

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS ECONÔMICAS
GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ECONÔMICAS**

GUSTAVO HENRIQUE DE ARAUJO GOMES

Modelo de Previsão para transporte ferroviário no Brasil

Juiz de Fora
2025

GUSTAVO HENRIQUE DE ARAUJO GOMES

Modelo de Previsão para transporte ferroviário no Brasil

Monografia submetida ao Departamento
de Ciências Econômicas da Universidade
Federal de Juiz de Fora para inscrição do
trabalho de monografia vinculado ao curso
de Economia sob orientação do Prof. Dr.
Alexandre Zanini.

Juiz de Fora
2025

Araujo Gomes, Gustavo Henrique .
Modelo de Previsão para transporte ferroviário no Brasil /
Gustavo Henrique Araujo Gomes. -- 2025.
48 f. : il.

Orientador: Alexandre Zanini
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Economia, 2025.

1. Regressão Dinâmica. 2. TKU. 3. Transporte Ferroviário. 4.
Modelo log-log. I. Zanini, Alexandre , orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
REITORIA - FACECON - Depto. de Economia

FACULDADE DE ECONOMIA / UFJF

ATA DE APROVAÇÃO DE MONOGRAFIA II (MONO B)

Na data de 02/12/2025, a Banca Examinadora, composta pelos professores

1 - Alexandre Zanini - orientador; e

2 - Cláudio Roberto Fóffano Vasconcelos,

reuniu-se para avaliar a monografia do acadêmico **GUSTAVO HENRIQUE DE ARAUJO GOMES**, intitulada: **MODELO DE PREVISÃO PARA TRANSPORTE FERROVIÁRIO NO BRASIL**.

Após primeira avaliação, resolveu a Banca sugerir alterações ao texto apresentado, conforme relatório sintetizado pelo orientador. A Banca, delegando ao orientador a observância das alterações propostas, resolveu **APROVAR** a referida monografia.

ASSINATURA ELETRÔNICA DOS PROFESSORES AVALIADORES



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Zanini, Professor(a)**, em 02/12/2025, às 17:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Claudio Roberto Fóffano Vasconcelos, Professor(a)**, em 02/12/2025, às 19:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2776355** e o código CRC **BC6F3C2B**.

Referência: Processo nº 23071.954533/2025-31

SEI nº 2776355

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo estruturar um modelo que permita prever o volume de carga transportado pelas ferrovias brasileiras, utilizando como variável dependente a métrica de toneladas por quilômetro útil (TKU). Para isso, foi realizada uma revisão da literatura com o intuito de identificar variáveis explicativas que possuam correlação significativa com a variável de interesse. O modelo estimado na forma log-log permitiu identificar os coeficientes de elasticidade com as variáveis preço do minério de ferro, exportações de produtos minerais, câmbio e variáveis com defasagens temporais. Verificou-se que o modelo obteve uma capacidade de ajuste de cerca de 83,55% dos resultados, gerando projeções anualizadas consistentes, em linha com o histórico, e projetando uma alta de 0,69% para o ano de 2026 frente ao ano de 2024 e 1,5% acima de 2025.

Palavras-chave: Regressão dinâmica. TKU. Transporte ferroviário. Modelo Log-Log.

ABSTRACT

This study aims to structure a model to forecast the volume of freight transported by Brazilian railways, using the metric of tons per useful kilometer (TKU) as the dependent variable. To this end, a literature review was conducted to identify explanatory variables with a significant correlation to the variable of interest. The model, estimated in log-log form, allowed for the identification of elasticity coefficients with the variables iron ore price, mineral product exports, exchange rate, and time-lagged variables. It was verified that the model achieved an explanatory power of about 83.55% of the results, generating consistent annualized projections, with variations aligned with historical data, and forecasting an increase of 0.69% for the year 2026 compared to 2024, and 1.5% above 2025.

Keywords: Dynamic regression. Statistical significance. TKU. Railway freight.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Locomotion No. 1, George Stephenson, 1825 (exemplar preservado).	12
Figura 2 — 'The Rocket', Stephenson (fotografia histórica, c. 1900).	12
Figura 3: Construção de um modelo de regressão dinâmica	26
Figura 4: Função de Autocorrelação dos Erros	36
Figura 5: TKU (em milhões - Valores Reais e Previstos)	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo das variáveis utilizadas na estimação modelo	33
Tabela 2: Previsão de 20 meses para TKUs - Intervalo de Confiança de 95%	38
Tabela 3: Dados anualizados da variável TKU e variação percentual	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIFER	Associação Brasileira da Indústria Ferroviária
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
ANTF	Associação Nacional de Transportadores Ferroviários
CNT	Confederação Nacional do Transporte
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. PANORAMA DO SETOR FERROVIÁRIO	11
2.1 O desenvolvimento ferroviário no mundo	11
2.2 A história ferroviária no Brasil	14
2.3 O atual setor ferroviário no Brasil	17
3. METODOLOGIA	20
3.1 Conceituação	20
3.2 Estrutura dos Modelos de Regressão Dinâmica	22
3.2.1 Modelos de Regressão Cochrane-Orcutt Generalizados	23
3.3 Construção de modelos de regressão dinâmica	24
3.4 Testes usados nos modelos de regressão dinâmica	27
3.4.1 Testes de verificação da “dinâmica” do modelo	27
3.4.2 Testes para a especificação das variáveis causais	30
3.4.3 Testes baseados na autocorrelação dos resíduos	31
4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS	32
4.1 Base de dados e variáveis	32
4.2. Análise dos resultados	34
4.3 Projeções do Modelo	37
5. CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

O transporte ferroviário desempenha papel estratégico no escoamento da produção nacional, especialmente em um país de dimensões continentais como o Brasil. Segundo dados da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2023), a malha ferroviária brasileira possui aproximadamente 30 mil km, dos quais cerca de 38% estavam inativos em 2022. Apesar dessa limitação, em 2023 o volume de carga transportado atingiu cerca de 390 bilhões de toneladas por quilômetro útil (TKU), consolidando o modal como essencial para o transporte de bens de alto volume e pouco valor agregado, como commodities (ANTT, 2024). Entre os produtos transportados, o minério de ferro representou aproximadamente 67% do total de TKU, evidenciando a dependência do setor em relação aos mercados primários, particularmente o mineral (ANTT, 2024).

A relevância do transporte ferroviário se reforça quando analisada sua participação na matriz de transportes nacional. A Fundação Dom Cabral (FDC, 2019) destaca que mais de 60% do volume de cargas transportadas no país depende das rodovias, enquanto o modal ferroviário responde por aproximadamente 27%. Essa diferença revela a concentração histórica no transporte rodoviário e evidencia a subutilização do potencial ferroviário. Projeções da mesma instituição indicam que, com políticas de incentivo, a participação ferroviária poderá alcançar cerca de 36% do total transportado até 2035, reforçando o papel do modal como eixo estruturante da logística nacional (FDC, 2019).

Além da dimensão econômica, o transporte ferroviário apresenta vantagens em termos de eficiência energética e sustentabilidade ambiental. De acordo com o World Bank (2009), o modal ferroviário consome menos energia por tonelada transportada em comparação ao rodoviário e emite menor quantidade de poluentes, tornando-o eficiente para o transporte de grandes volumes por longas distâncias. Esse atributo contribui não apenas para ganhos operacionais, mas também para a redução de impactos ambientais associados à movimentação de cargas (World Bank, 2009).

No campo acadêmico, observa-se uma lacuna significativa. Estudos anteriores, como Dutra Filho (2022), aplicaram modelos univariados de séries temporais, como Amortecimento Exponencial e Box & Jenkins, para estimar o volume transportado. Embora tenham fornecido resultados consistentes, tais abordagens não capturam plenamente a influência de múltiplas variáveis macroeconômicas e setoriais.

Diante disso, o presente trabalho propõe a utilização de regressão dinâmica¹, uma metodologia que permite modelar relações entre séries temporais de variáveis explicativas e a variável dependente, buscando compreender variáveis macroeconômicas e setoriais que causam maior impacto no setor ferroviário. Essa abordagem possibilita não apenas compreender melhor os determinantes do volume transportado em TKU, mas também projetar cenários com maior acuracidade, criando uma ferramenta que possibilita análises que capturam a sensibilidade das flutuações no ambiente de negócios do setor.

O estudo utiliza dados mensais referentes ao período de janeiro de 2011 a abril 2025, obtidos de fontes oficiais. O volume de TKU é fornecido pela CNT, enquanto variáveis explicativas macroeconômicas e setoriais foram coletadas junto a IBGE, IPEA Data, Investing e outras. A escolha dessas variáveis se deu com base em estudos acadêmicos prévios e na relevância econômica para o setor ferroviário, permitindo a construção de um modelo consistente.

Espera-se que os resultados contribuam tanto para a literatura acadêmica, ao aplicar regressão dinâmica em um contexto ainda pouco explorado no Brasil, quanto para a gestão prática, oferecendo subsídios para concessionárias e órgãos públicos na avaliação de políticas logísticas e planejamento de operações ferroviárias. Ao integrar evidências históricas, técnicas estatísticas e dados, o trabalho busca preencher lacunas de conhecimento e fornecer uma ferramenta de previsão.

O presente estudo está estruturado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta esta introdução; o Capítulo 2 discute o histórico das ferrovias brasileiras e os trabalhos acadêmicos que fundamentaram a escolha das variáveis; o Capítulo 3

¹ Goodrich (1989).

detalha a metodologia de regressão dinâmica; o Capítulo 4 trata da coleta, organização dos dados e geração das projeções e a análise dos resultados obtidos; e o Capítulo 5 contém as conclusões.

