

ESTUDO DA PRODUÇÃO DE FERROVIAS TIPO *HEAVY HALL* BRASILEIRAS A LUZ DA TEORIA ECONÔMICA

Francisco Gildemir Ferreira da Silva

Universidade Federal do Ceará – CAEN/UFC

RESUMO

O Brasil tem operações ferroviárias com trens pesados nas ferrovias de Carajás, Vitória Minas e MRS logística. Essas concessionárias utilizam trens que transportam grandes quantidades de *commodities* de forma quase que contínua e apresentam eficiências de densidade e de escala notórias e maiores do que outras ferrovias brasileiras. Nesse contexto, estudos produção de ferrovias de forma global, desconsiderando a peculiaridade dessas *Heavy Hall* pode gerar viés nas análises e resultados. Com o objetivo de compreender os aspectos de produção das ferrovias listadas, este trabalho estima a função de produção dessas e analisa as produtividades total, marginal e média delas. O resultado aponta para uma produção eficiente, mas com redução marginal da produção com aumento de insumos o que é esperado pela teoria econômica neoclássica para monopólios.

ABSTRACT

Brazil has railroad operation with Heavy Hall freight trains hauling bulk commodities at EFC, EFVM and MRS railroads. The trains carry large quantities almost continuously having notorious density and scale economies than other Brazilian railroads. In this context, studies of railway production in a global manner, disregarding the peculiarity of these Heavy Hall trains can generate bias in the analyzes and results. In order to understand the production aspects of the listed railways, this work estimates the production function of EFC, EFVM and MRS railroads and analyzes the elasticity and total, marginal and average productivity of them. The results points to an efficient production and if occurs a marginal reduction in inputs, then production decreases. This are expected by neoclassical economic theory to monopoly industries.

1. INTRODUÇÃO

Um sistema é definido como um conjunto de subsistemas que possuem fatores interagindo entre si para gerar resultados. No caso do sistema de transporte os retornos são: ruídos, viagens realizadas, toneladas transportadas, distância percorrida ou, simplesmente, deslocamento de pessoas e mercadorias. Um subsistema do sistema de transportes é o da produção e relaciona os insumos que são processados e geram produtos, condicionadas as especificações tecnológicas e operacionais.

Muito estudos se preocupam com estudos de produtividade e eficiência nos usos dos insumos para a produção de transportes. O tema sobre eficiência e produtividade de empresas de transportes, em indústrias reguladas ou não, têm sido extensivamente discutido na literatura, podendo ser visto um excelente compilado de trabalho em Coelli *et al.* (2003). Existem uns sem números de estudos brasileiros que abordam da análise de eficiência operacional, financeira e ambiental. Os estudos brasileiros têm utilizado extensamente de modelos DEA, tendo como trabalho pioneiro Novaes (1996), com um resumo de trabalhos feitos anteriores a 2002 em Azambuja (2002) e como um dos últimos trabalhos desenvolvidos com técnicas DEA não tradicionais por Reis *et. al* (2017).

Infelizmente, estudos brasileiros de função de produção são escassos, acredita-se que em parte pela deficiência de dados em outro ponto pela dificuldade na estimação de funções de

produção não lineares e que melhor expressam o comportamento de modos de transporte, pois há várias formas funcionais para bem expressar a produção de um modo de transportes que se quer mimetizar: ferrovias, rodovias, hidroviários, etc. Dentre as diferentes especificações, funções Cobb-Douglas são largamente usadas, dada a simplicidade de ser linearizada com a aplicação de logaritmos e o seu sucesso na estimação de relações de produções americanas. Outra bastante aplicada é uma expansão de Taylor de uma função não linear, por vezes a própria Cobb-Douglas ou a função de Elasticidade constante CES. Entretanto, pouco utilizada a CES apresenta características desejadas para certos modos de transportes, principalmente em estudos de produção de ferrovias.

Este artigo amplia os estudos de produção, estimando a função CES de ferrovias brasileiras *Heavy Hall* com técnicas econométricas para modelos não lineares. Cientificamente, objetiva-se medir os parâmetros econômicos: taxa técnica de substituição entre insumos, produtividades média, marginal e total. Trata-se, portanto, de uma abordagem alternativa as já consagradas com o uso do DEA. Desta feita, o artigo está dividido em duas seções que tratam da análise de produção de ferrovias e da estimação de funções de produção CES. Sequencialmente, faz-se a apresentação do modelo, sua estimação, resultados e análise econômica, findando com a última seção que trata das conclusões e sugestões.

2. ESTUDOS DE PRODUÇÃO FERROVIÁRIA

Existem vários estudos sobre produção de ferrovias no mundo uma vez que as ferrovias são modos de transportes centenários e que impulsionaram a sociedade moderna pós Revolução Industrial. Waters (2007) indica que estudos de economia de ferrovias tentam desde 1905 compreender a produção e os custos envolvidos no transporte ferroviário. Os trabalhos com viés econômico tratavam inicialmente da relação da construção de ferrovias, notoriamente americana e européia, com o desenvolvimento, entretanto com o advento da regulação americana e posteriormente com a decadência das ferrovias no mundo, pós 1970, os estudos focalizaram mais em aspectos microeconômicos. Desta feita, a sequência dessa seção apresentará a abordagem microeconômica com base nos trabalhos de Waters (2007) e Jará-Diaz (2007).

2.1 Histórico de Estudos de Produção e Custo Ferroviários

Estudos empíricos de custos e produção foram, inicialmente, influenciados pelo modal ferroviário, pois era uma indústria pujante e que dispunha de dados de um longo período, pós 1830 até a atualidade pelo menos para os EUA e Inglaterra, além de ter implementado mudanças tecnológicas que propiciavam uma análise de ganhos de escala, eficiência, produtividade, entre outros. No caso Brasileiro isso não foi diferente, transporte ferroviário exerce desde o império, papel primordial para movimentação de *commodities* tais como: soja, milho e minério (Brasileiro, *et. al.* 2001) e também no de passageiros entre estados e depois no meio urbano, embora com a ressalva de poucos registros sistemáticos de dados, a exceção dos períodos pós criação do GEIPOT e da RFFSA.

