



Redução das emissões de CO₂ do setor de transportes brasileiro aplicando a metodologia de Diagrama de Fontes de Carbono

Gabriel Lopes Espíndola

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
Flávio da Silva Francisco, D.Sc.**

Fevereiro de 2020

**REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO SETOR DE
TRANSPORTES BRASILEIRO APLICANDO A
METODOLOGIA DE DIAGRAMA DE FONTES DE
CARBONO**

Gabriel Lopes Espíndola

Projeto de Final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Ana Carolina de Lira Quaresma, M.Sc.

Prof^a. Ana Mehl, D.Sc.

Prof. Pedro Rua Rodriguez Rochedo, D.Sc.

Orientado por:

Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Fevereiro de 2020

L864r

Lopes Espíndola, Gabriel
Redução das emissões de CO₂ do setor de transportes brasileiro aplicando a metodologia de Diagrama de Fontes de Carbono / Gabriel Lopes Espíndola. -- Rio de Janeiro, 2020.
65 f.

Orientador: Eduardo Mach Queiroz.
Coorientador: Flávio da Silva Francisco.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Bacharel em Engenharia Química, 2020.

1. Emissões. 2. Transportes. 3. DFC. I. Queiroz, Eduardo Mach, orient. II. Francisco, Flávio da Silva, coorient. III. Redução das emissões de CO₂ do setor de transportes brasileiro aplicando a metodologia de Diagrama de Fontes de Carbono.

"Educação não transforma o mundo. Educação muda pessoas. Pessoas transformam o mundo".
(Paulo Freire)

AGRADECIMENTOS

À minha família, por todo o suporte ao longo da minha trajetória acadêmica. Um agradecimento especial à minha mãe, por toda a preocupação comigo e com meu futuro, por todos os conselhos e puxões de orelha. Sem ela eu provavelmente não teria chegado aqui.

Aos amigos da UFRJ, que levarei sempre comigo.

Aos professores da Escola de Química, que de forma brilhante me transmitiram seus conhecimentos.

Ao professor Eduardo Mach pela orientação.

Ao Flávio Francisco, pela disponibilidade e paciência em ter me acompanhado desde o princípio deste trabalho, auxiliando a orientação do Prof. Eduardo Mach.

À UFRJ, universidade pública, gratuita e de qualidade, por ter formado não só um profissional, mas também um cidadão.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

**REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO SETOR DE TRANSPORTES
BRASILEIRO APLICANDO A METODOLOGIA DE DIAGRAMA DE FONTES
DE CARBONO**

Gabriel Lopes Espíndola

Fevereiro, 2020

Orientadores: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

As ações antrópicas têm causado grande impacto ao meio ambiente, principalmente no que diz respeito às emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera. Em 2016, o Brasil entrou no Acordo de Paris. As Contribuições Nacionalmente Determinadas (CND) do Brasil estabelecem o compromisso de reduzir as emissões de GEE a um nível 37% inferior ao de 2005, em 2025, além de cumprir uma meta indicativa subsequente de 43% menos emissões em relação a 2005, em 2030. O Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) é uma metodologia que permite a identificação das fontes necessárias para suprir uma determinada demanda por meio da elaboração de um planejamento energético, respeitando os limites de emissão de GEE. O presente trabalho tem como base a utilização do DFC com sua adaptação para aplicação no setor de transporte de cargas do Brasil. Para demonstrar a aplicabilidade da metodologia DFC no setor de transportes, foi utilizado como base o trabalho de Walmsley *et al.* (2015), que trata de um planejamento energético do setor de transportes da Nova Zelândia, de forma que os níveis de emissão em 2050 sejam os mesmos que em 1990. Os resultados encontrados para a metodologia DFC foram bastante próximos dos obtidos pelos autores, provando, portanto, a eficácia da metodologia. Aplicando a metodologia DFC ao sistema de transporte de cargas do Brasil, com o objetivo de obter cenários de minimização das emissões de CO₂, e avaliar a viabilidade do cumprimento das metas estabelecidas nas CND, concluiu-se que a quantidade de transporte estimada em 2025, de 2.808,5 Gt-km, seria responsável por 46.371 kt-CO₂, respeitando o limite de emissão, que é de 46.686 kt-CO₂. Por sua vez, a quantidade de transporte estimada em 2030, de 3.072,9 Gt-km, emitiria 40.164 kt-CO₂, abaixo do limite de 42.240 kt-CO₂.

Abstract of Final Project presented to Escola de Química as partial fulfillment of the requirements for the degree of Chemical Engineer (B.Sc.).

**REDUCTION OF CO₂ EMISSIONS FROM THE BRAZILIAN
TRANSPORTATION SECTOR APPLYING THE CARBON SOURCES
DIAGRAM (CDS)**

Gabriel Lopes Espíndola

February, 2020

Supervisors: Prof. Eduardo Mach Queiroz, D.Sc.
Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Anthropic activities have been causing severe impact in the environment, especially when related to greenhouse gases (GHG) emissions in the atmosphere. In 2016, Brazil joined the Paris Agreement. Brazil's National Determined Contributions (NDCs) have set a target of reducing the GHG emissions to a level 37% lower than 2005, in 2025, and a subsequent target of cutting the emissions in 43% by 2030. The Carbon Sources Diagram (CSD) is a methodology that allows the identification of the sources needed to meet a certain demand through the elaboration of an energy planning based on a GHG emission limit. This work is based on the CSD application, with due adaptations, in the Brazilian cargo transport sector. The work of Walmsley *et al.* (2015) was used as a study case in order to demonstrate the CSD applicability. That work focused on an energy planning of the New Zealand transport sector so that the emission levels in 2050 are the same as in 1990. The results using the CSD were close to those obtained by the authors, therefore proving its effectiveness. Through the application of the CSD in the Brazilian cargo transport sector it was possible to obtain CO₂ emission minimization scenarios as well as to evaluate the feasibility of meeting the targets established in the NDCs. The estimated amount of transport in 2025, 2,808.5 Gt-km, would account for 46,371 kt-CO₂, thus below the emission limit of 46,686 kt-CO₂. Moreover, the estimated amount of transport in 2030, 3,072.9 Gt-km, would account for 40,164 kt-CO₂, below the emission limit of 42,240 kt-CO₂.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1. PANORAMA DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO BRASIL	4
1.2. SETOR DE TRANSPORTES BRASILEIRO.....	5
1.3. INICIATIVAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂ DO SETOR DE TRANSPORTES	9
1.4. OBJETIVOS.....	10
1.5. ESTRUTURA DO TEXTO	11
CAPÍTULO 2 - ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO DFC NO SETOR DE TRANSPORTES DA NOVA ZELÂNDIA	12
2.1. CRIAÇÃO DA TABELA DE OPORTUNIDADES	13
2.2. DETERMINAÇÃO DOS INTERVALOS DOS FATORES DE EMISSÃO.....	16
2.3. REPRESENTAÇÃO DA DEMANDA.....	17
2.4. CÁLCULO DA QUANTIDADE DE CO₂ EMITIDA EM CADA INTERVALO.....	18
2.5. IDENTIFICAÇÃO DAS FONTES NO DIAGRAMA.....	19
2.6. CÁLCULO DA QUANTIDADE REQUERIDA PELAS DEMANDAS EM CADA INTERVALO	20
2.7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DFC PARA O TRANSPORTE DE CARGAS DA NOVA ZELÂNDIA.....	22
2.8. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DFC PARA O TRANSPORTE DE PASSAGEIROS DA NOVA ZELÂNDIA.....	26
CAPÍTULO 3 - APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DFC NO SETOR DE TRANSPORTE DE CARGAS BRASILEIRO.....	31
3.1. ANO DE 2025	46
3.2. ANO DE 2030	52
3.3. CONSIDERAÇÕES	57
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÃO	59
CAPÍTULO 5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as ações humanas têm causado grande impacto ao meio ambiente e atualmente as emissões antropogênicas globais de gases de efeito estufa (GEEs) encontram-se no maior nível da história. Dentre as principais atividades relacionadas ao aumento gradativo das emissões de GEE estão a queima de combustíveis fósseis (carvão, gás natural, petróleo), de resíduos sólidos, de árvores e produtos de madeira; práticas agrícolas e industriais; e a decomposição de resíduos orgânicos em aterros de resíduos sólidos (GUIMARÃES, 2016).