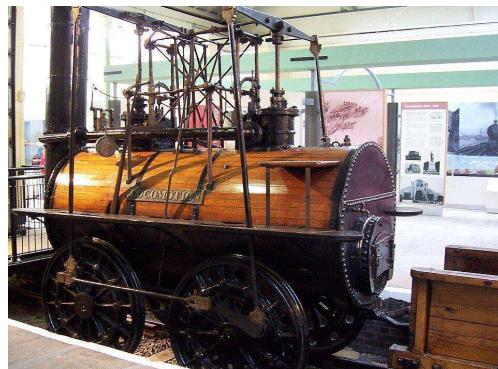
2. PANORAMA DO SETOR FERROVIÁRIO

2.1 O desenvolvimento ferroviário no mundo

O surgimento das ferrovias insere-se no processo mais amplo da Primeira Revolução Industrial e na transformação tecnológica baseada na máquina a vapor. A aplicação prática desta tecnologia ao transporte terrestre, por meio do desenvolvimento de locomotivas e da construção de linhas férreas, representou uma ruptura nos custos e tempos de circulação, reorganizando mercados, padrões de produção e a configuração espacial das economias (SILVEIRA, 2003; DNIT, 2016). Em termos analíticos, o aparecimento da ferrovia não foi apenas um avanço técnico: constituiu um nó entre inovação tecnológica, disponibilidade de capital, evolução institucional e dinâmicas geopolíticas que, em conjunto, remodelaram tipologias produtivas e formas de organização territorial (SILVEIRA, 2003).

A experiência inglesa é paradigmática como ponto de partida da difusão ferroviária. No início do século XIX, invenções e aperfeiçoamentos realizados por engenheiros como George Stephenson com a Locomotion em 1825 (Figura 1) e Robert Stephenson com a Rocket em 1829 (Figura 2) atestaram a viabilidade econômica e técnica do transporte por trilhos, servindo de modelo exportável para outras nações europeias e para os Estados Unidos (DNIT, 2016; SILVEIRA, 2003). Esse modelo combinou inovação, financiamento privado e arranjos institucionais que facilitaram a comercialização do modal, criando, no curto prazo, efeitos de rede — quanto mais linhas e ligações, maior o retorno marginal de cada extensão adicional da malha.

Figura 1: Locomotion No. 1, George Stephenson, 1825 (exemplar preservado)².



Fonte: Wikimedia.org

Figura 2 — 'The Rocket', Stephenson (fotografia histórica, c. 1900)³.



Fonte: Wikimedia.org

Do ponto de vista teórico, a expansão ferroviária deve ser compreendida em janelas de oportunidade macroeconômicas. Ciclos de inovação mostram que, em períodos de reestruturação tecnológica, recursos e capital convergem para obras de infraestrutura de grande porte (SILVEIRA, 2003). Assim, a difusão das ferrovias entre meados do século XIX e início do XX aparece articulada a um conjunto de fatores favoráveis — disponibilidade de capital (público e privado), demanda por integração de mercados, e contextos institucionais que premiavam a ampliação de redes de transporte (SILVEIRA, 2003).

Historicamente, porém, a trajetória das ferrovias nos diferentes países seguiu vetores distintos conforme objetivos econômicos e condições políticas. Em

² https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Locomotion_No._1..jpg

³ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stephenson%27s_Rocket.jpg

economias que visavam a industrialização interna (ex.: Reino Unido, partes dos Estados Unidos, Alemanha), a ferrovia foi catalisadora de processos de aglomeração industrial e de formação de mercados internos robustos. Em outros contextos — notadamente em colônias ou periferias econômicas — a ferrovia frequentemente assumiu caráter extrativista, direcionada ao escoamento de matérias-primas para portos e mercados externos, reproduzindo e consolidando lógicas de dependência econômica (DERRUAU, 1982 apud SILVEIRA, 2003).

Os impactos territoriais e sociais das ferrovias foram igualmente profundos. Ao reduzir custos de transporte, o modal alterou a localização de atividades econômicas, estimulou fluxos migratórios em direção a centros férreos, dinamizou o comércio regional e promoveu a formação de novas centralidades urbanas ao longo dos corredores ferroviários (SILVEIRA, 2003; DNIT, 2016). Em muitos casos, ferrovias criaram externalidades positivas — por exemplo, fomentando o surgimento de fornecedores locais e induzindo melhorias nas infraestruturas conexas — que, contudo, só se consolidaram quando houve concomitância entre oferta de capital, políticas industriais e criação de capacidades produtivas domésticas.

A difusão do modal também teve um perfil técnico-organizacional específico: a construção de uma malha ferroviária exige coordenação de grande escala (engenharia, fornecimento de material, financiamento e regulação), condição que favoreceu a emergência de novos arranjos institucionais financeiros, entre eles grandes projetos públicos, concessões privadas e parcerias híbridas (EUZEBIO, 2023). Em alguns países, o desenvolvimento de uma indústria de bens de capital (vagões, locomotivas, trilhos) acompanhou a expansão ferroviária, reduzindo a dependência de importações e criando cadeias produtivas domésticas — fenômeno menos presente em economias periféricas, o que afetou a sustentabilidade de longo prazo da infraestrutura nesses locais (SUMMERHILL apud EUZEBIO, 2023).

A passagem do século XIX ao XX, e posteriormente ao período pós-guerra, trouxe reconfigurações significativas: o motor a combustão e a difusão do transporte rodoviário introduziram nova competição modal, mas, em corredores de alta densidade de tráfego e em longas distâncias, a ferrovia permaneceu competitiva devido à sua elevada eficiência por tonelada-quilômetro (MARGO apud EUZEBIO,

2023). Assim, mesmo com a emergência de sistemas de transporte alternativos, o papel estratégico das ferrovias subsistiu nas rotas de maior fluxo e nas economias que conseguiram integrar planejamento territorial e industrialização.

Importante destacar que as escolhas institucionais que marcaram os processos de implantação (concessões, garantias estatais, subvenções, estatizações) exercearam efeitos duradouros sobre o desenho técnico e a vocação econômica final da malha. Onde incentivos públicos foram mal calibrados, surgiram traçados ineficientes e onerosos; onde predominaram estratégias de integração orientadas ao mercado interno, observou-se maior coesão e densidade da rede (EUZEBIO, 2023). Essa matriz de condicionantes técnicos, econômicos e institucionais é crucial para entender por que a história ferroviária de cada país assume contornos distintos e por que, ao avaliar alternativas regulatórias contemporâneas, é imprescindível considerar o legado dessas decisões iniciais.

Por fim, a história ferroviária mundial demonstra que a infraestrutura de transporte é simultaneamente uma questão técnica e uma decisão política: a expansão, manutenção e modernização da ferrovia dependem tanto de soluções de engenharia quanto de arranjos de governança, financiamento e articulação entre agentes públicos e privados (SILVEIRA, 2003; EUZEBIO, 2023).

2.2 A história ferroviária no Brasil

A trajetória das ferrovias no Brasil é, antes de tudo, a história de uma infraestrutura construída e regulada a partir de finalidades econômicas concretas — sobretudo o escoamento de produtos primários — e por meios institucionais que variaram entre incentivos públicos generosos, expansão dirigida por interesses regionais e, mais tarde, tentativa de centralização e de reprodução do serviço via empresas estatais. Essa combinação de objetivos, instrumentos e contingências produziu uma malha com baixa densidade relativa, marcada por concentração regional, heterogeneidade técnica e vocação setorial. (SILVEIRA, 2003; MATOS, 2015; EUZEBIO, 2023).

As origens legais e institucionais já apontam para a direção dos efeitos subsequentes. O Decreto nº 100/1835 (Decreto Feijó) introduziu a ideia de privilégio concessionário, mas faltavam garantias financeiras e incentivos suficientes para atrair vulto de capital. Só com o Decreto Legislativo nº 641/1852, que instituiu isenções, cessão de terras e garantias de juros ao capital empregado, ocorreu a virada: abriu-se um ambiente de negócios que viabilizou investimentos privados e a construção das primeiras linhas, dentre as quais a Estrada de Ferro Mauá (1854), símbolo não só da capacidade técnica (locomotiva a vapor) como da dependência de incentivos estatais para a materialização de grandes obras (DNIT, 2016). É indispensável notar que esses instrumentos — embora tivessem efeito mobilizador — condicionaram desde o início o desenho da rede: prazos longos, subvenções quilométricas e exclusividades territoriais criaram incentivos para priorizar quilometragem e escoamento local em detrimento de critérios de conectividade sistêmica (SILVEIRA, 2003; EUZEBIO, 2023).

A forte relação entre a expansão ferroviária e o ciclo do café cristalizou esse perfil. Entre o final do século XIX e início do XX, instrumentos como o Decreto Legislativo nº 2.450/1873 e o Decreto nº 5.561/1874 institucionalizaram subvenções e garantias que favoreceram trechos voltados ao escoamento para portos exportadores. Tais arranjos explicam a distribuição geográfica da malha — concentrada no Sudeste — e a fragmentação técnica, inclusive a coexistência de diferentes bitolas e a limitada interligação entre ramais (SANTOS, 1965 apud SILVEIRA, 2003). Assim, desde cedo a ferrovia brasileira se constituiu mais como instrumento de integração de cadeias exportadoras do que de articulação plena do território nacional.

