

Mapeamento e Mitigação de Riscos em Cadeias Logísticas Globais, com Foco em Gargalos como o Congestionamento Portuário e a Subutilização de Contêineres

Mapping and Mitigation of Risks in Global Logistics Chains, Focusing on Bottlenecks such as Port Congestion and Container Underutilization

Autor: Ivan de Matos

Formado em Logística, pelo Centro Universitário Leonardo Da Vinci

Pós-graduado em Administração de Pessoas, pelo Centro Universitário Leonardo da Vinci

Resumo

Este artigo analisa o mapeamento e a mitigação de riscos em cadeias logísticas globais, com ênfase em gargalos recorrentes como **congestionamento portuário, desbalanceamento e subutilização de contêineres, baixa confiabilidade de cronogramas e restrições intermodais** que amplificam o efeito cascata no hinterland. Com base em literatura de **gestão de operações, economia do transporte e resiliência de redes** (UNCTAD, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; SHEFFI, 2015; CHOPRA; MEINDL, 2016; IVANOV; DOLGUI, 2020), propõe-se uma estrutura que integra: (i) **taxonomia de riscos** em portos e corredores; (ii) **métricas** para diagnóstico e priorização (turnaround, dwell time, schedule reliability, container availability, TTS/TTR); (iii) **modelos de propagação** de falhas em rede marítimo-terrestre; e (iv) **estratégias de mitigação** no curto, médio e longo prazos (janelas operacionais, diversificação de gateways, pools de equipamentos, data sharing e contratos com SLAs de contingência). Sustenta-se que a combinação de **modularidade de rede, visibilidade interorganizacional e opcionalidade contratual** reduz a área do “triângulo da resiliência” e melhora a previsibilidade de serviço mesmo sob choques severos.

Palavras-chave: logística global; congestionamento portuário; contêiner; resiliência; risco operacional; intermodal.

Abstract

This paper examines risk mapping and mitigation in global logistics chains, emphasizing recurrent bottlenecks such as **port congestion, container imbalance and underutilization, low schedule reliability, and intermodal constraints** that magnify cascading effects across the hinterland. Drawing on **operations management, transport economics, and network resilience** literatures (UNCTAD, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; SHEFFI, 2015; CHOPRA; MEINDL, 2016; IVANOV; DOLGUI, 2020), we propose a framework integrating: (i) a **taxonomy of risks** in ports and corridors; (ii) **metrics** for diagnosis and prioritization (turnaround, dwell time,

schedule reliability, container availability, TTS/TTR); (iii) **propagation models** in the maritime-land network; and (iv) **mitigation strategies** for the short, medium and long terms (operational time windows, gateway diversification, equipment pools, data sharing and contingency SLAs). We argue that combining **network modularity**, **inter-organizational visibility**, and **contractual optionality** reduces the area of the “resilience triangle” and improves service predictability even under severe shocks.

Keywords: global logistics; port congestion; container; resilience; operational risk; intermodal.

1. Fenomenologia dos gargalos globais: conceitos, causas e dinâmica de propagação

A compreensão rigorosa dos gargalos logísticos globais exige separar **fenômeno**, **mecanismo** e **propagação**. O fenômeno observável, como filas de navios ao largo de gateways, pátios saturados e pranchas reduzidas em terminais, é apenas a face visível de um **descasamento temporal-espacial** entre **capacidade** e **fluxo**. O mecanismo subjacente envolve **ondas de chegada** fora de fase (blank sailings seguidos de bunching), **variação de janelas de atracação**, **baixa produtividade de cais** ou **restrições no hinterland** (rodoviário e ferroviário) que impedem a evacuação do pátio. A propagação emerge quando atrasos portuários deterioram a **schedule reliability** das rotas, comprimem janelas em portos subsequentes e induzem **reprogramações em cascata** nos serviços, com impactos que atingem fábricas, centros de distribuição e varejo a milhares de quilômetros (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; UNCTAD, 2020). Em termos conceituais, trata-se de um sistema **marítimo-terrestre interdependente**, no qual choques locais podem atravessar interfaces e **percolar** por toda a rede (IVANOV; DOLGUI, 2020).

O **congestionamento portuário** possui múltiplas etiologias, frequentemente combinadas. Entre as fontes típicas estão: **surto de demanda** concentrado por janelas promissionais (peak season), **alteração abrupta de rotas** por eventos geopolíticos e climáticos, **insuficiência de berços** e equipamentos (STS, RTG, RMG) para a geração de navios em operação, **mix de carga** que aumenta movimentos por escala (transbordo elevado), **acúmulo de contêineres vazios** por desbalanceamento de comércio e **restrições laborais** que reduzem janelas ou a produtividade marginal (NOTTEBOOM; PALLIS, 2020; CHRISTOPHER, 2016). A estes fatores soma-se a **variância de chegada** provocada por blank sailings e “bunching” deliberado, que, embora racionais para as alianças de armadores, impõem **picos de processamento** aos terminais. O resultado é a elevação do **dwell time** e do **turnaround** por escala, sintetizando em números a perda de capacidade efetiva.

A **subutilização e o desbalanceamento de contêineres** formam outro eixo crítico. Em mercados desequilibrados, fluxos de exportação e importação não se compensam, gerando excedente de vazios num sentido e **escassez** no outro, o que intensifica **reposicionamentos não produtivos** e acentua **custos logísticos de oportunidade** (UNCTAD, 2020). Essa dinâmica torna-se explosiva

quando há **restrições de espaço** em navios e **tarifação dinâmica** de frete baseada em confiabilidade, já que armadores priorizam rotas e clientes com **menor risco de detenção**. Do ponto de vista de rede, a baixa disponibilidade de equipamentos em nós de origem destrói **elasticidade operacional**, mesmo na presença de capacidade de navios, ampliando o **tempo para sobreviver** (TTS) e o **tempo para recuperar** (TTR) dos embarcadores (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008; SHEFFI, 2015).

A **baixa confiabilidade de cronogramas** (“schedule reliability”) atua como multiplicador de risco. Quando serviços chegam com atrasos sistemáticos e imprevisíveis, os **buffers planejados** nos pátios e na fábrica passam a ser consumidos por **incerteza de lead time**, e o sistema entra em **modo reativo**, com remarcações, rolagens e perdas de janela que podem impor **custos de ruptura** muito superiores aos de frete. Evidências setoriais mostram que quedas prolongadas de confiabilidade corrompem **planejamento S&OP/S&OE**, geram **efeito chicote** na demanda por transporte terrestre e exportam instabilidade para **cadeias de suprimento internas** (CHOPRA; MEINDL, 2016; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021). Em linguagem de resiliência, a dispersão do lead time reduz a **previsibilidade** e aumenta a **área do triângulo da resiliência** após cada choque (SHEFFI, 2015).

A **intermodalidade** converte-se em gargalo quando as **interfaces porto–rodovia–ferrovia** não têm capacidade sincronizada. Mesmo que o terminal atinja boa produtividade de cais, a **evacuação do pátio** pode ser limitada por **janelas de gate**, **escassez de motoristas**, **restrições urbanas** e **slot ferroviário** insuficiente. Isso induz **spillback**: o pátio cheio trava o cais, e o cais lento retroalimenta a fila de navios, num laço de reforço que só se desfaz com **desacoplamento** (estoques pulmão externos, off-dock) ou **redistribuição de fluxos** para gateways alternativos (CHRISTOPHER, 2016). Assim, gargalos portuários não são apenas portuários: são **sistêmicos**, e requerem leitura integrada do **corredor logístico**.

O **hinterland** não é um plano neutro: a geografia econômica concentra demanda em poucos corredores, criando **hubs de alta centralidade** cuja falha provoca perdas desproporcionais (RODRIGUE, 2020). Em redes **hub-and-spoke**, a eficiência em regime normal é acompanhada de **vulnerabilidade dirigida** a ataques e eventos localizados; já topologias mais distribuídas perdem eficiência média, mas apresentam **maior tolerância a falhas** aleatórias (IVANOV; DOLGUI, 2020). Políticas de **gateways múltiplos**, **portos secos (inland ports)** e **terminais retroportuários** reduzem centralidade e encurtam as **distâncias logísticas efetivas**, viabilizando **reroteamento** com menor perda de serviço. Essa reconfiguração, contudo, depende de **padrões e acordos interorganizacionais** que habilitem substituição **plug-and-play**.

O tempo, finalmente, é **barreira ao comércio**: atrasos elevam **custos generalizados** além do frete, deteriorando valor presente de vendas, penalizando produtos **time-sensitive** e amplificando a **incerteza de entrega** percebida pelo cliente (HUMMELS, 2001). Em cadeias just-in-time, horas perdidas no cais ou no pátio multiplicam custos na fábrica e na loja; em cadeias com inventário estratégico, atrasos comprimem **cobertura** e elevam **estoques de segurança** necessários,

imobilizando capital. A resiliência, nessa ótica, não se mede apenas em **TEUs processados**, mas em **tempo de serviço preservado** e **margem evitada** por ruptura, conectando métricas operacionais a impacto econômico (SHEFFI, 2015; CHOPRA; MEINDL, 2016).

