XXXIII Congresso Brasileiro de Custos
17, 18 e 19 de novembro de 2026
- Porto de Galinhas / PE -

Análise de viabilidade econômica do retrofit elétrico de RTGs em terminal de contêineres

Geovane dos Santos Gomes (UTFPR) - geovanegomes@alunos.utfpr.edu.br

Rômel da Rosa da Silva (UTFPR) - romelsilva@utfpr.edu.br

José Donizetti de Lima (UTFPR) - donizetti@utfpr.edu.br

Resumo:

Este estudo avalia a viabilidade econômica do retrofit elétrico da frota de Rubber-Tyred Gantries (RTGs) de um terminal de contêineres em operação no Brasil, combinando a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) à Simulação de Monte Carlo (SMC). O fluxo de caixa incremental confronta as economias com diesel, manutenção e overhauls aos custos de energia elétrica e de manutenção da configuração eletrificada, e as principais premissas do projeto são tratadas como variáveis aleatórias, permitindo estimar a distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido ("VPL") e as métricas de risco Value at Risk (VaR), Conditional Value at Risk (CVaR) e Conditional Expected Loss ("CEL"). Pelos critérios clássicos, o projeto seria aprovado sem ressalvas, com "VPL" positivo e Taxa Interna de Retorno ("TIR") superior à Taxa Mínima de Atratividade ("TMA"). A leitura MMIA, contudo, qualifica a decisão: o retorno adicional à TMA é modesto e os indicadores de risco situam-se no terço superior da escala de percepção, com recuperação do capital apenas no terço final do horizonte. A análise estocástica quantifica essa fragilidade, indicando probabilidade de inviabilidade próxima de 14% e concentrando o risco no preço do diesel, no investimento inicial e no volume movimentado, enquanto as variáveis relacionadas a parte elétrica exercem influência marginal. Conclui-se que o retrofit cria valor no contexto brasileiro, favorecido pelo baixo custo relativo da energia elétrica, mas com margens estreitas que recomendam a gestão ativa do investimento, evidenciando a utilidade da avaliação via MMIA seguida da SMC para decisões de descarbonização portuária.

Palavras-chave: *Eletrificação de RTGs, Terminais de contêineres, Análise de risco, Metodologia Multi-índice Ampliada, Simulação de Monte Carlo*

Área temática: *Custos como ferramenta para o planejamento, controle e apoio a decisões*

Análise de viabilidade econômica do *retrofit* elétrico de RTGs em terminal de contêineres

RESUMO

Este estudo avalia a viabilidade econômica do *retrofit* elétrico da frota de *Rubber-Tyred Gantries* (RTGs) de um terminal de contêineres em operação no Brasil, combinando a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) à Simulação de Monte Carlo (SMC). O fluxo de caixa incremental confronta as economias com diesel, manutenção e *overhauls* aos custos de energia elétrica e de manutenção da configuração eletrificada, e as principais premissas do projeto são tratadas como variáveis aleatórias, permitindo estimar a distribuição de probabilidade do Valor Presente Líquido (VPL) e as métricas de risco *Value at Risk* (VaR), *Conditional Value at Risk* ($CVaR$) e *Conditional Expected Loss* (CEL). Pelos critérios clássicos, o projeto seria aprovado sem ressalvas, com VPL positivo e Taxa Interna de Retorno (TIR) superior à Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A leitura MMIA, contudo, qualifica a decisão: o retorno adicional à TMA é modesto e os indicadores de risco situam-se no terço superior da escala de percepção, com recuperação do capital apenas no terço final do horizonte. A análise estocástica quantifica essa fragilidade, indicando probabilidade de inviabilidade próxima de 14% e concentrando o risco no preço do diesel, no investimento inicial e no volume movimentado, enquanto as variáveis relacionadas a parte elétrica exercem influência marginal. Conclui-se que o *retrofit* cria valor no contexto brasileiro, favorecido pelo baixo custo relativo da energia elétrica, mas com margens estreitas que recomendam a gestão ativa do investimento, evidenciando a utilidade da avaliação via MMIA seguida da SMC para decisões de descarbonização portuária.

Palavras-chave: Eletrificação de RTGs. Terminais de contêineres. Análise de risco. Metodologia Multi-índice Ampliada. Simulação de Monte Carlo.

Área Temática: Custos como ferramenta para o planejamento, controle e apoio a decisões.

1 INTRODUÇÃO

A pressão para reduzir as emissões de carbono das operações portuárias cresceu de forma acentuada na última década, impulsionada por metas climáticas e favorecida pela expectativa de redução de custos operacionais. O transporte marítimo responde por aproximadamente de 3% das emissões antropogênicas globais de CO_2 (IMO, 2020), e os portos concentram parte expressiva desse impacto. Dentro do perímetro portuário, os equipamentos de movimentação de carga figuram entre as principais fontes de poluição local, pois operam majoritariamente com motores a diesel, gerando emissões atmosféricas, ruído e custos elevados de combustível e manutenção (Ding *et al.*, 2021; Olivari *et al.*, 2024).

Um terminal de contêineres é o ponto de transferência entre os modais marítimo e terrestre, operando em dois sentidos. Na importação, os navios são descarregados pelos portêineres e os contêineres seguem para o pátio, onde permanecem empilhados até a retirada por caminhão ou trem. Na exportação, o fluxo

se inverte: a carga chega por via terrestre, aguarda empilhada no pátio e, no momento da atracação, é levada ao cais e embarcada pelos portêineres. Em ambos os sentidos, a movimentação e o empilhamento no pátio dependem de equipamentos específicos, entre os quais se destaca o RTG (*Rubber-Tyred Gantry*), pórtico rolante sobre pneus que percorre as pilhas do pátio, levantando, posicionando e retirando contêineres. Por ser um dos principais equipamentos de pátio em terminais de médio e grande porte e, tradicionalmente, movido a diesel, o RTG figura entre os maiores consumidores de combustível e como uma das principais fontes de emissão de CO_2 da operação de pátio (Ding *et al.*, 2021). Em levantamento realizado em um terminal de contêineres em Valência (Espanha), Martínez-Moya, Vazquez-Paja e Gimenez Maldonado (2019) identificaram que os tratores de pátio e os RTGs respondem por 68,1% das emissões de CO_2 do terminal.

Diante desse cenário, o movimento conhecido como “porto verde” (*green port*) tem impulsionado a substituição dos equipamentos a diesel por alternativas elétricas. No caso dos RTGs, essa transição pode ocorrer pela aquisição de unidades elétricas ou pela conversão (*retrofit*) das unidades a diesel existentes. A literatura registra ganhos expressivos com a eletrificação: Yang e Chang (2013), em estudo comparativo entre RTGs a diesel e elétricos (e-RTGs), reportaram redução de até 86,6% no consumo de energia e de 67,8% nas emissões de CO_2. Martínez-Moya *et al*. (2019) estimaram que a conversão dos RTGs reduziria em 43% as emissões de CO_2 do terminal analisado.