No século XX o Estado tornou-se protagonista na tentativa de remediar problemas acumulados. Choques externos, variações de preços e a inviabilidade econômica de muitas linhas conduziram à encampação e a projetos de reaparelhamento (Decreto-lei nº 8.894/1946), culminando na criação da Rede Ferroviária Federal S.A. (RFFSA) pela Lei nº 3.115/1957. A centralização visava reorganizar e modernizar a infraestrutura; contudo, a opção política e fiscal do período privilegiou o modal rodoviário e, na prática, limitou a disponibilidade de recursos para um reaparelhamento abrangente. Dessa forma, a presença estatal,

embora robusta institucionalmente, revelou-se insuficiente para reconstruir a capilaridade e a qualidade da malha que haviam sido demandadas (EUZÉBIO, 2023).

Em resposta ao agravamento estrutural, a opção política por transferir a atividade operacional ao setor privado, implementada nos anos 1990 via Programa Nacional de Desestatização (PND) e amparada na legislação de concessões (Leis n.º 8.987/1995, n.º 9.074/1995 e Decreto n.º 1.832/1996), foi precedida por cuidadosa modelagem técnico-financeira. O BNDES, gestor do PND nesse processo, diagnosticou um quadro patrimonial e jurídico crítico: aproximadamente 22 mil km de malha nacional com ativos amplamente deteriorados, elevado passivo trabalhista (estimado em cerca de R\$ 1 bilhão na época), e grande volume de ativos não-operacionais de difícil valoração. Para compatibilizar atração de investidores e proteção do interesse público, adotou-se um arranjo híbrido: a outorga de concessões de serviço público de carga por 30 anos, o arrendamento aos concessionários dos ativos operacionais necessários à prestação do serviço, a manutenção pela RFFSA da gestão dos bens não-operacionais e a venda dos bens de pequeno valor — solução que buscou isolar o passivo e concentrar esforços na recuperação operacional (BNDES, 1997).

Para viabilizar economicamente unidades de negócio atraentes, a extensa RFFSA foi reagrupada em seis “malhas” autossuficientes (Oeste, Centro-Leste, Sudeste, Sul, Tereza Cristina e Nordeste), configuradas levando em conta bitolas, interconexões regionais e perfis de carga, de modo a facilitar a participação em consórcios e reduzir riscos específicos de gestão local (BNDES, 1997). Complementarmente, adotaram-se medidas práticas para tornar os leilões exequíveis: programas de recuperação emergencial financiados em parte por empréstimo com apoio do Banco Mundial (destinados, por exemplo, ao “Projeto Nordeste”), revisão das projeções econômico-financeiras e implementação de programa de desligamento incentivado e de requalificação profissional (SENAI/SENAC/SEBRAE) para ajustar o contingente de pessoal e mitigar impactos sociais (BNDES, 1997).

A experiência resultou em ganhos operacionais — aumento da velocidade média, investimentos em locomotivas, vagões e vias permanentes, e melhoria de indicadores de segurança — mas também evidenciou limites estruturais. O novo desenho privilegiou intervenções sobre trechos de maior potencial de geração de caixa e não alterou, por si só, a baixa densidade da malha nem sua concentração em corredores minerais e agrícolas de alta produtividade. Em suma, a desestatização da RFFSA funcionou como instrumento necessário para interromper o ciclo de deterioração, mas deixou claro que a mera transferência de operação ao setor privado não substitui planejamento público articulado e instrumentos financeiros para promover interiorização, coesão territorial e a conciliação entre eficiência econômica e objetivos sociais (BNDES, 1997; SILVEIRA, 2003).

Em suma, a contextualização histórica mostra que a malha ferroviária brasileira não é um problema meramente técnico a ser “consertado” por investimento, tampouco um assunto exclusivamente de mercado a ser corrigido pela iniciativa privada: é uma construção histórica em que objetivos econômicos, escolhas fiscais e arranjos institucionais produziram um legado concreto. A partir dessa compreensão histórica, o exame das autorizações ferroviárias e da exploração em regime privado deve buscar instrumentos que combinem eficiência econômica com planejamento público estratégico.

2.3 O atual setor ferroviário no Brasil

A herança tecnológica e institucional da malha ferroviária brasileira condicionou a configuração atual do setor. A malha que hoje opera foi construída com finalidades econômicas muito concretas — sobretudo o escoamento de produtos primários. Essa herança tecnológica e institucional (bitolas heterogêneas, traçados orientados a portos, contratos concessionários e concentração de investimentos em corredores rentáveis) explica por que o modal férreo no Brasil não se apresenta como uma rede difundida e multifuncional, mas como um conjunto de corredores especializados, capazes de transportar enormes volumes em longas distâncias quando bem articulados com a cadeia produtiva (DNIT, 2016).

Na atualidade, esse desenho estrutural traduz-se em uma forte especialização da carga ferroviária: o TKU brasileiro (toneladas por quilômetro útil) é dominado por cargas minerais, com destaque para o minério de ferro, que em 2023 representou cerca de 67% do volume transportado (ANTT, 2024). Além disso, cerca de 70% do que o modal transporta é direcionado ao mercado externo (ANTT, 2024).

Essa concentração em poucos produtos e corredores confere alta sensibilidade do desempenho ferroviário ao setor exportador e à economia mundial. Em particular, a posição da China como principal destino das exportações brasileiras de minério torna a dinâmica chinesa um determinante externo de primeira ordem: alterações na produção industrial chinesa reverberam rapidamente sobre os incentivos à produção brasileira e, por conseguinte, sobre o volume a ser escoado por via ferroviária (COMEXSTAT, s.d.; BNDES, 2017).

A taxa de câmbio constitui outro canal macroeconômico decisivo. Em mercados de commodities cotados em dólar, a depreciação do real pode melhorar a competitividade do exportador brasileiro em moeda local, ampliando margens e potencialmente estimulando maior produção e embarques (WORLD BANK, 2013). Assim, o câmbio atua como mecanismo de transmissão entre choques internacionais e decisões domésticas de produção e escoamento, afetando a intensidade de utilização das ferrovias cujo papel primordial é o transporte de mercadorias voltadas ao mercado externo (BNDES, 2017; ANTT, 2024).

Outro aspecto frequentemente subestimado, mas crucial para a análise da demanda por ferrovia, é a competitividade intermodal. No Brasil, onde o transporte rodoviário domina a matriz de cargas, o custo do diesel orienta boa parte da escolha modal: elevações significativas no preço do combustível alteram a relação de custo entre rodovia e ferrovia, tornando esta última mais atrativa para cargas volumosas e de longa distância (DELSAUT, 2014). Logo, o preço do diesel ajuda a compreender deslocamentos relativos de carga entre modais, sobretudo em períodos de choque de preços de energia.

Tomando por base esse quadro integrado — vocação exportadora e mineral do modal, sensibilidade a preços e demanda externa, influência do câmbio e da competitividade intermodal — torna-se claro porque certas variáveis se apresentam

como naturais candidatas para explicar o comportamento do TKU. Pode-se então concluir que, na formulação de um modelo explicativo do volume de TKU transportado pelas ferrovias brasileiras, convém priorizar indicadores que representem (i) o comércio exterior e a dinâmica setorial (volume de exportações de produtos minerais; preço internacional do minério de ferro; importações da China), (ii) a competitividade cambial (taxa USD/BRL) e (iii) os custos relativos do modal concorrente (preço do diesel).

3. METODOLOGIA

O presente trabalho adota uma abordagem quantitativa e explicativa, fundamentada na aplicação do Método de Regressão Dinâmica sobre séries temporais. O objetivo central é prever o volume de toneladas por quilômetro útil (TKU) transportadas pelas ferrovias brasileiras, a partir de variáveis macroeconômicas e setoriais relevantes. Este capítulo é baseado em Zanini (2000).

3.1 Conceituação

Nos modelos de regressão linear estudados comumente na literatura, supõe-se que os erros “gerados” pelo modelo possuem algumas características como: média zero, variância constante, distribuição Normal e independência (o que implica na inexistência de correlação serial).

Entretanto, na prática, ao modelar séries econômicas, os resíduos tendem a apresentar correlações positivas, e erros positivos tendem a ser seguidos por outros também positivos (o mesmo comportamento é observado para resíduos negativos). O gráfico dos resíduos versus o índice dos tempos revela, nesta situação, que os resíduos tendem a se agrupar em “blocos” de resíduos com o mesmo sinal.

Ao tentar modelar uma série temporal através de um modelo de regressão, a hipótese de independência dos ruídos não é realista, e os resultados e testes usados nos modelos de regressão não são válidos. Por exemplo, segundo os autores, algumas das consequências da autocorrelação dos resíduos são:

- 1) Os estimadores usuais por mínimos quadrados são ainda não tendenciosos, mas não têm variância mínima.
- 2) Os estimadores da variância e dos erros padrões dos coeficientes da regressão são subestimados, o que levaria à conclusão de que os estimadores são mais precisos do que na realidade.

3) Os intervalos de confiança para os parâmetros da regressão e os testes de hipóteses relacionados a estes intervalos perdem a validade, como uma consequência direta de 2.

Desta forma, estes três motivos implicam na necessidade de procurar procedimentos para tratar o problema de autocorrelação dos erros, pois ignorá-los leva, em geral, a inúmeras conclusões errôneas.

Em particular, dado que a hipótese de independência dos erros não é realista no contexto de séries temporais, os modelos de regressão dinâmica estendem os modelos usuais de regressão ao levantarem esta restrição.