Segundo Watters II (2007) a análise do custo ferroviário tem duas abordagens: a de custo agregado para identificar características de custo amplo, como economias de escala e densidade; e outra com a análise dos custos ferroviários estimados de operações ferroviárias individuais, ou seja, análises de custo desagregado. O estudo pioneiro na primeira vertente foi Clark (1923) *apud* Watters (2007), seguido, segundo Watters II (2007) por Borts (1952, 1954, 1960), Klein (1953), entre outros. Os trabalhos recentes dessa abordagem são Bitzan (2000 e 2003) e Ivaldi e McCullough (2004 e 2007). Estes trabalhos carregaram resultados referentes a economia de escala, de densidade de ferrovias e testaram a estrutura de mercado que as

ferrovias poderiam se enquadrar (monopólio) via suposição da separabilidade de custos proposta em Baumol *et. al.* (1982). A forma desagregada se preocupa com os custos de servir vários clientes. A abordagem básica para esse tipo de análise de custo ferroviário é uma análise em dois estágios como apresentado em Waters II (1985). Esta abordagem mais micro se aplica as movimentações e operação ferroviária. Ressalte-se que mesmo com estudos que remontem o início de 1900, pouco se avançou na compreensão dos custos ferroviários ou no desenvolvimento de métodos que possam dar mais acurácea.

2.2 Características Teóricas da função de Produção e de Custo

A relação entre os fatores produtivos (matérias-primas, trabalho, capital, tecnologia, talento empresarial, terra) e a quantidade de bens e serviços produzidos em um determinado período de tempo por uma firma é chamada de função de produção (Thompson e Formby, 2003). De acordo com Samuelson e Nordhaus (1993), tal função também pode ser definida como a relação entre a quantidade máxima de produção que pode ser produzida e os fatores de produção necessários para realizar a produção, dado determinado nível tecnológico. Formalmente, uma função de produção pode ser representada como $y = f(x)$, onde x representa a quantidade dos insumos e y indica a produção alcançada em um determinado tempo, a partir da tecnologia empregada. Os limites das possibilidades técnicas de produção são analisados segundo os conceitos de produto: total; médio; e marginal. O primeiro designa a quantidade total do produto em unidades físicas, ou seja, y . O produto médio, por sua vez, corresponde à razão entre o produto total e a quantidade total de fatores de produção, isto é, $y/x = f(x)/x$. O produto marginal equivale ao produto adicional de um fator de produção, mantido os demais fatores constantes, sendo matematicamente expresso pela taxa marginal de variação da produção em função do insumo, ou $dy/dx = df(x)/dx$.

A função de produção tem que ter as propriedades para a estatística unidimensional $f: K \rightarrow R$, onde K domínio da função de produção é um subconjunto compacto, convexo, do ortante não negativo de R^s que é um espaço vetorial e s é o número de insumos pertencentes ao conjunto dos números inteiros não-negativos R contradomínio, é o conjunto dos números reais (Amaral, 2000). A função de produção usada deve ser: monotônica (bom comportamento da função e do ponto de vista de continuidade pode vir a implicar diferenciabilidade e portando passível de maximização); côncava (comportamento da função – apresentando retornos de escala); Envolvória de dados (factibilidade da produção); e Extrapolação mínima, tecnicamente: Dada uma função g que satisfaça as condições acima, obtêm-se, $g(\vec{x}) \geq f(\vec{x}); \forall \vec{x} \in K$. Note que as propriedades matemáticas da produção estão associadas a uma função neoclássica. Em suma, tem-se que a monotonicidade como o comportamento da função constante e contínua para um determinado valor de *input*, e do valor da envoltória ser sempre maior que a eficiência de uma determinada unidade de análise; a concavidade implica na dependência linear dos valores de inputs com relação à *outputs*; indica que a função da envoltória (produção factível) é sempre maior que um valor individual de uma unidade e a extrapolação máxima indica que sempre pode haver uma função de envoltória maior que a tratada em estudo, implicando que a eficiência pode sempre ser melhorada.

Uma característica relevante diz respeito aos retornos de escala que refletem a resposta do produto total quando todos os fatores produtivos aumentam proporcionalmente. Consoante Samuelson e Nordhaus (1993), a produção revela retornos crescentes, decrescentes ou constantes de escala quando um aumento proporcional em todos os fatores produtivos leva a um aumento mais do que proporcional, menos do que proporcional ou igualmente

proporcional da produção. Conhecida a função de produção pode-se otimizar a utilização os fatores de produtivos e a obtenção de economias de escala, de modo a garantir a máxima eficiência econômica na produção. Como resultado, tem-se que funções de produção são o dual das funções de custo.

As ferrovias são um caso bem descrito na literatura de monopólio natural, apresentando economias de escala por definição (Ver Baumol *et. al.*, 1982) e funcionando em uma estrutura de economias de rede. Além disso, ferrovias apresentam retornos de longo prazo nos investimentos (Da Silva *et. al.*, 2009) e a produção ferroviária envolve retornos de escala, economias de rede e de densidade e atendimento da subaditividade de custos conforme explicado por Ivaldi e McCulloch (2004) e Bitzan (2003). Se a indústria for de rede e verticalmente estruturada, então tem ganhos de escopo e escala, mas se for horizontalizada fomenta a competição, podendo implicar em perda de escopo e de escala, mas em ganhos em bem-estar com redução de preços. Isso motiva intervenção do Estado, como ocorrido na Europa com a separação da operação da gestão da infraestrutura e que foi cogitada no Brasil entre 2010 a 2014. Para estruturar a decisão de separação, a análise de custo é o principal instrumento de apoio a decisão, mas, conforme dito acima, a função de produção é o dual de função de custo e tem muitas propriedades e vantagens para um estudo empírico. Em primeiro lugar, a função de produção pode ser usada para medir índice de eficiência; em segundo lugar, os dados para a função de produção são observados pelo regulador e, no caso do Brasil é relatado mês a mês; e em terceiro lugar, tal função pode ser medida de um modo paramétrico, semi-paramétricas e não paramétricas. Logo, bem compreender funções de produção de ferrovias dão suporte a políticas regulatórias como a *Yardstick Competition*, a revisão de estruturas contratuais de concessões e a proposição de novos modelos de licitações e a compreensão das estruturas de custo das ferrovias.