Além dos fatores físicos, a **governança** das alianças de armadores e a **precificação dinâmica** afetam diretamente o risco de gargalos. A coordenação de navios em consórcios define **padrões de escala** e **sequenciamento de portos** que podem concentrar chamadas e pressionar janelas; por outro lado, arranjos contratuais de **capacidade mínima garantida**, **opções de slot** e **políticas de rolagem** impactam quem recebe serviço em crise. Para embarcadores, o desenho ótimo envolve **portfólio de companhias**, **janelas plurais** e **cláusulas de contingência** que preservem opcionalidade sem pulverizar demais o poder de barganha (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; TANG, 2006). É a tradução logística do trade-off entre **controle** e **opções reais**.

Por fim, a fenomenologia dos gargalos aponta para três **alavancas de mitigação** a serem desenvolvidas nos itens seguintes: **(i)** redesenho de **arquitetura** (modularidade, gateways múltiplos, desacoplamento intermodal); **(ii)** elevação de **visibilidade e confiabilidade** (dados compartilhados, PCS/TMS/EDI, torres de controle, métricas TTS/TTR e schedule reliability); e **(iii)** **opcionalidade econômica e contratual** (pools de contêineres, contratos com SLAs de crise, opções de capacidade e políticas de reposicionamento proativas). A literatura recente converge em que resiliência logística não é produto de uma única intervenção, mas de **portfólios coerentes** que combinem intervenções estruturais, informacionais e contratuais, calibradas ao perfil de risco do corredor e ao apetite financeiro do embarcador (UNCTAD, 2020; IVANOV; DOLGUI, 2020; SHEFFI, 2015).

2. Taxonomia de riscos e método de mapeamento

A construção de uma taxonomia útil para mapeamento de riscos em cadeias logísticas globais começa por distinguir **onde** o risco se manifesta (nós, arestas e interfaces), **como** ele se materializa (capacidade, tempo, qualidade, custo, conformidade) e **o que** o alimenta (determinantes físicos, institucionais e comportamentais). Em redes marítimo-terrestres, os **nós** incluem terminais, pátios retroportuários, portos secos e hubs de distribuição; as **arestas** abrangem trechos oceânicos, cabotagem, ferrovias, rodovias e dutos; e as **interfaces** são as passagens porto-rodovia, porto-ferrovia e porto-zona aduaneira, onde latências se amplificam (Notteboom; Rodrigue; Pallis, 2019; UNCTAD, 2020). Em cada categoria, o risco pode ser **estrutural** (capacidade instalada inadequada), **operacional** (produtividade abaixo do previsto), **informacional** (baixa visibilidade e previsibilidade) ou **institucional** (regras, greves, inspeções), e sua severidade combina **probabilidade, impacto e possibilidade de detecção**. Essa estrutura torna comparável o que, na prática, é heterogêneo, e permite vincular fontes de risco a **mecanismos de propagação** em cascata dentro da rede intermodal (Ivanov; Dolgui, 2020).

No nível dos **nós portuários**, os riscos típicos abrangem **berço, pátio e gate/hinterland**. Em berço, falhas de equipamentos STS/RTG/RMG, limitações de calado e **janelas de atracação**

comprimidas reduzem movimentos por hora e elevam **vessel turnaround**; no pátio, altas **taxas de ocupação**, mix de transbordo e empilhamento ineficiente alongam **dwell time**; no gate, **tempo de ciclo de caminhões**, **adesão a agendamentos** e restrições urbanas interferem na vazão (World Bank, 2020; Notteboom; Pallis, 2020). A **resiliência** desses nós depende tanto da engenharia (layout, equipamentos redundantes) quanto da governança (PCS, janelas colaborativas, priorização por SLA), pois a produtividade de cais é rapidamente anulada se **pátio** e **hinterland** não absorvem o fluxo (Christopher, 2016). Em choques, a **saturação do pátio** cria *spillback*: os navios esperam mais, comprimem cronogramas seguintes e exportam instabilidade.

Nas **arestas** oceânicas e terrestres, os riscos concentram-se em **confiabilidade de cronograma** e **capacidade efetiva**. No oceânico, **blank sailings**, “bunching” e reconfigurações de rotas por gargalos (Suez, Panamá, estreitos) deslocam janelas e reduzem a **schedule reliability**, medida crítica para embarcadores que dependem de lead times previsíveis (Sea-Intelligence, 2021; Notteboom; Rodrigue, 2021). No terrestre, **restrições ferroviárias** (slots, bitola, formação de trens) e **escassez de motoristas** ou chassis geram **filas de transferência** que estendem o tempo porta-a-porta (OECD/ITF, 2016). Como a rede é interdependente, **pequenas variações** nessas arestas podem multiplicar atrasos se **pontos de desacoplamento** (estoques pulmão, portos secos) não estiverem dimensionados para absorver a variância (Ivanov; Dolgui, 2020).

O **equipamento contêiner** constitui uma classe específica de risco que mistura física e economia. **Desbalanceamento geográfico** de comércio cria **excesso de vazios** em regiões e **escassez** em outras; a resposta usual — **reposicionamento não produtivo** — consome capacidade, encarece fretes e, quando mal temporizado, agrava **subutilização** em corredores (UNCTAD, 2020). Nos picos, **políticas de detenção/demurrage** e **alocação preferencial de slots** por armadores induzem seleção adversa entre clientes, elevando riscos de **rolagem** para demandantes com maior variabilidade (Drewry, 2021). Para mitigar, é preciso **governança de pools de equipamentos**, **contratos de reposicionamento** com incentivos corretos e **padronização** de contêineres e chassis que permita **substituibilidade** sem requalificações custosas (Clarksons Research, 2021; Christopher, 2016).

Os **riscos institucionais e regulatórios** permeiam todo o sistema: **aduanas e anuências** (sanitária, fitossanitária), regras de **priorização de cargas**, **restrições trabalhistas** e **políticas de acesso urbano** podem, isoladamente, **dominar** a capacidade física. Portos com **governança fragmentada** entre autoridade, operadores, terminais e órgãos públicos tendem a **respostas descoordenadas** em crise, sobretudo quando **sistemas de comunidade portuária (PCS)** não estão consolidados (Haralambides, 2019; IAPH, 2020). A integração regulatória, com **janelas únicas digitais**, e a **transparência de filas** via PCS reduzem assimetria informacional e **tempo morto**, mas dependem de **padrões de dados** e **acordos de partilha** previamente construídos (OECD/ITF, 2016).

Do lado da **demanda**, a **sazonalidade** (safras, *peak season*, feriados) e **shocks de consumo** (como no e-commerce) geram **ondas** que, se sincronizadas com restrições de oferta, resultam em congestionamento de cauda longa. A **propagação bullwhip**, bem documentada em cadeias

industriais, manifesta-se na logística marítima como **picos de chegada** seguidos de janelas vazias, corrompendo o uso de ativos e criando **ineficiências cíclicas** (Chopra; Meindl, 2016). Em setores *time-sensitive*, horas perdidas multiplicam **custos generalizados** e **penalidades** a jusante, reforçando a necessidade de **buffers estruturais** (gateways alternativos) e **contratos com opcionalidade** para realocar fluxo (Hummels, 2001; Sheffi, 2015).

O **método de mapeamento** recomendado combina três camadas: **(i) cartografia de rede** com nós, arestas, interfaces e **tiers de fornecedores logísticos**; **(ii) value stream mapping temporal** (lead time, variação, filas, *handovers*); e **(iii) análise de criticidade** por probabilidade/impacto/detecção. Ferramentalmente, integra-se **dados AIS, TOS e PCS** a painéis de **visibilidade** que revelam **acúmulos e variações**, enquanto **entrevistas estruturadas** com operadores capturam riscos tácitos (Ivanov; Dolgui, 2020; World Bank, 2020). O produto é um **mapa de risco** com **donos, SLAs e gatilhos** de contingência, que alimenta decisões de **desacoplamento e diversificação de gateways** antes que a crise ocorra.

Essa abordagem ganha potência quando acoplada a **gêmeos digitais** do corredor, simulando **propagação de atrasos** por diferentes perfis de chegada e restrições de capacidade. Com um gêmeo, avalia-se quão sensível é o **dwell time** a pequenas quedas de produtividade, quais **gates** saturam primeiro e quanto **estoque externo** é necessário para evitar *spillback* em pátio (Ivanov; Dolgui, 2020). Ao lado, **barômetros econômicos portuários** — como os compilados pela IAPH durante a pandemia — alimentam o gêmeo com dados reais de **demanda e produtividade**, permitindo calibrar políticas de **agendamento, janelas prioritárias e rotas alternativas** com realismo (IAPH, 2020).

