RCMOS – Revista Científica Multidisciplinar O Saber.
ISSN: 2675-9128. São Paulo-SP.
Ano V, v.1 2025. | submissão: 23/07/2025 | aceito: 25/07/2025 | publicação: 27/07/2025

Definição e Gestão de KPIs para a Otimização Logística: Uma Análise Crítica da Taxa de Utilização de Contêineres, Custo por Unidade Transportada e Emissões de GEE

Defining and Managing KPIs for Logistics Optimization: A Critical Analysis of Container Utilization Rate, Cost per Transported Unit, and GHG Emissions

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 discute o desenho e a governança de **indicadores-chave de desempenho (KPIs)** em operações logísticas intermodais, com foco em três métricas estruturantes: **taxa de utilização de contêineres**, **custo por unidade transportada** e **emissões de gases de efeito estufa (GEE)**. Propõe-se um enquadramento que integra **definição operacional rigorosa**, **padronização de dados**, **métodos de apuração** e **uso gerencial** ancorado em **trade-offs** entre eficiência, resiliência e sustentabilidade. Articulamos literatura de **gestão de operações**, **economia do transporte** e **contabilidade de carbono** para mostrar como escolhas aparentemente técnicas — como **denominadores**, **janelas de medição**, **mix de carga** e **escopos de emissões** — alteram a **narrativa de desempenho** e a **alocação de capital**(CHRISTOPHER, 2016; CHOPRA; MEINDL, 2016; UNCTAD, 2020; WORLD BANK, 2020; GHG PROTOCOL, 2011; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Palavras-chave: logística; KPIs; contêiner; custos logísticos; emissões; GEE.

Abstract

This paper examines the design and governance of **key performance indicators (KPIs)** in intermodal logistics, focusing on three backbone metrics: **container utilization rate**, **cost per transported unit**, and **greenhouse gas (GHG) emissions**. We propose a framework that integrates **rigorous operational definitions**, **data standardization**, **measurement methods**, and **managerial use** anchored in the **trade-offs** among efficiency, resilience, and sustainability. Drawing on **operations management**, **transport economics**, and **carbon accounting**, we show how seemingly technical choices—**denominators**, **measurement windows**, **cargo mix**, and **emissions scopes**—reshape the **performance narrative** and **capital allocation** (CHRISTOPHER, 2016; CHOPRA; MEINDL, 2016; UNCTAD, 2020; WORLD BANK, 2020; GHG PROTOCOL, 2011; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

Keywords: logistics; KPIs; container; logistics costs; emissions; GHG.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

1. Fundamentos e escopo dos KPIs logísticos: princípios de desenho, padronização e uso decisório

A discussão sobre KPIs logísticos precisa começar por um **princípio de utilidade**: um indicador só é bom se **orienta decisões** — alocação de capacidade, priorização de investimentos, desenho de contratos — e se **reduz ambiguidade** na coordenação entre elos. Isso exige três camadas: **definição operacional inequívoca** (o que é medido, onde e quando), **método de apuração** (fontes, fórmulas, janelas, tratamento de dados faltantes) e **governança de uso** (limiares, responsáveis, direitos de ação). Sem esse tripé, métricas viram "painéis decorativos" que multiplicam ruído em vez de gerar ação (CHRISTOPHER, 2016; ISO 22301, 2019). Em cadeias intermodais, o risco de **confusão semântica** é alto: "utilização", "custo unitário" e "emissões" podem significar coisas distintas em porto, ferrovia, rodovia e operador, produzindo **comparações espúrias** se não houver dicionário comum (WORLD BANK, 2020).

O segundo fundamento é **propriedade de medição**. Indicadores devem ser **confiáveis** (mesmo método → mesmos resultados), **válidos** (medem o que pretendem medir), **sensíveis** a mudanças operacionais relevantes e **robustos** a ruído de curto prazo. Em logística, a **granularidade temporal** e a **segmentação por serviço** (rota, tipo de carga, equipamento, cliente) são decisivas para evitar **lei das médias**: uma melhoria em um serviço pode ser mascarada por degradação em outro, gerando conclusões equivocadas no agregado (CHOPRA; MEINDL, 2016). Por isso, recomenda-se publicar KPIs por **janela/serviço** e só então compor **índices** ponderados por volume.

A terceira premissa relaciona KPIs a **trade-offs**. **Taxa de utilização de contêineres** tende a melhorar com **consolidação** e **adição de paradas**, mas isso pode **piorar lead times** e **variância**, elevando **estoques** e **custo de capital**; **custo por unidade transportada** diminui com **economias de escala**, porém pode **fragilizar resiliência** ao concentrar gateways e alongar rotas; **emissões de GEE** caem por **modal shift** e **aumento de fator de carga**, mas podem **colidir** com janelas de serviço ou **limitar opcionalidade** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; UNCTAD, 2020). O desenho do painel deve tornar esses conflitos **explícitos**, com **metas hierarquizadas** (serviço mínimo, resiliência, eficiência, sustentabilidade), evitando **otimizações locais** que destroem valor global.

O quarto ponto é a **padronização**. Emissões de GEE, por exemplo, devem seguir padrões como **GHG Protocol – Escopo 3 (Categoria 4/9)** e **EN 16258** para transporte, com **fatores de emissão** consistentes por combustível e modal; **utilização de contêineres** requer convenções sobre **carga útil** (peso vs. cubagem), **exclusões** (reefer vazio em *pre-trip*), e **tratamento de backhaul**; **custo por unidade** precisa explicitar se é **frete puro** ou **custo-to-serve** (incluindo handling, demurrage/detention, armazenagem e capital de giro) (GHG PROTOCOL, 2011; EN 16258, 2012; CHOPRA; MEINDL, 2016). Sem essa base, comparações **internas e externas** perdem sentido.

O quinto elemento é **qualidade e linhagem de dados**. KPIs logísticos nascem de **TOS/PCS** (portos), **WMS/TMS**(armazenagem/transporte), **telemetria** (AIS, ELDs), **faturamento** e

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

sistemas de energia/combustível. Para serem auditáveis, deve existir **trilha de reconciliação** e **versionamento**: como **TEUs, toneladas, quilômetros**, **combustível** e **custos** foram obtidos, agregados e limpos? Essa diligência reduz **disputas contratuais** (indexação à confiabilidade, *gain-sharing*) e evita **greenwashing** em emissões (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020). Sempre que possível, **APIs** e **dicionários de dados** devem ser partes do contrato.

O sexto aspecto é **escopo de controle**. Um KPI útil distingue **o que controlar** do que apenas **monitorar**. **Utilização de contêineres** pode ser parcialmente controlada por **políticas de consolidação, *match-back* e triangulação**; **custo por unidade** por **mix modal, contratos, redesenho de rotas**; **emissões** por **combustível, fator de carga, velocidade, modal shift**. KPIs fora do escopo do gestor viram **fontes de frustração**; por isso, o painel deve exibir **alavancas associadas** e **limiares** que disparem **direitos de ação** (CHRISTOPHER, 2016; SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008).

O sétimo princípio trata de **ritmo decisório**. KPIs com **alta volatilidade** pedem **janelas móveis** e **sinais suavizados (**ex.: médias ponderadas), enquanto decisões de capital precisam de **séries estáveis**; **emissões** podem ser fechadas **mensalmente** e auditadas **anualmente**; **utilização** e **custo unitário** exigem **cadência semanal/diária** para permitir correções de rota rápidas (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; ISO 22301, 2019). O **tempo de latência** entre mensuração e ação é, ele próprio, um KPI de maturidade.

