riscos e premissas existentes são:

- Necessidade de modernização da Linha 7 – Rubi com interferência mínima à circulação de trens e operação do serviço existente, garantindo a integridade do serviço prestado pela TIC ao longo das intervenções;



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA **13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS**

- Compatibilização do projeto com as obras e intervenções previstas pelo Operador de Carga em uma faixa de domínio restrita;
- Elevado número de invasões à faixa de domínio da Concessionária, sendo necessário a instauração de processos de reassentamento e desocupação;
- Execução de obras em espaço confinado e muito próximas à linhas operacionais existentes;
- Necessidade de compatibilização do projeto e execução com projetos futuros do Governo do Estado de São Paulo;
- Utilização de sistemas e tecnologias inovadoras, até então não utilizadas em terreno brasileiro;
- Grande número de interferências ao longo de todo o trecho (redes de esgoto, energia, telefonia e internet);
- Condições inadequadas da infraestrutura hídrica municipal, promovendo riscos de alagamento, interrupções e paralisações ao longo da intervenção e;
- Obras em Patrimônio Histórico tombado.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 4 – Pátio Lapa, construído em 1906. Fonte: Arquivo Municipal

O Trecho III atualmente não possui operação comercial de trens, contudo é influenciado por riscos e fatores específicos, que também podem comprometer o planejamento previsto:

- Implantação da ferrovia em um trecho não operacional, sem manutenção e com características claras e abandono;
- Necessidade de compatibilizar o projeto com a operação da Via de Carga, garantindo a continuidade dos serviços da Operadora e não impactando na circulação de trens;
- Alto número de edificações históricas ao longo de todo o trecho, aumentando a complexidade do projeto considerando todas as restrições existentes para Patrimônios Históricos;
- Invasões e ocupações irregulares ao longo de toda a via, gerando um volume relevante de reassentamentos e desapropriações e;
- Condições desconhecidas de solo e da infraestrutura existente.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS



Figura 5 – Estação tombada de Jundiaí. Fonte: TIC

Além dos aspectos singulares de cada Trecho, o projeto TIC possui particularidades que também afetam a produtividade geral em todos os locais, considerando:

- Necessidade de aprovação de múltiplos órgãos, prefeituras, entidades e até empresas privadas para execução das obras;
- Prazo comprimido para execução das intervenções e início da operação de ambos os serviços;
- Interoperabilidade do sistema e necessidade de execução de obras muito próximas às vias operacionais;
- Baixo número de empresas especializadas nos escopos de implantação, principalmente relacionadas à implantação dos sistemas de operação;
- Execução de obras ao ar livre, com exposição à fatores climáticos;



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

- Necessidade de importação de um elevado número de equipamentos, dispositivos e veículos, que atualmente não possuem fabricação no Brasil;
- Execução simultânea das obras do TIC, TIM e da modernização da Linha 7, aumentando substancialmente a complexidade do acompanhamento de obras e o número de empresas envolvidas.

Durante o processo de planejamento, todos os aspectos e fatores supracitados foram levados em consideração para cálculos de produtividade, duração e para geração da cadeia de atividades, resultando em um cronograma de mais de 20 mil linhas para todo o Projeto, considerando as etapas de pré-construção e construção. Para cada atividade do cronograma foram consideradas produtividades e durações específicas, definidas de acordo com a natureza da atividade, dados históricos e informações técnicas disponíveis.

Em atividades relacionadas a órgãos públicos, protocolos e aprovações, por exemplo, foram considerados os prazos oficiais publicados no contrato de concessão, normas, leis ou disponíveis nos canais de comunicação da referida entidade, e eventualmente considerados períodos de correção da informação, caso necessário.

Em atividades de construção e implantação de sistemas (terraaplenagem, drenagens, contenções, superestrutura etc.), a produtividade foi baseada, principalmente, nas restrições operacionais existentes no trecho, partindo da premissa de não interferir nas operações da Linha 7 e da Operadora de Carga.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Cada grupo de tarefas do cronograma foi meticulosamente analisado, estudando possíveis oportunidades de redução de prazo e eventual necessidade de paralelização de atividades de forma a garantir a entrega do empreendimento no prazo estipulado contratualmente.