A crescente demanda por combustíveis fósseis teve um papel fundamental no aumento das emissões de CO₂ de praticamente zero em 1870 para quase 33 Gt no ano de 2014 (IEA, 2017).

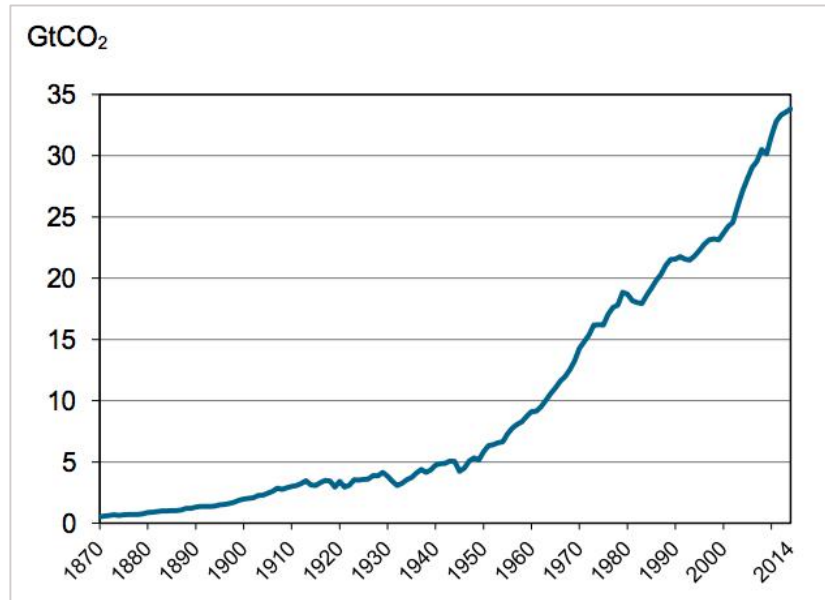


Figura 1.1 – Evolução das emissões globais de CO₂ por combustíveis fósseis, em GtCO₂.

Fonte: IEA (2017).

Os principais GEEs encontrados na atmosfera são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (GUIMARÃES, 2016). Esse aumento das emissões tem sido responsável pelo chamado efeito estufa. Uma vez em excesso na atmosfera, os GEE absorvem a reemissão radiante da superfície, levando ao aumento da temperatura média da atmosfera, que tem como consequência o aumento do nível dos oceanos devido ao derretimento das geleiras e a ocorrência cada vez mais frequente de eventos climáticos extremos. A continuidade dos patamares atuais de crescimento das emissões dos GEE levará a mais aquecimento, alterações no sistema climático e uma maior possibilidade de impactos severos e irreversíveis para as pessoas e ecossistemas (IEA, 2017).

Tendo em vista contornar esse cenário, várias iniciativas de âmbito global visando reduzir os impactos ambientais têm sido tomadas nas últimas décadas.

Em 1988, a Conferência de Toronto alertou o mundo para a necessidade da redução das emissões de GEE. Nessa ocasião foi aprovada a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (PIMC), principal órgão científico para tratar da avaliação das mudanças climáticas ocasionadas por atividades humanas (QUARESMA, 2016).

Em 1992 ocorreu no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Rio 92. Foi uma conferência de chefes de estado com o objetivo de debater uma agenda global visando minimizar os problemas ambientais mundiais. Nesse cenário, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Climática (CQNUMC) foi instituída com o objetivo de estabilizar as concentrações de GEE na atmosfera em um nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático. Esse nível deverá ser alcançado em um prazo que permita aos ecossistemas se adaptarem naturalmente à mudança do clima, de forma que o desenvolvimento humano e econômico prossiga de forma sustentável (MMA, 2015).

Um novo e importante passo foi dado no Acordo de Paris, o mais recente acordo climático global. Realizado durante a 21^a Conferência das Partes (COP21) da CQNUMC, em 2015, o Acordo tem como objetivos aumentar os esforços globais contra a ameaça da mudança climática e reforçar a capacidade dos países de lidar com os impactos resultantes dessas mudanças.

O Acordo de Paris foi assinado pelos 195 países integrantes da CQNUMC, com o compromisso de reduzir as emissões de GEE de forma a conter o aumento da

temperatura média global em 2°C acima dos níveis pré-industriais, bem como limitar o aumento da temperatura em até 1,5°C até 2100. Através das Pretendidas Contribuições Nacionalmente Determinadas (PCND), cada governo apresentou seu compromisso de redução de emissões de GEE (MMA, 2015).

Em setembro de 2016, após aprovação pelo Congresso Nacional, o Brasil oficialmente entrou no Acordo de Paris e as metas deixaram de ser pretensões e passaram a ser compromissos. Portanto, a sigla deixou de ser PCND e tornou-se CND – Contribuições Nacionalmente Determinadas (MMA, 2016).

As CND do Brasil têm como compromisso reduzir as emissões de GEE a um nível 37% inferior ao de 2005, em 2025, além de cumprir uma meta indicativa subsequente de 43% menos emissões em relação a 2005, em 2030. Para tal, o Brasil se comprometeu com uma série de medidas no Setor de Energia e em outros, a saber (SEEG, 2018):

- i. Aumentar a participação de bioenergia sustentável na matriz energética brasileira para aproximadamente 18% até 2030, expandindo o uso de biocombustíveis, aumentando a demanda por etanol e aumentando a porcentagem de biodiesel no diesel;
- ii. No uso da terra:
 - Reforçar a implementação do Código Florestal nos níveis municipal, estadual e federal;
 - Estabelecer políticas e medidas de forma a haver zero desmatamento ilegal em 2030;
 - Reflorestar 12 milhões de hectares de florestas para múltiplos usos até 2030;
 - Aperfeiçoar sistemas de gerenciamento de florestas nativas através de georreferenciamento e sistemas de rastreamento, de forma a coibir práticas ilegais e não-sustentáveis;
- iii. Atingir o uso de 45% de fontes renováveis na matriz energética em 2030, incluindo:
 - Expandir a produção de energias renováveis, exceto a hidroelétrica, entre 28 e 33% até 2030;
 - Expandir o uso doméstico de fontes não-fósseis (solar, eólica, biomassa), exceto a hidroelétrica, em pelo menos 23% em 2030;
 - Alcançar 10% em ganho de eficiência no setor de eletricidade em 2030;

- iv. No setor de agricultura, fortalecer o Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono), restaurar 15 milhões de hectares de área de pasto, além de implantar 5 milhões de hectares de áreas de integração lavoura-pecuária-floresta;
- v. No setor da indústria, promover o uso de tecnologias mais limpas e aperfeiçoar a eficiência energética e a infraestrutura dos processos;
- vi. No setor de transportes, promover medidas que aumentem a eficiência dos transportes e melhorar a infraestrutura dos transportes públicos nos centros urbanos.