No plano econômico-financeiro, também há resultados promissores reportados: Yang e Chang (2013) estimaram para os e-RTGs um *payback* simples individual de 2,2 anos, decorrente da economia de combustível e da menor manutenção, enquanto Tang *et al.* (2024) avaliaram portos com sistemas multienergéticos integrados e encontraram redução de custos da ordem de 71% e de emissões de CO_2 em torno de 67%. Entretanto, a viabilidade desse tipo de investimento é condicionada à relação entre os preços do diesel e da energia elétrica e ao nível de utilização do equipamento. Como o aporte inicial de capital é elevado e o retorno se distribui por mais de uma década, a tolerância a variações nessas premissas é baixa, o que eleva o risco da decisão. Olivari *et al.* (2024), ao avaliarem a eletrificação de tratores de pátio em um terminal de Gênova (Itália), constataram que o investimento ainda não é rentável em razão do alto preço de aquisição dos veículos elétricos, fortemente influenciado pelo custo das baterias, mas que a queda projetada desses preços e a maior intensidade de uso dos equipamentos tendem a torná-lo viável em cenários futuros; no mesmo sentido, Wei e Giuliano (2025), analisando a eletrificação dos equipamentos de movimentação no complexo de San Pedro Bay (Estados Unidos), concluíram que o custo de capital dos novos equipamentos supera as economias operacionais obtidas, sobretudo pela necessidade de duas unidades elétricas para substituir cada equipamento convencional no primeiro ciclo de renovação da frota e pelo preço relativamente alto da eletricidade local, que reduz a economia de combustível. Esses resultados evidenciam que a viabilidade econômica da eletrificação não é automática: a mesma tecnologia pode apresentar desempenho financeiro favorável em determinados contextos e desfavorável em outros, o que reforça a necessidade de avaliações aderentes às condições locais de operação e às premissas econômico-financeiras do terminal analisado.

Nesse contexto, a literatura ainda apresenta poucos estudos aplicados a portos da América do Sul, cujas condições energéticas e estruturas tarifárias podem diferir significativamente daquelas observadas em portos europeus, asiáticos e norte-americanos. No caso brasileiro, essa especificidade é acentuada por uma matriz

elétrica com 88,2% de participação de fontes renováveis e um fator de emissão de apenas 59,9 kg CO_2eq por MWh gerado em 2024, equivalente a 23% do valor observado nos países europeus da OCDE e a 17% do norte-americano (EPE, 2025). Essas características limitam a transferência direta, para terminais brasileiros, de resultados obtidos em outros contextos. Além disso, observa-se uma oportunidade de aprofundamento metodológico nas avaliações econômico-financeiras de projetos de eletrificação portuária, uma vez que as pesquisas são conduzidas com base em indicadores isolados e por modelos determinísticos, que podem limitar a compreensão conjunta entre retorno, risco e sensibilidade do investimento, principalmente em projetos com alto capital investido e expostos à volatilidade de variáveis como preço dos combustíveis, tarifas de energia elétrica e demanda da utilização dos equipamentos.

Diante disso, este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica da eletrificação de RTGs em um terminal de contêineres em operação no Brasil. Para isso, adota-se a Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) (Souza & Clemente, 2008; Lima *et al*., 2015) integrada à abordagem estocástica via Simulação de Monte Carlo (SMC) sob a abordagem estocástica proposta por Lima *et al*. (2017) e ampliada por Lima *et al*. (2024), permitindo analisar conjuntamente retorno, risco, sensibilidade e a distribuição probabilística dos resultados esperados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Eletrificação de RTGs em terminais de contêineres

A eletrificação de RTGs consiste na substituição do fornecimento de energia baseado em motores a diesel por sistemas elétricos conectados à rede do terminal. Em algumas configurações, mantém-se o gerador diesel como recurso auxiliar para deslocamentos entre blocos ou situações específicas de operação (Yang & Chang, 2013).

O retorno esperado da eletrificação decorre principalmente da substituição do diesel por energia elétrica, cujo custo relativo pode ser inferior dependendo da estrutura tarifária local. Além disso, a menor utilização de motores diesel e grupos geradores tende a reduzir custos de manutenção e reparo, podendo eliminar também eventos de manutenção pesada, como *overhauls*, quando estes fazem parte do ciclo de manutenção dos equipamentos convencionais (Yang & Chang, 2013). Por outro lado, a eletrificação exige desembolso inicial relevante, associado à aquisição ou conversão dos equipamentos, adequações de infraestrutura elétrica, instalação de cabos ou barramentos, eventuais reforços na rede interna do terminal e possíveis impactos operacionais durante a implantação (Olivari *et al.*, 2024; Wei & Giuliano, 2025).

2.2 Análise de viabilidade econômica de projetos de investimentos

A análise de viabilidade econômica de projetos de investimento busca avaliar se a aplicação de recursos em determinado ativo é capaz de gerar retornos compatíveis com os riscos assumidos e com o custo de oportunidade do capital. Em projetos de ativos reais, a aprovação técnica da alternativa não é suficiente para justificar sua implantação, sendo necessário avaliar se os fluxos de caixa esperados compensam o investimento inicial, os custos operacionais, a vida útil do projeto e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) definida pelo investidor (Souza & Clemente, 2008; Lima *et al.*, 2015).

As abordagens tradicionais de análise de investimentos utilizam indicadores como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e $payback$. Embora relevantes, a interpretação isolada desses indicadores pode restringir a avaliação do projeto, pois cada métrica captura apenas uma dimensão específica da decisão. Entretanto, decisões de investimento intensivas em capital exigem uma leitura conjunta entre retorno, risco e sensibilidade das principais premissas (Lima *et al*., 2015; Lima *et al*., 2024).

Nesse contexto, a Metodologia Multi-índice (MMI), proposta por Souza e Clemente (2008), estrutura a análise de investimentos a partir de um conjunto de indicadores de retorno e riscos. Na dimensão de retorno, são considerados indicadores como Valor Presente (VP), Valor Presente Líquido (VPL), Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA), Índice Benefício/Custo (IBC), Retorno Adicional decorrente do Investimento (ROIA) e índice $\mathrm{ROIA/TMA}$. Na dimensão de risco, a metodologia contempla indicadores como TIR, $payback$, índice $\mathrm{TMA/TIR}$, índice $payback/N$. A análise conjunta desses indicadores permite verificar não apenas se o projeto cria valor, mas também se o retorno esperado é compatível com os riscos percebidos do investimento. Para sintetizar essa avaliação, os índices $\mathrm{ROIA/TMA}$, $\mathrm{TMA/TIR}$ e $payback/N$ são representados em uma escala comum de zero a um e confrontados em um mapa perceptual, permitindo visualizar a intensidade do benefício e a exposição ao risco do projeto (Souza & Clemente, 2008).

Lima *et al.* (2015) ampliaram essa abordagem ao propor uma sistemática de análise da viabilidade econômica de projetos de investimento em ativos fixos, incorporando à MMI uma terceira dimensão voltada à análise de sensibilidade. Essa ampliação, denominada Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), busca melhorar a percepção dos riscos por meio da avaliação da sensibilidade do projeto a alterações em variáveis críticas. Para isso, a MMIA estima os limites de variação dessas grandezas antes que o projeto se torne economicamente inviável, permitindo identificar o grau de robustez da decisão frente a mudanças nas premissas adotadas.

Os principais indicadores utilizados na MMI e na MMIA podem ser organizados em três dimensões: retorno, risco e sensibilidade, conforme sintetizado no Quadro 1. Nas formulações apresentadas, FC_0 representa o investimento inicial, expresso como valor absoluto do desembolso realizado no instante zero, e FC_t o fluxo de caixa líquido do período t, para $t = 1, 2, \ldots, N$, em que N é o horizonte de análise.