Todo o processo de planejamento durou aproximadamente 24 meses e foram utilizadas todas as informações mais atualizadas disponíveis até o momento, o que contribuiu para o desenvolvimento do cronograma detalhado, garantindo maior assertividade com relação aos prazos de duração de cada uma das atividades.

Contudo, por ser um projeto de implantação inovador, com diferentes restrições e ausência de informação detalhada em alguns temas e, além de possuir um horizonte de implantação de médio e longo prazo (5 anos), todos os fatores estudados durante o planejamento podem ser alterados, evoluídos ou até mitigados ao longo da fase de implantação, gerando um volume de incertezas e variabilidade no cronograma pactuado.

Adicionalmente, todas as restrições operacionais consideradas durante o planejamento foram calculadas a partir de premissas que podem ser modificadas em função das necessidades da implantação ou da própria operação ferroviária, afetando diretamente os prazos previstos em cronograma.

Além dos riscos identificáveis, o projeto está exposto à variabilidade natural dos processos construtivos, podendo ocorrer desvios de produtividade, alterações de escopo, mudanças regulatórias e eventos externos que não podem ser previstos integralmente durante a etapa de planejamento.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Todas essas possíveis variações justificam a utilização da Simulação de Monte Carlo na avaliação do cronograma, uma vez que a metodologia permite incorporar o impacto das incertezas e da variabilidade das premissas adotadas, refletindo seus efeitos sobre a produtividade e o desempenho do projeto. Em complemento ao cronograma detalhado, a abordagem probabilística possibilita não apenas a identificação do Caminho Crítico, mas também de atividades potencialmente sensíveis que podem afetar direta ou indiretamente o prazo de entrega do empreendimento.



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para a realização da Simulação de Monte Carlo, o cronograma foi dividido em grupos de tarefas, considerando a similaridade dos fatores que influenciam cada uma delas. Foram criados 138 grupos de atividades, que compreendem tarefas que são relacionadas desde as etapas de projetos, suprimentos e documentação, até as tarefas finais de comissionamento e início da operação.

Tabela 1 – Exemplo de premissas de variação por grupo de tarefas. Fonte: TIC

ID	Fase	Grupo	Subgrupo	Descrição	Min	MP	Max
83	Construção	Civil	Etapas Preliminares 1	Mobilização / Construção Canteiro	-5%	0%	5%
84	Construção	Civil	Etapas Preliminares 2	Remanejamento de Interferências	-5%	0%	15%
85	Construção	Civil	Trecho I - Implantação 1	Execução de OACs	-15%	0%	5%
86	Construção	Civil	Trecho I - Implantação 2	Serviços de Terraplenagem	-15%	0%	5%
87	Construção	Civil	Trecho II - Implantação 1	Execução de OACs	-10%	0%	10%
88	Construção	Civil	Trecho II - Implantação 2	Serviços de Terraplenagem	-10%	0%	10%
89	Construção	Civil	Trecho III - Implantação 1	Execução de OACs	-5%	0%	15%
90	Construção	Civil	Trecho III - Implantação 2	Serviços de Terraplenagem	-5%	0%	15%
91	Construção	Civil	Trecho I - Implantação 3	Vedação de Faixa	-5%	0%	5%
92	Construção	Civil	Trecho II - Implantação 3	Vedação de Faixa	-5%	0%	5%
93	Construção	Civil	Trecho III - Implantação 3	Vedação de Faixa	0%	5%	10%
94	Construção	Civil	Trecho I - Implantação 4	Execução de VPM	-15%	-5%	10%
95	Construção	Civil	Trecho II - Implantação 4	Execução de VPM	-10%	0%	10%
96	Construção	Civil	Trecho III - Implantação 4	Execução de VPM	0%	5%	10%

Os agrupamentos foram realizados de acordo com as premissas utilizadas na consolidação do cronograma, levando em consideração as produtividades planejadas, eventuais folgas de cronograma e outros itens pertinentes para análise.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Nos Trechos I e II, por exemplo, já foi prevista a produtividade reduzida das tarefas devido às restrições operacionais. Por isso, ao se analisar as premissas para esse segmento, estas tendem a reduzir o prazo ao invés de aumentar levando em conta possíveis oportunidades de aceleração de obras.