1.1. Panorama das emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil

Três gases de efeito estufa – dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) são responsáveis por 99% das emissões no Brasil. O CO_2 sozinho representou 73% das emissões totais brutas e 64% das emissões totais líquidas no ano de 2016 e teve como principais fontes a queima de combustíveis fósseis e as mudanças de uso da terra (SEEG, 2018).

Entre as atividades econômicas responsáveis pela emissão de GEE, destacam-se os setores (SEEG, 2018):

- i. Energia: emissões devido ao uso de combustíveis fósseis e emissões advindas da indústria de petróleo, gás e carvão mineral.
- ii. Processos industriais: emissões de processos produtivos nas indústrias que não são resultado da queima de combustíveis.
- iii. Agropecuária: emissões devido à fermentação entérica do gado, manuseio de dejetos animais, solos agrícolas, cultivo de arroz e queima de resíduos agrícolas.
- iv. Mudança de uso da terra e florestas: emissões e remoções oriundas das variações das quantidades de carbono (biomassa vegetal e solo), emissões de CO_2 por aplicação de calcário em solos agrícolas e emissões de CH_4 e N_2O pela queima de biomassa nos solos.
- v. Tratamento de resíduos: emissões pela disposição e queima de resíduos sólidos e pelo tratamento de efluentes domésticos e industriais.

No grande setor Energético, o setor de transportes é o maior responsável por emissões de GEE, superando até mesmo o setor elétrico, devido a sua alta dependência de combustíveis de origem fóssil. Nota-se que as emissões desse setor, bem como a sua

participação no total das emissões vêm tendo uma trajetória crescente ao longo dos anos, como mostra a Figura 1.2.

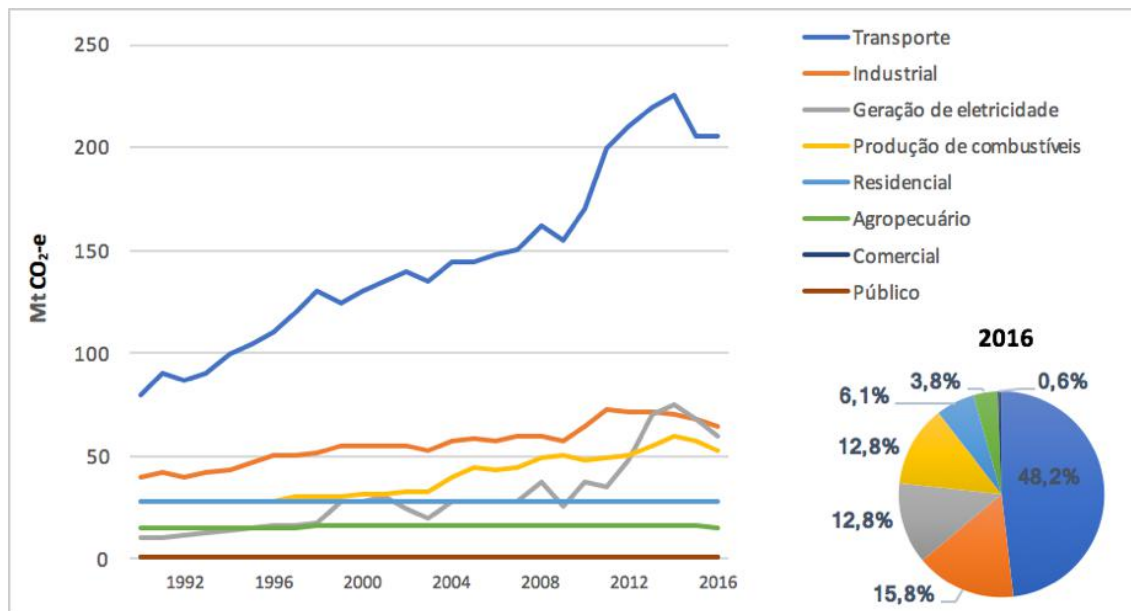


Figura 1.2 – Emissões de GEE (Mt CO₂-e) do setor de energia brasileiro por segmento de atividade e a participação de cada um nas emissões totais em 2016.

Fonte: SEEG (2018).

1.2. Setor de transportes brasileiro

O setor de transportes brasileiro ainda possui uma grande dependência de fontes de energia fósseis, o que provoca um grande impacto nas emissões de CO₂. A Figura 1.3 mostra a evolução do consumo de energia associado a diferentes combustíveis no Brasil, em Mtep (milhões de toneladas equivalentes de petróleo). Mostra-se evidente, portanto, que a matriz energética do setor é muito concentrada no diesel mineral e na gasolina automotiva, combustíveis de origem fóssil.

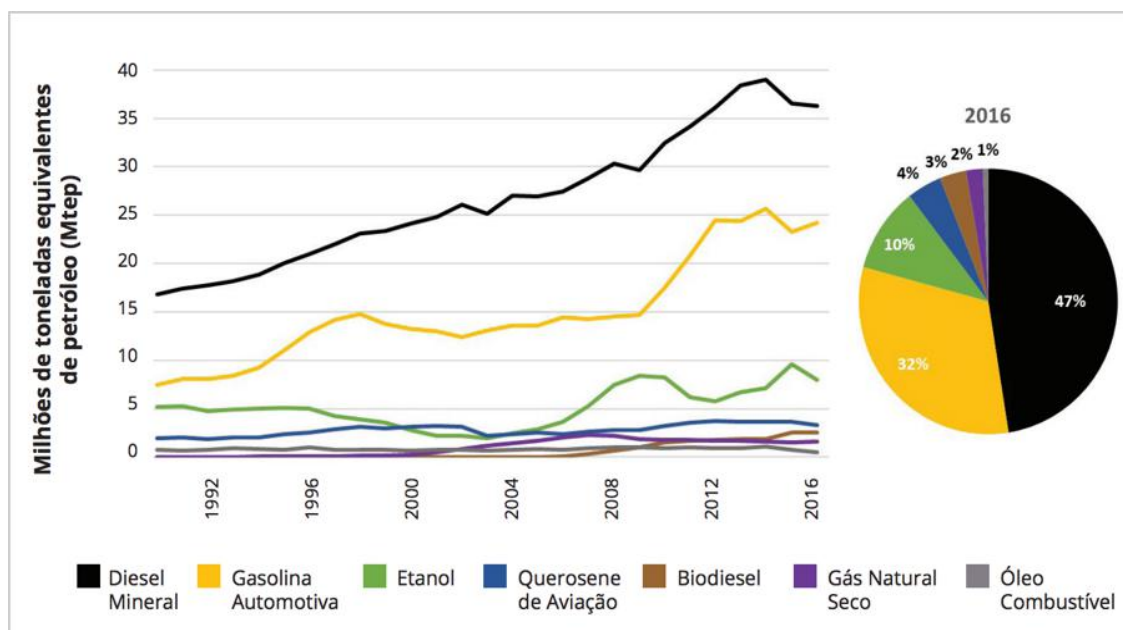


Figura 1.3 – Evolução do consumo de energia no setor de transportes, por tipo de combustível, no Brasil.