Dimensão	Indicador	Fórmula	Interpretação
Retorno	VPL	$VPL = \sum_{t=1}^{N} \frac{\mathrm{FC}_t}{(1+\mathrm{TMA})^t} - \mathrm{FC}_0$	Mede o valor líquido gerado pelo projeto, em valor presente.
Retorno	VPLA	$\mathrm{VPLA} = \mathrm{VPL} \times \frac{\mathrm{TMA}(1+\mathrm{TMA})^N}{(1+\mathrm{TMA})^N - 1}$	Converte o VPL em ganho periódico equivalente ao longo do horizonte de análise.
Retorno	IBC	$\mathrm{IBC} = \frac{\mathrm{VP}_{\text{benefícios}}}{\mathrm{VP}_{\text{custos}}}$	Indica o retorno para cada unidade monetária investida.
Retorno	ROIA	$\mathrm{ROIA} = \mathrm{IBC}^{1/N} - 1$	Expressa o retorno adicional periódico do projeto.
Risco	TIR	$\mathrm{VPL} = 0$	Taxa que iguala o valor presente dos fluxos de caixa ao investimento inicial.

Risco	Índice $\mathrm{TMA/TIR}$	$\frac{\mathrm{TMA}}{\mathrm{TIR}}$	Mede a proximidade entre a taxa mínima exigida e a taxa interna de retorno.
Risco	*Payback* descontado	Menor k tal que $\sum_{t=1}^{k} \frac{\mathrm{FC}_t}{(1+\mathrm{TMA})^t} \geq \mathrm{FC}_0$	Indica o tempo necessário para recuperar o investimento em valor presente.
Risco	Índice $\mathit{Payback}/N$	$\frac{\mathit{Payback}}{N}$	Mede a parcela necessária do horizonte de análise para recuperar o capital investido.
Sensibilidade	Limite de elasticidade da TMA	$\Delta\%\mathrm{TMA}_{\text{máx}} = \frac{\mathrm{TIR}}{\mathrm{TMA}} - 1$	Aumento máximo da TMA antes de inviabilizar o projeto.
Sensibilidade	Limite de elasticidade dos custos	$\Delta\%C_{\text{máx}} = \mathrm{IBC} - 1$	Aumento máximo dos custos antes de inviabilizar o projeto.
Sensibilidade	Limite de elasticidade das receitas/benefícios	$\Delta\%R_{\text{máx}} = 1 - \frac{1}{\mathrm{IBC}}$	Redução máxima dos benefícios antes de inviabilizar o projeto.
Sensibilidade	Variação simultânea de custos e benefícios	$\Delta\%(C_{\text{máx}} \cap R_{\text{máx}}) = \frac{\mathrm{IBC} - 1}{\mathrm{IBC} + 1}$	Variação simultânea máxima, com aumento de custos e redução de benefícios, antes da inviabilidade.

Quadro 1. Indicadores da Metodologia Multi-índice Ampliada
Fonte: Adaptado de Souza e Clemente (2008) e Lima *et al.* (2015).

2.3 Simulação de Monte Carlo aplicada à análise de investimentos

A simulação de Monte Carlo (SMC) consiste na geração de amostras aleatórias para simular artificialmente milhares de experimentos e então analisar estocasticamente os resultados. Na análise de investimentos, em vez de atribuir valores únicos às variáveis de entrada, o método permite representar as principais premissas do projeto por distribuições de probabilidade e, a partir de sucessivas iterações, obter uma distribuição de resultados para os indicadores econômico-financeiros (Lima *et al.*, 2017; Lima *et al.*, 2024).

Seguindo a abordagem estocástica proposta por Lima *et al.* (2017) e Lima *et al.* (2024), seja o vetor $X = (X_1, X_2, \ldots, X_n)$ composto pelas n variáveis que influenciam o fluxo de caixa do projeto. Para cada iteração m, sorteia-se um conjunto de valores $X^{(m)}$ a partir das distribuições definidas para as variáveis e calcula-se o respectivo indicador econômico-financeiro. No caso do VPL, tem-se:

$$\mathrm{VPL}^{(m)} = f\left(X^{(m)}\right), \text{ para } m = 1, 2, \ldots, M \quad (1)$$

em que M é o número total de simulações.

A fronteira de decisão econômica pode ser definida pelo critério $\mathrm{VPL} = 0$. Assim, os cenários em que $\mathrm{VPL} > 0$ indicam criação de valor econômico, enquanto os cenários em que $\mathrm{VPL} \leq 0$ indicam inviabilidade econômica do projeto. A probabilidade de inviabilidade pode ser estimada pela frequência relativa das simulações com VPL negativo:

$$P(\mathrm{VPL} \leq 0) = \frac{n\left(\mathrm{VPL}^{(m)} \leq 0\right)}{M} \quad (2)$$

em que $n\left(\mathrm{VPL}^{(m)} \leq 0\right)$ é o número de iterações nas quais o projeto apresentou VPL negativo.

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da SMC aplicada à análise de viabilidade econômica. Cada marcador corresponde a um cenário simulado, classificado como economicamente viável quando $\mathrm{VP(FC)} > \mathrm{FC_0}$ e inviável quando $\mathrm{VP(FC)} \leq \mathrm{FC_0}$. A reta tracejada representa a fronteira $\mathrm{VPL} = 0$, e as curvas marginais indicam as distribuições simuladas das variáveis representadas nos eixos.

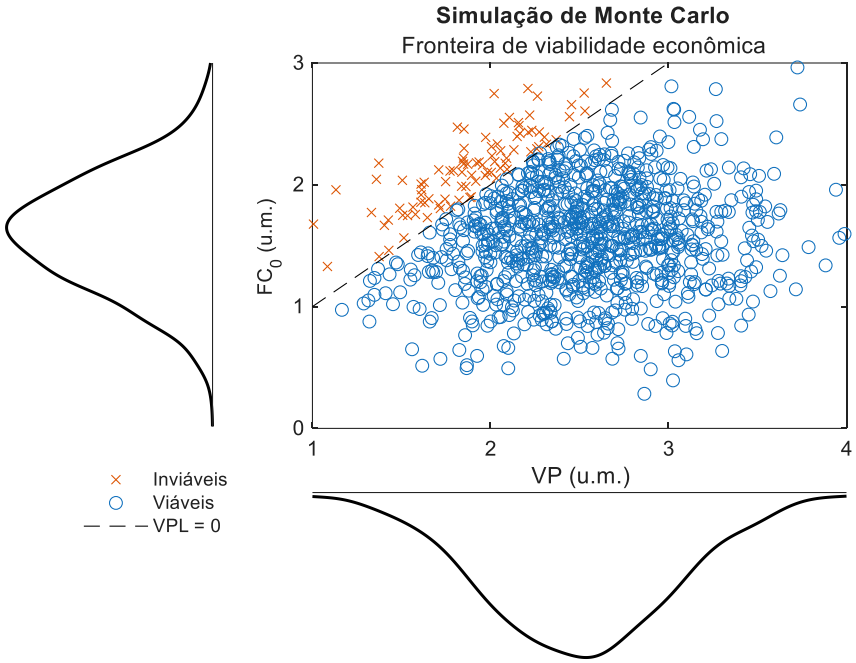


Figura 1. Simulação de Monte Carlo e fronteira de viabilidade econômica

Fonte: Elaborado pelos autores

Nota: Representação esquemática, com valores expressos em unidades monetárias (u.m.) arbitrárias.