O contrário ocorre nas tarefas relacionadas à implantação de Sistemas. Uma vez que esta atividade possui um risco elevado em relação à operação de trens, ou seja, qualquer falha no processo de migração impacta diretamente o serviço prestado, a tendência de variação de prazo aumenta, dificultando assim, a finalização das atividades conforme previsto.

Em tarefas relacionadas a execução de projetos, foram utilizados cálculos com base na produtividade das subcontratadas e na complexidade do projeto a ser desenvolvido. Desta forma, foram utilizados dados reais como parâmetros, garantindo maior assertividade nas eventuais variações previstas.

Tabela 2 – Exemplo de variações no desenvolvimento de projetos. Fonte: TIC

Empresa	Classe	Min	Max
Projetista A	Civil	0%	54%
Projetista B	Civil	0%	69%
Projetista C	Civil	0%	65%
Outras Empresas	Sistemas	-15%	45%

Além disso, em algumas atividades específicas foram utilizadas premissas de variação individuais, calculadas por percentual ou valores absolutos. Atividades de obtenção de licenças ambientais, certificações de projeto, correções de projeto e outros documentos



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

foram calculadas individualmente, levando em consideração fatores que afetam aquela tarefa em específico.

Desta forma, todas as atividades foram relacionadas a algum grupo ou variação específica, e essa variação foi utilizada para a realização da simulação.

Tabela 3 – Exemplo de premissas de variação de tarefas específicas. Fonte: TIC

Descrição da Tarefa	Tipo	Min	Méd	Max
Correções de projeto conforme solicitação do AI	Absoluto	0	15	15
Obtenção de Linçças Ambientais	Absoluto	120	210	280

Após a determinação das premissas de variação para todas as tarefas contidas dentro do cronograma de implantação do Projeto, foi realizada a Simulação de Monte Carlo.

A simulação foi realizada através do cálculo de 1.000 iterações (repetições) do cronograma recalculado aleatoriamente as durações de cada uma das mais de 20.000 tarefas em cada repetição, de maneira independente, respeitando as relações de precedência estabelecidas no cronograma.

Para a geração dos valores aleatórios das durações das atividades, foi utilizada a distribuição triangular, em razão da indisponibilidade de dados históricos suficientes para o ajuste de distribuições estatísticas mais robustas, como as distribuições normal ou beta. A distribuição triangular é amplamente utilizada em análises de risco de cronograma por demandar apenas três parâmetros de entrada — valor mínimo, valor mais provável e valor máximo —, permitindo representar de forma adequada a incerteza associada às atividades mesmo em cenários com informações limitadas.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

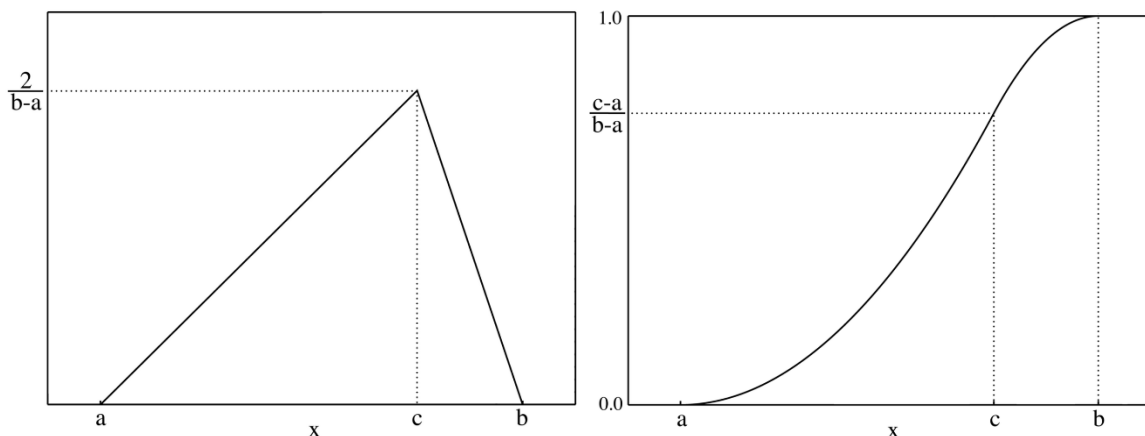
ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Além disso, a distribuição triangular apresenta maior concentração de probabilidade em torno do valor mais provável, que representa a duração prevista em cronograma e que foi previamente analisada e definida pela equipe de planejamento, tornando-a adequada para a avaliação probabilística do empreendimento e similar ao método PERT³, comumente utilizado para análise de variação do Caminho Crítico.