Fonte: SEEG (2018).

As emissões de GEE refletem esse comportamento do consumo energético. Dentre os segmentos do setor de energia brasileiro, o de transportes é o que responde pela maior parte das emissões de CO₂ na atmosfera. Tomando como referência o ano de 2016, os modais de transporte mais utilizados no país e que, portanto, emitiram quantidades significativas de CO₂, são o rodoviário (182,9 Mt), o aéreo (10,0 Mt), o ferroviário (2,7 Mt) e o hidroviário (2,3 Mt). O modal rodoviário destaca-se pela sua elevada participação nessa soma, representando 92% das emissões totais de CO₂. Além disso, nota-se um equilíbrio entre as emissões oriundas do transporte de cargas (99,7 Mt) e do transporte de passageiros (98,2 Mt) (SEEG, 2018). A Figura 1.4 apresenta esses dados.

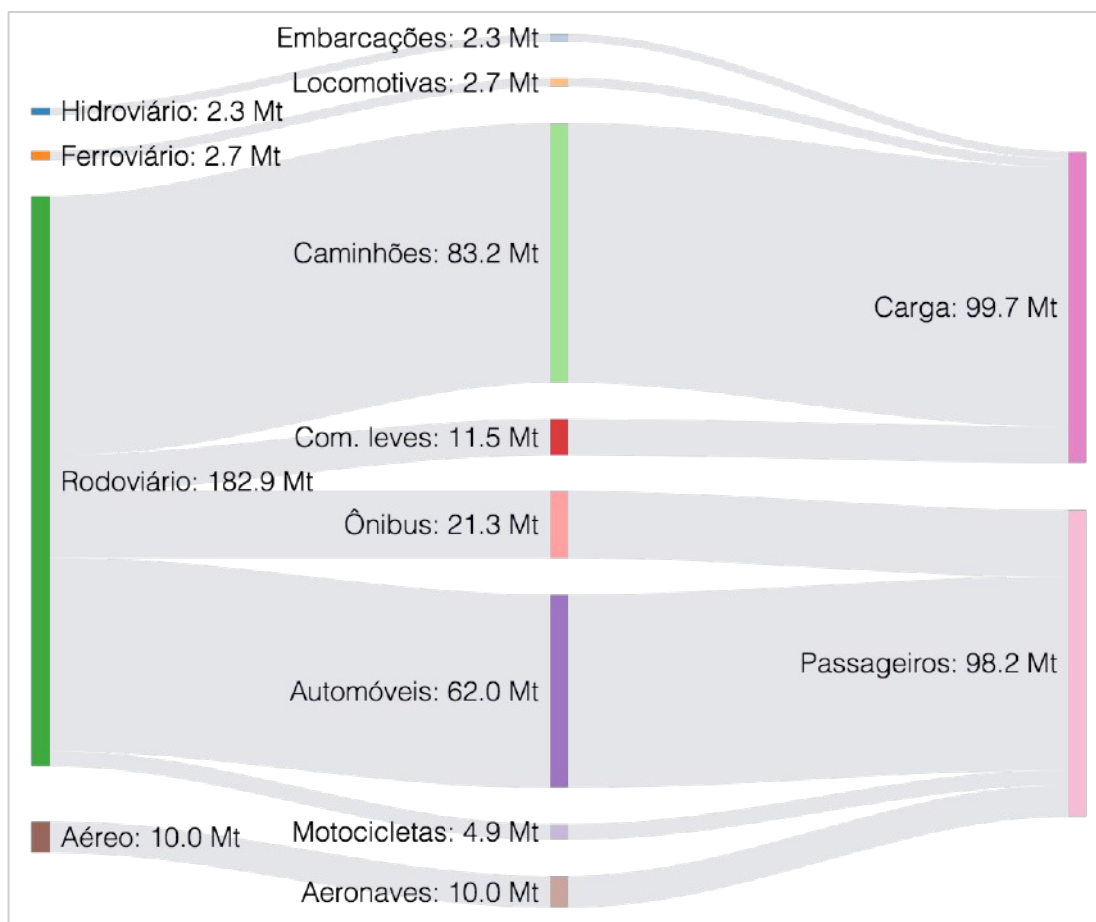


Figura 1.4 – Diagrama esquemático das emissões de CO₂ dos transportes no Brasil em 2016.

Fonte: SEEG (2018).

Um dos principais entraves ao crescimento econômico do Brasil diz respeito à dificuldade logística e de infraestrutura de escoamento da produção nacional por um sistema de transportes eficiente. A matriz brasileira de transportes é desbalanceada e privilegia em excesso o modal rodoviário em detrimento dos demais modais, ao contrário do que ocorre em outros países de dimensões continentais, como Estados Unidos, Canadá e Rússia (SEEG, 2018), conforme ilustra a Figura 1.5.

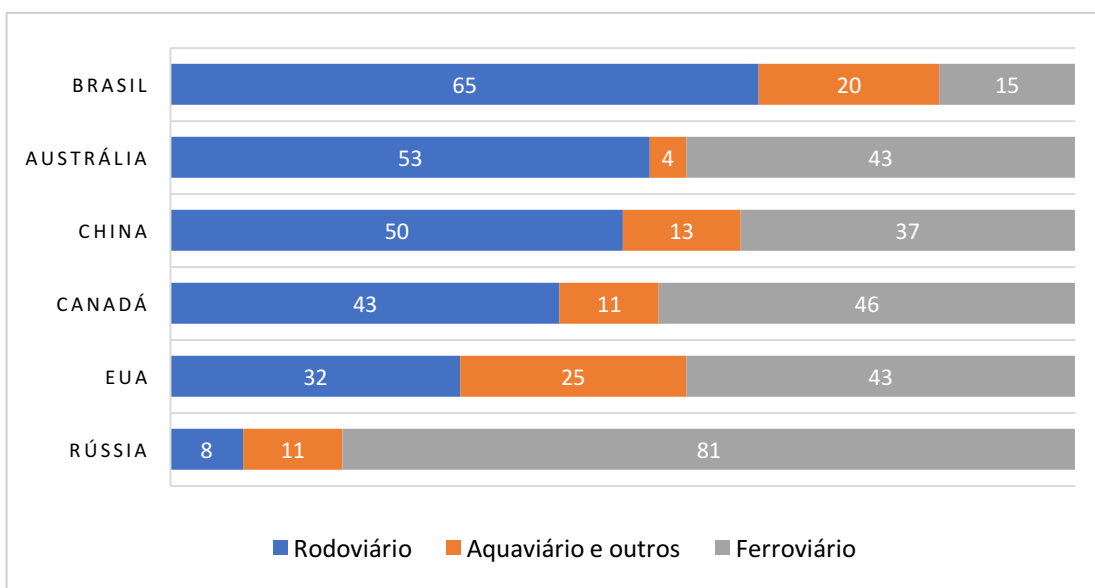


Figura 1.5 – Divisão modal do transporte de cargas em países selecionados no ano de 2015.