Por fim, o oitavo fundamento é **alinhamento organizacional**. KPIs devem entrar no **S&OP/S&OE** e no **ciclo orçamentário**, com **metas e bônus** vinculados a **OTIF**, **custo-to-serve**, **fator de carga** e **intensidade de carbono**. **Treinamentos**, **exercícios de mesa** e **After Action Reviews** transformam indicadores em **aprendizagem** e **melhoria contínua**, consolidando um **regime operacional de resiliência** no qual **dados** produzem **decisão** e **decisão** produz **resultado auditável** (SHEFFI, 2015; ISO 22301, 2019).

2. Taxa de utilização de contêineres: definição, medição, vieses e decisões

A **taxa de utilização de contêineres** mede quanto da **capacidade útil** (peso ou volume) de um contêiner é efetivamente ocupada por carga pagante. Em termos simples, pode-se definir **Utilização (peso)** = *peso da carga/ (payload máximo do contêiner)* e **Utilização (volume)** = *volume da carga/ (capacidade cúbica)*; em rotas mistas, usam-se **fatores de conversão (stowage factor)** para reconciliar **peso vs. cubagem** (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021). No nível de frota, pode-se reportar **utilização média ponderada por TEU-km** ou **por viagem**, distinguindo **headhaul** e **backhaul**para evitar **efeito-média** que mascara desequilíbrios estruturais (UNCTAD, 2020). Ao publicar a métrica, é crítico explicitar **qual base** (peso/volume) e **quais exclusões** foram aplicadas.

O primeiro desafio é **qualidade de dados**. Em muitos ambientes, **peso líquido** e **cubagem** não estão padronizados nos sistemas; **EDI** e **documentos de embarque** chegam com **lacunas**; **cargas mistas** exigem **estimativas**. Recomenda-se criar **camadas de apuração**: *nível 1* por **manifesta/data lake** (estimativa), *nível 2* por **WMS/TMS** (captura operativa) e *nível 3* por

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

auditoria física/amostragem em rotas críticas. **Regras de imputação e outliers** devem ser publicadas para garantir **consistência** e **comparabilidade** (WORLD BANK, 2020; IAPH, 2020). Sem isso, a utilização vira **número opinativo**.

O segundo ponto é o **denominador adequado**. Para **dry 40'**, **payload** é limitante típico; para **produtos volumosos (**tissue, e-commerce leve), **cubagem** domina; em **reefer**, parte da capacidade é "perdida" para equipamentos e **segregações**; em **mercadorias perigosas**, **compatibilidade** reduz ocupação. Portanto, comparar **utilização** entre **classes de produto** sem **normalização** gera **injustiça** e **incentivos perversos** (CHOPRA; MEINDL, 2016). Uma prática recomendada é medir **utilização ajustada** pelo **limitante físico** do SKU (peso ou volume) e publicar **benchmarks por família**.

O terceiro aspecto são os **vieses operacionais**. A busca por **utilização máxima** incentiva **esperas para consolidar**, aumentando **lead time** e **variância**; em picos, consolidação tardia **piora OTIF** e **detona demurrage/detention**. Do outro lado, **adensar** contêineres pode elevar **riscos de avaria** e **segurança**, com **custo oculto**. A decisão ótima equilibra **utilização marginal** com **custo de tempo e risco**, muitas vezes via **curvas de resposta** estimadas em **gêmeos digitais** do corredor (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008; CHRISTOPHER, 2016). O KPI, portanto, deve vir acompanhado de **limites de serviço** e **regras de exceção**.

O quarto tema é **subutilização estrutural** por **desbalanceamento geográfico**. Em fluxos com **headhaul forte e backhaul fraco**, **utilização média** cai mesmo com **excelência operacional**; parte da solução está em **triangulação, *match-back*** e **pools interorganizacionais de contêineres** para reduzir **reposicionamentos vazios** e elevar **uso efetivo (**UNCTAD, 2020; DREWRY, 2021). Aqui, o KPI deve ser lido junto a **índices de disponibilidade de equipamento** e **taxas de reposicionamento**, sob risco de **culpar o operador** por **estrutura de mercado**.

O quinto ponto é a **integração com sustentabilidade**. **Maior utilização** reduz **emissões por tonelada-km** ao **diluir consumo** de combustível por unidade, mas pode **aumentar emissões absolutas** se a **consolidação** exigir **rotas mais longas** ou **esperas**; além disso, **modal shift** para reduzir carbono pode **reduzir utilização** temporariamente. Por isso, recomenda-se publicar **intensidade de carbono (gCO_2e/t-km)** em paralelo à utilização e **explicitar compensações** de rota/modal (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; IMO, 2020). A narrativa correta evita **greenwashing de eficiência**.

O sexto elemento são **contratos e incentivos**. **SLAs** que **bonificam** apenas **utilização** podem **penalizar serviço** e **resiliência**; mecanismos de **gain-sharing** alinhados a **custo-to-serve** e **emissões** equilibram objetivos. Em **congestionamento portuário**, políticas de **demurrage/detention condicionais** podem **destravar caixas** e permitir **utilização mais alta** sem punir o cliente por **causas sistêmicas** (WORLD BANK, 2020; IAPH, 2020). O KPI deve informar **revisões contratuais** e **políticas de exceção**.

O sétimo tema é **cadência e visualização**. **Utilização por janela** (hora/dia) em **heatmaps** por **serviço e gateway** ajuda a **enxergar padrões** e **oportunidades de *match-back***; **dashboards**

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

com **dispersão** (não só média) revelam **volatilidade** e **causas especiais**. Em rotas críticas, **thresholds** ativam **playbooks**: abaixo de X% por Y dias, **acionar consolidação alternativa**; acima de Z%, **revisar riscos de avaria** e **política de estiva** (CHRISTOPHER, 2016; WORLD BANK, 2020).

Por fim, o oitavo aspecto é **aprendizado**. **After Action Reviews** em **picos sazonais** e **eventos de disrupção** devem atualizar **regras de consolidação**, **políticas de exceção** e **contratos**. **Benchmarking** externo (relatórios setoriais) e **interno** (entre corredores) evita **miopia local**. Quando bem governada, a **taxa de utilização** deixa de ser vaidade e passa a ser **alavanca integrada** de **custo-to-serve**, **OTIF** e **intensidade de carbono**, com **responsáveis e direitos de ação** definidos (UNCTAD, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

3. Custo por unidade transportada: definição operacional, *cost-to-serve* e decisões gerenciais

A métrica **custo por unidade transportada** parece trivial à primeira vista — dividir despesas logísticas por um denominador de volume —, mas seu **poder decisório** depende da **definição operacional** e do **escopo de custos**adotados. Em cadeias intermodais, há quatro denominadores dominantes: **(i)** custo por **TEU-km** ou **tonelada-km**, adequado a benchmarking modal; **(ii)** custo por **pedido** (order), útil a portfólios B2B fragmentados; **(iii)** custo por **SKU**ou **família de produto**, que internaliza diferenças de densidade e de *valor do tempo*; **(iv)** custo por **janela de serviço**(rota/serviço/gateway), que explicita trade-offs entre confiabilidade e gasto (CHOPRA; MEINDL, 2016; WORLD BANK, 2020). Em qualquer caso, é indispensável declarar se o indicador cobre **frete puro** ou **custo-to-serve**(incluindo **terminal handling**, **drayage/chassis**, **armazenagem**, **demurrage/detention**, **seguros**, **capitais de giro** e **expedições de contingência**), pois decisões estratégicas — como **multi-gateway**, **off-dock** ou **opções de capacidade**— movem itens fora do frete, mas dentro do **custo de servir** (UNCTAD, 2020; SHEFFI, 2015).