A função de produção de Elasticidade Constante de Substituição (CES) funciona como uma generalização da função Cobb-Douglas permitindo qualquer elasticidade de substituição (constante não negativa), esperado no caso ferroviário por suas peculiaridades acima relatadas. A CES comporta análises mais generalistas da produtividade marginal, produtividade total dos fatores de produção e produção média, sendo popular em várias áreas de economia, mas raramente usada empiricamente por sua não linearidade e consequente dificuldade de ser estimado por técnicas de regressão linear padrão. Kmenta (1967) propôs uma abordagem de linearização da função CES via expansão de Taylor para sua estimação que encontra problemas de omissão de variável em decorrência da truncagem e de convergência, dependendo dos reais valores dos parâmetros. Contudo, Thursby e Lovell (1978) e Thursby (1980) propuseram tratamento alternativo que melhora as estimações e que é explicado na próxima seção para ser utilizado no processo de estimação.

3. ESTIMAÇÃO ECONOMETRICA DE FUNÇÕES DE PRODUÇÃO CES

A função CES é expressa pela Equação 1, possuindo elasticidade de substituição constante e que mede o quão propensa a firma está a alterar a proporção entre os insumos, dada uma variação percentual na razão entre o produto marginal dos insumos.

$$f(x,y) = y(\delta x^{-\rho} + (1-\delta)y^{-\rho})^{-v/\rho} \quad (1)$$

A Equação 1 inclui três casos especiais: se ρ tende a 0, então σ se aproxima de 1 e a função assume a forma Cobb-Douglas; se ρ for muito grande, σ se aproxima 0 e a CES tende para uma função de produção de Leontief; e se ρ tende a -1 , σ vai para infinito e a Equação 1 será uma função linear, se v for igual a 1. Kmenta (1967) derivou uma aproximação da função

clássica de produção de dois *inputs* do CES que pode ser estimada por mínimos quadrados ou regressão simples. Após a expansão de Taylor a equação 1 fica na forma linear apresentada na Equação 2.

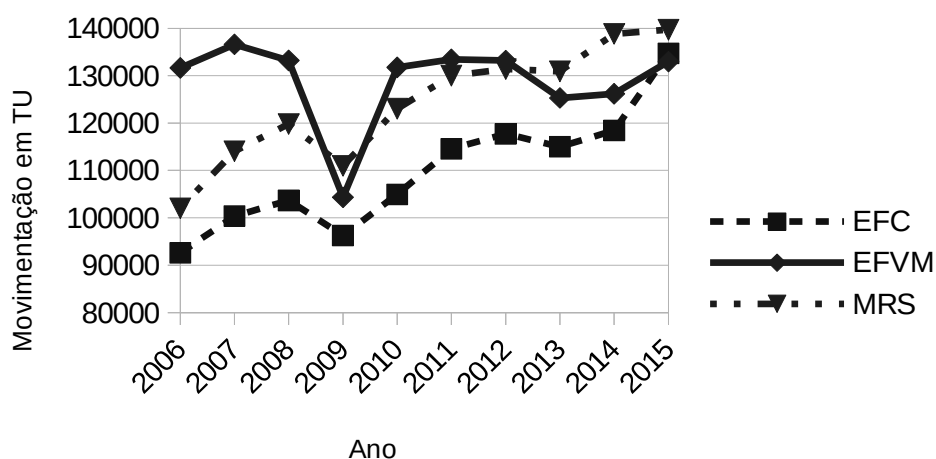
$$f(x, y) = \log y + \nu \delta \log x + \nu (1 - \delta) \log y - \rho \nu / 2 (\delta (1 - \delta)) (\log x - \log y)^2 \quad (2)$$

Hoff (2004) indica que a Equação 2 pode ser escrita como uma função translog restrita, assim, além de ser uma generalização de uma função Cobb-Douglas, a linearização da função CES via expansão de Taylor propicia uma versão de uma função Translog. A Equação 2 é estimável utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários, mas com viés nos estimadores, sendo tratado por Thursby (1980) utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt. O ajuste de Thursby (1980) executa uma ótima interpolação entre o método de Gauss-Newton que envolve uma linearização por uma aproximação de Taylor de primeira ordem e o método de gradiente. Outros trabalhos implementaram alternativas ao método do gradiente, sendo descritos no pacote micEconCES do *R project* que foi desenvolvido por Henningsen e Henningsen (2010), sendo utilizado no desenvolvimento dos modelos que serão apresentados na próxima seção.

4. MODELO APLICADO AO TRANSPORTE FERROVIÁRIO *HEAVY HALL* NO BRASIL.

Neste trabalho serão analisados dados das ferrovias de Carajás (EFC), Ferrovia Vitória Minas (EFVM) e Ferrovia da MRS logística que transportam cargas como: minério de ferro, manganês, carvão mineral, produtos siderúrgicos, cimento a granel e açúcar, caracterizando-se como ferrovias de grandes volumes transportados apresentado na Figura 01. A EFC e a EFVM são ferrovias vinculadas ao transporte de minério pela relação das mesmas com a Companhia VALE S.A. de mineração e que utiliza no caso da EFC, praticamente 90% da capacidade desta, para o transporte de minério e cerca de 85% para o caso da EFVM. A MRS logística tem grande volume de cargas siderúrgicas e de minério havendo também cargas do setor agrícola, em parte pela região de abrangência dela (Minas Gerais e São Paulo).