Fonte: SEEG (2018).

Essa distorção contribui para uma perda de competitividade e para o aumento do “custo Brasil”, uma vez que o modal rodoviário acaba por preencher lacunas de outros modais de transporte, predominando muitas vezes em operações em que, por suas especificidades (natureza do produto transportado, distância, capacidade de carga), não é o mais adequado economicamente. Tal panorama é consequência direta da opção estratégica, adotada na década de 1950, de privilegiar as rodovias em relação aos outros modais de transporte e da posterior redução da capacidade de investimentos do Estado em infraestrutura (GOLDENSTEIN *et al.*, 2006).

Quanto às emissões, o transporte de cargas no Brasil emitiu 73,6 Mt de CO₂ no ano de 2006. Em 2016, o transporte de cargas foi responsável por 99,7 Mt de CO₂, o que correspondeu a um aumento de 35% das emissões em dez anos. O modal rodoviário destaca-se pela sua grande participação (94,7 Mt) no total das emissões, sendo os caminhões as principais fontes emissoras (83,2 Mt) (SEEG, 2018).

1.3. Iniciativas para redução das emissões de CO₂ do setor de transportes

Algumas medidas vêm sendo tomadas no sentido de mitigar as emissões veiculares de CO₂ no Brasil e no mundo, basicamente a partir do uso de metas de eficiência energética, estímulo ao uso de combustíveis mais limpos como os biocombustíveis, além da adoção de novas tecnologias como veículos elétricos e híbridos.

A necessidade de diminuição do uso de combustíveis fósseis levou a maioria dos países desenvolvidos a desenvolverem políticas específicas para medição e controle dos níveis de consumo de combustíveis e emissão de poluentes. Na União Europeia, as metas de emissões de CO₂ são constantemente revistas, fazendo com que as montadoras inovem continuamente (BNDES, 2017).

No Brasil, com a instituição do Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores (Inovar-Auto), passaram a ser exigidas metas de eficiência energética como critério de regularização de empresas no Novo Regime Automotivo (BNDES, 2017).

Entretanto, o aumento da eficiência de novos veículos, ainda que seja capaz de reduzir o consumo energético, não será capaz de evitar sozinho o aumento da frota veicular mundial e o conseqüente uso crescente de combustíveis. Para isso, mudanças radicais devem ser feitas no setor de transportes, tanto no padrão de motorização quanto na transição de combustíveis fósseis para fontes mais limpas (BNDES, 2017).

O etanol conseguiu uma grande penetração no mercado brasileiro. Ele é utilizado de forma eficiente em veículos em substituição à gasolina e é capaz de reduzir em até 90% das emissões de CO₂ em comparação com os combustíveis fósseis. Isso se explica, pois, dependendo da matéria-prima utilizada e do balanço energético do processo de produção, o biocombustível pode absorver uma quantidade de CO₂ próxima àquela emitida durante a sua combustão (BNDES, 2017).

Outra medida importante na mitigação de emissões diz respeito à mistura de biodiesel no diesel. Atualmente utiliza-se um teor de 10% de biodiesel na frota movida a diesel. O Conselho Nacional de Política Energética instituiu em 2018 um aumento anual de 1% do combustível renovável até 2023, quando então a mistura terá 15% de biodiesel. Testes indicam resultados positivos na redução de monóxido de carbono e

principalmente material particulado, o que é importante para a frota de ônibus urbanos, responsáveis por boa parte da fumaça que degrada imóveis e prejudica a saúde da população nos grandes centros (MME, 2018).

Há também o RenovaBio, uma política de Estado, que objetiva traçar uma estratégia conjunta para reconhecer o papel estratégico de todos os tipos de biocombustíveis na matriz energética brasileira, tanto para a segurança energética quanto para mitigação de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa. Uma das iniciativas do RenovaBio é o incentivo à produção de biogás, combustível que pode ser obtido a partir de esgoto e resíduos de alimentos. A utilização do biogás a partir de fontes residuais na substituição de quaisquer fontes, seja para a geração de energia elétrica seja como combustível, possui uma grande vantagem ambiental, pois é o único energético que possui pegada de carbono negativa em seu ciclo de vida. Assim, pode-se afirmar que sua disseminação é estratégica para o Brasil alcançar as metas de redução de GEE das CND (MME, 2015).

1.4. Objetivos

Diversas pesquisas têm sido realizadas no sentido de minimizar as emissões de CO₂ na atmosfera, tendo em vista o cumprimento de metas estabelecidas em acordos internacionais. Em geral, é desejável maximizar o uso de fontes neutras ou de baixo teor de carbono para substituir os combustíveis fósseis convencionais com alto teor de carbono. No entanto, essas tecnologias são mais caras no geral (por exemplo, energias renováveis) ou controversas (energia nuclear) do que combustíveis fósseis tradicionais. Além disso, no curto prazo, muitas vezes é necessário gerir a transição para o aumento da utilização de energia de baixo carbono para minimizar as interrupções no fornecimento de energia ou o preço. Portanto, em muitos cenários de planejamento há algum interesse em identificar a quantidade mínima de fontes de energia de zero ou baixo carbono necessárias para cumprir os limites de emissão de CO₂ (FRANCISCO, PESSOA e QUEIROZ, 2014).

Para atender essa necessidade, o procedimento algorítmico-heurístico denominado Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) foi apresentado por FRANCISCO, PESSOA e QUEIROZ (2014). Sua aplicação permite identificar as fontes necessárias

para suprir uma determinada demanda, por meio da elaboração de planejamentos energéticos, respeitando o limite de emissão de GEE. O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e validar a metodologia do Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) para o setor de transporte de cargas nacional. Para tal, inicialmente a metodologia será validada a partir de um Estudo de Caso do setor de transportes da Nova Zelândia, com uma avaliação de seus resultados face aos apresentados por outros autores. Posteriormente, serão elaborados planejamentos energéticos para o setor de transporte de cargas brasileiro, baseados no compromisso firmado pelo Brasil e estabelecido nas CND, que preconizam uma redução das emissões de CO₂ de 37% em 2025 e de 43% em 2030 em relação às emissões de 2005.