Além da probabilidade de inviabilidade, a distribuição simulada do VPL permite avaliar a severidade dos resultados desfavoráveis por meio de métricas de risco de cauda (Lima *et al.*, 2024). O *Value at Risk* (VaR), ao nível de significância α, corresponde ao quantil inferior da distribuição do VPL associado a essa probabilidade, isto é, ao menor valor v para o qual a probabilidade de o VPL ser igual ou inferior a v seja de pelo menos α (Morgan, 1996). Denotado por VaR_α, esse indicador é dado por:

$$VaR_\alpha = inf\{v: P(\mathrm{VPL} \leq v) \geq \alpha\} \quad (3)$$

Embora o VaR identifique um ponto crítico da distribuição, ele não informa a magnitude esperada dos resultados nos cenários situados abaixo desse limite. Por essa razão, utiliza-se também o *Conditional Value at Risk* ($CVaR$), introduzido por Rockafellar e Uryasev (2000, 2002), definido como o valor esperado do VPL condicionado aos cenários da cauda inferior, isto é, àqueles em que o VPL é igual ou inferior ao VaR_α:

$$CVaR_\alpha = E[\mathrm{VPL} \mid \mathrm{VPL} \leq VaR_\alpha] \quad (4)$$

Complementarmente, o *Conditional Expected Loss* (CEL), proposto por Lima *et al.* (2024) mensura o valor esperado do VPL condicionado apenas aos cenários economicamente inviáveis, ou seja, àqueles em que o VPL é negativo:

$$CEL = E[\mathrm{VPL} \mid \mathrm{VPL} < 0] \quad (5)$$

Em conjunto, essas métricas permitem avaliar não apenas a probabilidade de

inviabilidade do investimento, mas também a intensidade das perdas potenciais nos cenários desfavoráveis. Assim, a SMC complementa a MMIA ao incorporar uma leitura probabilística dos indicadores de retorno, risco e sensibilidade (Lima *et al*., 2024).

3 METODOLOGIA

3.1 Delineamento da pesquisa

Este estudo avalia a viabilidade econômica do *retrofit* de RTGs movidos a diesel em um terminal de contêineres em operação no Brasil. O projeto prevê a conversão dos equipamentos para alimentação elétrica por barramento condutor (*busbar*), considerando dados operacionais, energéticos e econômico-financeiros do próprio terminal.

O fluxo de caixa foi construído a partir das economias com diesel, manutenção dos motores e *overhauls*, deduzidas dos custos de energia elétrica e de manutenção dos equipamentos adaptados. A avaliação foi realizada pela Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA), conforme a sistemática de Lima *et al.* (2015), abrangendo indicadores de retorno, riscos e sensibilidades. Para a interpretação dos índices $\mathrm{ROIA/TMA}$, $Payback/N$ e $\mathrm{TMA/TIR}$, adotou-se a divisão da escala de percepção em terços, classificando-se como baixas as posições até 1/3, médias as intermediárias e altas as superiores a 2/3. Posteriormente, aplicou-se a SMC, com base em Lima *et al.* (2017) e Lima *et al*. (2024), para incorporar a incerteza das principais premissas e estimar a distribuição probabilística do VPL.

Vale ressaltar que foram considerados apenas os efeitos econômicos diretamente associados ao investimento e à operação dos RTGs. Eventuais custos ou impactos operacionais durante a implantação, como indisponibilidade temporária dos equipamentos ou redução de produtividade, não foram incluídos.

3.2 Descrição do caso, premissas e construção do fluxo de caixa

O terminal opera 21 RTGs movidos a diesel e movimenta aproximadamente 860 mil TEUs por ano. Com uma relação média de 1,68 TEU por contêiner e 2,6 movimentos de RTG por contêiner, o número anual de movimentos foi estimado por:

$$N_{mov,t} = (V_{TEU,t} / R_{TEU}) \times m_{RTG} \quad (6)$$

em que $N_{mov,t}$ representa o número de movimentos de RTG no ano t, $V_{TEU,t}$ é a movimentação anual do terminal, R_{TEU} corresponde à relação média de TEU por contêiner e m_{RTG} ao número médio de movimentos de RTG por contêiner. Com os valores adotados, foram estimados aproximadamente 1,33 milhão de movimentos anuais.

Na configuração a diesel, o consumo médio é de 1,54 litro por movimento. Para a configuração elétrica, adotou-se o consumo de 2,2 kWh por movimento, obtido em um projeto piloto realizado no próprio terminal, no qual um RTG foi eletrificado e monitorado em condições reais de operação.

A análise foi desenvolvida em dólares norte-americanos e a preços constantes, sem escalonamento inflacionário. Adotou-se um horizonte operacional de 12 anos, correspondente à vida útil remanescente dos RTGs, considerando uma vida útil total estimada de 20 anos e a idade atual de 8 anos. A TMA foi fixada em 12% ao ano, e o $\mathrm{FC}_0 = \mathrm{USD}\ 6{,}010\ \mathrm{mi}$ a ser integralmente desembolsado no ano zero. O *overhaul*, previsto para o 12º ano de vida dos equipamentos, foi considerado no quarto ano do horizonte de análise. O Quadro 2 apresenta as demais premissas utilizadas no modelo.

Premissa	Símbolo	Valor
Número de RTGs convertidos	n_{RTG}	21
Movimentação anual	$V_{TEU,t}$	860.000 TEUs
Relação média de TEUs por contêiner	R_{TEU}	1,68
Movimentos de RTG por contêiner	m_{RTG}	2,60
Movimentos anuais estimados	$N_{mov,t}$	1.330.952
Consumo de diesel	c_D	1,54 L / movimento
Consumo de energia elétrica	c_E	2,20 kWh / movimento
Preço do diesel	P_D	USD 0,547 / L
Tarifa de energia elétrica	P_E	USD 0,076 / kWh
Custo de manutenção dos motores a diesel	M_D	USD 5,14 / hora de operação
Custo de manutenção dos RTGs eletrificados	M_E	70% de M_D
Horas anuais de operação por RTG	h_t	5.040
Custo com *overhauls*	OH	USD 50.000 / RTG
Investimento inicial	FC_0	USD 6.010.000
Horizonte operacional	N	12 anos
Taxa Mínima de Atratividade	TMA	12% a.a.

Quadro 2. Premissas operacionais e econômico-financeiras do projeto

Fonte: Elaborado pelos autores

A partir dessas premissas, o fluxo de caixa (FC) incremental dos anos operacionais foi representado pela Equação (7):

$$\mathrm{FC}_t = N_{mov,t}(c_D P_D - c_E P_E) + n_{RTG}\left[h_t(M_D - M_E) + (OH)I_{OH,t}\right],\ t = 1, 2, \ldots, 12 \quad (7)$$

em que $I_{OH,t}$ é uma variável indicadora igual a 1 no ano em que ocorreria o *overhaul* e 0 nos demais anos. No ano zero, o fluxo de caixa corresponde ao desembolso integral do investimento. Assim, o FC completo do projeto é dado pela Equação (8):

$$\mathrm{FC} = (-\mathrm{FC}_0, \mathrm{FC}_1, \mathrm{FC}_2, \ldots, \mathrm{FC}_{12}) \quad (8)$$

3.3 Aplicação da abordagem estocástica

Na etapa estocástica, sete variáveis foram tratadas como aleatórias e modeladas por distribuições LogNormal, escolha justificada pelo suporte estritamente positivo dessas grandezas. Cada distribuição foi centrada no respectivo valor determinístico do Quadro 2, assumindo-se independência estatística entre as variáveis. Na ausência de séries históricas específicas do terminal, adotou-se um coeficiente de variação (CV) de 10%, com exceção do consumo de diesel, fixado em 5% por estar amparado em histórico operacional de toda a frota. O Quadro 3 sintetiza a parametrização adotada.