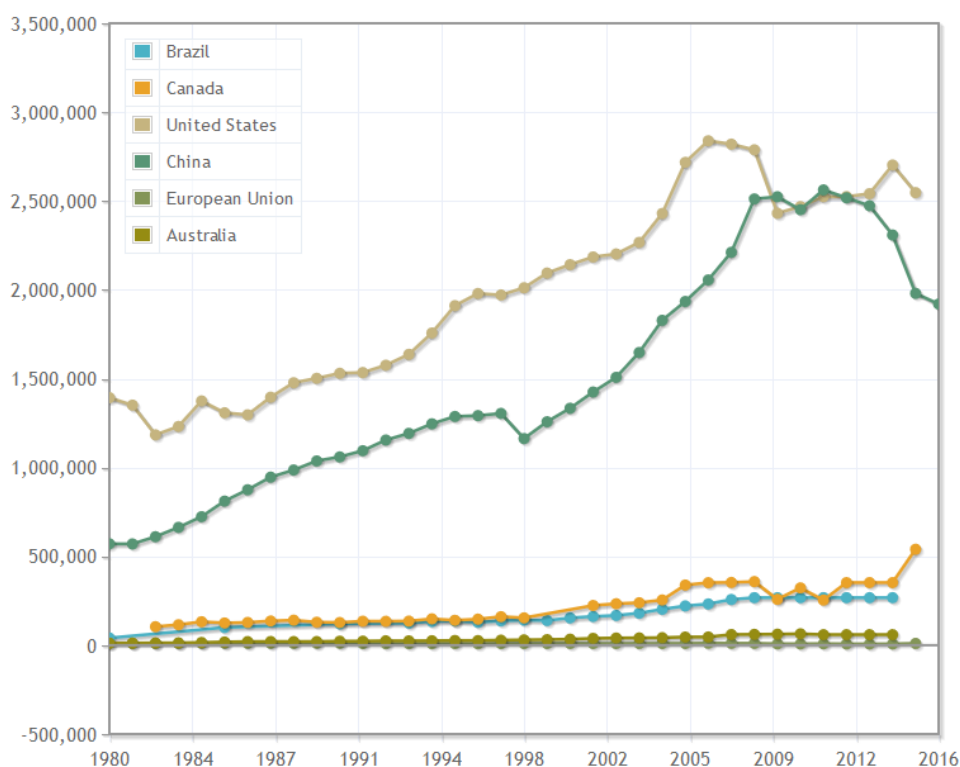
Figura 01: Movimentação das Ferrovias EFC, EFVM e MRS em TU de 2006 a 2015.



Fonte: ANTT (2016)

O paralelo aos volumes das cargas transportadas no Brasil é o Canadá, conforme pode ser visto na Figura 02 retirada do site *Index Mundi*, não havendo um comparativo por empresas ferroviárias. Muitos comparativos são tentados pensando no transporte americano e europeu o que não se adéqua pelas características infraestruturais no primeiro caso uma vez que os EUA possui 10 vezes mais infraestrutura ferroviária do que o Brasil e no segundo caso pelo uso, pois as ferrovias da UE são primordialmente utilizados para transporte de pessoas. Outro caso que pode gerar discussões de paralelismo é a Austrália, mas que possui corredores de exportação e não uma estrutura em rede.

Figura 02: Comparação entre movimentação de ferrovias no mundo realizado no site *Index Mundi*.



Fonte: *World Bank, World Development Indicator*, atualizados em 30/06/2016 e construído no site *Index Mundi*.

Na sequência serão apresentados os dados e as estatísticas utilizados para definir o modelo de função de produção apresentado na seção 4.2 seguido pela análise na seção 4.3.

4.1 Descrição e estatísticas dos dados

Os dados foram retirados do Anuário Estatístico da ANTT de 2018, com dados de 2006 a 2017 da movimentação de cargas em Toneladas Útil, Toneladas-km, número de vagões, número de trens formado, número de locomotivas, número de funcionários, acidentes e outras variáveis de acompanhamento da regulação segundo estabelecido nos contratos de concessão. Conforme a ANTT, o conteúdo da publicação é informativo, sendo proveniente dos dados enviados mensalmente pelas concessionárias ferroviárias através do Sistema de Acompanhamento e Fiscalização do Transporte Ferroviário- SAFF, nos termos Resolução ANTT nº 2.502/2007. Assim, os dados podem não representar fidedignamente a realidade da produção e dos insumos utilizados pelas ferrovias, uma vez que não são realizadas auditorias

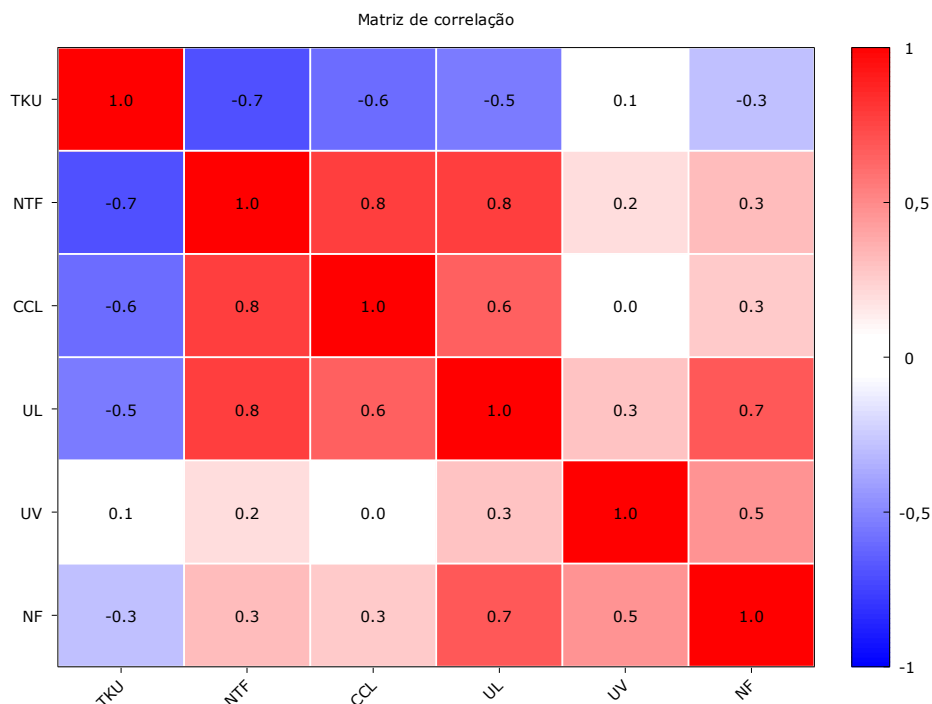
nesses dados. Mesmo com os problemas de qualidade da informação, os dados foram estruturados em um painel de 132 observações para cada uma das três concessionárias, sendo, portanto, observações mensais de seis variáveis, descritas a seguir, o que totalizam 396 observações por variável e 11 anos de acompanhamento das variáveis das concessionárias mês a mês.