A **apuração do numerador** exige reconciliar **custos fixos e variáveis** e, idealmente, empregar um **custeario por atividades**. Em redes com alto *mix* de serviços, o **ABC/TDABC** distribui *overheads* (planejamento, agendamento, controle aduaneiro, torres de controle, PCS) por **direcionadores de custo** ligados ao uso real de recursos (viagens, *stops*, *touches*, tempo de guindaste, *truck turn time*), mitigando distorções das médias (CHOPRA; MEINDL, 2016; KAPLAN; ANDERSON, 2007). A qualidade do rateio decide a utilidade do KPI: se *overheads* de pico e **custos de congestionamento** (detention, *premium surcharges*) permanecem "fora" do numerador, o indicador **subestima** a vantagem de soluções que reduzem variância — por exemplo, **janelas estendidas** e **portos secos** (WORLD BANK, 2020; IAPH, 2020).

Do lado do **denominador**, a escolha entre **TEU-km** e **ton-km** altera comparações entre produtos **leve-volumosos** (e-commerce leve, *tissue*) e **pesados-compactos** (metais, químicos). Boas práticas combinam **duas visões**: custo por **ton-km** para refletir esforço físico-energético, e custo por **ordem/SKU** para captar **complexidade operacional** (pontos de toque,

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

documentações, inspeções) não explicada por massa (CHRISTOPHER, 2016; OECD/ITF, 2016). Em serviços de **contêiner refrigerado**, incluir **energia/plug-in** e perdas de capacidade "não vendável" (equipamentos, segregações) evita *bias* contra *reefers* quando comparados a *dry* (UNCTAD, 2020).

A **volatilidade de frete e energia** recomenda incorporar **bandas** ou **índices** no KPI. Em ambientes de **BAF/GRI**flutuantes e **diesel/bunker** correlacionados, o custo por unidade deve apresentar **cenários** (base, alto, baixo) ou **curvas de sensibilidade** por modal, mostrando **pontos de indiferença** entre **all-water** e **land-bridge**, ou entre **rodoviário** e **intermodal/ferrovia** (EIA, 2021; UNCTAD, 2020). Ao conectar o KPI a **signposts** (queda de *schedule reliability*, filas de ancoragem, *slot* ferroviário), o S&OE ganha **gatilhos** para **migrar mix modal** antes que o *spike* destrua margem (SEA-INTELLIGENCE, 2021; SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008).

A ligação do KPI com **confiabilidade** e **tempo** é estrutural. **Minutos** em cais e **horas** em pátio/gate viram **pontos de margem** quando traduzidos em **estoques de segurança**, **expedições de contingência** e ***lost sales***, o que reforça a necessidade de **painéis integrados** que exibam **custo por unidade junto de TTR/TTS**, **OTIF** e **demurrage/detention**(SHEFFI, 2015; PONOMAROV; HOLCOMB, 2009). Sem essa integração, melhorias de **custo médio** podem esconder **piora na variância** que **aumenta** o **custo de servir** total — típica *armadilha da média* em redes com gargalos (WORLD BANK, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021).

Em **contratos e incentivos**, indexar parte do **frete** ou do **handling** a **indicadores de serviço** (ex.: *on-time*, *truck turn time*, *dwell*) alinha o KPI ao objetivo de **reduzir TTR** e **compressão de backlog**. **Gain-sharing** que partilha **perda evitada** (queda de detention, frete prêmio, expedições aéreas) encoraja operadores a **abrirem janelas**, **ativarem off-dock** e **desviarem** fluxo quando limiares são cruzados, mesmo que isso **eleve momentaneamente** o custo unitário "na planilha" (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020). O foco muda de **custo por TEU** para **custo-to-serve e margem preservada**, linguagem que convence finanças (CHRISTOPHER, 2016).

A **heterogeneidade por SKU/cliente** pede **política de serviço diferenciada**. Produtos **time-sensitive** aceitam **custo unitário maior** em troca de **lead time** e **baixa variância**; *commodities* aceitam **estoque/rota mais longa**. **Curvas ABC por valor e criticidade**, acopladas a **janela/serviço**, evitam "ótimos de prateleira" que reduzem um KPI mas **aumentam** *lost sales* ou **emissões** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; CHOPRA; MEINDL, 2016). O painel deve permitir **simular combos**: *multi-gateway + off-dock + opção de capacidade* versus "somente estoque", comparando **custo por unidade** e **TTR**.

Por fim, **qualidade de dados e auditoria** sustentam credibilidade. Integrar **TOS/PCS**, **WMS/TMS**, **faturamento** e **energia/combustível** via **APIs** e **dicionários métricos** publicados reduz disputas e **greenwashing de custos**; *After Action Reviews* e **reconciliações** periódicas ajustam regras de imputação (outliers, vazios, *backhauls*) e garantem **comparabilidade intertemporal** (IAPH, 2020; OECD/ITF, 2016). Em síntese, o KPI "custo

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

por unidade" só orienta bem quando é **explicável**, **comparável**, **sensível** a decisões e **acoplado** a **resiliência** e **sustentabilidade**.

4. Emissões de GEE: escopos, métodos de cálculo e uso gerencial no portfólio de decisões

A mensuração de **emissões de GEE** em logística requer **padrões reconhecidos** e **deliberações metodológicas**transparentes. O **GHG Protocol** consolida a distinção entre **Escopo 1** (combustíveis próprios), **Escopo 2** (eletricidade adquirida) e **Escopo 3** — em especial as **Categorias 4 (upstream transportation)** e **9 (downstream transportation)**—, enquanto a **EN 16258** e o **GLEC Framework** oferecem diretrizes específicas para **transporte de carga** e **ciclo de vida do combustível** (GHG PROTOCOL, 2011; EN 16258, 2012; SMART FREIGHT CENTRE, 2019). Para decisões operacionais, o indicador de base é a **intensidade de carbono (gCO₂e/ton-km ou TEU-km)**, podendo ser enriquecido por **WTT/TTW** (*well-to-tank* / *tank-to-wheel*), **NOx/SOx** e, em aéreo, ajustes de **forçante radiativa** quando politicamente requerido (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; IMO, 2020). Declarar **fronteiras do inventário**, **fatores de emissão** e **qualidade de dados** (tiering) evita números incomparáveis.

A **qualidade de dados** pode seguir uma escada de **tiers**: **Tier 1 (fatores padrão)** por modal e combustível; **Tier 2 (dados operacionais)** como consumo real de diesel, bunker, eletricidade de pátio/reefer; **Tier 3 (medições telemétricas)** por viagem/serviço (velocidade, *idling*, *cold ironing*), com *matching* a **ETA/ETD** e **tarefas de pátio** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; IAPH, 2020). Quanto maior o **tier**, maior a **capacidade preditiva** para analisar **trade-offs** de **fator de carga**, **velocidade** (slow steaming), **rota** e **modal shift**. A auditoria anual deve explicitar **erros e incertezas**, e **recalcular séries** quando fatores forem atualizados, garantindo **comparabilidade** (GHG PROTOCOL, 2011).

A relação entre **utilização de contêineres** e **emissões** é **não linear**. Aumentar **fator de carga** reduz a **intensidade**(gCO₂e/ton-km), mas pode **elevar emissões absolutas** se implicar **esperas** para consolidar, **rotas mais longas** ou **re-manuseio** em *hubs* (NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; UNCTAD, 2020). Por isso, recomenda-se reportar **intensidade junto com emissões absolutas** e **indicadores de serviço** (OTIF, TTR), tornando explícitos os **trade-offs**. Em *reefers*, **decisões de *set-point*** e **plug-in** (shore power) mudam o perfil de emissões por hora; em pátios, **eletrificação** e **automação seletiva** deslocam emissões de **Escopo 1 → 2**, exigindo atenção a **fatores da rede elétrica** (WORLD BANK, 2020; IMO, 2020).