Variável	Símbolo	Média	Coeficiente de Variação	Distribuição
Movimentação anual	$V_{TEU,t}$	860.000 TEUs	10%	LogNormal
Consumo de diesel	c_D	1,54 L / movimento	5%	LogNormal

Consumo de energia elétrica	c_E	2,20 kWh / movimento	10%	LogNormal
Preço do diesel	P_D	USD 0,547 / L	10%	LogNormal
Tarifa de energia elétrica	P_E	USD 0,076 / kWh	10%	LogNormal
Fator de manutenção elétrica	f_{M_E}	0,70	10%	LogNormal
Investimento inicial	FC_0	USD 6.010.000	10%	LogNormal

Quadro 3. Variáveis aleatórias da simulação

Fonte: Elaborado pelos autores

Foram geradas 100 mil simulações independentes, com semente fixa para garantir a reprodutibilidade, recalculando-se, em cada uma, o FC das Equações (7) e (8) e o VPL correspondente pela Equação (1). Da distribuição empírica resultante extraíram-se a probabilidade de inviabilidade, conforme a Equação (2), e as métricas de cauda VaR, $CVaR$ e CEL, definidas nas Equações (3) a (5), ao nível de significância $\alpha = 5\%$. A importância relativa de cada fonte de incerteza foi avaliada pela correlação de postos de Spearman entre os valores sorteados de cada variável e o VPL simulado. Os procedimentos foram implementados em MATLAB®, com as *toolboxes Financial* e *Statistics and Machine Learning*.

4 RESULTADOS

4.1 Fluxo de caixa projetado

A Figura 2 apresenta o FC incremental do projeto, construído a partir dos valores determinísticos das premissas do Quadro 2. As economias brutas anuais somam USD 1,665 milhão, das quais 67,3% decorrem do combustível diesel evitado (USD 1,121 milhão) e 32,7% da manutenção dos motores a combustão (USD 0,544 milhão). Os custos incorridos pela operação elétrica somam USD 0,603 milhão por ano, compostos pela energia elétrica (USD 0,223 milhão) e pela manutenção da configuração elétrica (USD 0,381 milhão). A economia líquida resultante é de USD 1,062 milhão por ano, constante ao longo do horizonte em razão da premissa de preços constantes, exceto no ano 4, em que o *overhaul* evitado dos 21 motores adiciona USD 1,050 milhão, elevando o fluxo daquele ano a USD 2,112 milhões.

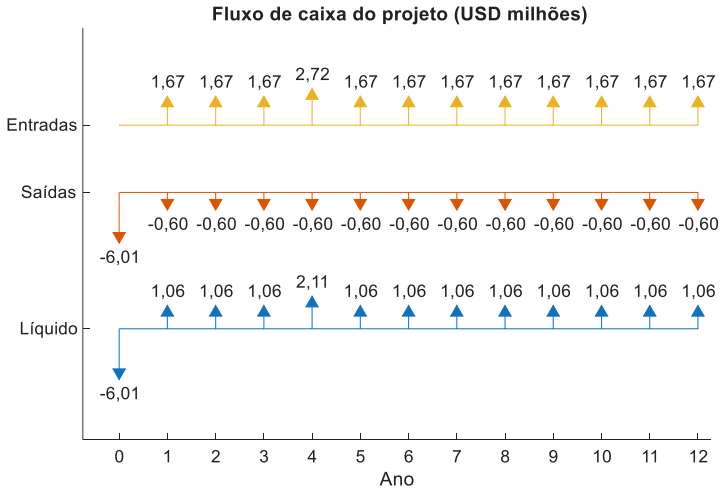


Figura 2. Fluxo de caixa do projeto

Fonte: Elaborado pelos autores

4.2 Indicadores da Metodologia Multi-índice Ampliada

A Figura 3 sintetiza a avaliação do projeto pela MMIA em três painéis: o FC com o $payback$ descontado, o espectro de validade e o mapa perceptual de retorno e riscos. O primeiro painel apresenta o FC do projeto e a trajetória do VPL acumulado descontado. A trajetória do VPL acumulado descontado cruza o eixo de valor nulo aos 8,18 anos, de modo que a recuperação do capital consome 68,1% do horizonte de 12 anos. Ao término do horizonte, o VPL acumulado atinge USD 1,23 milhão.

O espectro de validade mostra o VPL em função da TMA. A curva cruza o eixo horizontal na TIR, de 16,36% ao ano, superior à TMA de 12%. O mapa perceptual posiciona os índices da metodologia na escala de classificação apresentada na seção 3.1: a razão TMA/TIR, de 73,4%, e o índice $Payback/N$, de 68,1%, situam-se na faixa alta, indicando folga estreita entre o retorno exigido e o obtido e recuperação tardia do capital, enquanto o índice ROIA/TMA, de 13,1%, permanece na faixa baixa, sinalizando ganho adicional modesto em relação ao custo de oportunidade.