As estatísticas das ferrovias analisadas se encontram na Tabela 01. As variáveis analisadas foram: **TKU**: toneladas por quilômetro útil, que corresponde ao somatório do produto entre o volume transportado, em **toneladas úteis (TU)**, e a distância percorrida, em **quilômetros (km)**, de cada composição transitada na malha concedida ou na malha de outras ferrovias, na realização do transporte de carga própria ou de terceiros; **NTF**: número de trens formados, que corresponde ao **número total de trens de carga formados no período**; **CCL**: consumo de combustível, representando o somatório da quantidade de combustível, em **litros (l)**, consumido pelas locomotivas diesel-elétricas utilizadas para o desempenho das operações de transporte, manobra e serviço; **UL**: utilização de locomotiva de frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de locomotivas utilizadas no transporte de carga, inclusive em carga própria, em **locomotiva.hora**, por modelo de locomotiva própria, arrendada, alugada, de outras concessionárias e de terceiros no período considerado; **UV**: utilização de vagão frota própria e de outras ferrovias, que corresponde ao somatório dos tempos de vagões carregados no serviço remunerado e carga própria, em **vagão.dia**, por tipo dos vagões próprios, arrendados, alugados e de terceiros (exceto de outras ferrovias), no período considerado; e **NF**: número de empregados por lotação, sendo igual ao total de **empregados** por área de atuação e por tipo de vínculo empregatício com a concessionária, sendo “próprios” para os empregados com vínculo empregatício com a concessionária, ou “terceirizados” para os trabalhadores de empresas contratadas para a prestação de serviços nas instalações da concessionária, levantado no último dia do mês informado.

As variáveis que serão utilizadas para a modelagem podem possuir relações. Sendo a variável dependente na modelagem o TKU, então avaliando a relação uma a uma das variáveis de insumo, com as informações expostas na Tabela 01 e na Figura 3, tem-se as seguintes possibilidades: o NTF tem relação direta com a produção; da mesma forma, o CCL guarda relação direta com o TKU, embora podendo haver diferenças entre concessionárias, pois as locomotivas podem ser mais ou menos modernas e também pela necessidade de operações ferroviárias diferentes como será explicitado nos próximos parágrafos para o caso das ferrovias EFVM e EFC; a variável UL tem relação direta com a produção, tendo, possivelmente, interação com a variável NTF e CCL uma vez que as locomotivas são demandas na formação dos trens e gastam combustível nas suas operações; a UV, que trata da utilização dos vagões em vagão.dia apresenta correspondência direta e positiva com TKU, pois o aumento da utilização de vagão está condicionada a demanda por carga que precisa ser acomodada em vagões, logo com toneladas úteis sendo alocadas nesses vagões movimentados; por fim, a NF não tem uma relação clara, mas sendo uma variável importante na modelagem, pois representa o número de empregados e pode apresentar relação positiva, caso a ferrovia utilize intensivamente a mão de obra ou relação negativa se a ferrovia utilize excessivamente o capital, este último sendo o desejado. Para efeitos do modelo, por ser utilizado o modelo de duas variáveis, será testada a melhor combinação entre dois insumos para representar a relação com TKU tal como a Equação 1. Desta forma, estudou-se pormenorizadamente a correlação entre as variáveis, representada na Figura 3 em que se observa correlação alta entre as variáveis NTF, CCL e NL, mas não entre essas e as variáveis UV e NF. A correlação entre as variáveis e TKU é negativa exceto para a variável UV. Essa

análise sugere que as variáveis NFC, CCL e NL podem apresentar sobreposição de informação quando utilizadas como *proxy* do capital e que será explicado mais adiante na definição do modelo.

Figura 03: Mapa de calor apresentando correlação entre variáveis.



Fonte: Elaboração do autor com auxílio do software Gretl, conforme Cottrell, e Lucchetti (2017) e dados da ANTT (2018)

As estatísticas indicadas na Tabela 01 podem ser utilizadas para estabelecer uma comparação entre as concessionárias. A EFC transporta mais TKUs com menos trens formados, e utilizando menos UVs, ULs e NFs do que as outras transportadoras. A MRS é a concessionária que mais utiliza combustível nominalmente, transportando menos TKUs, lembrando que a extensão da MRS é o dobro da EFC e pouco menos que o dobro da EFVM, então o TKU da MRS é provavelmente impactado pela distância que o trem percorre, sendo esperado a diferença apresentada.

A EFVM, diferentemente das outras duas ferrovias, tem bitola métrica e consequentemente a capacidade de carga dos seus trens deve ser reduzida. Observando a operação da EFVM e EFC, a primeira é conhecida pela estrutura em “carrossel” onde o trem desce em direção ao porto e retorna vazio em outro trecho, não prejudicando o transporte de minério no sentido exportação, favorecendo a eficiência no uso de locomotivas em comparação com a MRS, mas não em comparação a EFC que tem estrutura diferente do “carrossel”, entretanto tão vantajosa quanto a da EFVM e estando em processo de duplicação e com vários pátios de passagem em operação que facilitam a operação mais dinâmica e eficiente. Além disso, o embarcador envolvido nas movimentações da EFVM e EFC são detentores do terminal portuário final da carga, existindo equipamentos para reduzir movimentação de carga, tal como o virador da VALE no terminal da ponta-da-madeira no porto de Itaqui-MA, portanto esperando-se a geração de ganhos de escala e melhoras de eficiência nessas ferrovias. Há de salientar ainda as volatilidades maiores nas movimentações de carga, medidas pelo desvio padrão, nas

ferrovias EFVM e MRS, frente a EFC, respectivamente. Pode-se, também, observar tal amplitude de movimentação e uso de insumos nos valores de máximo e mínimo.

Tabela 01: Estatísticas descritivas das ferrovias EFC, EFVM e MRS de 2006 à 2017.