O **modal shift** é a alavanca clássica de descarbonização, mas seu **valor líquido** depende de **tempo** e **capacidade**. Migrar **rodoviário → ferrovia/intermodal** reduz **intensidade** por ton-km; porém, se **slots** são escassos ou **transfers** multiplicam *touches* e **dwell**, o **TLC** e o **TTR** podem **piorar**, produzindo **expedições de contingência** (aéreo) que anulam ganhos (OECD/ITF, 2016; CHOPRA; MEINDL, 2016). Cenários operacionais precisam **co-simular** emissões, custo e nível de serviço, usando **gêmeos digitais** que incluam **energia, fator de carga e confiabilidade** para prescrever **carteiras eficientes** (IVANOV; DOLGUI, 2020; SHEFFI, 2015).

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

No **oceânico**, **IMO 2020** já reduziu **SOx**, e discussões pré-2021 sobre **CII/EEXI** apontam para **eficiência por tonelada-milha**; **slow steaming** baixa emissões por viagem, mas **aumenta inventário em trânsito** e pode **exigir navios adicionais** para manter frequência, com **efeitos ambíguos** em emissões totais (IMO, 2020; UNCTAD, 2020). Em **portos**, **shore power** e **eletrificação de pátio** mudam a curva marginal de emissões, condicionada à **matriz elétrica local**; **PCS** que exponham **fila/ancoragem** e coordenem **janelas** reduzem **idling** marítimo-terrestre, entregando **co-benefícios** de carbono e serviço (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020).

A **contabilidade WTT+TTW** evita vieses em comparações entre **diesel, GNL e eletricidade**. Combustíveis com **baixas emissões TTW** podem ter **WTT alto**; eletrificação desloca emissões para **Escopo 2** e depende da **intensidade da rede**; **GNL** reduz **NOx/SOx** e **CO_2 TTW**, mas pode ter **fugas de metano** relevantes *upstream* (SMART FREIGHT CENTRE, 2019). Para decisões, publicar **intensidade WTT e TTW** por modal e **margens de incerteza** salva o KPI de interpretações **otimistas demais** e alinha o portfólio a **metas realistas**.

Em **contratos e incentivos**, **índices de carbono** podem integrar **SLAs** e **gain-sharing**: descontos ou bônus atrelados a **redução de gCO_2e/ton-km** mantida sem **piora de OTIF/TTR**; **opções de capacidade** "verdes" (slots em serviços/ferrovias com melhor intensidade), exercíveis quando **bandas de emissões** ou **energia** exigirem resiliência climática (IAPH, 2020; CHRIS-TOPHER, 2016). **Janelas estendidas**, **off-dock** e **multi-gateway** também são **instrumentos climáticos** quando reduzem **idling** e **re-manuseio**, ainda que aumentem ligeiramente o custo unitário — daí a importância de **painéis integrados** de **custo-to-serve + carbono + serviço** (WORLD BANK, 2020; OECD/ITF, 2016).

Governança e transparência evitam *greenwashing*. Publicar **metodologias**, **fatores**, **tiers** e **limites de incerteza**; alinhar-se a **GHG Protocol/EN 16258/GLEC**; submeter **amostras** a **verificação independente**; e incorporar **emissões** ao **S&OP/S&OE** com **gatilhos** (ex.: migrar X% para ferrovia quando **banda de diesel** e **fator de rede** tornarem a opção **dominante**) transformam o KPI em **alavanca executiva** (GHG PROTOCOL, 2011; SMART FREIGHT CENTRE, 2019). **AARs** pós-pico e **revisões trimestrais** mantêm o sistema **adaptativo**, atualizando **carteiras** conforme tecnologia, energia e regulamentações evoluem.

Por fim, o KPI de **emissões** precisa **conversar** com **utilização** e **custo por unidade** em **fronteiras eficientes**. Em muitas redes, o **combo** "**utilização adequada (sem esperar demais) + agendamento inteligente + off-dock para reduzir dwell + mix modal calibrado**" domina soluções monocausais, reduzindo **gCO_2e/ ton-km**, **TTR** e **TLC** simultaneamente (SHEFFI, 2015; IVANOV; DOLGUI, 2020; WORLD BANK, 2020). O resultado é um **portfólio de KPIs** que não apenas mede, mas **guia** escolhas com **responsáveis, limiares e direitos de ação** definidos.

5. Integração dos três KPIs no S&OP/S&OE, torres de controle e contratos: da métrica ao direito de ação

A integração entre **taxa de utilização de contêineres**, **custo por unidade transportada** e **emissões de GEE** começa por um **desenho de governança** que ligue métricas a **rituais decisórios** (S&OP/S&OE), **direitos preautorizados de ação** e **limiares numéricos** que

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

disparem *playbooks* operacionais. No **S&OP**, os três KPIs entram como **restrições e metas simultâneas**: níveis mínimos de serviço (OTIF), tetos de **custo-to-serve**, faixas alvo de **utilização** por família de produtos e **orçamentos de carbono** por corredor; no **S&OE**, essas metas viram **gatilhos** com prazos e responsáveis, reduzindo **latência decisória** em choques (ISO 22301, 2019; CHRISTOPHER, 2016). Essa arquitetura só funciona se existir **dicionário métrico** comum e **linhagem de dados** auditável, evitando "duas verdades" na mesma sala (WORLD BANK, 2020; IAPH, 2020).

No ciclo **S&OP**, recomenda-se tratar os KPIs em **duas camadas**: **planejamento base** (demanda, capacidade, redesenho modal/gateway) e **planejamento por cenários** com bandas de **frete/energia** e **confiabilidade** que mostrem *trade-offs* de **utilização × TTR × gCO_2e/ton-km** antes de aprovar carteira e orçamento. O comitê deve receber **fronteiras eficientes** produzidas por gêmeos digitais: para cada mix de **estoque ponte, multi-gateway, off-dock e opções de capacidade**, exibir o **TLC** e a **área do triângulo da resiliência** esperada, com faixas de **Operational VaR**sob caudas de frete e atrasos (SHEFFI, 2015; PONOMAROV; HOLCOMB, 2009; CHOPRA; MEINDL, 2016). Assim, a discussão migra de "médias" para **downside protegido**.

No **S&OE**, a palavra-chave é **ritmo**. **Dashboards** diários/semanais na torre de controle devem mostrar **utilização por janela/serviço**, **custo por unidade** (base e *cost-to-serve* com detention/armazenagem/capital), e **intensidade de carbono**, sempre **lado a lado** com **KRIs de fluxo** (schedule reliability, fila/ancoragem, *truck turn time*, *rail slot*), para que desvios sejam visíveis **antes** de virarem perda (SEA-INTELLIGENCE, 2021; IAPH, 2020). **Gatilhos** claros — por exemplo, *Utilização (ajustada)* < X% por Y dias + *dwell* > Z h — acionam **consolidação alternativa**, **janelas estendidas**, **ativação de off-dock** ou **desvio de gateway**, com *owners* definidos (ISO 22301, 2019; WORLD BANK, 2020).