Por fim, o mapeamento precisa virar **governança: registro de riscos** versionado, **heatmaps** por nó/aresta, **donos** com metas de **TTS/TTR, rituais S&OP/S&OE** que incorporem métricas logísticas e **acordos interorganizacionais** para partilha de dados. Sem governança, o mapa vira mural decorativo; com governança, ele orienta **investimento** (berços, pátios, PCS), **contratação** (SLA e cláusulas de contingência) e **operações** (priorização, buffers, reroteamento), reduzindo a **área do triângulo da resiliência** e a **incerteza percebida** pelo cliente final (ISO 22301, 2019; Christopher, 2016).

3. Métricas de diagnóstico e priorização (turnaround, dwell, confiabilidade, contêiner e TTS/TTR)

A mensuração da saúde logística começa pelo **ciclo do navio** e **ciclo do contêiner** nos portos. **Vessel turnaround** capta o tempo de escala, do *pilot on board* ao *pilot off*, integrando **produtividade de cais, restrições de berço e coordenação de rebocadores/ práticos; dwell time** mede a permanência do contêiner no terminal, expondo **ineficiências de pátio, gate e documentais** (World Bank, 2020; Notteboom; Pallis, 2020). Esses indicadores, quando desagregados por **janela, tipo de carga e serviço** (transbordo vs. origem/destino), permitem

identificar **pontos de desacoplamento** subdimensionados e **padrões de saturação**. A priorização de investimentos e políticas operacionais deve usar **curvas de resposta** que mostrem quanto **MTTR** logístico cai quando se eleva produtividade de cais ou se expande pátio, evitando soluções de alto custo para ganhos marginais (Christopher, 2016).

A **confiabilidade de cronogramas** (*schedule reliability*) é métrica-chave para embarcadores, pois transforma variação marítima em **incerteza industrial**. Relatórios setoriais mostram que, em choques, a confiabilidade pode cair a patamares históricos, tornando **buffers** planejados insuficientes e aumentando **rolagens** e **rebookings** (Sea-Intelligence, 2021; Notteboom; Rodrigue, 2021). A análise deve ir além do percentual de “on-time”: é crucial observar **janelas de atraso**, **dispersão** e **persistência do erro**, porque **desvios sistemáticos** demandam **redesenho de SLAs** e **portfólios de armadores**. Em priorização, serviços com **baixa variância** merecem **cargas críticas**; serviços com **alto desvio** exigem **gateways alternativos** ou **estoques pulmão** adicionais (Sheffi, 2015).

O **ciclo do contêiner** oferece indicadores preditivos de gargalo. **Turn time de caixa**, **índice de disponibilidade** e **taxa de reposicionamento vazio** sinalizam **subutilização** e **desbalanceamento**: tempos crescentes e índices decrescentes em regiões de origem indicam **escassez** emergente; o inverso sugere **acúmulo ineficiente** (UNCTAD, 2020). Em mercados com dados, o **split full/empty**, **padrões de detenção** e **retenção média por cliente** antecipam tensões; na ausência de visibilidade, proxies como **ocupação de pátio** e **lead time de booking** ajudam a construir **alertas**. Para priorizar mitigação, roteiros que **reduzem reposicionamento não produtivo** (por pools, *match-back* e triangulação) elevam **utilização efetiva** e liberam capacidade para carga produtiva (Drewry, 2021; Clarksons Research, 2021).

No **hinterland**, métricas de **truck turn time**, **adesão a agendamento**, **no-show** e **slot ferroviário utilizado/planejado** determinam a vazão porta-a-porta. Quando **turn times** e *appointment adherence* se deterioram, o **spillback** para o pátio é previsível, elevando **dwelling** e comprimindo **produtividade de cais**; nas ferrovias, a relação **slot usado/planejado** e a **pontualidade** sinalizam gargalos upstream (OECD/ITF, 2016). Para priorizar, corredores com **baixa confiabilidade intermodal** devem receber **buffers temporais** e **políticas de gate estendidas** em picos, enquanto **terminais retroportuários** e **portos secos** funcionam como **desacopladores** que reduzem ocupação de pátio e tornam o sistema menos sensível a variações de porta de saída (Christopher, 2016; Notteboom; Pallis, 2020).

A **métrica de resiliência** por excelência é a dupla **TTS/TTR** — **Time-to-Survive** e **Time-to-Recover** — aplicada ao corredor e suas variantes por nó/aresta. **TTS** estima por quanto tempo o sistema mantém **nível de serviço mínimo** com estoques/capacidade existentes quando um choque interrompe um elo; **TTR** mede o tempo até retornar ao patamar-meta após mitigação (Simchi-Levi; Kaminsky; Simchi-Levi, 2008; Sheffi, 2015). A combinação informa **dimensionamento de estoques pulmão**, **necessidade de gateways alternativos** e **poder de barganha** em contratos

(opções de capacidade, *take-or-pay* flexível). Em priorização, investimentos com **maior redução de TTR** por unidade de capital devem liderar o portfólio de mitigação.

Para conectar operação e finanças, convém medir **demurrage/detention, frete prêmio, perdas por ruptura** (pedidos cancelados, *lost sales*) e **área do triângulo da resiliência** (queda de desempenho × duração) na moeda do negócio. Essa tradução mostra que **minutos** no cais podem virar **milhões** na loja, e legítima **capex** em pátio, **Sistemas de Comunidade Portuária** e **acordos contratuais** com opcionalidade (Christopher, 2016). Em governança, **Operational VaR** e **Expected Shortfall** aplicados a indicadores de serviço capturam as **caudas** de perda em choques e ajudam a desenhar **limites de risco** por corredor, produto e cliente (Ponomarov; Holcomb, 2009).

A **qualidade dos dados** é condição de possibilidade para todas as métricas. Sem **dicionário comum, granularidade, latência** e **regras de reconciliação** (TOS ↔ PCS ↔ WMS/TMS), indicadores tornam-se **não comparáveis** entre terminais e ao longo do tempo. **APIs seguras** e **padrões de troca** (EDI/EDIFACT, ANSI X12, APIs REST) devem ser definidos no **contrato** para garantir **visibilidade interorganizacional** e **auditoria**; durante a pandemia, portos com PCS maduros e **barômetros de atividade** responderam melhor à volatilidade (IAPH, 2020; OECD/ITF, 2016). Como regra de priorização, **dados que alimentam decisões de gatilho** (ex.: mudar gateway quando *schedule reliability* cai abaixo de X%) merecem investimento preferencial.

Por fim, as métricas precisam entrar no **ciclo decisório**. **Torres de controle** devem exibir **OTIF marítimo-terrestre, turnaround/dwell** por serviço, **confiabilidade por aliança, disponibilidade de contêiner** e **KRIs intermodais**, com **limiares de gatilho** que ativam *playbooks* (janelas estendidas, priorização de cargas críticas, *split* por gateway). **Gêmeos digitais** integram essas métricas em **simulações de stress** para selecionar medidas com melhor **relação impacto/custo**. O resultado esperado é reduzir a **área do triângulo da resiliência** e estabilizar **previsibilidade de serviço**, condição necessária para cadeias enxutas que, entretanto, precisam sobreviver em um mundo de **choques recorrentes** (Ivanov; Dolgui, 2020; World Bank, 2020; Sea-Intelligence, 2021).

4. Modelos de propagação em rede: percolação, filas e efeitos de encadeamento entre o mar e o hinterland

A dinâmica de propagação de distúrbios logísticos em cadeias globais pode ser formalizada combinando **ciência de redes** (estrutura e centralidades), **teoria de filas** (formação e dissipação de backlog) e **modelos de percolação** (limiares de conectividade), compondo um arcabouço capaz de explicar por que pequenas perturbações em um nó portuário resultam em **grandes perdas sistêmicas** a jusante. Em termos estruturais, redes **scale-free** maximizam eficiência em regime estável, mas exibem **vulnerabilidade dirigida** a falhas em hubs de alta **betweenness**, condição típica de cadeias com poucos gateways oceânicos e corredores terrestres concentrados (Ivanov; Dolgui, 2020). Do lado dinâmico, a fila em cada elo cresce quando a **taxa de chegada** supera, ainda que marginalmente, a **taxa de serviço**, elevando o tempo médio de permanência por **Lei de**

Little, e exportando atraso às arestas adjacentes (Chopra; Meindl, 2016). Essa combinação topológica e estocástica torna plausível que um choque local — queda de produtividade de cais ou janela perdida — **percole** por várias regiões, mesmo sem aumento global de demanda (Notteboom; Rodrigue, 2021).

O primeiro mecanismo de encadeamento ocorre no **mar** via **schedule reliability**: atrasos em um porto comprimem janelas nos seguintes, exigindo **replanejamento** da rotação e provocando **bunching** de escalas que sobrecarrega janelas de operação e rebocadores/práticos (Sea-Intelligence, 2021). Quando o serviço não absorve o atraso ao custo de velocidade (limites de consumo de bunker e emissões), transfere a “dívida de tempo” para os próximos nós, criando **mini-picos** que estouram a **capacidade efetiva** de cais e pátio. O segundo mecanismo dá-se no **pátio**: ele vira **acumulador de variância** quando caminhões e trens não evacuam contêineres na mesma cadência, gerando **spillback** para o cais e, em seguida, para a rada, onde filas de navios se formam (World Bank, 2020). O terceiro mecanismo, no **hinterland**, aparece quando slots ferroviários ou janelas urbanas restringem a vazão, conservando o atraso na forma de **estoque imobilizado e tempo morto** (OECD/ITF, 2016). Esses três mecanismos interagem, gerando **loops de reforço**.