Na distribuição triangular, uma variável aleatória x pode ser calculada pela seguinte função:

Figura 6 - Características da Distribuição Triangular



$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 \times (x - a)}{(b - a) \times (c - a)}, & a \leq x \leq c \\ \frac{2 \times (c - x)}{(c - b) \times (c - a)}, & b \leq x \leq c \end{cases}$$

Relacionado os valores da distribuição triangular com a aplicação prática do cronograma, tem-se:

³ A Técnica de Avaliação e Revisão de Programas (Program Evaluation and Review Technique – PERT) é um método de planejamento e análise de cronogramas que incorpora a incerteza das durações das atividades por meio de estimativas probabilísticas, utilizando, tradicionalmente, os cenários otimista, mais provável e pessimista para estimar a duração esperada do projeto (MALCOLM et al., 1959)



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

$$x = \begin{cases} d_{\min} + \sqrt{R * (d_{\text{méd}} - d_{\min}) * (d_{\max} - d_{\min})}, & \text{se } 0 \leq R \leq \frac{d_{\text{méd}} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \\ d_{\max} - \sqrt{(1 - R) * (d_{\max} - d_{\text{méd}}) * (d_{\max} - d_{\min})}, & \text{se } \frac{d_{\text{méd}} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \leq R \leq 1 \end{cases}$$

Onde:

R = número aleatório, entre 0 e 1, gerado automaticamente e;

d_x = Duração (mínima, média ou máxima) de determinada atividade.

Exemplificando o uso da distribuição, para cada tarefa foi realizada uma simulação aleatória de durações com base nos máximos e mínimos previstos, obtendo a duração estimada para aquela iteração específica, conforme Tabela 4, apresentada abaixo.

Tabela 4 – Exemplo de premissas de variação de tarefas específicas. Fonte: TIC

Iteração	Descrição da Tarefa	Duração Real	Duração Mínima (Real x Pmin)	Duração Máxima (Real x Pmax)	Aleatório	Duração Estimada (Monte Carlo)
1	Execução de terraplenagem do km 70+000 ao km 70+300	30 dias	28,5 dias	34,5 dias	0,41	30,5 dias
2					0,46	30,7 dias
3					0,05	29,1 dias
4					0,21	29,9 dias
.					0,90	32,9 dias
.						
n					0,23	29,9 dias

Em cada uma das iterações de cada uma das tarefas, o valor da duração estimada das tarefas foi passado de acordo com os parâmetros de precedência existentes, de forma a simular eventuais impactos e desvios de prazo, positivos ou negativos.

Após a realização das 1.000 iterações, foi possível analisar, de maneira probabilística, os principais marcos de entrega para cada um dos empreendimentos existentes e, principalmente, para o início da operação do TIC.