As **torres de controle interorganizacionais** são o **motor** dessa integração: consolidam **AIS/TOS/PCS/WMS/TMS/energia**, aplicam **métodos de imputação** e rotinas de **reconciliação**(TOS↔PCS↔faturamento) e publicam **versões** das séries com **SLA de latência** e **logs de auditoria**. Nessa camada, **APIs** e **padrões** (EDIFACT/X12/REST) garantem comparabilidade e viabilizam **indexação contratual** a dados confiáveis (OECD/ITF, 2016; IAPH, 2020). Sem essa infraestrutura, **KPIs viram opinião** e **SLAs** degeneram em disputa de versões — cenário conhecido em picos de congestionamento (WORLD BANK, 2020).

Em **contratos**, os KPIs devem ser **instrumentos**, não *decor*. **SLAs de contingência** podem indexar parte do preço a **confiabilidade e fluidez** (OTIF, *truck turn time*, *dwell*), estabelecer **isenções condicionais** de **demurrage/detention**quando a causa raiz for sistêmica, e vincular **bônus/penalidades** à **redução de gCO_2e/ton-km** sem sacrificar serviço (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020). **Opções de capacidade** e **cláusulas de desvio** devem ter **gatilhos objetivos**(queda de *schedule reliability*, filas, bandas de combustível) definidos a partir dos painéis, para que **ações caras** só sejam exercidas quando **margem preservada** superar o prêmio (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008; CHRISTOPHER, 2016).

Os **incentivos de chão de fábrica** precisam evitar **perversidades**. Bonificar exclusivamente **utilização** pode induzir **esperas** e **avarias**; bonificar apenas **custo por unidade** pode

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

desidratar resiliência e piorar **OTIF**; bonificar só **emissões** pode **forçar modal shift** sem capacidade. A solução é um **cesto ponderado**: metas de **utilização ajustada**pelo limitante do SKU, **custo-to-serve** por janela e **intensidade de carbono** com **limites de serviço** e **faixas de exceção** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; CHOPRA; MEINDL, 2016). Em ambientes de pico, a **priorização por valor de tempo** legitima decisões que **sacrificam utilização** para **salvar receita**.

Gêmeos digitais operacionais conectam planejamento e execução: recebem **sinais** (confiabilidade, filas, energia) e testam **playbooks** para ver **quanto** cada ação derruba **TTR** e **TLC** e **como** altera **utilização** e **gCO_2e/ton-km**. Essa *tecnologia de prova* evita "ótimos de planilha" e ancora **pedidos de CAPEX/OPEX** em **curvas de resposta** (IVANOV; DOLGUI, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021). Ao levar o *what-if* para a rotina, a empresa transforma **KPIs** em **política operacional**, não em *scorecards*.

A **transparência seletiva** com o ecossistema fecha o ciclo: publicar **metodologias**, **tiers de dados** e **incertezas**; aderir a **GHG Protocol/EN 16258/GLEC**; compartilhar **painéis de desempenho** com parceiros e, quando apropriado, com autoridades; e submeter **amostras** à **verificação independente** fortalece legitimidade e **reduz litígio** (GHG PROTOCOL, 2011; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; IAPH, 2020). O resultado é um **Regime Operacional de Resiliência** em que **KPIs → gatilhos → ações → métricas auditáveis** (ISO 22301, 2019; SHEFFI, 2015).

Por fim, a **cadência** precisa ser explícita: revisão **semanal** para *tático* (S&OE), **mensal** para *tático-estratégico* (S&OP) e **trimestral** para **portfólio e contratos**; **AARs** pós-pico atualizam **limiares** e **regras de exceção**; **treinamentos**mantêm proficiência em leitura dos painéis e operação dos *playbooks*. Sem **cadência e treino**, mesmo os melhores KPIs **não viram comportamento** (SHEFFI, 2015; ISO 22301, 2019).

6. Métricas de resiliência (TTR/TTS, OTIF, VaR) como "envelope" de governança para custo, utilização e carbono

Chamamos de **envelope de resiliência** o conjunto de **limites operacionais** definidos por **TTR/TTS** (tempo para degradar/recuperar), **OTIF** (nível de serviço entregue) e **Operational VaR/Expected Shortfall** (perda em cauda). **Custo por unidade**, **utilização** e **gCO_2e/ton-km** devem otimizar **dentro** desse envelope — nunca à sua custa —, sob pena de ganhos efêmeros que **aumentam variância** e **destroem margem** em choques (SHEFFI, 2015; PONOMAROV; HOLCOMB, 2009; CHOPRA; MEINDL, 2016). O envelope torna **explícito** que eficiência e sustentabilidade **são restrições**, não meras aspirações.

O **TTR/TTS** deve ser medido por **nó** e por **corredor**, com granularidade suficiente para capturar **backlogs** e **loops de reforço**. Em portos e intermodais, **tempo de ancoragem**, **produtividade de cais**, **ocupação de pátio**, **truck turn time**e **slots ferroviários** são **preditores** do TTR; a torre de controle precisa **simular** como **janelas estendidas**, **off-dock** e **desvios** movem a rede de volta ao regime subcrítico (WORLD BANK, 2020; SEA-

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTELLIGENCE, 2021). Estabelecer **metas TTR** por cenário cria um "teto de sofrimento" que não pode ser violado por decisões que apenas **barateiam o TEU**.

O **OTIF** é a **bússola do cliente** e deve ser **co-monitorado** com **utilização**: consolidar para elevar fator de carga **sem**degradar **OTIF** é *ótimo*; consolidar **com** degradação de janelas e **demurrage/detention** é **falso ganho**. Em ambientes de **desbalanceamento** e **picos**, **priorização por valor de tempo** e **políticas de exceção** (por SKU crítico) preservam **receita** melhor que metas cegas de utilização (CHRISTOPHER, 2016; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021). **Painéis**devem mostrar **dispersão** de OTIF, não apenas médias, para expor **caudas** que consomem margem.

O **Operational VaR/Expected Shortfall** traduz **serviço** e **custo** em linguagem financeira: qual a **pior perda** plausível (custo extra, *lost sales*, *frete prêmio*) a 95%/99%? Em portfólios com **opções de capacidade** e **multi-gateway**, o VaR **cai** mesmo se o **custo médio** subir ligeiramente — troca racional em setores **time-sensitive** (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008; SHEFFI, 2015). Incorporar VaR ao envelope impede que **otimizações estáticas**passem no comitê sem provar **proteção de cauda**.

KRIs formam a borda **antecipatória** do envelope. Quedas persistentes de **schedule reliability**, *spikes* de **bunker/diesel**, **fila/ancoragem** fora da banda, **explosão de *truck turn time*** e **utilização de *rail slots*** no limite são **sinais precursores** que exigem **ação automática** conforme *playbook* (IAPH, 2020; SEA-INTELLIGENCE, 2021; EIA, 2021). Definir **limiares numéricos**, **fontes** e **responsáveis** evita que o envelope seja **retórico** e garante **tempo de reação** antes que **backlogs** cresçam **superlinearmente**.

O envelope também organiza **fronteiras eficientes** entre **utilização × TTR × carbono**. Gráficos que exibem **gCO_2e/ton-km** vs. **TTR** sob bandas de **custo-to-serve** revelam **combos dominantes** — p. ex., **utilização adequada + agendamento inteligente + off-dock** — que reduzem **carbono** e **tempo** com leve custo incremental; soluções monocausais, como **slow steaming** sem recalibrar **estoques** e **frequência**, podem **violar** TTR/OTIF e **ampliar** o triângulo da resiliência (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; OECD/ITF, 2016; IMO, 2020). O envelope, portanto, é **ferramenta de portfólio**, não apenas de auditoria.