Um elemento central nos modelos é o **acoplamento temporal** entre nós. Mesmo pequenas flutuações de chegada, quando **correlacionadas** por estratégias das alianças (blank sailings seguidos de bunching) ou por eventos climáticos, aumentam a probabilidade de atravessar o **limiar de percolação**, no qual múltiplos nós simultaneamente operam acima de $\rho \approx 1$ (utilização próxima ou acima de 100%) e deixam de dissipar filas (Notteboom; Pallis, 2020). Nessa fase, os **decoupling points** — estoques pulmão, portos secos, pátios off-dock — agem como **diques** que absorvem parte do excesso, reduzindo a chance de **conectividade total** do atraso. Quando inexistem ou estão subdimensionados, a rede entra em **regime crítico**: backlog cresce **superlinearmente** e a recuperação exige **choques negativos** de chegada (janelas estendidas, desvio de navios) para voltar ao regime estável (Ivanov; Dolgui, 2020).

Na representação por **filas interconectadas**, cada elo é um servidor com distribuição de chegadas e tempos de serviço; o acoplamento entre servidores ocorre por **buffers compartilhados** (pátio), **janelas temporais** (gate/slot ferroviário) e **prioridades** (carga refrigerada, perecível). Uma queda de **produtividade de guindastes** reduz a taxa de serviço de cais, aumentando a fila de navios e o backlog em pátio; simultaneamente, a **incerteza de chegada** dos serviços piora, elevando **variância** nos demais nós. Em termos de controle, **disciplinas de atendimento** (priorização por SLA, por cronograma, por tipo de carga) alteram a distribuição do atraso e o **tempo médio de espera** por classe, com impacto direto em indicadores de **OTIF** e **demurrage/detention** (Chopra; Meindl, 2016). A calibragem ótima dessas disciplinas é específica de cada corredor e depende do **perfil de risco** e do **valor do tempo** setorial (Hummels, 2001).

No **marítimo-terrestre acoplado**, a modelagem por **eventos discretos** (DES) captura com precisão as dependências entre cais, pátio, gate e hinterland, permitindo testar **políticas de agendamento, tamanhos de pilha, táticas de empilhamento** (yard stacking), **ventilação de**

janelas e gate extended hours. Para fenômenos de **comportamento adaptativo** — replanejamento de armadores, decisões de motoristas, priorizações de terminais —, modelos **baseados em agentes (ABM)** reproduzem melhor as não linearidades e feedbacks (Ivanov; Dolgui, 2020). Em ambos, incluir **regras de decisão realistas** (ex.: rolagem quando atraso $>\Delta$, prioridade para exportações com *cut-off* crítico) evita “ótimos de laboratório” e aproxima a análise da **política operacional** efetiva.

A **geografia** entra no modelo via **custos de desvio e restrições modais**. Desviar um navio para um gateway alternativo reduz atraso de atracação, mas transfere custos ao hinterland — maior distância rodoviária/ferroviária, janelas urbanas não compatíveis, **capacidade de armazenagem** limitada — que podem **anular** o benefício líquido. As métricas de **TTS/TTR** do corredor ajudam a decidir **quando** um desvio é racional: se o TTR no gateway primário excede o **tempo de sobrevivência** com estoques e capacidade local, o desvio ganha atratividade mesmo com custo terrestre adicional (Simchi-Levi; Kaminsky; Simchi-Levi, 2008). A decisão ótima, portanto, equilibra **tempo de recuperação** sistêmico e **custo total**.

A **disponibilidade de contêineres** agrega uma dimensão própria à propagação. Quando o **turn time** de caixas aumenta e **match-backs** ou **triangulações** não são possíveis, as cadeias ficam reféns de **reposicionamentos não produtivos** que competem por slots com carga pagante, ampliando **fretes prêmio e seleção adversa** (UNCTAD, 2020). Em termos de rede, a **ausência de caixas** em pontos de origem funciona como **quebra de aresta**, impedindo o fluxo mesmo com navios e janelas disponíveis. Nesses casos, **pools interorganizacionais** e **acordos de box interchange** reduzem a chance de colapso, atuando como **redundância estrutural** de equipamento (Drewry, 2021).

O **componente informacional** é transversal: **baixa visibilidade** de ETA/ETD, filas e disponibilidade de equipamento **retarda** decisões de desvio e **piora** a alocação de recursos. Portos com **Port Community Systems (PCS)** consolidados reagiram melhor a choques por reduzir **assimetria informacional** e **latência decisória**, permitindo que escalas, gates e trens fossem **recalibrados** com antecedência (IAPH, 2020; World Bank, 2020). Em termos de modelo, **atrasos de informação** atuam como **lags** que deslocam o sistema para trajetórias subótimas, ampliando a área do **triângulo da resiliência** (Sheffi, 2015).

Por fim, a **medida de sucesso** dos modelos não é sua elegância, mas sua capacidade de **informar decisões**: dimensionar **buffers** (pátio, off-dock, estoques clientes), escolher **disciplinas de prioridade** por valor de tempo, definir **gatilhos de desvio** de navios e contêineres, e calibrar **contratos** (SLAs, opções de capacidade, políticas de demurrage/detention). Quando ancorados em dados AIS/TOS/PCS e validados com **barômetros portuários** e **painéis intermodais**, esses modelos mudam a conversa de “culpa” para **engenharia de resiliência**, elevando previsibilidade em ecossistemas complexos (Notteboom; Rodrigue, 2021; OECD/ITF, 2016; Ivanov; Dolgui, 2020).

5. Estratégias de mitigação: curto, médio e longo prazos em arquitetura, dados e contratos

No **curto prazo**, a mitigação prioriza **táticas operacionais** que aumentam a **taxa de serviço** efetiva e reduzem a **variância** sem demandar grandes obras. Em cais e pátio, destacam-se: **janelas estendidas** com turnos adicionais; **redistribuição de guindastes** por navio conforme mix de baías; **rearranjo de pilhas** (yard re-slotting) para encurtar movimentos; e **priorização por SLA/valor de tempo** (perecíveis, farmacêuticos, cargas críticas) (World Bank, 2020). No gate, **agendamento dinâmico** com penalidades por **no-show** e incentivos a **janelas de vale** suaviza picos, enquanto **balcões digitais** e **pré-despacho** reduzem **tempo documental** (OECD/ITF, 2016). No hinterland, **trens adicionais** e **janelas ferroviárias temporárias** ajudam a evacuar pátios, desde que haja **coordenação fina** com terminais e operadores. Essas medidas comprimem **backlog** e devolvem o sistema abaixo do limiar de percolação (Sea-Intelligence, 2021).

Ainda no curto prazo, políticas voltadas ao **equipamento contêiner** incluem: **triangulação e match-back** para reduzir reposicionamentos vazios; **isenção seletiva de demurrage/detention** quando a causa raiz é gargalo do terminal e não comportamento do cliente; e **priorização de caixas escassas** para **commodities time-sensitive** (UNCTAD, 2020). **Pools interorganizacionais** e **intercâmbio de caixas** entre armadores, negociados sob governança neutra, aumentam elasticidade e **reduzem ineficiências de inventário** de equipamento (Drewry, 2021). Para embarcadores, **bookings redundantes condicionados** em serviços distintos — quando contratualmente viável — funcionam como **opções reais** de escoamento, mitigando risco de rolagem.

No **médio prazo**, o foco desloca-se para **desacoplamento estrutural** e **diversificação de gateways**. **Portos secos** e **terminais retroportuários** próximos a clusters industriais funcionam como **buffers fora da cerca**, aliviando o pátio principal e encurtando o **tempo de giro** de caminhões; **inland depots** com **desembarço aduaneiro** antecipado diminuem **tempo documental** no terminal. Em paralelo, **estratégias multi-gateway** introduzem **redundância geográfica real** — não colinear — permitindo **desvios** com custo total competitivo quando o gateway primário degrada (Christopher, 2016; Notteboom; Pallis, 2020). A chave é **padronização** de embalagens, etiquetagem e processos para que a substituição seja **plug-and-play**, evitando requalificações onerosas durante a crise.