Estrada de Ferro Carajás- EFC.					
<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>TKU</i>	7,68E+09	7,50E+09	1,16E+09	5,25E+09	1,08E+10
<i>NTF</i>	1,30E+03	1,34E+03	2,59E+02	7,18E+02	1,74E+03
<i>CCL</i>	2	2	0	2	3
<i>UL</i>	212	215	34	128	257
<i>UV</i>	11.119	11.846	4.497	205	16.739
<i>NF</i>	4.645	4.377	1.079	2.642	8.181
Estrada de Ferro Vitória Minas – EFVM					
<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>TKU</i>	5,98E+09	6,21E+09	7,55E+08	3,53E+09	7,04E+09
<i>NTF</i>	4,42E+03	4,54E+03	5,31E+02	2,92E+03	5,21E+03
<i>CCL</i>	3	3	2	3	19
<i>UL</i>	317	316	23	132	377
<i>UV</i>	16.609	19.459	6.293	132	20.833
<i>NF</i>	6.435	6.252	1.216	4.740	8.978
MRS Logística					
<i>Variável</i>	<i>Média</i>	<i>Mediana</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>
<i>TKU</i>	4,77E+09	4,81E+09	6,76E+08	2,99E+09	5,92E+09
<i>NTF</i>	9,01E+03	9,46E+03	1,72E+03	5,90E+03	1,18E+04
<i>CCL</i>	5	5	0	4	7
<i>UL</i>	671	682	114	451	874
<i>UV</i>	15.783	18.026	5.701	663	20.235
<i>NF</i>	7.062	7.465	2.835	3.657	11.564

Fonte: Elaborado pelo autor com base nos dados da ANTT (2018).

É possível observar e construir indicadores que possam servir para iniciar um estudo das relações entre os insumos e o produto, entretanto, não sendo objetivo desse trabalho exaurir a compreensão das relações insumo-produto, o trabalho seguirá com a apresentação do modelo. Notem que existirão duas variáveis fixas, NF e TKU, frente as outras que serão escolhidas para representar o capital.

4.2 Função de Produção CES: estimação e avaliação do modelo

Foram estimadas várias funções de produção com forma funcional da Equação 1. Escolheu-se o modelo com duas variáveis de insumo, alterando o insumo de capital para verificar o desempenho estatístico em explicar a produção em TKU restando uma equação conforme Equação 3.

$$TKU = \gamma (\delta K^{-\rho} + (1-\delta)L^{-\rho})^{-\nu/\rho} \quad (3)$$

Com TKU: toneladas por quilômetro útil; K: representa alguma das variáveis de capital, NTF, UV, UL ou CCL, sendo que a rigor, todas seriam *proxies* e o CCL possivelmente apresentando correlação entre as outras variáveis. As estimações são apresentadas na Tabela 02 e será assumido, considerando as peculiaridades da base de dados relatadas na seção 4.1,

grau de significância de 5% para aceitação dos parâmetros estimados. As estimativas foram executadas no pacote micEconCES do *R project*, conforme a linearização proposta por Kmenta (1967) expressa na Equação 2 e com diferentes abordagens de estimação por mínimos quadrados generalizados para modelos não-lineares, com diferentes procedimentos da busca do mínimo com base no gradiente tal como apontado em Henningsen e Henningsen (2010).

Tabela 02: Estatísticas descritivas das ferrovias EFC, EFVM e MRS de 2006 à 2017.

Modelo 01: Insumos: UV e NF						
	Aproximação de KMENTA		Estimação com Método de Newton		Estimação com BFGS	
	Coef	P-valor	Coef	P-valor	Coef	P-valor
γ	1,22E+10	0,014509	7,08E+05	0,436	4,34E+07	0,183
δ	-1,155	0,092898	1,159	8,39E-05	1,09E+00	2,00E-16
ρ	-0,3396	0,000304	0,3657	0,793	1,11E+00	0,233
v	-0,9549	0,032933	0,911	5,16E-12	5,02E-01	9,31E-11
Elasticidade dos Insumos	1,5143	2,17E-12	0,7322	0,328	0,4731	0,0236
Estatística geral do Modelo		-0,0022		-1,3591		-0,7917
Modelo 02: Insumos: UL e NF						
	Aproximação de KMENTA		Estimação com Método de Newton		Estimação com BFGS	
	Coef	P-valor	Coef	P-valor	Coef	P-valor
γ	1,53E+09	0,00918	5,16E+06	0,987165	5,23E+07	0,869
δ	9,04E+00	1,81E-13	-2,14E+02	0,982874	-1,63E+01	0,862
ρ	3,95E-01	1,46E-12	-1,07E-02	0,191354	-1,31E-02	0,283
v	-2,71E-02	2,00E-16	1,54E-01	0,000275	2,15E-01	9,02E-07
Elasticidade dos Insumos	0,96204	2,00E-16	1,1195	2,00E-16	1,151	1,19E-12
Estatística geral do Modelo		-106,8789		0,0202		-0,0499
Modelo 03: Insumos: NTF e NF						
	Aproximação de KMENTA		Estimação com Método de Newton		Estimação com BFGS	
	Coef	P-valor	Coef	P-valor	Coef	P-valor
γ	4,40E+10	0,000159	1,28E+06	0,128	1,92E+08	0,00998
δ	1,26E+00	2,00E-16	-4,18E-01	9,26E-06	-7,77E-01	9,24E-08
ρ	1,64E+00	0,140129	1,90E-01	0,219	1,12E-01	0,22502
v	-2,38E-01	3,02E-15	9,33E-01	2,00E-16	3,79E-01	2,00E-16
Elasticidade dos Insumos	0,379	0,0175	0,8402	1,46E-14	0,89934	2,00E-16
Estatística geral do Modelo		Não calculado		-1,2017		0,0342
Modelo 04: Insumos: CCL e NF						
	Aproximação de KMENTA		Estimação com Método de Newton		Estimação com BFGS	
	Coef	P-valor	Coef	P-valor	Coef	P-valor
γ	6,65E+13	0,620034	2,23E+08	0,997	2,45E+08	0,823
δ	-2,98E+00	0,000575	-1,14E+02	0,998	-5,99E+00	7,65E-01
ρ	-4,65E-02	0,000637	-5,54E-02	0,909	-2,29E-03	0,973
v	-6,04E-01	2,00E-16	4,48E-02	0,357	6,30E-02	1,89E-01
Elasticidade dos Insumos	1,04877	2,00E-16	1,0586	0,0501	1,00229	2,00E-16
Estatística geral do Modelo		-12,6479		0,0412		0,0740

BFGS: método quasi-Newton desenvolvido independentemente por Broyden (1970), Fletcher (1970), Goldfarb (1970) e Shanno (1970)