No **relato executivo**, o envelope vira **quadro-mestre**: **painéis** ao conselho mostram **OTIF**, **TTR/TTS**, **VaR**, **custo-to-serve**, **utilização** e **intensidade de carbono** com **metodologias** e **incertezas**; **metas públicas** e **barômetros** (IAPH/World Bank) dão **legitimidade** e **benchmarking** externo (WORLD BANK, 2020; IAPH, 2020; ISO 22301, 2019). Nessa linguagem, pedidos de **CAPEX/OPEX** passam a disputar **perda evitada** e **redução de TTR**, não *slides* estéticos.

Por fim, o envelope é **vivo**. **AARs** trimestrais recalibram **limiares**, atualizam **fatores de emissão** e **regras de imputação** (tiers, WTT/TTW), revisam **denominadores** de **utilização** por mudança de *mix* e incorporam **novas evidências** (p. ex., *driver shortage*, sazonalidade climática). **Treinamentos** e **simulações** mantêm proficiência; **auditorias independentes** preservam credibilidade (GHG PROTOCOL, 2011; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; ISO

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

22301, 2019). Em síntese, o envelope faz com que **eficiência, serviço e sustentabilidade** sejam **copilotos** permanentes das decisões — e não passageiros ocasionais.

7. *Benchmarking* e *gain-sharing* entre elos: desenho de incentivos sem perversidades

O ponto de partida para um *benchmarking* sério de **utilização de contêineres, custo por unidade e emissões** é a **normalização metodológica**: mesmo dicionário métrico, mesmas janelas temporais, mesma segmentação por **serviço/rota/gateway** e **família de produto**, com clareza sobre **denominadores** (ton-km, TEU-km, pedido, SKU) e escopos (**frete puro** vs. **custo-to-serve**; **WTT/TTW** em carbono). Sem isso, comparações cruzadas geram **ilusões de eficiência** e **injustiças contratuais**, sobretudo quando há **desbalanceamentos estruturais** de *headhaul/backhaul* que deprimem utilização média e distorcem intensidades de carbono (CHOPRA; MEINDL, 2016; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; UNCTAD, 2020). Uma prática robusta é publicar *benchmarks* em **camadas**: por janela/serviço (base), por corredor (agregado) e **índice corporativo** ponderado por valor tempo/receita.

O segundo alicerce é **qualidade e linhagem de dados**. *Benchmarks* devem indicar **tiers** de dado (fatores médios, consumo operacional, telemetria), **fontes** (TOS/PCS, WMS/TMS, faturamento, energia), **regras de imputação** e **auditoria independente** por amostragem, evitando que supostas "melhorias" sejam produto de **mudanças contábeis** e não de produtividade real (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020; GHG PROTOCOL, 2011). A ausência de trilha de reconciliação — por exemplo, entre **dwell** publicado e **detention** faturado — transforma *benchmarking* em disputa de versões e neutraliza *gain-sharing* (OECD/ITF, 2016).

O terceiro pilar é o **ajuste por mix**. A comparação de custo/ton-km e gCO_2e/ton-km precisa **desagregar** por **densidade**, **reefer vs. dry**, **periculosidade** e **criticidade** (valor de tempo), sob pena de penalizar operações que atendem SKUs intrinsecamente mais caros ou com menor fator de carga. A solução é usar **índices ajustados** (por exemplo, *utilização ajustada ao limitante*, custo-to-serve por **janela/serviço** e **intensidade de carbono** com WTT/TTW) e publicar, ao lado dos índices, **composições de mix** para leitura contextual (CHRISTOPHER, 2016; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; UNCTAD, 2020). Esse ajuste reduz **incentivos perversos** de "fugir" de cargas difíceis.

No desenho de ***gain-sharing***, a regra deve repartir **perda evitada** mensurada em **moeda**: queda de **demurrage/detention**, de **frete prêmio**, de **expedições de contingência** e de **TTR** convertido em **capital de giro**poupado, além da **redução de gCO_2e/ton-km** ponderada por preço sombra de carbono quando aplicável. A referência é um **baseline** congelado (janela/serviço) e um **contrafactual** gerado por **gêmeo digital** ou série histórica ajustada, com *wash-out* de efeitos exógenos (combustível, tarifas) para não remunerar "vento de cauda" (SHEFFI, 2015; IVANOV; DOLGUI, 2020; WORLD BANK, 2020). O *pool* de ganhos financia **janelas estendidas**, **off-dock** e **trens extras**, criando **ciclo virtuoso**.

Para **evitar perversidades**, *gain-sharing* não pode **bonificar isoladamente** a **utilização** ou o **custo por unidade**. Metas unidimensionais geram **esperas** para consolidar (piora OTIF/TTR), **risco de avaria** e **carbono oculto** por *idling*; metas só de carbono podem **forçar modal shift**

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

sem capacidade, subindo custo e degradando serviço. O antídoto é um **cesto ponderado**: **utilização ajustada** + **custo-to-serve** + **gCO₂e/ton-km dentro** de um **envelope de resiliência**(TTR/TTS, OTIF, VaR) que funcione como **restrição dura** (CHOPRA; MEINDL, 2016; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; SHEFFI, 2015). Assim, não se compra eficiência "barata" que estoura a cauda de risco.

Outro cuidado é o **timing**. Ganhos devem ser apurados por **janelas rolling** com **sazonalidade** e **picos** tratados explicitamente, para que operadores **invistam** quando mais importa (safras, *peak season*). **Cláusulas sazonais** que elevam o *split* de *gain-sharing* em pico alinham incentivos à **elasticidade marginal** de medidas como **janelas** e **trens adicionais** (SEA-INTELLIGENCE, 2021; WORLD BANK, 2020). Sem esse *timing*, os ganhos aparecem **fora** da janela de dor e o ecossistema regride ao improviso.

A **verificação independente** é parte do contrato: amostragens de **dwell**, **turn time**, **utilização**, **combustível** e **emissões**por terceiro neutro, com **ACIs** e **regras de reprocessamento** quando falhas de dado superarem tolerâncias. Em carbono, vale usar **tiers GLEC** e recalcular retrospectivamente quando **fatores** mudarem, preservando **comparabilidade intertemporal** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; GHG PROTOCOL, 2011). No custo, **ABC/TDABC** auditado garante que *overheads* e **custos de congestionamento** não "sumam" (KAPLAN; ANDERSON, 2007; WORLD BANK, 2020).

Há também **limites regulatórios e concorrenciais**. Em mercados com **alianças** e **integração vertical**, *gain-sharing* e **pools de contêineres** devem observar **antitruste** e **não discriminação**, com **acesso neutro** e **transparência mínima**de dados; do contrário, o remédio vira barreira à entrada (OECD/ITF, 2016; HARALAMBIDES, 2019). A solução é padronizar **APIs**, publicar **metodologias** e **metas agregadas** e manter **comitês multiactor** para arbitragem técnica, reduzindo assimetria e oportunismo (IAPH, 2020).

Finalmente, *benchmarking* e *gain-sharing* só criam valor quando **retroalimentam o S&OP/S&OE** e **orçamentos**. Metas trimestrais de **redução de TTR**, **queda do custo-to-serve** e **intensidade de carbono** devem **liberar funding** de um **fundo de resiliência** para **off-dock**, **janelas**, **automação seletiva** e **opções de capacidade**, com **portões de fase**atrelados a **perda evitada** comprovada (SHEFFI, 2015; ISO 22301, 2019). É nesse encadeamento — medir, comparar, distribuir ganhos e reinvestir — que o painel de KPIs deixa de ser **decorativo** e vira **motor de governança**.