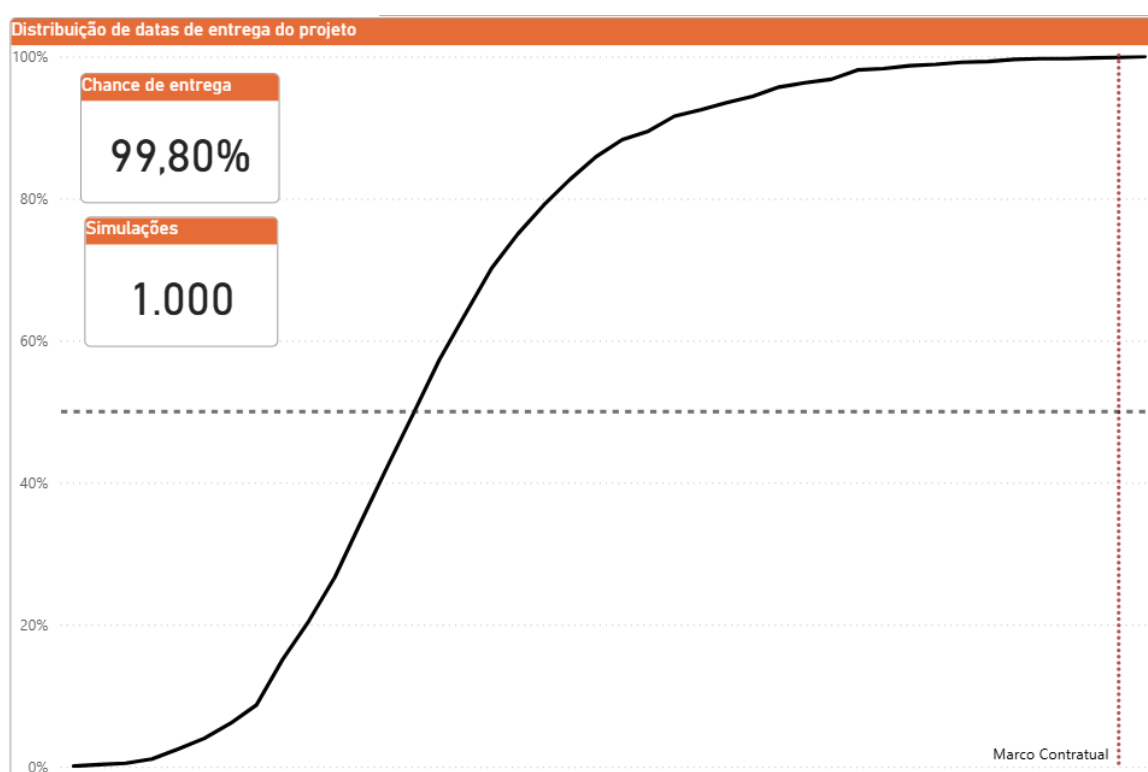
Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários

ANP
TRILHOS
TIC TRENS

32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

Os resultados da simulação demonstram que a chance de entrega do TIC é de 99,80%, conforme Figura 7 apresentada abaixo, ou seja, com as informações disponíveis no momento da análise, a tendência é que a entrega do projeto TIC em 2031 possa ser antecipada.

Figura 7 - Distribuição de Probabilidades de entrega do projeto TIC. Fonte: TIC



Além disso, após a finalização da Simulação de Monte Carlo, foi possível identificar caminhos potencialmente críticos que, se não gerenciados, podem influenciar diretamente na entrega do projeto e, inclusive, ocasionar no atraso da entrega do projeto.

Para cada um desses caminhos e atividades, foram estruturados planos de ação para mitigação de eventuais atrasos, a fim de garantir o atendimento aos prazos pré-estabelecidos.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CONCLUSÕES

A aplicação da Simulação de Monte Carlo no cronograma de implantação do TIC permitiu à Concessionária a visualização dos possíveis impactos gerados por incertezas de projeto, com foco nos eventos previamente conhecidos, mas de difícil dimensionamento.

Embora a simulação tenha resultado na provável entrega do projeto na data marco prevista contratualmente, a utilização do modelo permitiu o mapeamento de atividades intermediárias com potencial risco de atraso, viabilizando o desenvolvimento de ações preventivas antes do início das frentes, aumentando a probabilidade do atendimento aos prazos contratuais estabelecidos e aos marcos intermediários do empreendimento.

Vale ressaltar que a Simulação de Monte Carlo foi utilizada com base em parâmetros subjetivos e calculados através de referências históricas de projetos similares e conhecimento técnico das equipes envolvidas no projeto e que, por ser um projeto com duração estimada de 5 anos, diferentes variáveis não conhecidas até o momento podem ser identificadas durante a execução.