Também no médio prazo, **torres de controle** interorganizacionais e **Port Community Systems** robustos tornam-se multiplicadores de força. Ao integrar **AIS/ETA**, **TOS**, **WMS/TMS**, **slots ferroviários** e **janelas de gate** em **painéis unificados**, a rede ganha **consciência situacional** e pode ativar **playbooks** com **gatilhos** claros (ex.: abrir janelas extras quando $dwell > \Delta$; mover serviços para gateway B quando $schedule\ reliability < A$) (IAPH, 2020; World Bank, 2020). **APIs seguras** e **dicionários de dados** comuns viabilizam **compartilhamento seletivo** de informações sensíveis (capacidade, filas) sem expor estratégia competitiva, reduzindo **latência decisória** e **ruído** entre parceiros (OECD/ITF, 2016).

No **longo prazo**, a mitigação implica **investimento em capacidade e flexibilidade**: **novos berços** e **guindastes** compatíveis com navios maiores; **automação seletiva** em pátio; **expansão ferroviária** e corredores dedicados; e **zonas logísticas** para **off-dock** e **inland ports**. Entretanto, a lição da resiliência é evitar criar **capacidade rígida** que permaneça ociosa fora de crises; por isso, adota-se uma lógica de **modularidade expansível** (fases), **design para manutenção e reaproveitamento multiuso** de áreas e equipamentos (Ivanov; Dolgui, 2020). No domínio regulatório, **janelas únicas digitais** (single window) e **harmonização de anuências** reduzem incerteza crônica e fazem **capacidade administrativa** acompanhar a física (Haralambides, 2019).

A **dimensão contratual** é transversal. Para armadores e operadores, **SLAs de contingência** com **níveis mínimos de serviço**, **opções de capacidade** e **cláusulas de *force majeure*** calibradas alinham incentivos e evitam disputas no auge da crise. Para embarcadores, **portfólios de companhias** e **contratos híbridos** (parte a preço fixo, parte indexada à confiabilidade) criam **opcionalidade** sem pulverizar completamente o poder de barganha (Notteboom; Rodrigue, 2021). Em equipamento, **acordos de *box sharing*** e **pools neutros** reduzem a probabilidade de **quebra por falta de caixa** em origens críticas. Em todas as frentes, **mecanismos de *gain-sharing*** vinculam benefícios de resiliência (redução de TTR, queda de demurrage) ao retorno econômico dos parceiros.

A **avaliação econômica** das medidas deve ir além de “custo por TEU”. O critério é **perda evitada** e **tempo de recuperação** por unidade de capital, medidos pela redução da **área do triângulo da resiliência** e do **Operational VaR** do corredor (Sheffi, 2015; Ponomarov; Holcomb, 2009). **Gêmeos digitais** permitem comparar carteiras de mitigação (mais janelas vs. pátio off-dock vs. desvio multi-gateway) sob diferentes perfis de chegada e restrições modais, exibindo **fronteiras eficientes** de resiliência. Essa abordagem revela que **combinações** — um pouco de capacidade física, um pouco de dados, um pouco de opcionalidade — costumam dominar **soluções únicas**.

Por fim, a **governança** assegura que mitigação não seja episódica. **Comitês de resiliência** com operadores, autoridade portuária, armadores, ferroviárias, rodoviários e embarcadores definem **metas TTS/TTR**, **limiares de gatilho**, **planos de contingência** e **auditorias** periódicas. **Exercícios de mesa** e **simulações** treinam as equipes para decisões sob pressão, enquanto **AARs** transformam incidentes em melhorias permanentes. A cultura desejada é a de **prevenção pró-ativa** e **aprendizagem contínua**, na qual a discussão deixa de ser “quem causou o gargalo?” e passa a ser “como configuramos a rede, os dados e os contratos para que, da próxima vez, **o choque perca energia** antes de virar crise?” (IAPH, 2020; Christopher, 2016; Ivanov; Dolgui, 2020).

6. Arquiteturas contratuais, incentivos e opcionalidade econômica (SLAs, reservas de capacidade, demurrage/detention e *box pools*)

A arquitetura contratual que estrutura relações entre armadores, terminais, operadores terrestres e embarcadores é um determinante direto do risco logístico, porque define **direitos de prioridade**, **regras de alocação** em crise e **mecanismos de compensação** por serviço degradado. Em

ambientes de congestionamento portuário, contratos tradicionais baseados apenas em volume e tarifa mostram-se insuficientes para proteger **níveis de serviço** quando a **confiabilidade de cronograma** cai e a **variação de chegada** sobe; torna-se necessário incorporar **SLAs de contingência** com métricas como **turnaround**, **dwell time**, **rolagem máxima aceitável** e **janelas de atraso**, além de **gatilhos** explícitos que ativem planos de desvio, janelas estendidas e priorização por criticidade de carga (Sea-Intelligence, 2021; World Bank, 2020). Esses SLAs devem ser acompanhados de **mecanismos de auditoria de dados**(PCS/TOS) e de **cláusulas de transparência** sobre filas e disponibilidade de equipamento, pois a assimetria informacional é uma das fontes de perdas evitáveis no auge do gargalo (IAPH, 2020; OECD/ITF, 2016).

Um segundo pilar é a **opcionalidade contratual** por meio de **reservas de capacidade** e **opções reais**. Em vez de adquirir apenas slots firmes, embarcadores intensivos em tempo podem negociar **opções de capacidade** exercíveis quando **schedule reliability** cai abaixo de um limiar, ou quando **dwell** ultrapassa x horas, criando um **direito de migrar** volume para outro serviço ou gateway sem penalidade acima de um teto previamente definido (Notteboom; Rodrigue, 2021). Na prática, isso equivale a comprar **seguro operacional** embutido no contrato, cujo prêmio é calibrado pela probabilidade de exercício e pelo custo marginal do armador/operação em prover elasticidade. A literatura de **opções reais** sugere que, em ambientes de alta volatilidade, o valor dessa opcionalidade supera o “custo extra médio” percebido, sobretudo quando o **custo de ruptura** em fábrica/loja é muito maior que o **delta de frete**(Christopher, 2016; Chopra; Meindl, 2016).

O terceiro pilar envolve **indexação e gain-sharing**. Em relações de longo prazo, parte do frete pode ser **indexada à confiabilidade** (por exemplo, descontos quando o serviço cai abaixo de $x\%$ “on-time” ou bônus quando excede $y\%$), alinhando incentivos para **redução de variância** e **aceleração de recuperação** (Sea-Intelligence, 2021). De forma simétrica, **ganhos de resiliência** — redução de **TTR** do corredor, queda de **demurrage/detention**, melhora de **OTIF marítimo-terrestre** — podem ser compartilhados entre terminal, armador e embarcador, internalizando externalidades positivas de investimentos em **dados**, **processos** e **buffers estruturais** (IAPH, 2020). Esse *gain-sharing* reduz conflitos durante a crise e incentiva **pré-investimentos colaborativos** em PCS, janelas digitais e portos secos (OECD/ITF, 2016).

No quarto pilar situam-se **políticas de demurrage/detention**. Em contextos de congestionamento sistêmico, aplicar **regras padrão** de cobrança produz **injustiça distributiva** e incentiva comportamentos defensivos (retenção preventiva de caixas, *hoarding*), que **pioram** a disponibilidade de equipamento e alongam filas (UNCTAD, 2020). Políticas **condicionais** — por exemplo, **isenções** quando a causa raiz é **indisponibilidade de gate** ou **janela ferroviária** e **escalonamento** de taxas quando o atraso é endógeno ao embarcador — reduzem incentivos perversos e **liberam caixas** socias. Evidências setoriais indicam que **regras claras e previsíveis** diminuem contencioso e encurtam o **turn time** de contêiner, especialmente quando acopladas a **PCS** que atestem a cadeia causal do atraso (World Bank, 2020; IAPH, 2020).

O quinto pilar são os **pools interorganizacionais de contêineres** e **acordos de *box interchange***. Quando **desbalanceamentos** regionais elevam reposicionamentos vazios e **subutilização** de caixas, **pools neutros** permitem *match-backs* e **triangulações** mais eficientes, reduzindo **slots não produtivos** e **fretes prêmio** (Drewry, 2021; UNCTAD, 2020). A governança desses pools precisa resolver **alocação, responsabilidade por danos, seguros e qualidade mínima**, além de tratar **padronização de chassis e selo de manutenção**, para viabilizar **substituibilidade plug-and-play** sem requalificações caras (Clarksons Research, 2021). Em mercados concentrados, **autoridades portuárias** podem agir como **facilitadoras** de pools, respeitando regras de competição (Haralambides, 2019).

O sexto pilar diz respeito a **cláusulas de desvio (re-routing)** e **priorização de cargas críticas**. Contratos modernos devem explicitar quando e como **desviar navios** para gateways alternativos, quem arca com **custos terrestres incrementais**, e como **prioridades** (farmacêuticos, perecíveis, *supply time-critical*) são atendidas sem paralisar o restante da carteira (Notteboom; Pallis, 2020). O princípio é ancorar a decisão em métricas **TTS/TTR** do corredor e em **limiares de confiabilidade**, para que o desvio não dependa de negociações ad hoc em cada crise (Simchi-Levi; Kaminsky; Simchi-Levi, 2008). Isso exige **torres de controle** interorganizacionais com **dados tempestivos** e direitos de decisão preautorizados (IAPH, 2020).