8. *Roadmap* de implantação: metas, cadência e verificação independente

O *roadmap* inicia com um **diagnóstico de materialidade**: mapear **corredores críticos**, **SKUs A/B por valor de tempo**, **gargalos prováveis** (porto, *drayage*, ferrovia, compliance), **perfil energético** e **maturidade de dados** por **tier**. O resultado é um **mapa de riscos e alavancas** que vincula cada KPI a **KRIs** (confiabilidade, fila/ancoragem, *turn time*, slots) e a **direitos de ação** disponíveis — por exemplo, "*Utilização ajustada* < X% + *dwell* > Y h → **ativar off-dock/janelas**; GLP < Z% por 3 semanas → **exercer opção de capacidade/desvio**" (SEA-

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

INTELLIGENCE, 2021; ISO 22301, 2019; WORLD BANK, 2020). Esse **quadro de comando** define onde começar.

Fase 1 (0–90 dias): construir o **painel mínimo viável** e o **dicionário métrico**. Integrar **TOS/PCS**, **WMS/TMS**, **faturamento** e **energia/combustível** por **APIs**, publicar **fórmulas** (utilização, custo-to-serve, gCO_2e/ton-km) e **linhagens** de dado, e estabelecer **SLA de latência** e **regras de imputação**. Em paralelo, rodar um **piloto** em um **corredor/janela** com **gêmeo digital** para calibrar **curvas de resposta** (utilização × TTR × carbono) a **janelas estendidas**, **off-dock**, **multi-gateway** e **opções**, criando **fronteiras eficientes** para o S&OP (IVANOV; DOLGUI, 2020; CHOPRA; MEINDL, 2016).

Fase 2 (90–180 dias): **institucionalizar a torre de controle** interorganizacional, com **rituais S&OE** (briefings diários, *war rooms* semanais), **gatilhos preautorizados** e **playbooks** acionáveis. **Contratos** entram na nova lógica: **SLAs de contingência**, **indexação à confiabilidade**, **isenções condicionais de demurrage/detention**, **opções de capacidade**com **limiares objetivos** ancorados nos KPIs/KRIs do painel (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020; SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2008). Essa fase reduz **latência decisória** e dá **dentes** às métricas.

Fase 3 (6–12 meses): escalar **buffers estruturais** e **padronização técnica**. Implantar **portos secos/off-dock**, **coortes de chassis**, **contratos sazonais** ferroviários, e **padrões de embalagem/etiquetagem/EDI-API** para **substituibilidade plug-and-play** entre gateways, reduzindo **tempo de requalificação** e **custo de desvio** (OECD/ITF, 2016; CHRISTOPHER, 2016). Nesta fase, formalizar ***gain-sharing*** com **baseline** e **verificação independente**, viabilizando **fundos de resiliência** autofinanciados por **perda evitada** (SHEFFI, 2015).

Fase 4 (12–24 meses): priorizar **capacidade modular** e **automação seletiva** onde o gêmeo mostrar **alto ganho marginal** em **TTR** por unidade de capital: **berços em fases**, **yard automation** parcial, **STS adicionais**, **corredores ferroviários escaláveis**, **shore power/eletrificação de pátio** com atenção a **WTT/TTW** (WORLD BANK, 2020; IMO, 2020). Estruturar **pagamentos por disponibilidade** atrelados a **SLAs** e metas de **TTR/OTIF** e **gCO_2e/ton-km**, reduzindo risco de demanda e acelerando *payback* (SHEFFI, 2015).

O *roadmap* exige **metas e cadência** explícitas. **Semanal** para *tático* (KPIs de utilização/custo/OTIF e KRIs de fluxo), **mensal** para S&OP (fronteiras eficientes e *mix* modal/gateway) e **trimestral** para **portfólio** e **contratos**, com **AARs**pós-pico para revisar **limiares** e **regras de exceção** (ISO 22301, 2019; CHRISTOPHER, 2016). Métricas **públicas**(turnaround, *dwell*, confiabilidade) e **barômetros** setoriais aumentam **legitimidade** e **disciplina de execução** (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020).

A **verificação independente** dá credibilidade e evita *greenwashing* de custo e carbono. Em emissões, aplicar **GLEC/EN 16258/GHG Protocol** com **tiers claros**, **bandas de incerteza** e **recalculo** quando fatores mudarem; em custo, auditar **ABC/TDABC** e reconciliações com **detention/armazenagem**; em utilização, auditar **pesos/cubagens**por amostragem e **regras de *match-back*** (SMART FREIGHT CENTRE, 2019; GHG PROTOCOL, 2011; KAPLAN;

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

ANDERSON, 2007). A auditoria deve ser **amigável à operação**: foco em **risk-based sampling** e **API-first**.

O **capital humano** é condição de possibilidade. Treinar times em **leitura de painéis**, **operações de gêmeos digitais**, **contratos com opções** e **S&OP/S&OE por gatilhos**; instituir **certificações internas**; e rodar **simulações de mesa**mensais consolida **capacidade repetível** (CHRISTOPHER, 2016; SHEFFI, 2015). **Bonificações** atreladas a **TTR reduzido**, **custo-to-serve** e **intensidade de carbono** alinham comportamento à estratégia, evitando **otimizações locais**que corroem serviço.

Por fim, o *roadmap* precisa de um **quadro de financiamento** que traduza KPIs em **ativos bancáveis**. **Fundos de resiliência** capturam *gain-sharing* e financiam **off-dock**, **janelas** e **automação seletiva**; **seguros paramétricos** e **opções de capacidade** com **gatilhos verificáveis** (GLP, filas, *dwell*) protegem **downside**; **capex modular** com **pagamentos por disponibilidade** viabiliza projetos de maior porte (SHEFFI, 2015; SEA-INTELLIGENCE, 2021). Esse encadeamento converte **medir** em **agir**, **agir** em **resultado** e **resultado** em **escala** — essência de uma **governança de KPIs** que otimiza **custo, serviço e carbono** simultaneamente.

Conclusão

A análise desenvolvida ao longo deste artigo sustenta que **KPIs logísticos só criam valor quando deixam de ser "números em um painel" e passam a ser mecanismos de decisão com direitos de ação acoplados**. Isso requer **definições operacionais inequívocas**, **métodos padronizados de apuração** e **governança** que ligue métricas a **rituais S&OP/S&OE**, *playbooks* e contratos. Ao tratar **taxa de utilização de contêineres**, **custo por unidade transportada** e **emissões de GEE** como um **trípode** — eficiência, custo-to-serve e sustentabilidade —, evitamos otimizações locais que corroem serviço e margem em momentos de estresse, ancorando as escolhas no **envelope de resiliência** (TTR/TTS, OTIF e VaR) como **restrições duras** (CHRISTOPHER, 2016; CHOPRA; MEINDL, 2016; SHEFFI, 2015).

No primeiro eixo, mostramos que **utilização de contêineres** é uma métrica **condicional**: melhora quando há consolidação, *match-back* e triangulação, mas pode **degradar OTIF** e **elevar risco** quando induz esperas e adensamentos excessivos. A leitura correta exige distinguir **limitantes físicos** (peso vs. cubagem), **headhaul/backhaul**e **classes de produto** (dry, reefer, perigosos), além de publicar **utilização ajustada** ao limitante e **dispersão** por janela de serviço. Em mercados com **desbalanceamento estrutural** e gargalos portuários, **pools interorganizacionais de contêineres** e **políticas condicionais de demurrage/detention** são alavancas para elevar uso efetivo sem punir o elo errado (UNCTAD, 2020; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; WORLD BANK, 2020).