Os modelos de regressão dinâmica combinam a dinâmica de séries temporais e o efeito de variáveis explicativas. Atenta-se que o termo “regressão dinâmica” não indica que os parâmetros do modelo evoluem no tempo. Ao contrário, a palavra “dinâmica” significa aqui um modelo de regressão no qual incluímos a estrutura de dependência de uma série temporal.

Modelos de regressão dinâmica devem ser usados quando existe uma estrutura de dependência entre a variável de interesse e variáveis causais e, ao mesmo tempo, quando a estrutura de correlação da série dependente (série a ser explicada) indicar que não podemos supor a independência dos erros.

Salienta-se que a estimação de parâmetros num modelo de regressão dinâmica é feita através de mínimos quadrados ordinários, a exemplo dos modelos de regressão usuais. Entretanto, a estimação em modelos de regressão dinâmica é mais complicada, e envolve um procedimento iterativo com vários estágios.

Nos modelos de regressão dinâmica, a variável dependente é explicada por seus valores defasados e pelos valores atuais e passados de variáveis causais ou exógenas. Atenta-se, neste momento, para uma outra distinção entre os modelos de regressão dinâmica e modelos de espaço de estados. Nos modelos de regressão dinâmica, as variáveis exógenas são tratadas como “números fixos” e não como variáveis aleatórias. Já nos modelos de espaço de estados,

As variáveis exógenas são tratadas como séries temporais, ou seja, realizações de processos estocásticos. Logo, no contexto da modelagem em espaço de estados, a estrutura de auto covariâncias e autocorrelações das séries de variáveis exógenas é uma informação de interesse, enquanto este aspecto é ignorado nos modelos de regressão dinâmica.

3.2 Estrutura dos Modelos de Regressão Dinâmica

Os modelos de regressão dinâmica podem ser descritos pela equação:

$$\phi(B)Y_t = \beta x_t + \varepsilon_t \quad (3.1)$$

onde:

Y_t = variável dependente (endógena) no instante t;

β = vetor de coeficientes das variáveis causais, que será estimado por mínimos quadrados;

x_t = vetor de variáveis causais (exógenas) no instante t ;

ε_t = ruído aleatório associado ao modelo, onde supomos que os ε_t são independentes e identicamente distribuídos com densidade $N(0,\sigma^2)$;

$\phi(B)$ = polinômio autoregressivo de ordem p, isto é:

$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ sendo B o operador de atraso;

A estrutura do modelo de regressão dinâmica permite considerar como elementos x_t variáveis causais e também suas defasagens.

A presença do polinômio $\phi(B)$ no modelo traz uma grande flexibilidade desta classe de modelos, mas, ao mesmo tempo, dificulta a procura por um modelo adequado. Observa-se que, se $\phi(B) = 1$, não existem defasagens da variável dependente, e a interpretação do modelo é muito simples, pois as variáveis causais influenciam diretamente a variável endógena. Ao contrário, quando $\phi(B) \neq 1$, o modelo pode ser usado para representar relações bastante complicadas.

Por fim, salienta-se que uma grande diferença entre os modelos de Regressão Dinâmica e os modelos ARIMA consiste no fato dos modelos de regressão dinâmica incluírem efeitos de variáveis causais através do termo βx_t . Os modelos ARIMA univariados de Box e Jenkins, por sua vez, não incluem tais efeitos, e apenas o passado da série Y_t e os valores defasados da série de erros são usados na modelagem e previsão da série Y_t .

Procura-se, portanto, dentro de metodologia definida, evoluir na modelagem, buscando em outras causalidades, que não somente a própria série de demanda, um melhor modelo para prever esta demanda. Este modelo, como já mencionado, foi o modelo de regressão dinâmica que pode ser considerado como um caso particular do que é conhecido na literatura como modelos de Cochrane e Orcutt generalizados.

3.2.1 Modelos de Regressão Cochrane-Orcutt Generalizados

O modelo de regressão generalizado de Cochrane e Orcutt (1949) é dado por:

$$\phi(B)Y_t = \beta x_t + w_t \quad (3.2)$$

$$R(B)w_t = \varepsilon_t \quad (3.3)$$

Onde $R(B)$ = polinômio autorregressivo.

Pode-se notar que a equação (3.2) tem a mesma forma da equação (3.1) da regressão dinâmica, entretanto os erros w_t apresentam uma estrutura AR dada pela equação (3.3).

Este modelo dado pelas equações (3.2) e (3.3) ainda pode ser descrito em termos de uma única equação como a seguir. Note que da equação (3.2):

$$w_t = \phi(B)Y_t - \beta x_t$$

Substituindo esta última expressão na equação (3.3) tem-se que:

$$R(B) \cdot [\phi(B)Y_t - \beta x_t] = \varepsilon_t \quad (3.4)$$

Desta última expressão nota-se que o modelo de regressão generalizado de Cochrane e Orcutt introduz defasagens tanto na variável dependente Y_t quanto nas causais. A expressão (3.4) indica também que a relação de causalidade entre Y_t e x_t não é afetada pela introdução do polinômio autorregressivo $R(B)$.

Esta última equação pode ainda ser escrita em termos de novas variáveis Y^*t e x^*t dadas por:

$$Y^*t = R(B)Y_t \text{ e } x^*t = R(B)x_t$$

onde $R(B)$ é chamado de “fator comum” e representa a estrutura de correlação presente no erro w_t .

A equação obtida então usando-se estas novas variáveis é:

$$\phi(B)Y^*t = \beta x^*t + \varepsilon_t \quad (3.5)$$

Logo, o modelo de regressão generalizado de Cochrane e Orcutt reduz-se ao modelo de regressão dinâmica usual ao se considerar as novas variáveis Y^*t e x^*t . O modelo original de Cochrane e Orcutt tem como fator comum $R(B) = 1 - \alpha\beta$ e então a equação (3.5) reduz-se a:

$$\phi(B) \cdot [Y_t - \alpha Y_{t-1} - 1] = \beta [x_t - \alpha x_{t-1} - 1] + \varepsilon_t \quad (3.6)$$

Salienta-se que, neste modelo, o procedimento de estimação é sequencial. A estimativa inicial de α é 0, e a partir dela estimamos β e $\phi(B)$ por mínimos quadrados ordinários. A partir destas estimativas encontra-se um estimador de $R(B)$ através da equação $R(B)w_t = \varepsilon_t$. O polinômio estimado $R(B)$ é então usado para transformar Y_t e x_t e reestimar β e $\phi(B)$. O processo é repetido até que se alcance a convergência dos parâmetros.

3.3 Construção de modelos de regressão dinâmica

Geralmente os modelos econométricos têm uma estrutura conhecida, baseada em considerações teóricas e o problema reduz-se ao problema de estimação dos parâmetros do modelo já conhecido. Entretanto, este é raramente o caso no contexto de séries temporais, onde a estratégia é construir modelos a partir dos dados.

A estratégia usualmente empregada para construir um modelo de regressão dinâmica é uma estratégia bottom-up, isto é, partimos de um modelo simples e o refinamos e incluímos novas variáveis até encontrar um modelo apropriado. A elaboração de um modelo de regressão dinâmica é muitas vezes um procedimento difícil, pois é preciso não apenas escolher as variáveis a serem incluídas no modelo, mas também os lags (defasagens) destas variáveis.

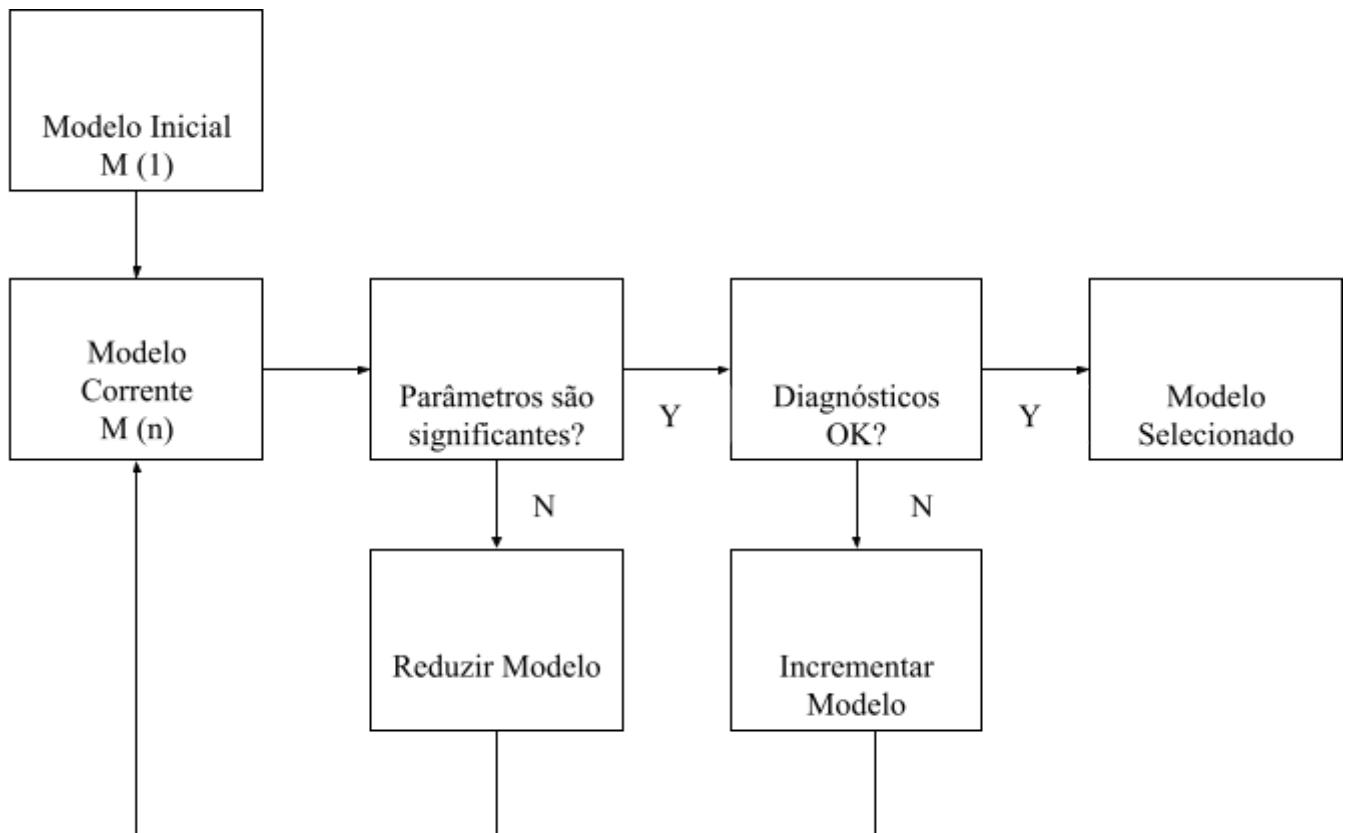
Na definição do modelo adequado, é necessário levar em conta não só a significância dos parâmetros, mas também uma certa estrutura “lógica” do modelo. Por exemplo, vendas (ou demanda) de um produto são geralmente afetadas por seu preço. O aumento do preço, por sua vez, tende a diminuir as vendas (ou demanda), e vice-versa. Logo, se o modelo de regressão encontrado para explicar venda pelo preço apresenta um coeficiente positivo para a variável preço, é bom desconfiar por mais bem ajustado que esteja o modelo, pois a relação apontada pelo modelo não é, em geral, verdadeira. Em síntese, na escolha de um modelo de regressão, não é necessário apenas encontrar um ajuste de parâmetros adequado, mas fundamentalmente faz-se mister verificar se os coeficientes estimados são coerentes.