1.5. Estrutura do texto

Este texto encontra-se dividido em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta um Estudo de Caso visando demonstrar a aplicabilidade da metodologia do Diagrama de Fontes de Carbono no planejamento energético do setor de transportes da Nova Zelândia.

O Capítulo 3, de forma similar, apresenta a aplicação do DFC visando a elaboração de um planejamento energético do setor de transportes brasileiro, com o objetivo de avaliar a redução das emissões de CO₂, tendo como base os valores das CND de 2030 assinada pelo Brasil no Acordo de Paris.

No Capítulo 4 são apresentadas as conclusões gerais e sugestões para trabalhos futuros. O Capítulo 5 traz as referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2

ESTUDO DE CASO – APLICAÇÃO DO DFC NO SETOR DE TRANSPORTES DA NOVA ZELÂNDIA

Neste Capítulo será feita uma apresentação da metodologia do Diagrama de Fontes de Carbono (DFC) através da sua aplicação a um Estudo de Caso retirado do trabalho de Walmsley *et al.* (2015), que utilizaram um método gráfico denominado *Carbon Emission Pinch Analysis* (CEPA) para obter um planejamento energético do setor de transportes da Nova Zelândia. Essa metodologia permite a identificação da quantidade mínima de fontes de zero ou baixo carbono de forma a atender às metas de emissão preestabelecidas, de acordo com a demanda energética. No entanto, apesar de práticas, metodologias gráficas tendem a carregar um certo grau de imprecisão. Com a aplicação da metodologia DFC, será possível obter um planejamento energético de forma simples e sem as imprecisões inerentes ao procedimento gráfico.

O Estudo de Caso elabora um planejamento energético para o setor de transportes da Nova Zelândia, de forma que os níveis de emissão em 2050 sejam os mesmos que em 1990. Para isso, os autores utilizaram o método CEPA, que mostra a quantidade de emissões que cada fonte gera e possibilita modificações do setor energético de forma a atender aos limites de emissão (WALMSLEY *et al.*, 2015).

A metodologia DFC, assim como outras ferramentas associadas a redução de emissões, tem como objetivos identificar a quantidade mínima de fontes de energia com baixa emissão de carbono, de forma a satisfazer as demandas energéticas e os limites de emissões de uma determinada região ou setor e desenvolver o sistema de alocação de energia, utilizando a quantidade mínima de fontes específicas de energia para atender os limites de emissão preestabelecidos (FRANCISCO, PESSOA e QUEIROZ, 2014).

Tendo em vista que grandes variações no planejamento energético, como por exemplo na demanda (e por consequência, na emissão de CO₂) ou nas fontes de energia disponível são pré-especificadas e pode haver variação significativa de custos associados a cada opção, com o objetivo de apresentar uma visão geral e abrangente o

DFC pode ser aplicado para gerar diferentes cenários. Dois destes cenários foram definidos por Quaresma *et al.* (2018):

i. Cenário de baixo custo: prioriza o uso de fontes mais baratas, de acordo com a sua disponibilidade. A prioridade é atender às demandas energéticas;

ii. Cenário favorável ao ambiente: prioriza o uso de fontes mais limpas (com baixos fatores de emissão).

No presente Estudo de Caso, o DFC é aplicado utilizando-se os dados apresentados por Walmsley *et al.* (2015) e adotando-se um cenário de baixo custo. É assumido que o custo é inversamente proporcional ao fator de emissão do meio de transporte, como forma de simplificação da metodologia. Ou seja, as fontes deverão ser utilizadas da mais poluente (mais barata) até a menos poluente (mais cara).

Com o cenário estabelecido, é possível dar início à aplicação da metodologia DFC. Os passos são descritos a seguir. Mais detalhes sobre o desenvolvimento desta metodologia podem ser vistos em QUARESMA (2016).

2.1. Criação da Tabela de Oportunidades

O primeiro passo da metodologia DFC é a criação da Tabela de Oportunidades. Ela deve conter todas as informações necessárias para a aplicação da metodologia. Assim, foi utilizado o software *Pega Ponto Versão 1.0* (Oliveira, Gambetta e Pinto, 2006) para estimar as quantidades de fontes disponíveis na Nova Zelândia em Gt-km (toneladas transportadas vezes a distância percorrida) a partir do gráfico resultante da aplicação da metodologia CEPA disponibilizado no trabalho de Walmsley *et al.* (2015), conforme a Figura 2.1.

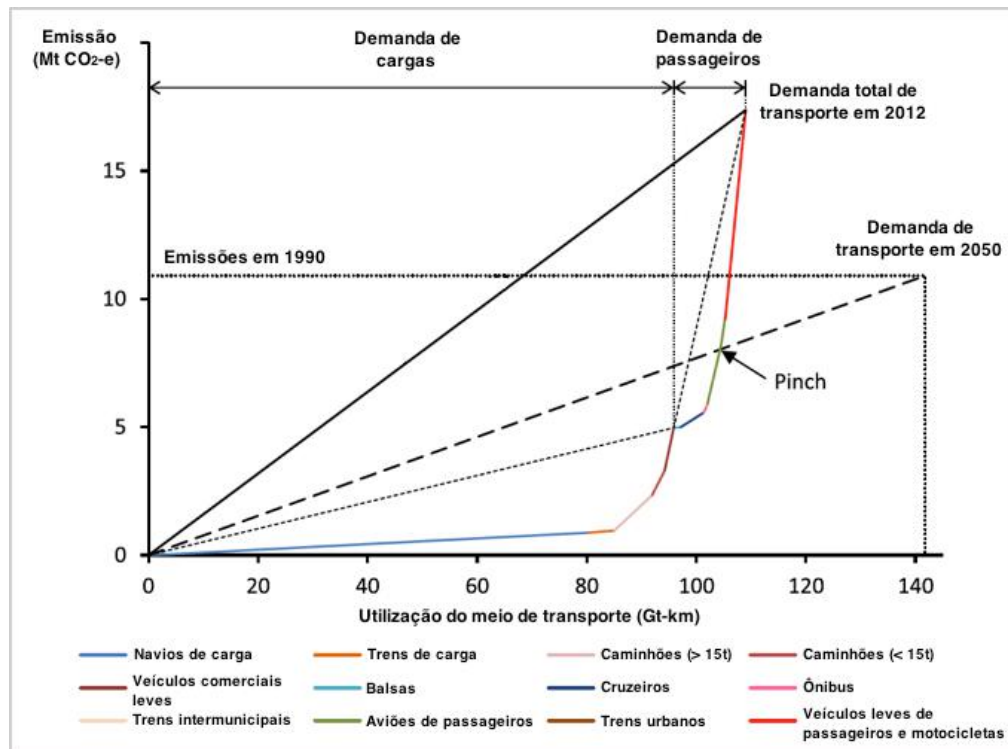


Figura 2.1 – Curva de emissões de diferentes meios de transporte na Nova Zelândia em 2012 construída a partir da metodologia CEPA e a meta para 2050.

Fonte: Walmsley *et al.* (2015).