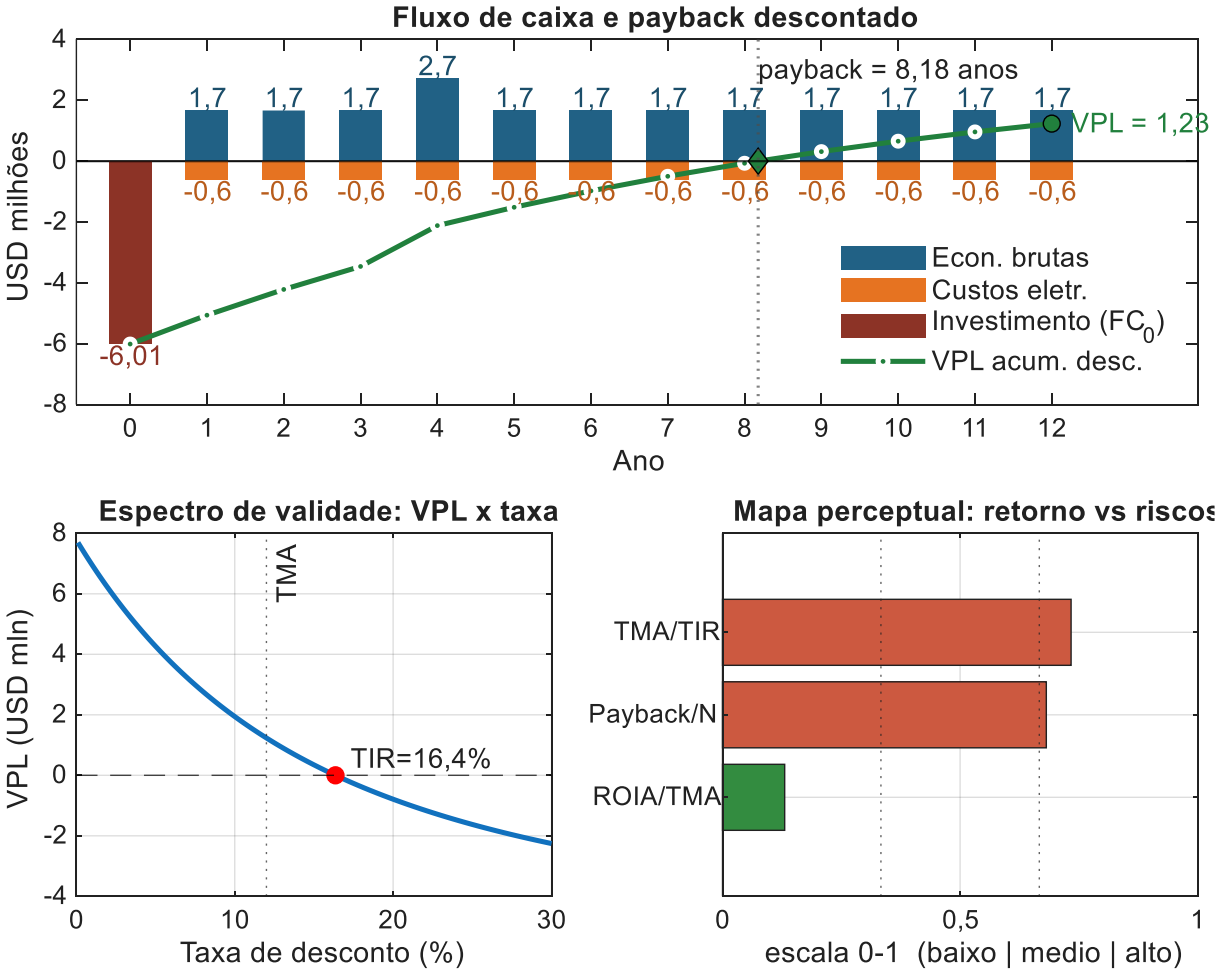


Figura 3. Indicadores da MMIA: fluxo de caixa com payback descontado, espectro de validade e mapa perceptual

Fonte: Elaborado pelos autores

Na dimensão sensibilidade, os limites de elasticidade quantificam as folgas individuais e combinadas das premissas. Isoladamente, o projeto suporta elevação de até 36,3% na TMA, aumento de até 20,5% no investimento inicial ou redução de até 17,0% nas economias líquidas anuais antes de se inviabilizar. Quando as variações

são simultâneas, as margens estreitam-se de forma expressiva: 9,3% para a combinação de aumento do investimento com redução das economias e 7,4% quando os três parâmetros variam conjuntamente em direção desfavorável.

Complementam a avaliação os indicadores de retorno não representados na Figura 3. O VPL de USD 1.234.714 corresponde a um VPLA de USD 199.328 por ano ao longo do horizonte. O IBC, de 1,2054, indica que cada dólar investido retorna USD 1,21 em valor presente, e o ROIA, de 1,57% ao ano, expressa a rentabilidade excedente à TMA.

A leitura articulada das três dimensões qualifica a decisão de modo distinto da análise por indicadores isolados. Pelos critérios clássicos, o projeto seria aprovado sem ressalvas, uma vez que $\text{VPL} > 0$, $\text{TIR} > \text{TMA}$ e $payback \leq N$. A MMIA, entretanto, revela um perfil de retorno adicional baixo combinado a riscos classificados como altos e a margens de segurança reduzidas frente a variações simultâneas das premissas. Esse perfil não invalida o investimento, mas indica que sua atratividade depende da concretização conjunta das premissas adotadas, o que justifica o tratamento explícito da incerteza por meio da abordagem estocástica amparada na SMC.

4.3 Análise estocástica via SMC

A Figura 4 apresenta a distribuição de probabilidade do VPL obtida com as 100 mil simulações. O $\text{VPL}_{médio} = \text{USD}\ 1{,}238\ \text{mi}$ é praticamente idêntico ao valor determinístico, e o desvio-padrão de USD 1,175 milhão equivale a 94,9% da média. Essa dispersão traduz-se em uma probabilidade de inviabilidade econômica, $P(\text{VPL} \leq 0) = 14{,}17\%$.

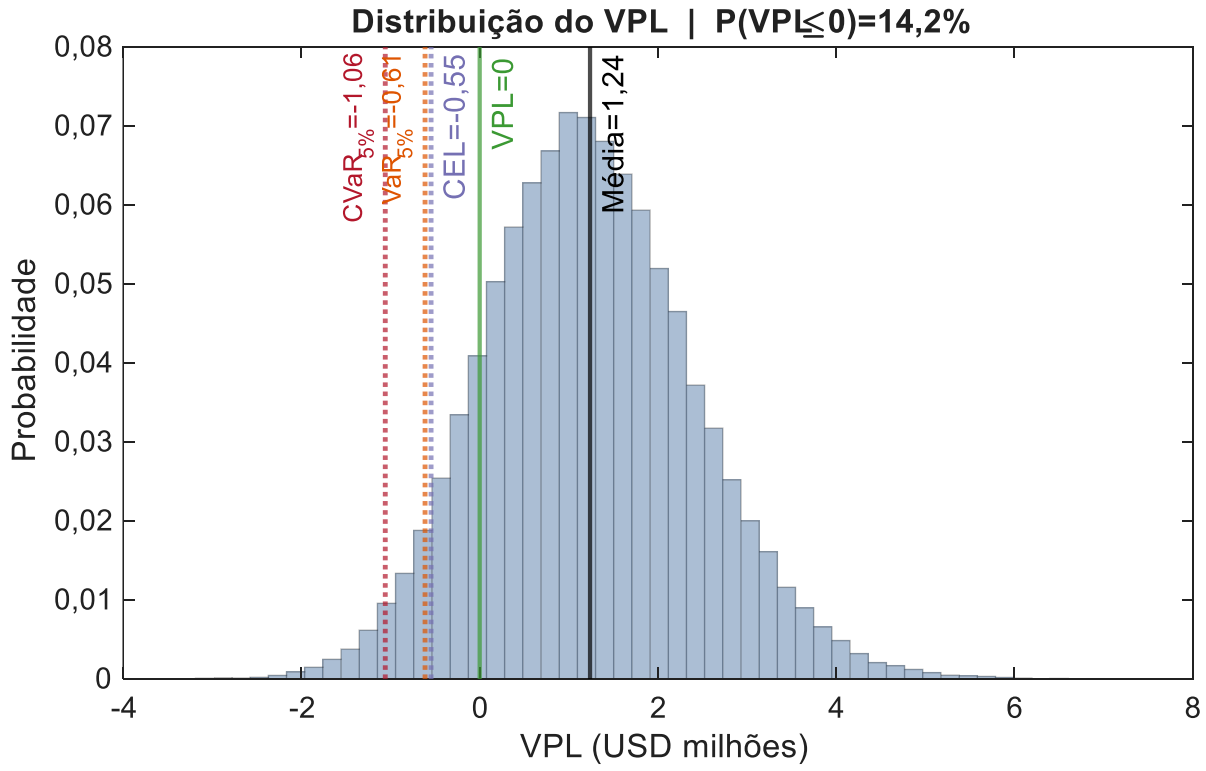


Figura 4. Distribuição de probabilidade do VPL com as métricas de risco

Fonte: Elaborado pelos autores

As métricas de cauda dimensionam a severidade dos cenários desfavoráveis. O $VaR_{5\%}$ indica que os piores cenários partem de um $\mathrm{VPL} = \mathrm{USD} - 0{,}613\ \mathrm{mi}$, e o $CVaR_{5\%} = \mathrm{USD} - 1{,}059\ \mathrm{mi}$ corresponde ao VPL médio no grupo dos 5% mais desfavoráveis. O $CEL = \mathrm{USD} - 0{,}545\ \mathrm{mi}$ expressa o VPL médio condicionado a todos os cenários inviáveis e equivale a 9,1% do investimento inicial médio.