No segundo eixo, **custo por unidade transportada** só orienta bem quando migra de **frete puro** para **custo-to-serve**, incorporando **terminal handling**, **drayage/chassis**, **armazenagem**, **demurrage/detention**, **expedições de contingência** e **capital de giro**. A adoção de **ABC/TDABC** reduz vieses de rateio e evidencia o custo da **variância**(atrasos, filas, rolagem), permitindo comparar **buffers estruturais** (multi-gateway, *off-dock*) e **opções contratuais** por

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

perda evitada e **redução de TTR**. Sem essa ótica, decisões que barateiam o TEU "na planilha" **aumentam** o custo total quando se mede o que de fato importa ao negócio (KAPLAN; ANDERSON, 2007; SHEFFI, 2015; IAPH, 2020).

No terceiro eixo, **emissões de GEE** precisam sair do terreno do *greenwashing* e entrar no da **contabilidade auditável**: **GHG Protocol (Escopo 3, Cat. 4/9)**, **EN 16258** e **GLEC Framework** asseguram **fronteiras claras**, **tiers de dados**(fatores médios → consumo real → telemetria) e **distinção WTT/TTW**. A **intensidade de carbono (gCO₂e/ton-km)**deve ser reportada **junto** de emissões absolutas, **utilização** e **nível de serviço**, pois **ganhos aparentes** em intensidade podem esconder **esperas e re-manuseios** que elevam emissões totais. Decisões como **slow steaming**, **modal shift** e **eletrificação de pátio/shore power** precisam ser avaliadas **no portfólio**, com efeitos sobre **TTR**, **OTIF** e **TLC** (GHG PROTOCOL, 2011; EN 16258, 2012; SMART FREIGHT CENTRE, 2019; IMO, 2020).

Um resultado central é que **dados e padrões** são a infraestrutura invisível dessa agenda. **Port Community Systems (PCS)**, **Janelas Únicas Digitais** e **APIs** entre **TOS/WMS/TMS/energia** reduzem **assimetria informacional**, cortam **latência** e permitem **indexar contratos** a métricas confiáveis. **Dicionários de dados**, **linhagem/auditoria** e **publicação regular** de **turnaround, dwell e confiabilidade** criam legitimidade e **diminuem litígios**, sobretudo quando **SLAs de contingência** e **isenções condicionais de demurrage/detention** entram em cena (IAPH, 2020; WORLD BANK, 2020; OECD/ITF, 2016; ISO 22301, 2019).

Também argumentamos que **torres de controle interorganizacionais** e **gêmeos digitais** são o elo entre **métricas** e **ação**. Ao acoplar **DES/SD/ABM** a **bandas de frete/energia** e **sinais precursores** (queda de *schedule reliability*, *spikes*de bunker/diesel, fila/ancoragem), as empresas passam a **testar playbooks** antes de acioná-los, estimando **curvas de resposta**: quanto **janelas estendidas**, **off-dock** e **desvios multi-gateway** derrubam **TTR** e **TLC**, e como alteram **utilização** e **gCO₂e/ton-km**. Esse realismo operacional evita "ótimos de planilha" e ancora pedidos de **CAPEX/OPEX**em **perda evitada** (IVANOV; DOLGUI, 2020; SEA-INTELLIGENCE, 2021; EIA, 2021).

A literatura e a prática convergem para **carteiras de mitigação** que combinam **buffers físicos** (estoques ponte para SKUs *time-sensitive*), **buffers estruturais** (multi-gateway, *off-dock*, contratos ferroviários sazonais), e **opções reais**(reservas de capacidade, *box pools*) com **gatilhos objetivos**. **Fronteiras eficientes** mostram que, em muitos corredores, o *combo* "**utilização adequada (sem esperar), agendamento inteligente e *off-dock***" domina soluções monocausais, reduzindo **carbono** e **TTR** com leve custo incremental por unidade — **troca racional** quando medida por **VaR/Expected Shortfall** de serviço (SHEFFI, 2015; NOTTEBOOM; PALLIS, 2020; CHOPRA; MEINDL, 2016).

No plano **contratual**, **gain-sharing** deve repartir **perda evitada** (queda de detention, frete prêmio e expedições de contingência; redução de TTR e gCO₂e/ton-km) sobre um **baseline** auditável, com **wash-out** de efeitos exógenos. **Metas unidimensionais** (apenas utilização, apenas custo, apenas carbono) geram **perversidades**; o desenho correto usa um **cesto ponderado dentro** do **envelope de resiliência** e observa **antitruste/não discriminação** em

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

pools e trocas de dados (IAPH, 2020; OECD/ITF, 2016; HARALAMBIDES, 2019; DREWRY, 2021).

Propusemos, ainda, um **roadmap** em quatro fases: **(i)** painel mínimo viável e dicionário métrico; **(ii)** institucionalização da torre com **gatilhos preautorizados** e **SLAs de contingência/opções**; **(iii)** escalonamento de **buffers estruturais** e **padronização técnica** para substituição *plug-and-play*; **(iv)** investimentos em **capacidade modular e automação seletiva** financiados por **pagamentos por disponibilidade**. **Treinamento contínuo**, **AARs** e **verificação independente**preservam credibilidade e mantêm a organização em **regime operacional de resiliência** (ISO 22301, 2019; CHRISTOPHER, 2016; SHEFFI, 2015).

Do ponto de vista **financeiro-executivo**, a mudança de lente é inequívoca: **do custo médio por TEU** para **margem preservada**, **perda evitada** e **proteção de cauda**. **Operational VaR** torna comparáveis **estoque físico**, **buffers estruturais** e **opções**, enquanto **orçamentos de carbono** e **metas TTR/OTIF** funcionam como **restrições**. Essa tradução cria **linguagem comum** entre operações e conselho e acelera aprovações baseadas em **evidência**(PONOMAROV; HOLCOMB, 2009; SEA-INTELLIGENCE, 2021; WORLD BANK, 2020).

Em síntese, **definir e gerir KPIs** para **utilização, custo e carbono** é **engenharia de governança**: padronizar, medir, auditar, **conectar a direitos de ação** e **reinvestir ganhos**. Quando **dados** se tornam infraestrutura e **contratos** viram **motores de execução**, as cadeias evoluem de uma lógica reativa para um **regime previsível e adaptativo**, no qual **eficiência, resiliência e sustentabilidade** deixam de competir entre si e passam a **co-otimizar** resultados econômicos e operacionais, mesmo sob **volatilidade geopolítica e tarifária** (CHRISTOPHER, 2016; NOTTEBOOM; RODRIGUE, 2021; SMART FREIGHT CENTRE, 2019).

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.

EIA – U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Short-Term Energy Outlook*. Washington, DC: EIA, 2021.

EN 16258. *Methodology for Calculation and Declaration of Energy Consumption and GHG Emissions of Transport Services (freight and passengers)*. Brussels: CEN, 2012.

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

GHG PROTOCOL. *Corporate Value Chain (Scope 3) Accounting and Reporting Standard*. Washington, DC: WRI/WBCSD, 2011.

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.

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

IMO – INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. *IMO 2020 Sulphur Cap: Guidance and Impacts*. London: IMO, 2020.

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

KAPLAN, R. S.; ANDERSON, S. R. *Time-Driven Activity-Based Costing: A Simpler and More Powerful Path to Higher Profits*. Boston: Harvard Business School Press, 2007.

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

NOTTEBOOM, T.; RODRIGUE, J.-P. Port congestion and the destabilization of supply chains 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.

SMART FREIGHT CENTRE. *Global Logistics Emissions Council (GLEC) Framework*. Amsterdam: SFC, 2019.

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

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.

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

Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença CreativeCommons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que o trabalho original seja corretamente citado.