Com as quantidades de fontes disponíveis, é possível calcular os fatores de emissão de cada meio de transporte utilizando a Equação 2.1.

$$F_j = \frac{\varepsilon_j}{D_j} \quad (2.1)$$

em que:

F_j : fator de emissão do meio de transporte j (ktCO₂-e/Gt-km);

ε_j : emissão de CO₂ do meio de transporte j (ktCO₂-e);

D_j : consumo esperado pela demanda j (Gt-km).

Dessa forma, é possível criar a Tabela de Oportunidades, representada pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tabela de Oportunidades para o Estudo de Caso.

	<i>Tipo de transporte</i>	<i>Fator de emissão, F_j (ktCO₂-e/ Gt-km)</i>	<i>Consumo esperado, D_j (Gt-km)</i>
<i>Transporte de cargas</i>	Marítimo	11	80,3
	Ferroviário	12	4,7
	Caminhões (>15t)	196	6,7
	Caminhões (<15t)	408	2,5
	Veículos comerciais leves	960	1,7
<i>Total</i>		52	95,9
<i>Transporte de passageiros</i>	Barcas	21	1,4
	Cruzeiros	137	4,3
	Ônibus	452	0,7
	Aéreo	1.060	3,2
	Veículos leves de passageiros	2.077	3,5
<i>Total</i>		944	13,1

A Tabela 2.1 mostra, em ordem crescente, os fatores de emissão (F_j) dos meios de transporte (de cargas e de passageiros, separadamente) da Nova Zelândia, extraídos do trabalho de Walmsley *et al.* (2015). Os fatores de emissão totais do transporte de cargas e do transporte de passageiros foram obtidos através de uma média ponderada dos respectivos fatores de emissão desses setores. Também estão apresentadas as quantidades disponíveis de cada modal, obtidas a partir da Figura 2.1.

2.2. Determinação dos intervalos dos fatores de emissão

O próximo passo é ordenar os fatores de emissão em ordem crescente. Para facilitar o entendimento, são apresentados dois diagramas; o primeiro (Figura 2.1) representando o transporte de cargas e o segundo (Figura 2.2) representando o transporte de passageiros. Nas Figuras 2.2 e 2.3 os fatores de emissão são identificados na parte superior e os intervalos na parte inferior.

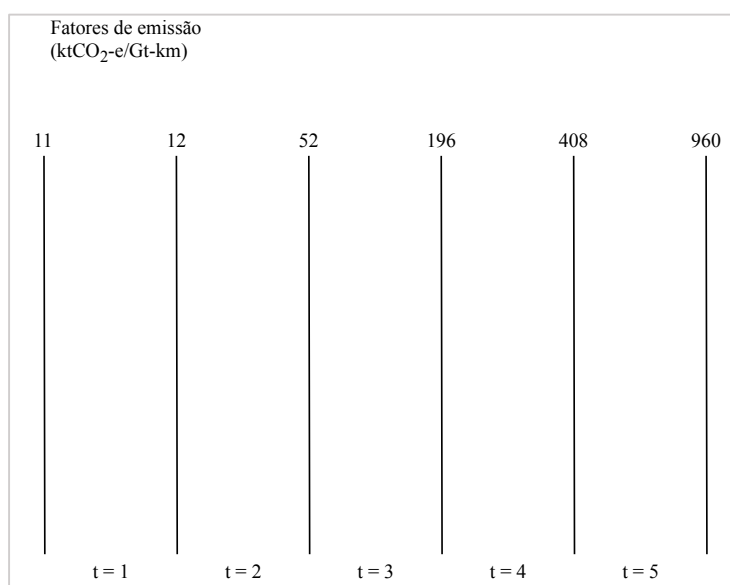


Figura 2.2 – Representação inicial do DFC para o transporte de cargas.

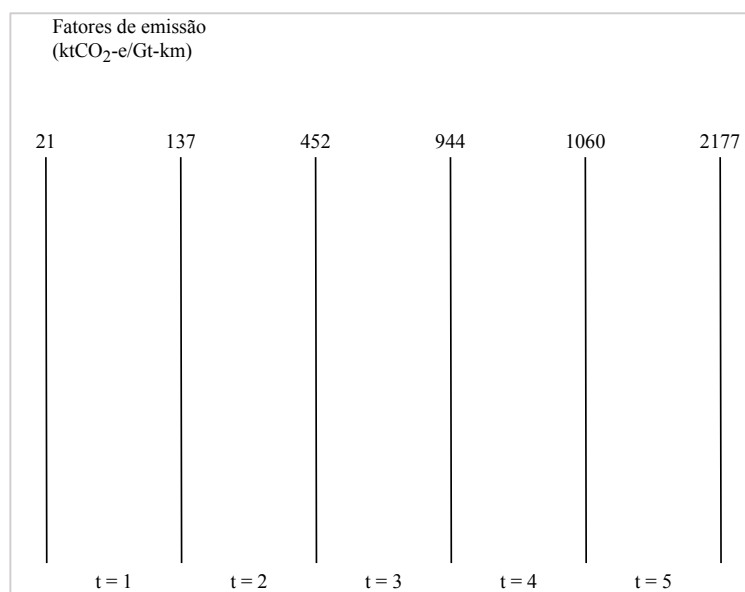


Figura 2.3 – Representação inicial do DFC para o transporte de passageiros.

2.3. Representação da demanda

Uma seta horizontal, com origem no seu respectivo fator de emissão e término no valor do último intervalo, é utilizada para representar a demanda de transporte de cargas e de passageiros. A escolha do valor final é feita para garantir que a demanda por transporte seja satisfeita. Após a definição dos intervalos e da inclusão das demandas, o diagrama estará pronto para ser usado como ferramenta de alocação das fontes de carbono, conforme observado nas Figuras 2.4 e 2.5.

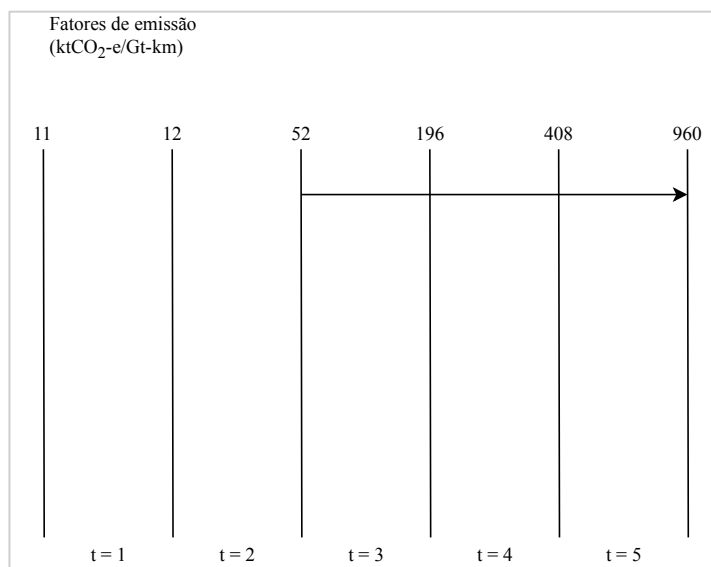


Figura 2.4 – Representação da demanda no DFC para o transporte de cargas.