A Figura 5 estende o espectro de validade da Figura 3 à dimensão estocástica, apresentando a mediana do VPL em função da TMA, envolta pelas bandas interquartílicas e de 90% de confiança. Na TMA de 12% ao ano, a banda de 90% estende-se de USD −0,60 a USD 3,25 milhões. A mediana anula-se em 16,2%, valor correspondente à TIR mediana do projeto, ao passo que o percentil de 5% cruza o eixo de valor nulo já em 9,9%, taxa inferior à própria TMA adotada, logo, mesmo custos de capital mais brandos que o exigido não blindam os cenários desfavoráveis. Em sentido oposto, o percentil de 95% sustenta VPL positivo até 23,8%. A Figura 5 evidencia que a folga entre a TMA e a TIR é uma faixa de resultados possíveis, e que a sensibilidade do projeto ao custo de capital se amplifica sob incerteza.

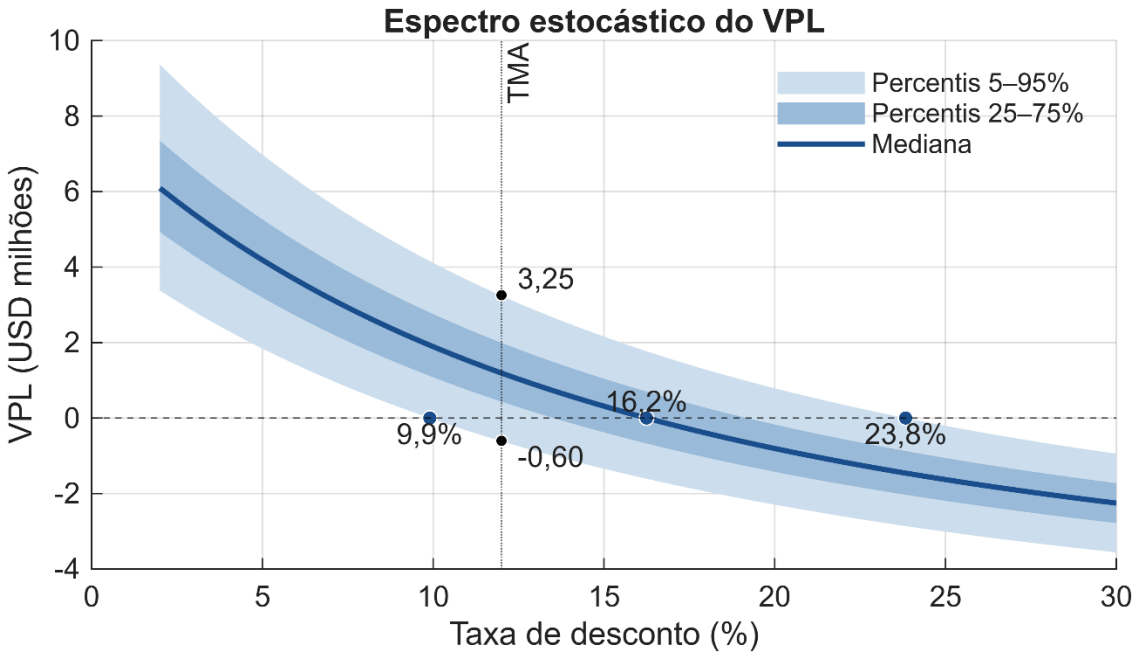


Figura 5. Espectro de validade estocástico

Fonte: Elaborado pelos autores

A estabilidade dessas estimativas é ilustrada na Figura 6, no qual o VPL médio e a probabilidade de inviabilidade convergem para seus valores finais, com os intervalos de confiança de 95% estreitando-se ao longo das simulações e alcançando, em 100 mil realizações, semiamplitude de USD 7,3 mil para a média, equivalente a 0,6% de seu valor, e coeficiente de variação de 0,78% para o estimador de $P(\mathrm{VPL} \leq 0)$.

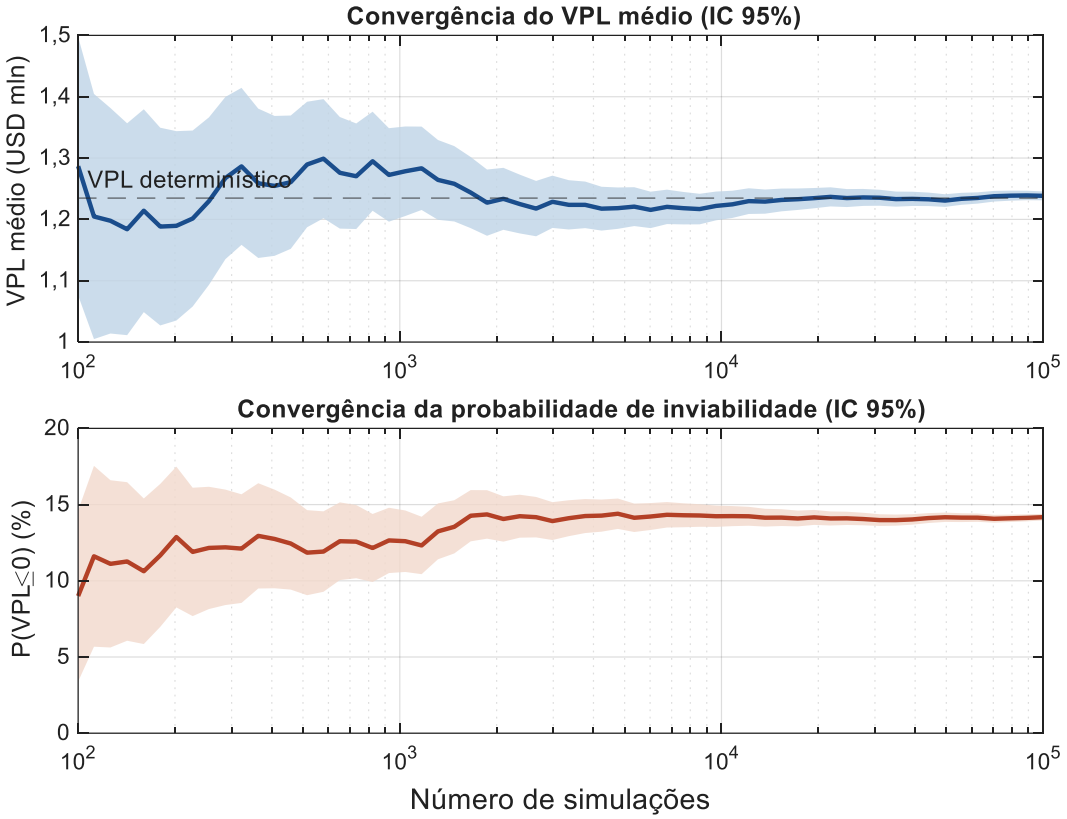


Figura 6. Convergência do VPL médio e da probabilidade de inviabilidade

Fonte: Elaborado pelos autores

Por fim, a Figura 7 hierarquiza as fontes de incerteza pela correlação de Spearman entre cada variável sorteada e o VPL simulado. O preço do diesel domina a formação do risco, seguido do investimento inicial e da movimentação anual; o consumo de diesel ocupa posição intermediária, enquanto o fator de manutenção elétrica, a tarifa de energia elétrica e o consumo elétrico exercem influência marginal.