Os valores encontrados para os parâmetros por diferentes métodos sugerem o uso do Modelo 02 da Tabela 02, embora a estatística geral do modelo apresente inconsistência, os parâmetros são estatisticamente significantes a 5% e os resultados que utilizam o método de aproximação de Kmenta são considerados viesados, mas com aderência em magnitude ao esperado teoricamente.

$$TKU = \gamma (\delta UL^{-\rho} + (1 - \delta) NF^{-\rho})^{-v/\rho} \quad (4)$$

Conforme explicado anteriormente o método de Kmenta apresenta problemas de omissão de variável em decorrência da trucagem e de convergência, dependendo dos reais valores dos parâmetros, tendo sido tratado por Thursby e Lovell (1978) e Thursby (1980) e utilizado no processo de estimação desse artigo, via algoritmos implementados no pacote micEconCES do *R project* com base em Henningsen e Henningsen (2010). Na próxima seção será feita

uma análise do modelo escolhido quanto a elasticidade e produtividades média, total e marginal.

4.3 Análise do Modelo e suas implicações econômicas

A elasticidade de substituição mede a variação percentual na relação capital/trabalho induzida por uma mudança de 1 ponto percentual na taxa marginal de substituição técnica, ao longo de uma isoquanta. Da Tabela 02 observa-se a elasticidade de 0,96204 e significância estatística a 5%, sugerindo a possibilidade pequena de substituição de um insumo por outro. Caso esta elasticidade fosse grande haveria alta substitutibilidade e se fosse próximo de zero, então a substituição de um insumo pelo outro seria indiferente. Algumas manipulações algébricas da Equação 4 permitem definir a produtividade média por insumo e a produtividade marginal. A produtividade total é representada pela própria função. Como ρ não tende a zero, nem a 1, nem é muito grande, então assumiremos que a forma funcional escolhida é a verdadeira, portanto a CES será analisada na sua forma pura. Desta feita, tem-se o Quadro 01 que apresenta as fórmulas das produtividades média e marginal por insumos obtidos por meio de manipulações algébricas da Equação 2 e aplicação das derivadas da produção (TKU) em função dos insumos.

Quadro 01: Fórmulas para cálculo dos Produtos Médios e Marginal das Concessionárias.

Produto Médio	
UL	$\gamma (\delta UL^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho})^{-v/\rho} / UL$
NF	$\gamma (\delta UL^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho})^{-v/\rho} / NF$
Produto Marginal	
UL	$\delta \gamma \gamma (\delta UL^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho})^{-v/\rho} UL^{-\rho} / (UL (\delta UL^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho}))$
NF	$\delta \gamma \gamma (\delta NF^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho})^{-v/\rho} UL^{-\rho} / (NF (\delta UL^{-\rho} + (1-\delta) NF^{-\rho}))$

A Tabela 3 resume numericamente os resultados de produtividade média e marginal por variável e por concessionária. Os valores foram calculados considerando as médias das variáveis apresentadas na Tabela 1. Os níveis de produção resultaram em: $1,50 \times 10^{10}$, $1,49 \times 10^{10}$ e $1,44 \times 10^{10}$, para a EFC, EFVM e MRS, respectivamente, portanto, entre as concessionárias os níveis de produto são semelhantes. A produtividade média seguem a seguinte desigualdade $P_{meEFC} > P_{meEFVM} > P_{meMRS}$, havendo diferença da ordem de 40% da EFC frente as outras no insumo considerado representar o Capital e da ordem de 30% no insumo que representa a mão-de-obra.

Tabela 3: Produtividade Média e Marginal das concessionárias.

Variáveis	EFC	EFVM	MRS
	Produtividade Média		
UL	7,10E+06	4,69E+06	2,15E+06
NF	3,24E+05	2,31E+05	2,05E+05
Produtividade Marginal			
UL	-1,14E+04	-6,42E+03	-2,19E+03
NF	-1,54E+02	-9,63E+01	-8,23E+01

A produtividade marginal representa variações de produto ao implementar variações no insumo analisado. Valores negativos desse indicador significam que adições de insumo

gerarão perdas de produção, o que está ocorrendo conforme exposto na Tabela 3. No caso de ferrovias, que são monopólios naturais, a situação de $Pmgs < 0$ sugerem que a quantidade produzida tende a decrescer o que é esperado pela literatura (veja Varian, 2003 para uma explicação das condições de funcionamento do monopólio).

Não obstante a análise absoluta das produtividades marginais, pode-se verificar que a empresa com maior produtividade marginal é a EFC e a segunda a MRS, restando a EFVM. Isso sugere que o comportamento mais monopolístico é o da EFC, seguido pela MRS e EFVM. Pela literatura monopólios tendem a ser eficientes o que tem sido confirmado pelos estudos nacionais para avaliar eficiência e que utilizam o DEA a exemplo de Novaes (1996), Azambuja (2002) e Reis *et. al* (2017).

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÃO

O estudo agrega informações para a análise da produção de ferrovias brasileiras tipo *Heavy Hall*. Tal conhecimento favorece estruturar comparativos importantes para auferir ganhos de produção. Os resultados indicam que as ferrovias são produtivamente equivalentes, embora com suas peculiaridades: bitolas, infraestrutura, demanda, operação e localização geográfica. Observa-se que ferrovias que possuem nós finais mais dinâmicos, EFC e EFVM, possuem melhor uso dos insumos para a produção. Nota-se da mesma forma que ganhos marginais de mudanças de insumos são mais sensíveis para essas ferrovias. A MRS não possui interação com o porto de destino de suas cargas (Santos), portanto a produtividade total de uma ferrovia pode ser ampliada com seu nó de destino mais eficiente.

A metodologia para mensurar a função de produção apresentou-se tecnicamente executável e propiciou informações extras aos métodos aplicados pelas pesquisas brasileiras. Com as estimações, pode-se obter produtividades marginais, médias, total e elasticidade das concessionárias. Estes parâmetros econômicos propiciam a verificação se mudanças em insumos gerarão retornos na produção e se a operação se encontra no limite de produção. Os resultados apontam para pouca margem de substitutibilidade entre os insumos capital e trabalho e que as concessionárias se encontram operando como monopolistas com produções decrescentes, possivelmente com preços mais elevados o que, para ser confirmado, exige um estudo mais pormenorizado.