O sétimo pilar são **cláusulas de dados e auditoria**. Sem **APIs seguras, dicionários métricos e latência acordada** para ETA/ETD, filas e disponibilidade de equipamentos, **SLAs** degeneram em disputa de versões (OECD/ITF, 2016). Contratos devem obrigar **publicação estruturada** de estados operacionais em **PCS**, preservar **confidencialidade competitiva** e permitir **auditoria independente**, sob princípios de **LGPD** e padrões abertos. Portos que codificaram essas cláusulas **antes** da pandemia **responderam melhor** à volatilidade, porque a **visibilidade compartilhada** reduz **tempo de reação** e melhora **alocação de recursos** (IAPH, 2020; World Bank, 2020).

O oitavo pilar é **compliance e antitruste**. Em ambientes de **alianças de armadores e operadores integrados**, contratos que buscam resiliência não podem colidir com regras de **competição; *gain-sharing*, *box pools*** e janelas prioritárias devem ser desenhados com **neutralidade de acesso e não discriminação** (Haralambides, 2019). Ao mesmo tempo, reguladores podem **estimular** padrões mínimos de **interoperabilidade e transparência** que favorecem **resiliência sistêmica**, sem impor modelos únicos que inibam inovação. O fio condutor é equilibrar **eficiência privada** com **estabilidade de ecossistema**.

7. Governança, dados e padronização: Port Community Systems, Janelas Únicas Digitais e torres de controle interorganizacionais

A **governança de dados** é a infraestrutura invisível da resiliência, pois converte sinais dispersos (AIS, TOS, WMS/TMS, gate, slots ferroviários) em **consciência situacional** acionável. **Port Community Systems (PCS)** maduros, com **padrões de dados e APIs abertas**, reduziram

dramaticamente **latência decisória** durante crises, permitindo **recalibrar janelas, ajustar prioridades e redistribuir fluxos** com base em métricas compartilhadas (IAPH, 2020). O desenho institucional do PCS deve garantir **neutralidade e governança multilateral** (autoridade portuária, terminais, armadores, operadores terrestres e embarcadores), preservando **confidencialidade** por camadas e evitando **lock-in** tecnológico em plataformas proprietárias, um risco que aumenta a vulnerabilidade a longo prazo (OECD/ITF, 2016).

As **Janelas Únicas Digitais** (Single Window) integram **aduaana e anuências** (sanitária, fitossanitária, segurança) ao fluxo portuário, atacando **latências documentais** que frequentemente dominam os tempos físicos de operação. Países que consolidaram Single Window **antes** de choques registraram **menor crescimento de dwell time e menor variância de lead time**, efeito atribuído à redução de **retrabalho documental, pre-clearance e melhor sincronização** entre fiscalização e operação (World Bank, 2020). Para além da tecnologia, o *bottleneck* é organizacional: requer **harmonização normativa, acordos de níveis de serviço** entre órgãos e **monitoramento público** de desempenho, sob métricas comparáveis (Haralambides, 2019).

Torres de controle interorganizacionais estendem o PCS para **decisão tática near-real time**. Diferem de dashboards informativos por incorporarem **direitos de decisão preautorizados**: ao cruzar **schedule reliability, ocupação de pátio, truck turn time e disponibilidade de contêiner**, podem **acionar gatilhos** como **janelas estendidas, chamadas prioritizadas, ativação de off-dock e recomendações de desvio** para gateways alternativos (IAPH, 2020; Sea-Intelligence, 2021). Para funcionar, exigem **dicionários métricos, SLA de dados e logs de auditoria** que sustentem accountability e evitem disputas. Em cadeias críticas (farmacêuticos, alimentos), essas torres permitem **priorização ética** em escassez, requisito de legitimidade social (Christopher, 2016).

A **padronização** técnica é o cimento da interoperabilidade. Em logística de contêineres, padrões de **embalagem, etiquetagem eletrônica, mensageria (EDIFACT/ANSI X12) e APIs REST** reduzem o **custo de troca** entre parceiros e encurtam **tempos de requalificação**, permitindo que **arranjos horizontais** (multi-gateway, multi-operador) entreguem **opcionalidade real** (OECD/ITF, 2016). Sem padrões, cada desvio ou *box interchange* requer engenharia ad hoc e renegociação que consome a janela de reação. Portos líderes investem em **laboratórios de padronização e catálogos de integração** para onboardings rápidos e **testes de conformidade** contínuos (World Bank, 2020).

A **qualidade e governança do dado** exigem disciplina: **granularidade** adequada (por janela, serviço, tipo de carga), **latência** compatível com decisões operacionais, **metodologias de cálculo** publicadas e **ciclos de reconciliação** entre fontes (TOS ↔ PCS ↔ WMS/TMS). Sem isso, duas consequências seguem: **indicadores não comparáveis** entre terminais e ao longo do tempo, e **decisões incoerentes** que ampliam o triângulo da resiliência (Christopher, 2016). A experiência compilada em barômetros econômicos durante a pandemia mostra que **métricas padronizadas e publicação regular** ampliam confiança e **reduzem ruído** entre stakeholders (IAPH, 2020).

Privacidade, segurança e competição são restrições reais à abertura de dados. O desenho deve adotar **minimização de dados, anonimização** quando possível e **governança de acesso** por perfis, além de **trilhas de auditoria** para responder a incidentes (IAPH, 2020). Em mercados concentrados, o receio de revelar estratégias é legítimo; porém, **dados agregados e atrasados** ainda produzem ganho coletivo sem ferir competição, e podem ser obrigatórios por **regulação leve** quando a **estabilidade sistêmica** estiver em jogo (Haralambides, 2019). O equilíbrio entre **transparência suficiente** e **sigilo competitivo** precisa ser pactuado ex-ante, não no meio da crise.

A dimensão **humana e institucional** é decisiva: PCS, Single Window e torres de controle falham se **processos** e **capacidades** não acompanharem. É necessário formar **equipes analíticas** com fluência em **operações** e **dados**, treinar **rituais de decisão** (briefings curtos, *After Action Reviews*) e instituir **comitês de resiliência** que cuidem da *run*(operações) e do *change* (melhorias e investimentos) com **ritmo regular** (ISO 22301, 2019). Em termos de incentivos, vincular **bônus** à **redução de TTR, melhora de confiabilidade** e **queda de demurrage/detention** orienta comportamento para **resiliência mensurável** (Sheffi, 2015).

Gêmeos digitais conectados ao PCS transformam governança em **capacidade preditiva**. Ao injetar **ETA/ETD** reais, ocupação de pátio, *appointment adherence* e disponibilidade de contêiner, simulam **percolação de atrasos**, testam **gatilhos** e comparam **carteiras de mitigação** (janelas vs. off-dock vs. desvio multi-gateway) sob diferentes perfis de chegada (Ivanov; Dolgui, 2020). O valor prático é antecipar **pontos de saturação**, orientar **redistribuição de recursos** e apoiar **decisões contratuais** (opções de capacidade, box pools) com números, reduzindo a dependência de heurísticas e narrativas (Notteboom; Rodrigue, 2021).

Por fim, a **legitimidade** da governança de dados depende de **transparência** e **resultados**. Publicar **painéis de desempenho** com séries históricas e **metas pactuadas**, abrir **protocolos de priorização** em escassez e manter **canais de feedback** com usuários (transportadores, despachantes, embarcadores) elevam confiança e reduzem a propensão a **soluções particulares** que corroem a eficiência sistêmica (World Bank, 2020; IAPH, 2020). Quando governança, dados e padronização se alinham, o sistema **absorve choques** com menor perda de serviço e **recupera** mais rápido, legitimando investimentos e consolidando **vantagem competitiva de ecossistema** (Christopher, 2016; Sea-Intelligence, 2021).

8. Capacitação, políticas públicas e financiamento: da preparação organizacional à resiliência sistêmica

A construção de resiliência logística não se encerra no perímetro da firma nem na cerca do porto; ela depende de **capacitação organizacional, arranjos institucionais** e **instrumentos de financiamento** que permitam transformar diagnósticos técnicos em rotinas e ativos tangíveis. No plano micro, as empresas precisam estabelecer **programas contínuos de treinamento** para planejadores, despachantes e equipes de pátio, ancorados em **exercícios de mesa, simulações por eventos discretos (DES)** e **modelos baseados em agentes (ABM)** que reproduzam filas

interconectadas e decisões sob pressão; no plano meso, cadeias setoriais devem organizar **comitês de resiliência** que cruzem armadores, terminais, operadores terrestres e embarcadores, com **rituais mensais S&OP/S&OE** e **After Action Reviews** pós-incidente; e no plano macro, autoridades portuárias, aduanas e ministérios setoriais precisam de **unidades de gestão de risco** com mandato para ajustar **regras operacionais** (janelas, priorização) em contingências sem depender de trâmites ad hoc (ISO 22301, 2019; Christopher, 2016; Ivanov; Dolgui, 2020). Essa **arquitetura multinível** converte o mapeamento de risco em **capacidade instalada**, reduzindo o intervalo entre **deteção, decisão e ação**.