As previsões geradas por um modelo de regressão dinâmica dependem não só de valores passados da série, mas também dos valores previstos para as variáveis causais. Logo, para obtermos as previsões da série Y_t para $t + 1, t + 2, t + 3$, etc, é necessário fornecer ao modelo os valores futuros do vetor de variáveis causais x_t . Se as previsões destas variáveis exógenas não forem apropriadas, o modelo de regressão dinâmica irá também gerar previsões inadequadas.

Isto caracteriza um aspecto importante dos modelos de regressão dinâmica que consiste na possibilidade de consecução de cenários ao se chegar a um modelo relacional de variáveis dependentes em relação a variáveis explicativas. Isto é, surge a possibilidade de montagem de vários cenários para as variáveis causais o que enriquece, por exemplo, qualquer trabalho de planejamento de vendas de um determinado produto.

Feitas estas considerações, o fluxograma a seguir indica, de maneira genérica, os passos usados na construção de um modelo de regressão dinâmica.

Figura 3: Construção de um modelo de regressão dinâmica



Fonte: Zanini (2000)

Como dito anteriormente, a especificação correta de um modelo de regressão dinâmica envolve a precisa especificação da relação causal entre as variáveis e a estrutura dinâmica do modelo.

Nos modelos de regressão dinâmica podem ser usadas também variáveis de intervenção (ou variáveis dummy). O objetivo deste tipo de procedimento é considerar situações atípicas como, por exemplo, aumento das vendas de brinquedo no Natal e no Dia da Criança (neste caso é razoável incluir dummies para os meses de dezembro e outubro no modelo). O mesmo procedimento pode ser usado para levar em conta os efeitos de situações incomuns como greves e planos econômicos.

Os modelos de regressão dinâmica incorporam ainda diretamente a sazonalidade da série ao modelo, ao invés de supor que a série será previamente dessazonalizada. Atenta-se que existem duas maneiras de tratar a sazonalidade: via dummies sazonais ou diretamente, através de defasagens na variável dependente ou nos erros estruturados.

3.4 Testes usados nos modelos de regressão dinâmica

Como dito anteriormente, em regressão dinâmica a construção do modelo envolve vários passos até se chegar a um modelo “final”. Diversos testes da adequação de um modelo de regressão podem ser mencionados. Estes testes são aplicados em diversos estágios da modelagem da série. Temos, por exemplo:

- i) testes como o objetivo de definir a especificação do modelo explicativo;
- ii) testes visando encontrar a dinâmica do modelo, isto é, a inclusão ou não de variáveis defasadas,
- iii) testes para verificar o ajuste do modelo.

Para que se entenda um pouco melhor o modelo de regressão dinâmica que será apresentado para o volume de TKU, será abordado de uma forma geral, como se processa o “algoritmo” dos testes na prática:

3.4.1 Testes de verificação da “dinâmica” do modelo

Como dito anteriormente, a dinâmica de um modelo acontece através dos lags da variável dependente e/ou através da presença de erros estruturados

num modelo de Cochrane-Orcutt. A cada momento da elaboração do modelo, são realizados testes de hipóteses sobre a “dinâmica” do modelo.

Em todos os casos a seguir, a hipótese nula afirma que a dinâmica do modelo está corretamente especificada, ou seja, a inclusão de outros lags da variável dependente ou outros erros estruturados não é necessária. A hipótese alternativa, em cada caso, representa a necessidade de inclusão de novos termos. Sendo assim tem-se :

1) Teste de defasagem da variável endógena

Suponha que a variável dependente Y_t e seus lags $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p-1}$ estão presentes no modelo atual. A hipótese alternativa consiste em adicionar a variável defasada Y_{t-p} ao modelo, isto é, adiciona-se o primeiro lag ainda não presente no modelo atual. Se esta variável for considerada significante, a hipótese nula é rejeitada e deve-se adicionar a variável Y_{t-p} ao modelo.

2) Teste da defasagem sazonal da variável endógena

Este teste é semelhante ao anterior. A hipótese alternativa consiste em adicionar ao modelo atual a variável defasada até o primeiro lag sazonal Y_{t-pS} ainda não presente ao modelo. Se o coeficiente de Y_{t-pS} for significante, esta variável deve ser incluída no modelo, e a hipótese nula deve ser rejeitada.

3) Teste da sequência de defasagens da variável endógena

A hipótese alternativa consiste em adicionar todos os lags da variável dependente que ainda não estão presentes no modelo.

4) Teste da defasagem dos resíduos

A hipótese alternativa consiste em adicionar ao modelo o primeiro termos defasado ε_{t-p} ainda não incluído no modelo atual.

5) Teste da defasagem sazonal dos resíduos

Na hipótese alternativa adiciona-se ao modelo atual o primeiro lag sazonal ε_{t-pS} ainda não presente no modelo.

6) Teste da sequência de defasagens dos resíduos

Na hipótese alternativa adiciona-se às variáveis do modelo atual uma sequência de resíduos defasados $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \varepsilon_{t-S}$ onde S é o período sazonal. É importante ressaltar que, na hipótese alternativa, inclui-se apenas os resíduos ainda ausentes no modelo atual.

3.4.2 Testes para a especificação das variáveis causais

O objetivo de todos estes testes é verificar se a inclusão de uma ou mais variáveis ainda não contempladas no modelo resulta numa melhora do ajuste. Atenta-se para o fato de que os testes para a especificação de variáveis causais não se referem à parte dinâmica do modelo, e não tratam da inclusão de lags da variável dependente e de erros estruturados.

1) Teste das variáveis causais excluídas

Neste teste verifica-se a necessidade de inclusão de cada uma das variáveis (escolhidas previamente para análise) mas que ainda não estão presentes no modelo. Se quaisquer destas variáveis são consideradas significantes, deve-se incluí-las no modelo (talvez sequencialmente) e “rodar” a mesma bateria de testes para verificar se a inclusão foi vantajosa.

2) Teste de tendência temporal

Este teste corresponde à inclusão de uma variável do tipo $x_t = t$ no modelo. Esta variável é útil em casos em que a série dependente não é estacionária.

3) Teste da defasagem das variáveis exógenas (causais)

Na hipótese alternativa inclui-se um lag adicional das variáveis causais já presentes no modelo atual.

4) Teste para a presença de funções não lineares das variáveis exógenas

Neste teste inclui-se o quadrado de cada variável exógena já presente no modelo. Todos os quadrados das variáveis exógenas são incluídos de uma só vez e, portanto, é necessário buscar quais (ou qual) quadrados são realmente significantes.

5) Teste do fator comum

Este teste é realizado só quando o modelo inclui erros estruturados. Sob a hipótese alternativa, a auto regressão dos erros é eliminada, e todos os lags da variável dependente e das causais são adicionados ao modelo. Se a hipótese nula é

rejeitada, existe evidência de que um modelo mais geral deveria ser considerado, ao invés do modelo de Cochrane-Orcutt. O grande problema é descobrir em que direção deve-se generalizar o modelo corrente, e não existe uma resposta única para esta questão.