É necessário reforçar que, riscos com probabilidade muito baixa, como a identificação de sítios arqueológicos, por exemplo, geram pouco ou nenhum impacto na simulação visto que a chance de materialização é mínima em relação às atividades do cronograma e acabam sendo



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

expurgadas, consideradas como *outliers*⁴ ou riscos de cauda⁵ de projeto. Contudo, na eventual materialização de eventos do tipo, há um aumento relevante no risco de atraso na entrega do empreendimento.

É importante mencionar que a Simulação pode ser utilizada continuamente em conjunto com as atualizações do cronograma, sendo alimentada diretamente pelas produtividades das tarefas em execução ou finalizadas, garantindo maior assertividade nos cálculos e parâmetros utilizados. Ademais, conforme o projeto evolui, a tendência de redução da variabilidade dos resultados aumenta, fator que está diretamente relacionado à redução do volume de atividades simuladas (considerando que grande parte das atividades será concluída ao longo do tempo) e a precisão dos parâmetros.

Finalmente, vale destacar que a Simulação de Monte Carlo não substitui o cronograma nem a análise do Caminho Crítico. Ambas as metodologias possuem papéis complementares: enquanto o cronograma determinístico estabelece a lógica de execução e identifica o caminho crítico sob um conjunto específico de premissas, a abordagem probabilística amplia essa análise ao considerar a variabilidade inerente às atividades e aos eventos que podem influenciar o desempenho do projeto, possibilitando a viabilização antecipada de planos de ação para mitigação ou prevenção dos impactos.

⁴ Outlier é um valor atípico que se afasta significativamente da distribuição esperada dos dados e que, em análises de risco e simulações, pode representar eventos raros ou condições excepcionais capazes de influenciar os resultados obtidos (BARNETT; LEWIS, 1994).

⁵ Risco de cauda (tail risk) é a possibilidade de ocorrência de eventos raros e de baixa probabilidade, localizados nas extremidades de uma distribuição de probabilidade, mas que podem gerar impactos significativamente superior aos cenários normalmente esperados (TALeB, 2007).



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA 13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FLYVBJERG, B. **What you should know about megaprojects and why: an overview**. Project Management Journal, Hoboken, v. 45, n. 2, p. 6–19, 2014. DOI: 10.1002/pmj.21409.

PRIEMUS, H.; FLYVBJERG, B.; VAN WEE, B. Introduction. In: PRIEMUS, H.; FLYVBJERG, B.; VAN WEE, B. (org.). **Decision-Making on Mega-Projects: Cost-Benefit Analysis, Planning and Innovation**. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2008. p. 1–13.

KELLEY JR., J. E.; WALKER, M. R. **Critical-Path Planning and Scheduling**. In: PROCEEDINGS OF THE EASTERN JOINT COMPUTER CONFERENCE, 1959, Boston. Anais [...]. New York: ACM, 1959. p. 160–173. DOI: 10.1145/1460299.1460318.

SÃO PAULO (Estado). Agência de Transporte do Estado de São Paulo – ARTESP. TIC Trens. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: <https://www.artesp.sp.gov.br/artesp/setor-regulado/metroferroviario/tic-trens>. Acesso em: 12 jul. 2026.

METROPOLIS, Nicholas; ULAM, Stanislaw. **The Monte Carlo Method**. Journal of the American Statistical Association, Alexandria, v. 44, n. 247, p. 335-341, 1949. DOI: 10.1080/01621459.1949.10483310.

ULAM, Stanislaw M. **Adventures of a Mathematician**. New York: Charles Scribner's Sons, 1976.



Prêmio
Tecnologia &
Desenvolvimento
Metroferroviários



32ª SEMANA DE TECNOLOGIA METROFERROVIÁRIA

13º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

MALCOLM, D. G.; ROSEBOOM, J. H.; CLARK, C. E.; FAZAR, W. **Application of a technique for research and development program evaluation.** *Operations Research*, Catonsville, v. 7, n. 5, p. 646–669, 1959. DOI: 10.1287/opre.7.5.646.

BARNETT, V.; LEWIS, T. ***Outliers in Statistical Data***. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1994.

TALEB, N. N. ***The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable***. New York: Random House, 2007