O estudo também ensaia o estudo do comportamento da função de produção em paralelo a função custo que embora não tenha sido feito no texto, pode ser realizado, com limitações, em modelos duais do custo e produção. O trabalho é limitado por utilizar um painel para a estimação, mas fazer o exercício com modelo *pooled*, a justificativa da abordagem é a complexidade de estimar modelos não-lineares em modelos de efeito fixo ou variável. Desta feita, sugere-se a extensão do trabalho para outras metodologias econométricas, embora, a estrutura não-linear da função CES possa gerar complicações no processo numérico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANTT. Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2016) Anuário Estatístico – Ano 2018 (Base 2006). Disponível em http://www.antt.gov.br/ferrovias/arquivos/Anuario_Estatistico.html Acesso em 29/06/2018.
- _____. (2016) EVOLUÇÃO DO TRANSPORTE FERROVIÁRIO DE CARGAS – Ano 2016 (Base 2006). Disponível em www.antt.gov.br. Acesso em 29/06/2018.
- Azambuja, A. M. V. de. (2002). Análise de Eficiência na Gestão do Transporte Urbano por Ônibus em Municípios Brasileiros. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis, 385f.

- Baumol, W., Panzar, J., and Willig, R. (1982). *Contestable markets and the theory of industry structure*. New York: Harcourt Brace Jovanovich Inc.
- Bitzan, J. (2000). *Railroad cost conditions – implications for policy. Report for the Federal Railroad Administration*, Washington, DC.
- Bitzan, J. (2003). *Railroad costs and competition: The implications of introducing competition to railroad networks*. *Journal of Transport Economics and Policy*, 37(2 (May)), 201–275.
- Brasileiro, A., Santos, E. M., Aragão, J.J.G., Senna, J.M., Lima Neto, O., e Orrico Filho, R.D., (2001) Transporte no Brasil: história e reflexões. Coordenação: Oswaldo Lima Neto; Autores:– Brasília, DF, Ed. Universitária da UFPE.- GEIPOT
- Broyden CG (1970). *The Convergence of a Class of Double-rank Minimization Algorithms*. *Journal of the Institute of Mathematics and Its Applications*, 6, 76–90.
- Coelli, T.; Estache, A.; Perelman, S.; Trujillo, L. (2003) *A Primer on Efficiency Measurement for Utilities and Transport Regulators*. Washington: The World Bank.
- Cottrell, A. and R. Lucchetti (2017) *Gretl User's Guide, gretl documentation*. Disponível em: <http://sourceforge.net/projects/gretl/files/manual/>. Acesso em 29/06/2018.
- David P. Baron and Roger B. Myerson (1982) *Regulating a Monopolist with Unknown Costs* *Econometrica* Vol. 50, No. 4 (Jul., 1982), pp. 911-930
- Da SILVA, F. G. F.; Martins, F.G.D ; Rocha, C. H. ; Araujo, C.E.F . (2009) Investimentos em transportes terrestres causam crescimento econômico? Um estudo quantitativo. In: Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes-ANPET, 2009, Vitória. XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2009.
- Fletcher R (1970). *A New Approach to Variable Metric Algorithms*. *Computer Journal*, 13, 317–322.
- Goldfarb D (1970). *A Family of Variable Metric Updates Derived by Variational Means*. *Mathematics of Computation*, 24, 23–26.
- Henningsen A, Henningsen G (2010). *micEconCES: Analysis with the Constant Elasticity of Scale (CES) Function*. R package version 0.6, URL <http://CRAN.R-project.org/package=micEconCES>.
- Hoff A (2004). *The Linear Approximation of the CES Function with n Input Variables*. *Marine Resource Economics*, 19, 295–306.
- Ivaldi, M., and McCullough, G. J. (2004). *Subadditivity tests for network separation with an application to U.S. railroads*. London, CEPR Discussion Paper 4392.
- Ivaldi, M., and McCullough, G. J. (2007). *Railroad pricing and revenue-to-cost margins in the post-Staggers era*. In: S. Dennis & W. Talley (Eds), *Railroad economics*. Elsevier Science.
- Jara-Díaz, S. (2007), *Transport production and cost structure*, in Sergio Jara-Díaz (ed.) *Transport Economic Theory*, pp.11 - 49
- Kmenta J (1967). *On Estimation of the CES Production Function*. *International Economic Review*, 8, 180-189.
- Novaes, A.G. (1996) Avaliação da produtividade de serviços de transportes através da análise por envelopamento de dados. Anais do X Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília, V. 2, p. 577-588.
- Reis, j.c. ; Sacramento, k. T. ; Soares de Mello, j.c.c.b. ; Angulo Meza, l. . Avaliação de eficiência das ferrovias brasileiras: Uma aplicação do método multicritério para seleção de variáveis em DEA e Representação Gráfica Bidimensional. *Espacios* (Caracas), v. 38, p. 15, 2017.
- Samuelson, P. A., Nordhaus, W. D. (1993) *Economia*. 14ª edição, Portugal: McGraw-Hill.
- Shanno DF (1970). *Conditioning of Quasi-Newton Methods for Function Minimization*. *Mathematics of Computation*, 24, 647–656.
- Thompson Júnior, A. A., Formby, J. P. (2003) *Microeconomia da Firma: teoria e prática*. 6ª edição, Rio de Janeiro: LTC.
- Waters, W. G., II (1985). *Rail cost analysis*. In: K. G. Button & D. Pitfield (Eds), *International railway economics* (pp. 101–135). Aldershot, UK: Gower Publishing.
- Waters, W. G., II (2007) *Evolution of Railroad Economics, Research in Transportation Economics*, Volume 20, 2007, Pages 11-67, ISSN 0739-8859, ISBN 9780762312559, [https://doi.org/10.1016/S0739-8859\(07\)20002-2](https://doi.org/10.1016/S0739-8859(07)20002-2). (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885907200022>)
- World Development Indicators, The World Bank Disponível em <https://datacatalog.worldbank.org/dataset/world-development-indicators> Acesso em 29/06/2018.
- Varian, H. R. (2003) *Microeconomia: princípios básicos: uma abordagem moderna*. Tradução da 6ª edição americana, Rio de Janeiro: Campus.