3.4.3 Testes baseados na autocorrelação dos resíduos

Como pode ser visto, o processo de construção de um modelo de regressão dinâmica deve levar em conta diversos diagnósticos com o objetivo de verificar se o modelo atual é apropriado. Em particular, deve-se sempre examinar o gráfico das autocorrelações dos resíduos. Se estas são significantes para alguns lags, alguma característica da variável dependente não foi capturada pelo modelo atual. Por exemplo, no caso de dados mensais, se a autocorrelação dos resíduos é significante no lag 12, a observação situada num período genérico $t - 12$ meses é relevante para explicar a observação no período t , e sua inclusão no modelo possivelmente resultará num decréscimo dos erros de previsão do modelo.

A existência de autocorrelações significativas nos resíduos pode então indicar uma das seguintes situações:

- 1) deve-se incluir mais lags da variável dependente ou
- 2) deve-se incluir lags adicionais das variáveis exógenas já presentes no modelo ou incluir novas variáveis causais.

Enfim, é importante saber que, em qualquer das situações mencionadas, o fato de os resíduos apresentarem alto relacionamento significativo indica que algum tipo de estrutura presente na série Y_t não foi captada pelo modelo em consideração.

4. ANÁLISE DE DADOS E RESULTADOS

4.1 Base de dados e variáveis

O período de referência para o estudo é de janeiro de 2011 a abril de 2025, utilizando dados mensais. A partir disso, projeta-se os 20 meses seguintes, gerando informações até dezembro de 2026.

A variável dependente utilizada neste trabalho se refere ao TKU, divulgada pela CNT em seus painéis de dados abertos (CNT⁴). Nesse painel é possível extrair dados mensais de todo o período na qual pretende-se utilizar como base.

Como foi exposto ao final do capítulo dois, cinco variáveis estarão na base de dados para que o estudo possa ser realizado: (i) volume de exportações de produtos minerais; (ii) preço internacional do minério de ferro; (iii) importações da China; (iv) taxa de câmbio USD/BRL e (v) preço do diesel.

O volume de exportações de minerais e a taxa de câmbio USD/BRL foram extraídos do IPEA, que possui uma ampla de dados e que reúnem diversas fontes (IPEA Data⁵). Já o preço do minério de ferro foi extraído da Investing, com os filtros realizados para que fosse possível extrair o fechamento de cada mês (Investing.com⁶). Para os dados das importações chinesas, o National Bureau of Statistics of China (NBS⁷). E, a última variável, que se trata do preço do diesel, foram retirados do portal de dados abertos do Governo Federal (DadosGov⁸). A Tabela 1 faz um resumo das variáveis utilizadas no processo de estimação do modelo.

⁴ <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte-ferroviario>

⁵ <https://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>

⁶ <https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures-historical-data>

⁷ <https://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=A01>

⁸ <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/serie-historica-de-precos-de-combustiveis-e-de-glp>

Tabela 1: Resumo das variáveis utilizadas na estimação modelo

Nome das Variáveis	Tipo de Variável	Descrição	Fonte
Exportações Produtos Minerais	Explicativa	Representa o total de bens minerais exportados pelo Brasil, medido em toneladas ou dólares FOB.	IPEA DATA
Preço do Minério de Ferro	Explicativa	Reflete o valor médio mensal do minério no mercado global, cotado em dólares por tonelada.	Investing.
Importações China	Explicativa	Captam o nível de demanda do principal destino do minério de ferro brasileiro.	NBS
Taxa de Câmbio	Explicativa	A quantidade de moeda nacional por unidade de moeda estrangeira. A valorização do dólar tende a aumentar a competitividade das exportações brasileiras e, consequentemente, o volume de carga transportada.	IPEA DATA
Preço do Diesel	Explicativa	Representa o custo médio mensal do combustível utilizado nas locomotivas.	Dados Governo Federal
TKU	Dependente	É o indicador que expressa a quantidade de carga (em toneladas) transportada multiplicada pela distância percorrida (em quilômetros).	CNT

Fonte: Elaborado pelo autor

4.2. Análise dos resultados

Para atingir o objetivo final da projeção do TKU, foi utilizado o software Forecast Pro for Windows (FPW) para estimar o modelo. Para atingir esse fim, foi aplicada a metodologia expressa no Capítulo 3. Seguindo a estratégia *bottom up*, ou seja, partindo de um modelo mais simples, aplicou-se os testes diagnósticos até chegar em um modelo mais elaborado.

Após realizar as análises da significância estatística das variáveis que foram selecionadas para compor esse estudo, foi possível concluir que o volume global de importações da China e o preço do diesel não apresentaram significância em testes de causalidade. Portanto, a equação final do modelo é expressa pela equação (5.1):

$$\begin{aligned} \ln(TKU)_t = & 5,99 + 0,042\ln(CB)_t + 0,27\ln(EX)_t - 0,13\ln(EX)_{t-1} - 0,15\ln(PM)_t \\ & + 0,41\ln(TKU)_{t-1} + 0,32\ln(TKU)_{t-2} + \varepsilon_t \quad (4.1) \end{aligned}$$

Onde:

$\ln(TKU)_t$: função logarítmica da variável de toneladas por quilômetros úteis (dependente)

$\ln(CB)_t$: função logarítmica da variável que representa o câmbio

$\ln(EX)_t$: função logarítmica da variável que representa o volume de exportações de minerais

$\ln(EX)_{t-1}$: função logarítmica da variável que representa o volume de exportações de minerais defasada em um mês

$\ln(PM)_t$: função logarítmica da variável que representa o preço do minério de ferro no mercado internacional

$\ln(TKU)_{t-1}$: função logarítmica da variável de toneladas por quilômetros úteis defasada em um mês

$\ln(TKU)_{t-12}$: função logarítmica da variável de toneladas por quilômetros úteis defasada em doze meses

Primeiramente, é importante ressaltar que todos os coeficientes estimados apresentaram significância estatística ao nível de 5%, indicando que as variáveis incluídas no modelo possuem relação consistente com o volume transportado em toneladas-quilômetro útil (TKU).

A opção pelo forma log-log foi para possibilitar a interpretação dos coeficientes de regressão na forma de coeficientes de elasticidade. Para maior detalhamento, ver Zanini (2000).

Observa-se que um aumento de 1% no câmbio (USD/BRL) está associado a um acréscimo aproximado de 0,04% no TKU, evidenciando que a desvalorização do real tende a impulsionar o volume transportado, possivelmente em função do maior incentivo às exportações. De forma semelhante, o coeficiente positivo para a variável de exportações de produtos minerais indica que um aumento de 1% neste volume resulta, em média, em um crescimento de 0,27% no TKU, o que reforça a relevância das exportações na demanda pelo transporte ferroviário, especialmente do minério de ferro.

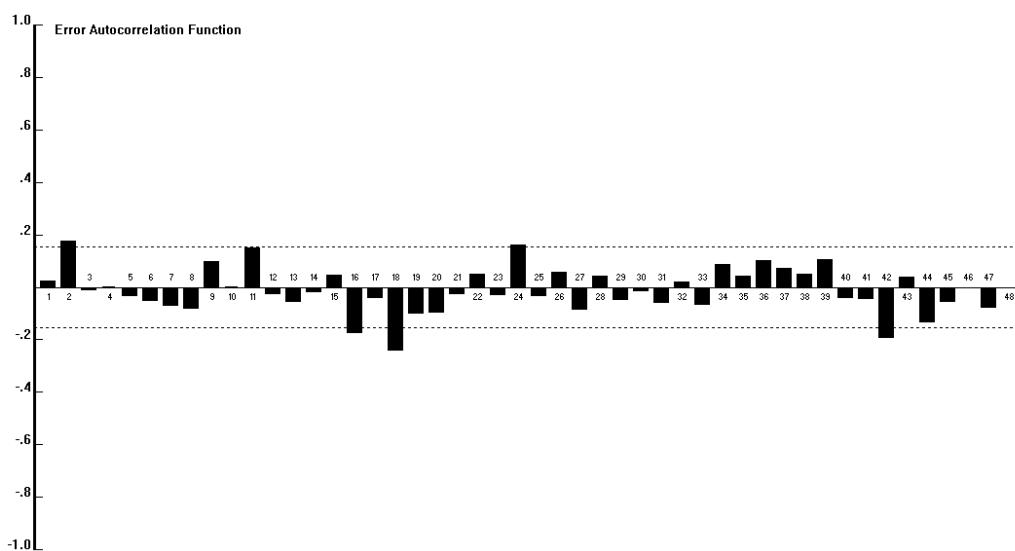
Por outro lado, o preço internacional do minério de ferro apresentou relação negativa, de modo que um aumento de 1% no seu preço está associado a uma redução aproximada de 0,15% no TKU. Esse comportamento pode refletir ajustes de mercado em períodos de preços elevados, nos quais há redução temporária do volume embarcado. Da mesma forma, as exportações de produtos minerais defasadas em um mês apresentaram um impacto negativo de 0,13%, sobre o volume transportado.

A presença das defasagens de um mês $TKU[-1]$ e de doze meses $TKU[-12]$ confirma a natureza dinâmica do modelo. O coeficiente de 0,41 para o TKU defasado em um período indica que há certa inércia no comportamento da série, isto é, parte significativa do volume transportado em um mês é explicada pelo desempenho do mês anterior. Já o coeficiente de 0,33 para o TKU defasado em doze meses revela a presença de sazonalidade anual, o que é coerente com os ciclos regulares de produção e exportação mineral.