A **política pública** é determinante em ambientes onde gargalos são produto de **coordenação imperfeita** e **externalidades**. Portos com **Port Community Systems (PCS)** maduros e **Janelas Únicas Digitais** integrando aduana e anuências exibiram **menor crescimento de dwell time** e **dispersão de lead time** durante choques, porque reduziram **assimetria informacional** e **latência documental** em toda a comunidade (IAPH, 2020; World Bank, 2020). Reguladores podem fomentar tais plataformas por meio de **padrões de dados abertos, fundos de matching** e **metas de desempenho público** (turnaround, dwell, *schedule reliability*), sem ditar tecnologia proprietária (OECD/ITF, 2016; Haralambides, 2019). Em paralelo, **harmonização normativa** (janelas de gate, inspeções de risco, *pre-clearance*) e **governança multilateral** com assentos para operadores e usuários reforçam legitimidade e reduzem a probabilidade de captura de agenda por um único ator, algo crítico quando **priorizações** afetam repartição de custos e receitas.

A **agenda de financiamento** precisa traduzir resiliência em **ativos bancáveis** e **KPIs verificáveis**. Bancos de desenvolvimento, fundos logísticos e *green bonds* podem financiar **off-dock, portos secos, automação seletiva de pátio** e **corredores ferroviários** se os projetos apresentarem **casos de negócio** com **perda evitada** e **redução de TTR** quantificadas via gêmeos digitais e séries históricas (Sheffi, 2015; Ivanov; Dolgui, 2020). Para reduzir o risco de demanda, contratos podem incorporar **pagamentos por disponibilidade** atrelados a **SLAs de contingência** (janelas estendidas, prioridade ética), evitando que investimentos fiquem reféns da volatilidade de curto prazo. No âmbito privado, **opções de capacidade** em contratos com armadores e **pools de contêineres** podem ser estruturados como **seguros paramétricos** que pagam quando *schedule reliability* cai abaixo de um limiar, internalizando a resiliência como **produto financeiro** (Notteboom; Rodrigue, 2021; Drewry, 2021).

A **dimensão climática** e de **sustentabilidade** amplia a noção de risco e impõe **co-benefícios** quando bem gerida. A adaptação a **eventos extremos** (tempestades, ondas de calor) demanda **redesenho físico** de berços e pátios, **drenagem, elevação de áreas críticas** e **protocolos de retomada**; a mitigação de emissões por **eletrificação de pátio, shore power** e **combustíveis alternativos** conecta-se a **corredores verdes** que reduzem variância por **acesso prioritário** e **janela de atracação preferencial** (Haralambides, 2019; World Bank, 2020). Ao contrário de trade-offs simplistas, evidências sugerem que investimentos climáticos **bem desenhados** também melhoram **previsibilidade** ao reduzir paradas não planejadas e ampliar **redundância energética**, o que diminui a área do **triângulo da resiliência** em choques (Christopher, 2016). A regulação

internacional até 2021 (ex.: IMO 2020) reforça a necessidade de **compliance técnico** acoplado a **eficiência operacional** para evitar penalidades que se somem a atrasos.

A **cooperação transfronteiriça** é essencial em cadeias que cruzam jurisdições com capacidades assimétricas. **Acordos bilaterais para Single Window interoperável, reconhecimento mútuo** de inspeções e **padrões de mensageria** reduzem o “efeito fronteira” que transforma fronteiras em gargalos previsíveis (OECD/ITF, 2016; UNCTAD, 2020). No nível de armadores e alianças, **transparência mínima de *schedule reliability*, filas e capacidade de equipamentos** — mesmo que **agregada e atrasada** — melhora a coordenação de desvio de navios e reposicionamento de caixas, desde que **guard rails de competição e antitruste** estejam claros (Haralambides, 2019; IAPH, 2020). A **diplomacia logística** passa a ser parte da agenda de comércio, especialmente em corredores onde **colinearidade de risco** climático e institucional é alta.

No **capital humano**, a resiliência depende de **competências híbridas**: profissionais capazes de falar a língua de **operações, dados, regulação e finanças**. Programas de **certificação** mediados por portos e universidades, com trilhas em **PCS/Single Window, modelagem de filas e redes, contratos logísticos e análise econômica** (Operational VaR, Expected Shortfall), aceleram a formação desse perfil (Christopher, 2016; Ponomarov; Holcomb, 2009). **Laboratórios vivos** em terminais e *inland ports*, conectados a gêmeos digitais do corredor, permitem **aprendizagem por experimentação** de políticas (agendamento, priorização, off-dock), tornando o sistema **adaptativo** e reduzindo dependência de “heróis operacionais”.

A **medição pública** fecha o ciclo. Indicadores comparáveis de **turnaround, dwell, confiabilidade, disponibilidade de contêiner e KRIs intermodais** devem ser **publicados com periodicidade e metodologia** consistente, permitindo **benchmarking** (World Bank, 2020; Sea-Intelligence, 2021). *Scorecards* por corredor, com metas pactuadas e **planos de ação** claros, criam accountability e **diminuem o ruído político** que costuma acompanhar crises em portos. Quando **barômetros portuários** (IAPH) e **painéis governamentais** convergem, o debate desloca-se de **narrativas causais** para **engenharia de soluções**, o que eleva a qualidade do gasto público e privado (IAPH, 2020).

A **inovação regulatória** pode, por fim, criar “**safe sandboxes**” para testar **políticas de agendamento dinâmico, janelas estendidas, intercâmbio de caixas e contratos com opções** sem risco de descumprimento inadvertido de normas. Tais ambientes controlados, com **supervisão neutral** da autoridade portuária e participação de **operadores e usuários**, encurtam o tempo entre **ideia e escala**, desde que métricas de **TTS/TTR, OTIF e demurrage/detention** sejam monitoradas para decidir **go/no-go** (OECD/ITF, 2016). Quando inovar é parte da rotina e **auditoria** está embutida no processo, a resiliência deixa de ser **episódio** e se torna **capacidade organizacional**.

Finalmente, **integrar capacitação, políticas e financiamento** em um **roteiro único** evita a armadilha de projetos isolados que não mudam o sistema. Um **Plano Diretor de Resiliência Logística** por corredor — combinando **portfólio de mitigação** (arquitetura, dados, contratos),

governança multilateral, metas e barômetros, fontes de financiamento e cronograma de implantação — entrega previsibilidade de execução e cria incentivo para **alinhamento interorganizacional**. Ao ancorar decisões em **modelos validados e métricas públicas**, a coalizão de atores passa a ter um **norte comum**, condição necessária para enfrentar gargalos como **congestionamento portuário e subutilização de contêineres com menos improvisado e mais engenharia** (World Bank, 2020; Notteboom; Rodrigue, 2021; Ivanov; Dolgui, 2020).

Conclusão

A análise desenvolvida ao longo do artigo sustenta que **mapeamento e mitigação** de riscos em cadeias logísticas globais dependem de uma **visão integrada** que uma **fenomenologia dos gargalos, métricas de diagnóstico, modelos de propagação e estratégias de intervenção** articuladas em **arquitetura, dados e contratos**. Gargalos como **congestionamento portuário e subutilização/desbalanceamento de contêineres** não são acidentes isolados; resultam de **descasamentos temporais-espaciais entre chegada e capacidade**, amplificados por **interfaces intermodais e topologias de rede** de alta centralidade que convertem atrasos locais em **perdas sistêmicas**. A partir de um quadro que combina **ciência de redes, filas interconectadas e percolação**, mostramos por que pequenas quedas de produtividade podem atravessar o limiar crítico de utilização e estourar filas em cascata, exigindo **decoupling points e buffers** para impedir a conectividade total do atraso (Ivanov; Dolgui, 2020; World Bank, 2020; Notteboom; Rodrigue, 2021).

No terreno **métrico**, argumentamos que a governança de risco precisa migrar de indicadores médios para uma combinação de **turnaround/dwell, confiabilidade de cronogramas, ciclo do contêiner e TTS/TTR** por corredor e classe de carga, complementados por **KRIs intermodais** (truck turn time, slots ferroviários) e medidas de **perdas econômicas** (demurrage/detention, frete prêmio, *lost sales*). Esse painel permite não só **priorizar investimentos** — por redução de **MTTR/TTR** por unidade de capital — como também **acertar o mix de mitigação** (janelas estendidas, off-dock, multi-gateway, pools de equipamento), reduzindo a **área do triângulo da resiliência** e transformando debates em números auditáveis (Sheffi, 2015; Ponomarov; Holcomb, 2009; Sea-Intelligence, 2021).