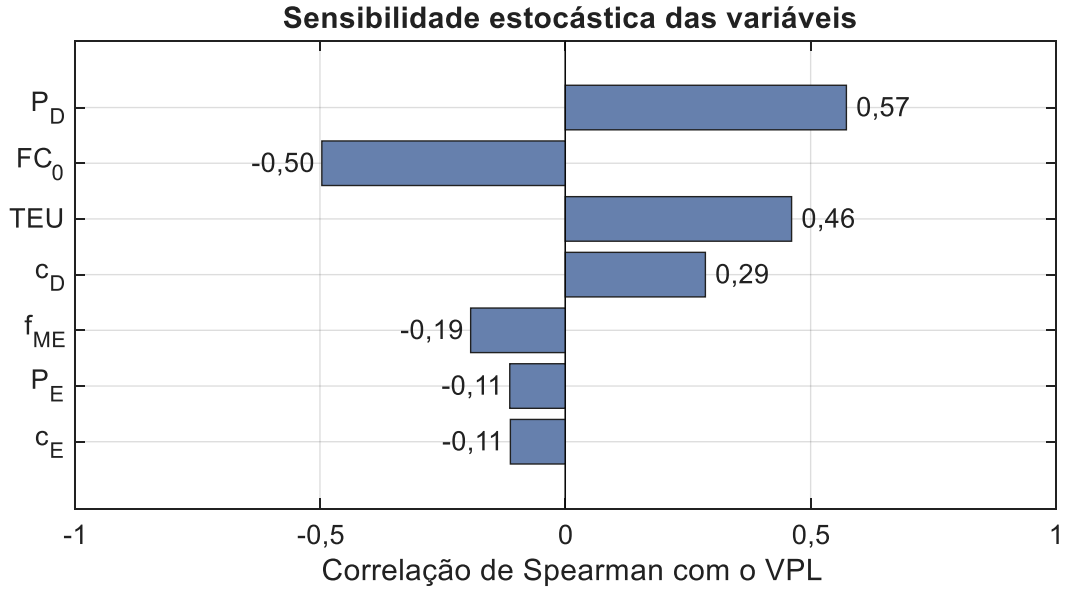


Figura 7. Sensibilidade estocástica das variáveis pela correlação de Spearman

Fonte: Elaborado pelos autores

5 CONCLUSÕES

Este artigo avaliou a viabilidade econômica do *retrofit* elétrico da frota de 21 RTGs de um terminal de contêineres em operação no Brasil por meio da Metodologia Multi-índice Ampliada (MMIA) e da Simulação de Monte Carlo (SMC). Buscou-se avaliar se a eletrificação sustenta-se como decisão de investimento no contexto da matriz elétrica brasileira, predominantemente renovável (EPE, 2025).

Os resultados favorecem a implantação do projeto, mas com qualificações que os indicadores tradicionais não revelariam. A leitura multi-índice ampliada evidenciou retorno adicional modesto, recuperação do capital apenas no terço final do horizonte e índices de riscos no terço superior da escala de percepção, com margens de segurança que se estreitam rapidamente sob variações simultâneas das premissas.

A abordagem estocástica quantificou essa fragilidade, apontando uma probabilidade de inviabilidade econômica de 14,17%, perda média nos cenários desfavoráveis equivalente a 9,1% do investimento médio e concentrou o risco no preço do diesel, no investimento inicial e no volume movimentado, indicando que a gestão do FC_0 e a garantia de volume são os principais pontos de controle gerencial.

Cabe registrar que o modelo captura apenas os efeitos econômicos diretos. Os benefícios ambientais da substituição do diesel por eletricidade de matriz predominantemente renovável (EPE, 2025) podem constituir benefícios não considerados no estudo, cuja incorporação, por precificação de carbono ou exigência regulatória, tenderia a ampliar a atratividade estimada.

O estudo contribui em três planos: no gerencial, oferece ao decisor um *framework* que articula retorno, risco e sensibilidade sob incerteza, em lugar de um indicador isolado; no metodológico, aplica a MMIA estocástica via SMC a um caso real de descarbonização portuária, contexto ainda incipiente nessa literatura; e no campo da gestão de custos, evidencia que a economia com combustível e manutenção sustenta o retorno do *retrofit* no contexto brasileiro, favorecido pelo baixo custo relativo da energia elétrica.

As limitações do estudo decorrem de escolhas simplificadoras assumidas na modelagem: o coeficiente de variação de referência de 10%, pode subestimar a incerteza de variáveis voláteis; a hipótese de independência entre as variáveis desconsidera a possível correlação positiva entre os preços do diesel e da energia elétrica, cuja incorporação tenderia a reduzir a dispersão do VPL, uma vez que os dois preços atuam em lados opostos do FC; a exclusão dos custos e impactos operacionais da implantação atua em sentido oposto, tornando as estimativas de retorno otimistas. Essas limitações definem a agenda natural de continuidade: calibrar as distribuições com séries históricas do terminal e do mercado de combustíveis, modelar a dependência entre os preços dos combustíveis e da eletricidade e incorporar os custos de transição ao FC. Adicionalmente, cabe avaliar o efeito de mecanismos de precificação de carbono sobre a atratividade do *retrofit* e estender a abordagem a outros equipamentos portuários.

REFERÊNCIAS

Ding, Y., Yang, Y., Heilig, L., Lalla-Ruiz, E., & Voss, S. (2021). Deployment and *retrofit* strategy for *rubber-tyred gantry* cranes considering carbon emissions. *Computers & Industrial Engineering, 161*, 107645.

Empresa de Pesquisa Energética (EPE). (2025). *Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024*. Rio de Janeiro: EPE.

International Maritime Organization (IMO). (2020). *Fourth IMO Greenhouse Gas Study 2020*. Londres: IMO.

Lima, J. D. de, Silva, R. da R. da, Dranka, G. G., Ribeiro, M. H. D. M., & Southier, L. F. P. (2024). Introducing *conditional expected loss*: A novel metric for risk investment analysis. *The Engineering Economist*.

Lima, J. D. de, Trentin, M. G., Oliveira, G. A., Batistus, D. R., & Setti, D. (2015). A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects. *International Journal of Engineering Management and Economics, 5*(1/2), 19-34.

Lima, J. D. de, Trentin, M. G., Oliveira, G. A., Batistus, D. R., & Setti, D. (2017). Systematic analysis of economic viability with stochastic approach: A proposal for investment. In M. Amorim, C. Ferreira, M. Vieira Junior, & C. Prado (Orgs.), *Engineering systems and networks: The way ahead for industrial engineering and operations management* (Vol. 10, pp. 317-325). Springer International Publishing.

Martínez-Moya, J., Vazquez-Paja, B., & Gimenez Maldonado, J. A. (2019). Energy efficiency and CO_2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia. *Energy Policy, 131*, 312-319.

Morgan, B. J. P. (1996). RiskMetrics: Technical manual (4th ed.). J.P. Morgan.

Olivari, E., Gurrì, S., Caballini, C., Carotta, T., & Dalla Chiara, B. (2024). Ports go green: A cost-energy analysis applied to a case study on evaluating the electrification of yard tractors. *The Open Transportation Journal, 18*(1).

Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2000). Optimization of conditional value-at-risk. *The Journal of Risk, 2*(3), 21-41.

Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2002). Conditional value-at-risk for general loss distributions. *Journal of Banking & Finance, 26*(7), 1443-1471.

Souza, A., & Clemente, A. (2008). *Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações*. São Paulo: Atlas.

Tang, D., Chen, Z., Zhao, W., Yuan, Y., Yuan, C., Guerrero, J. M., & Zio, E. (2024). Sustainable mega-seaports with integrated multi-energy systems: Life-cycle environmental and economic evaluation. *Journal of Cleaner Production, 476*, 143650.

Wei, D., & Giuliano, G. (2025). Estimating the economic impacts of cargo handling equipment electrification: A case study of the San Pedro Bay ports. *Research in Transportation Business & Management, 59*, 101294.

Yang, Y.-C., & Chang, W.-M. (2013). Impacts of electric rubber-tired gantries on *green port* performance. *Research in Transportation Business & Management, 8*, 67-76.