O modelo apresentou poder de explicação (R^2 ajustado) indicando que cerca de 83% da variação do logaritmo do TKU é explicada pelas variáveis independentes incluídas. Já o MAPE (erro percentual médio) evidencia que o modelo erra, em média, 4,59% ao projetar o mês seguinte. Além disso, o teste de Durbin-Watson apresentou valor de 1,944, próximo de 2, indicando ausência de autocorrelação residual de lag 1. O teste de Ljung-Box confirmou essa evidência, com probabilidade associada de 0,9994, rejeitando a hipótese nula de erros descorrelacionados⁹, entretanto comprovando-se a mesma através da análise da função de autocorrelação dos erros, como mostra a Figura 4. Vê-se autocorrelações dos erros na faixa de -0,2 e 0,2.

Em síntese, o modelo log-log estimado mostrou-se estatisticamente robusto e coerente do ponto de vista econômico, captando adequadamente a influência das variáveis macroeconômicas e setoriais sobre o volume transportado por ferrovias no Brasil, bem como a presença de componentes sazonais e de persistência temporal no comportamento da série.

Figura 4: Função de Autocorrelação dos Erros



Fonte: Elaborado pelo autor

⁹ No FPW rejeita-se a hipótese nula quando o p-valor é \geq ao Nível de Confiança.

A próxima seção trata da projeção da variável dependente para os próximos dois anos, utilizando a equação 4.1 como referência.

4.3 Projeções do Modelo

Nos modelos de natureza causal, a projeção da variável dependente requer a estimativa prévia do comportamento futuro das variáveis explicativas que compõem a equação. Assim, este trabalho optou por realizar a auto projeção das séries correspondentes ao câmbio, às exportações e ao preço do minério de ferro, de modo a fornecer subsídios para o cálculo da variável de interesse.

Na etapa de auto projeção, procedeu-se à comparação entre diferentes métodos de previsão, com o objetivo de identificar o método que apresentasse o melhor desempenho estatístico no ajuste das séries temporais. Foi feita uma competição entre o Método de Amortecimento Exponencial (MAE) e o Método de Box & Jenkins (MBJ) realizando-se uma análise recursiva fora da amostra (*out-of-sample rolling evaluation*)¹⁰. O método vencedor foi aquele que minimizou o erro médio absoluto (MAD) acumulado fora da amostra. Foi definido como método vencedor para projetar as variáveis explicativas presentes no modelo o Modelo de Amortecimento Exponencial (MAE). Atenta-se que o MAE apresentou os seguintes poderes de explicação (coeficientes de determinação ou R² ajustado): Câmbio (99,32%), Exportações (81,29%) e Preço do minério de ferro (93,55%).

Com base nas séries auto projetadas, procedeu-se à obtenção das previsões da variável dependente para um horizonte de 20 meses à frente, tomando como referência abril de 2025, último período disponível na base de dados para a variável TKU. Ressalta-se que, entre abril e setembro de 2025, foram utilizados os valores observados das variáveis explicativas, enquanto os meses subsequentes correspondem aos valores projetados pelo modelo vencedor (MAE). Os resultados finais das projeções, acompanhados dos respectivos intervalos de confiança de 95%, encontram-se apresentados na Tabela 2. Neste ponto, atenta-se para uma das vantagens de se trabalhar com modelos matemáticos-estatísticos, ou seja, não é calculado apenas um número, a previsão, mas estima-se um intervalo de confiança que possui determinada probabilidade de conter o valor da previsão.

¹⁰ Goodrich & Stellwagen (1999).

Tabela 2: Previsão de 20 meses para TKUs - Intervalo de Confiança de 95%

Data	Limite Inferior	Projeção	Limite Superior
2025-05	29.308	32.936	37.013
2025-06	29.753	33.747	38.276
2025-07	32.458	36.868	41.877
2025-08	32.176	36.556	41.532
2025-09	31.628	35.935	40.828
2025-10	31.182	35.428	40.253
2025-11	30.443	34.588	39.299
2025-12	30.687	34.866	39.614
2026-01	26.292	29.873	33.941
2026-02	25.466	28.935	32.875
2026-03	27.699	31.472	35.758
2026-04	27.656	31.423	35.702
2026-05	28.849	32.962	37.661
2026-06	29.469	33.791	38.746
2026-07	30.727	35.278	40.504
2026-08	30.920	35.513	40.789
2026-09	31.064	35.683	40.988
2026-10	30.437	34.963	40.162
2026-11	29.936	34.388	39.502
2026-12	30.892	35.486	40.763

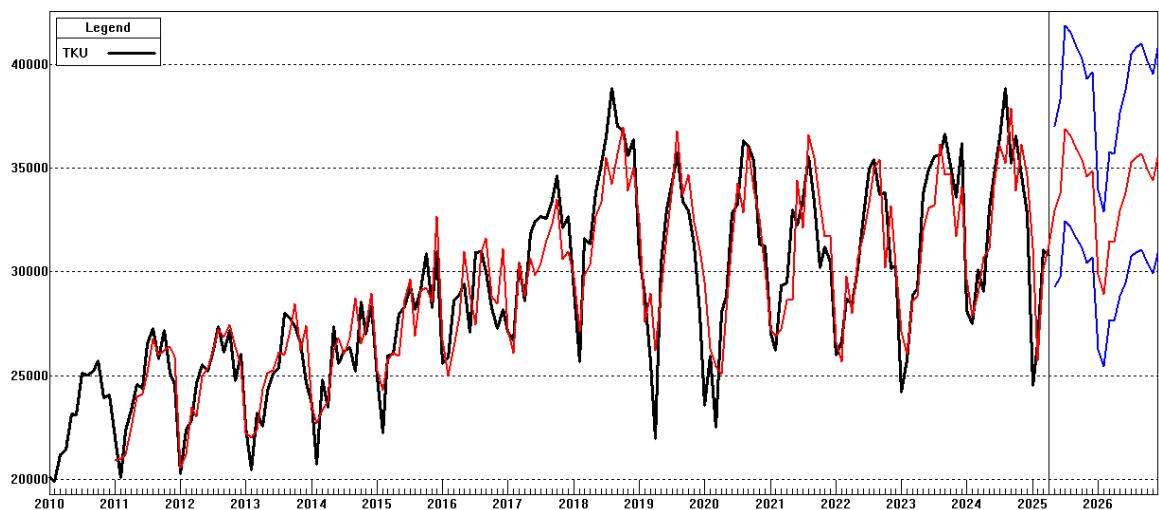
Fonte: Elaborado pelo autor

Conforme mostra a Figura 5, entre abril e setembro de 2025 a trajetória projetada mostra coerência com o comportamento das variáveis explicativas: o câmbio manteve-se estável e elevado, as exportações cresceram e o preço do minério de ferro permaneceu sem grandes variações, cenário que favorece o aumento do transporte ferroviário de cargas, conforme previsto pela equação de regressão.

A tendência de alta até julho de 2025, quando o TKU atinge 36.868, reflete o impacto positivo das exportações e do efeito inercial da própria série, que impulsionam o crescimento de curto prazo. A estabilização e leve queda entre agosto e novembro de 2025 também são coerentes com a estrutura do modelo, já que o preço do minério de ferro apresenta efeito negativo e voltou a subir no

período, enquanto o termo defasado das exportações indica acomodação natural após crescimento do volume exportado. Ainda com essa acomodação, o ano de 2025 encerrou com volume global do ano, um volume transportado -0,8% menor que no último ano (Tabela 3).

Figura 5: TKU (em milhões - Valores Reais e Previstos)



Fonte: Elaborado pelo autor Nota: Valores reais Valores ajustados/previsões
 Intervalo de Confiança de 95%

Em 2026, inicia-se com uma inflexão acentuada em janeiro (-14,3%), em linha com o observado nos dados históricos, seguida por uma sequência de oscilações de menor magnitude. Após essa correção, o modelo projeta retomada gradual do crescimento ao longo de 2026, terminando o ano com 399.765 milhões de TKUs acumulados, uma alta de 0,7% frente ao resultado observado em 2024 e 1,5% maior que 2025, comparando resultados de 24 e 12 meses (Tabela 3).

Tabela 3: Dados anualizados da variável TKU e variação percentual

Ano	Valores para TKU (em milhões)	Variação (%)
2020	365.284	
2021	371.433	1,7%
2022	371.064	-0,1%
2023	389.508	5,0%
2024	397.019	1,9%
2025*	393.845	-0,8%
2026*	399.765	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor Nota: * indica dados projetados

Assim, o comportamento projetado do TKU mostra-se consistente com os dados históricos e com a lógica econômica do setor, em que exportações e câmbio impulsionam o transporte ferroviário, enquanto variações nos preços das commodities tendem a atenuar o ritmo de crescimento.

Em termos quantitativos, o modelo indica que o volume total anual possui uma média de crescimento de 1,5%, entre 2020 até o último dado projetado para 2026, considerando a tendência central das projeções. Mesmo com oscilações pontuais, o cenário geral sugere gradual expansão sustentada da atividade ferroviária, sustentada principalmente pelo dinamismo das exportações de produtos minerais e dinâmica exportadora do país.

Por fim, é importante ressaltar que a metodologia permite ainda a geração de diversos cenários de previsão a partir da geração e combinação de diferentes cenários para as variáveis explicativas presentes no modelo.

5. CONCLUSÃO

O transporte ferroviário desempenha papel essencial na logística nacional, especialmente no escoamento de commodities minerais e agrícolas, consolidando-se como um dos principais vetores do desenvolvimento econômico brasileiro. Considerando sua importância estratégica, este trabalho teve como objetivo projetar o volume de toneladas úteis (TKU) transportadas por ferrovias no Brasil, utilizando um modelo de Regressão Dinâmica, com base nas variáveis câmbio, exportações e preço do minério de ferro, fatores iniciais e de sazonalidade.