Mostramos que **estratégias de mitigação** eficazes precisam atuar em **três horizontes**. No **curto prazo, táticas** que aumentam taxa de serviço e reduzem variância — **ventilação de janelas, priorização por valor de tempo, rearranjo de pilhas, agendamento dinâmico** — comprimem backlog e devolvem o sistema abaixo do limiar crítico. No **médio prazo, desacoplamento estrutural** com **portos secos/off-dock e diversificação real de gateways** adiciona **redundância geográfica** e cria **opções de roteamento** com custo total controlado, desde que padrões técnicos garantam **substituibilidade plug-and-play**. No **longo prazo, capacidade e flexibilidade** — berços, pátios, automação seletiva, corredores ferroviários — precisam ser desenhadas com

modularidade expansível para evitar rigidez e ociosidade estrutural (World Bank, 2020; Christopher, 2016; Notteboom; Pallis, 2020).

Sublinhamos a dimensão **contratual e de incentivos**, frequentemente negligenciada em análises puramente técnicas. **SLAs de contingência** com **gatilhos claros, opções de capacidade e indexação à confiabilidade** alinham incentivos e criam **opcionalidade econômica** para embarcadores, ao mesmo tempo em que reduzem **disputas e latência decisória** em crises. **Políticas condicionais de demurrage/detention e pools interorganizacionais de contêineres** atacam a **subutilização e o desbalanceamento** de caixas, liberando slots e reduzindo fretes prêmio quando mais importa. Esses instrumentos funcionam melhor quando ancorados em **dados auditáveis** (PCS/TOS) e **regras de transparência** minimalmente suficientes para coordenar sem ferir competição (IAPH, 2020; Drewry, 2021; Clarksons Research, 2021).

A **governança de dados** é a infraestrutura invisível da previsibilidade. **PCS, Janelas Únicas Digitais e torres de controle interorganizacionais** convertem sinais dispersos em **decisão acionável** com **direitos preautorizados**: abrir janelas, priorizar cargas, acionar off-dock, recomendar desvios. Sem **dicionário métrico, APIs seguras e latência acordada**, SLAs viram promessas e modelos perdem poder preditivo; com eles, a comunidade portuária reduz **ruído**, melhora **alocação de recursos** e cria **legitimidade** para decisões difíceis em janelas estreitas (World Bank, 2020; IAPH, 2020; OECD/ITF, 2016). A mensagem é inequívoca: dados não são ornamento; são **capacidade operacional**.

Avançamos a ideia de que **políticas públicas inteligentes** podem catalisar a resiliência ao definir **padrões abertos, metas de desempenho públicas e fundos de indução** para PCS/Single Window e *off-dock*, sem substituir a diversidade de soluções tecnológicas. Na esfera internacional, **cooperação transfronteiriça** para interoperabilidade de janelas e **reconhecimento mútuo** de inspeções corta o “efeito fronteira” e reduz variância sistêmica, especialmente em corredores com assimetrias de capacidade (OECD/ITF, 2016; UNCTAD, 2020). O ângulo **ambiental** — adaptação e descarbonização — adiciona **co-benefícios** ao reduzir paradas e ampliar redundância energética, reforçando o argumento de que resiliência e sustentabilidade podem ser **complementares** quando articuladas (Haralambides, 2019; World Bank, 2020).

No plano **econômico-financeiro**, propusemos a tradução de resiliência em **ativos bancáveis e seguros paramétricos**: **gêmeos digitais** quantificam **perda evitada e redução de TTR**, permitindo estruturar financiamentos com **pagamentos por disponibilidade e gatilhos de crise**, enquanto **opções de capacidade** em contratos e **box pools** funcionam como **opções reais** que preservam margem quando *schedule reliability* degrada (Sheffi, 2015; Notteboom; Rodrigue, 2021). Essa linguagem aproxima conselhos e financiadores, tirando a resiliência do campo do “bom senso” e levando-a para o campo da **alocação de capital**.

A síntese normativa que decorre é a de um **Portfólio Integrado de Resiliência** por corredor: **(i)** arquitetura modular com **decoupling points** dimensionados por TTS/TTR; **(ii)** dados e governança com **PCS/Single Window e torres de controle com direitos de ação**; **(iii)** contratos

com **SLAs de contingência, opções e políticas condicionais** de demurrage/detention; e **(iv)** financiamento ancorado em **modelos e métricas** públicos. Esse portfólio reduz a **área do triângulo da resiliência**, encurta **backlogs** e estabiliza **previsibilidade**, que é o verdadeiro produto entregue por um corredor logístico moderno (Christopher, 2016; Sea-Intelligence, 2021; World Bank, 2020).

Do ponto de vista **operacional**, o artigo oferece **checklists** implícitos para gestores: medir **turnaround/dwell** por janela e serviço; monitorar **confiabilidade** com **dispersão e persistência**; acompanhar **turn time e disponibilidade de caixas**; dimensionar **buffers** e **multi-gateway** com base em **TTS/TTR**; instaurar **SLAs com gatilhos e dados auditáveis**; e praticar **exercícios de mesa** trimestrais com **AARs** formais. Essas rotinas, quando institucionalizadas, diminuem dependência de improviso e alinham toda a comunidade a um **regime operacional de resiliência**, no qual decisões difíceis são tomadas **antes** da crise (ISO 22301, 2019; Christopher, 2016).

Em termos de **agenda de pesquisa**, ficam três frentes: **(a)** metodologias padronizadas para valorar **opções reais** em contratos logísticos e **box pools** sob volatilidade; **(b)** integração operacional de **gêmeos digitais** aos ciclos **S&OP/S&OE** com dados PCS/Single Window; **(c)** indicadores de **resiliência de ecossistema** que captem **efeitos distributivos e reputacionais**, para além da firma. A prática, por sua vez, deve perseguir **coalizões** entre operadores, autoridades e embarcadores para desenhar **planos diretores de resiliência** financiáveis, com **metas mensais e pontos de verificação** públicos (IAPH, 2020; World Bank, 2020; UNCTAD, 2020).

Em suma, **mapear e mitigar riscos** em cadeias logísticas globais com foco em **congestionamento portuário e subutilização de contêineres** exige **engenharia de sistemas, governança de dados e economia de incentivo** trabalhando em uníssono. Não há bala de prata, mas há **portfólios eficientes** que, quando ancorados em métricas e contratos inteligentes, **absorvem choques** com menor perda de serviço e **recuperam** mais rápido, preservando valor para produtores, operadores e consumidores. Essa é a promessa — e a exigência — de resiliência logística no século XXI (Notteboom; Rodrigue, 2021; Ivanov; Dolgui, 2020; Sheffi, 2015).

Referências (até 2021)

CHOPRA, S.; MEINDL, P. *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. 6. ed. Boston: Pearson, 2016.

CHRISTOPHER, M. *Logistics & Supply Chain Management*. 5. ed. Harlow: Pearson, 2016.

CLARKSONS RESEARCH. *Container Intelligence Quarterly*. London: Clarksons Research, 2021.

DREWRY. *Container Forecaster*. London: Drewry Maritime Research, 2021.

HARALAMBIDES, H. E. Gigantism in container shipping, ports and global logistics: a time-lapse into the future. *Maritime Economics & Logistics*, v. 21, p. 1–60, 2019.

HUMMELS, D. Time as a Trade Barrier. NBER Working Paper, 2001.

IAPH – INTERNATIONAL ASSOCIATION OF PORTS AND HARBORS. *COVID-19 Port Economic Impact Barometer*. Antwerp: IAPH, 2020.

ISO. *ISO 22301:2019 — Security and Resilience — Business Continuity Management Systems — Requirements*. Geneva: ISO, 2019.

IVANOV, D.; DOLGUI, A. Viability of intertwined supply networks: extending the supply chain resilience angles. *International Journal of Production Research*, v. 58, n. 10, p. 2904–2915, 2020.

NOTTEBOOM, T.; PALLIS, A. Port Economics, Management and Policy: COVID-19 and the impact on ports. Relatório/briefs, 2020.

NOTTEBOOM, T.; RODRIGUE, J.-P. Port economics, management and policy: port congestion and supply chain (in)stability in 2020/2021. *Maritime Economics & Logistics*, 2021.

OECD/ITF – INTERNATIONAL TRANSPORT FORUM. *Policies to Enhance Intermodal Connectivity and Performance*. Paris: OECD Publishing, 2016.

PONOMAROV, S. Y.; HOLCOMB, M. C. Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*, v. 20, n. 1, p. 124–143, 2009.

RODRIGUE, J.-P. *The Geography of Transport Systems*. 4. ed. New York: Routledge, 2020.

SEA-INTELLIGENCE MARITIME ANALYSIS. *Global Liner Performance (GLP) Report*. Copenhagen: Sea-Intelligence, 2021.

SHEFFI, Y. *The Power of Resilience: How the Best Companies Manage the Unexpected*. Cambridge, MA: MIT Press, 2015.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. 3. ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2008.

UNCTAD – UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. *Review of Maritime Transport 2020*. Geneva: UNCTAD, 2020.

WORLD BANK; IHS MARKIT. *Container Port Performance Index 2020*. Washington, DC: World Bank, 2020