A metodologia aplicada demonstrou-se adequada para representar a dinâmica do setor, permitindo estimar uma equação de previsão com elevado poder explicativo e consistência estatística. O modelo final apresentou coeficiente de determinação ajustado superior a 83,55%, além de erros médios de previsão de cerca de 4,59%, o que evidencia sua capacidade de acompanhar o comportamento histórico da série, ao nível de 95% de significância estatística. Ademais, a estrutura do modelo captou com precisão a persistência temporal do TKU, enquanto as variáveis explicativas refletiram os condicionantes externos de maior relevância para o transporte ferroviário.

As projeções realizadas para o período de maio de 2025 a dezembro de 2026 indicaram uma tendência de crescimento moderado no volume transportado, intercalada por oscilações de curto prazo associadas às variações cambiais e ao preço internacional do minério de ferro. O modelo sugere que a cada 1% de aumento nas exportações, o TKU cresce em média 0,27%, enquanto as elevações no preço do minério de ferro reduzem o volume transportado em cerca de 0,15%. Esses resultados confirmam o papel determinante das exportações e das condições do mercado externo no desempenho do modal ferroviário brasileiro.

Em termos quantitativos, o TKU projetado apresentou crescimento de aproximadamente 1,5% entre 2025, evidenciando um cenário de expansão reduzido e sujeito a oscilações conjunturais. Tais resultados reforçam a utilidade do modelo

proposto como ferramenta de planejamento estratégico e apoio à tomada de decisão em políticas públicas e investimentos em infraestrutura ferroviária.

Entretanto, é importante reconhecer as limitações do estudo, especialmente pela exclusão de fatores não mensuráveis, como eventos geopolíticos, mudanças regulatórias e variações abruptas na demanda global, que podem impactar significativamente as projeções devido à forte relação com o fator de exportação. Nesse sentido, recomenda-se que pesquisas futuras incorporem variáveis setoriais adicionais, particularmente aquelas relacionadas à expansão da malha ferroviária, à evolução da capacidade do material rodante e aos investimentos potencialmente impulsionados pela Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021, que institui o Marco Legal das Ferrovias, para captar o impacto que o volume de capital tem no setor.

Além disso, estudos futuros podem buscar o aprimoramento das projeções por meio da aplicação de diferentes modelos de previsão de variáveis explicativas, como o Modelo de Regressão Dinâmica (MRD) que foi utilizado para a variável dependente do presente trabalho, permitindo a construção de cenários probabilísticos para todas as variáveis explicativas e permitindo que a variável dependente fosse projetada a partir de diversos cenários. Essa abordagem contribuiria para uma análise mais robusta e abrangente das incertezas inerentes ao setor.

Por fim, conclui-se que o modelo de Regressão Dinâmica demonstrou ser um instrumento eficaz para compreender e projetar o comportamento do transporte ferroviário de cargas no Brasil, oferecendo subsídios analíticos relevantes para o planejamento econômico e logístico. Assim, o estudo contribui para o aprimoramento das análises prospectivas do setor e abre caminho para novas aplicações econométricas voltadas à infraestrutura e à logística nacional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). **Panorama do Setor.** Brasília, DF: ANTT, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/informacoes-estrategicas/publicacoes/panorama-do-setor.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2025.

B3. **IBC-Br: como funciona esse indicador da economia brasileira?** São Paulo: B3, [s.d.]. Disponível em: <https://borainvestir.b3.com.br/noticias/mercado/ibc-br-como-funciona-esse-indicador-da-economia-brasileira/>. Acesso em: 11 out. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **O processo de desestatização da RFFSA: principais aspectos e primeiros resultados.** Rio de Janeiro: BNDES, 1997. Disponível em: <https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/13817>. Acesso em: 5 out. 2025.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL — BNDES. **Ferroviás de carga brasileiras: uma análise setorial.** Rio de Janeiro: BNDES, 2017. (BNDES Setorial, n. 46). Disponível em: https://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/14136/2/BNDES-Setorial-46_Ferroviás_P.pdf. Acesso em: 11 out. 2025.

BRASIL. Decreto nº 1.832, de 11 de abril de 1996. **Regulamenta o transporte ferroviário.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1996/D1832.htm. Acesso em: 11 out. 2025.

BRASIL. Decreto-Lei nº 8.894, de 1946. **(Sobre reaparelhamento/encampação) — disponível em repositórios legislativos** (Planalto/LexML). Acesso em: 12 out. 2025. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/>. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995. **Regulamenta o regime de concessões e permissões de serviços públicos.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L8987.htm. Acesso em: 11 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.074, de 7 de julho de 1995. **Dispõe sobre permissões e concessões de serviços públicos.** Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9074.htm. Acesso em: 11 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 3.115, de 1957. **(Criação da Rede Ferroviária Federal S.A. — RFFSA).** Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3115.htm. Acesso em: 12 out. 2025.

BRASIL. Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. **Institui o Marco Legal das Ferrovias.** Diário Oficial da União: Brasília, DF, 24 dez. 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14273.htm. Acesso em: 10 jun. 2025.

BORGES DA SILVA, Víctor; TRAJANO VIEIRA, Edson; DE SÁ RODRIGUES, Marilsa; OLIVEIRA, Edson Aparecida Araújo Querido. **Análise dos impactos da concessão do setor ferroviário de cargas na década de 1990.** Interacão - Revista de Ensino, Pesquisa e Extensão, v. 22, n. 2, p. 37–48, 2020. Disponível em: <https://ojs.periodicos.unis.edu.br/interacao/article/view/368>. Acesso em: 18 jul. 2025.

COMEXSTAT / MINISTÉRIO DA ECONOMIA (MDIC). Comex Stat — **Estatísticas do comércio exterior.** Série: exportações por produto/país (usada para destinos das exportações brasileiras de minério de ferro — China). Disponível em: <https://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral/137639>. Acesso em: 12 out. 2025.

CNT. **Painel CNT do Transporte - Ferroviário.** [s.d]. Disponível em: <https://www.cnt.org.br/painel-cnt-transporte-ferroviario>. Acesso em: 6 out. 2025.

DADOSGOV. **Série Histórica de Preços de Combustíveis e de GLP.** [s.d]. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/conjuntos-dados/serie-historica-de-precos-de-combustiveis-e-de-glp>. Acesso em: 6 out. 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Histórico das ferrovias.** Brasília, DF: DNIT, 2016. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/ferrovias/historico>. Acesso em: 1 jul. 2025.

DELSAUT, M. **The effect of fuel price on demands for road and rail travel: an application to the French case.** Transportation Research Procedia / Case Studies on Transport Policy, v. 1 (ou v.2 conforme versão), 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146514000192>. Acesso em: 12 out. 2025.

DUTRA FILHO, Rodrigo Pereira. **Modelo de previsão da carga total em TKU transportada pelas ferrovias brasileiras.** 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufjf.br/jspui/bitstream/ufjf/14767/5/rodrigopereiradutrafilho.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2025.

FUNDAÇÃO DOM CABRAL. **Diagnóstico e projeções para a infraestrutura em logística de transportes no Brasil.** Belo Horizonte: FDC, 2019. Disponível em: <https://ci.fdc.org.br/AcervoDigital/Relatórios%20de%20Pesquisa/Relatórios%20de%20Pesquisa%202019/Diagnóstico%20e%20projeções%20para%20a%20infraestrutura%20em%20logística%20de%20transportes%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2025.

GOODRICH, R.L. **Applied Statistical Forecasting.** Belmont, Business Forecast Systems, 1989.

GOODRICH, R.L.; STELLWAGEN, E.A.. **Forecast Pro for Windows.** Business Forecast Systems, 1999.

INVESTING. **Minério de ferro refinado 62% Fe CFR Futuros.** [s.d]. Disponível em:<https://br.investing.com/commodities/iron-ore-62-cfr-futures-historical-data>. Acesso em: 6 out. 2025.

IPEA. **IPEADATA.** [s.d]. Disponível em:<https://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>. Acesso em: 6 out. 2025.

MATOS, Lucina Ferreira. **Memória ferroviária: da mobilização social à política pública de patrimônio.** Rio de Janeiro: FGV/CPDOC, 2015. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/84b5cead-f541-4e1e-8ac7-982a4228a082/content>. Acesso em: 30 set. 2025.

NBS. **Total Value of Imports, Accumulated(1,000 US dollars).** [s.d]. Disponível em: <https://data.stats.gov.cn/english/easyquery.htm?cn=A01>. Acesso em: 6 out. 2025.

SILVEIRA, Márcio Rogério. **A importância geoeconômica das estradas de ferro no Brasil.** 2003. 454 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

WORLD BANK. **What determines demand for freight transport?** Washington, D.C.: World Bank, 1986. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/683781468739249005/pdf/multi-page.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

WORLD BANK. **Freight transport for development toolkit: railway transport.** Washington, DC: World Bank, 2009. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/119711468149677258/pdf/563590WP0rail11Box3494502B01PUBLIC1.pdf>. Acesso em: 15 jul. 2025.

WORLD BANK. **The Real Exchange Rate and Export Growth: Theory and Evidence.** Washington, DC: World Bank, 2013. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/5528cf5e-f421-57e3-8e0a-125f26b85e51/content>. Acesso em 10 out. 2025.

ZANINI, Alexandre. **Redes Neurais e Regressão Dinâmica: Um Modelo Híbrido para Previsão de Curto Prazo da Demanda de Gasolina Automotiva no Brasil.** PUC RIO, 2000.