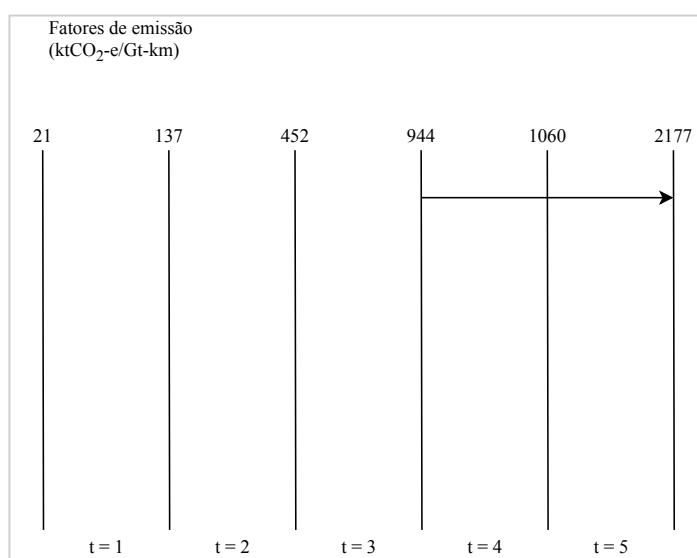


Figura 2.5 – Representação da demanda no DFC para o transporte de passageiros.

2.4. Cálculo da quantidade de CO₂ emitida em cada intervalo

Utilizando os dados informados na Tabela 2.1 e a Equação 2.2, é possível calcular a quantidade de CO₂, em ktCO₂-e, emitida em cada intervalo. Ela é representada entre parênteses, acima da seta em cada intervalo.

$$\Delta C_{j,t} = D_j (F_{\text{final},t} - F_{\text{inicial},t}) \quad (2.2)$$

sendo:

$\Delta C_{j,t}$: quantidade de CO₂ emitida pelo meio de transporte j no intervalo t (ktCO₂-e);

D_j : demanda do meio de transporte j (Gt-km);

$F_{\text{final},t}$: fator de emissão no início do intervalo t (ktCO₂-e/Gt-km);

$F_{\text{inicial},t}$: fator de emissão no final do intervalo t (ktCO₂-e/Gt-km).

Após calcular os valores de $\Delta C_{j,t}$ para cada intervalo, obtém-se os diagramas das Figuras 2.6 e 2.7.

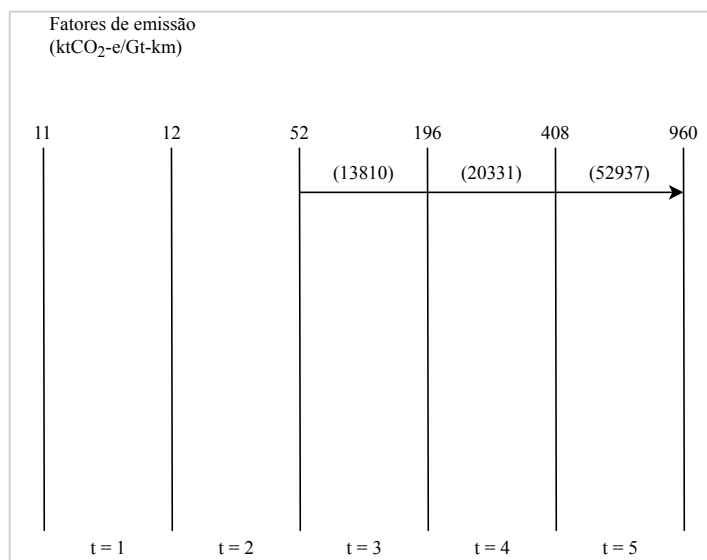


Figura 2.6 – Representação da quantidade de CO₂ emitida em cada intervalo da demanda para o transporte de passageiros.

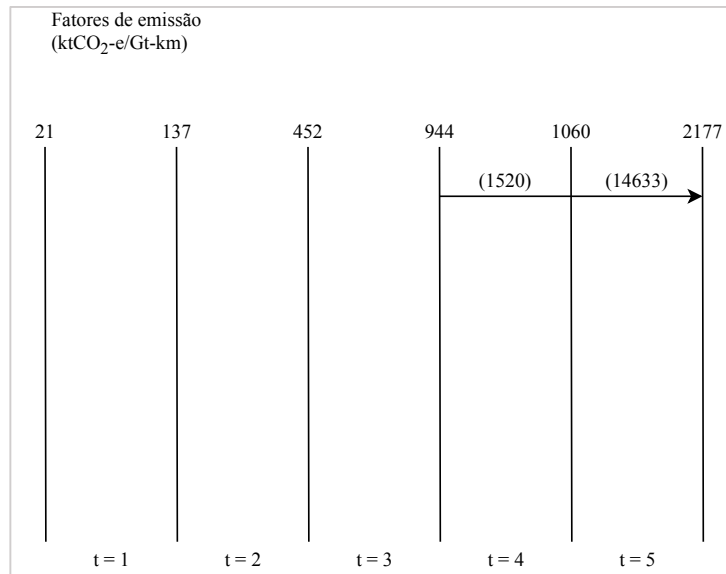


Figura 2.7 – Representação da quantidade de CO₂ emitida em cada intervalo da demanda para o transporte de passageiros.

2.5. Identificação das fontes no diagrama

Nesta etapa, identifica-se as fontes disponíveis pelos seus nomes, acima de seus respectivos fatores de emissão. Sendo assim, a representação fica conforme as Figuras 2.8 e 2.9.

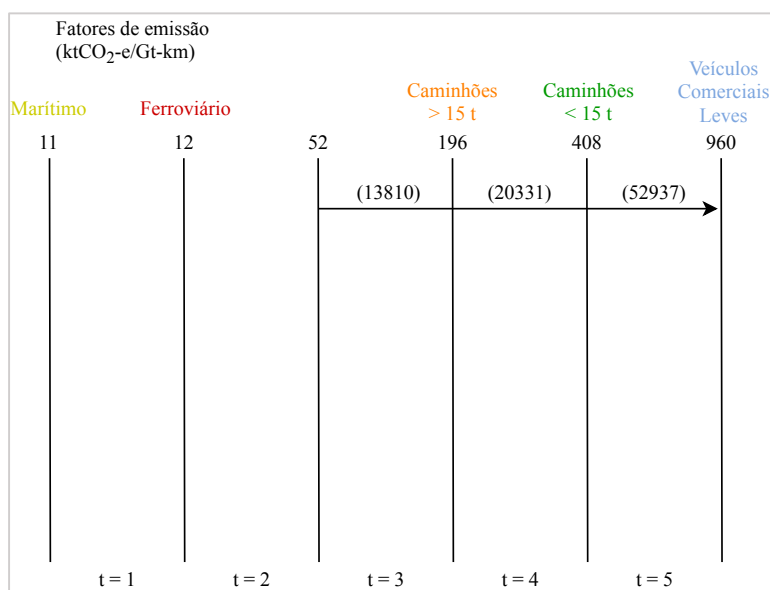


Figura 2.8 – Representação das fontes disponíveis para o transporte de cargas.

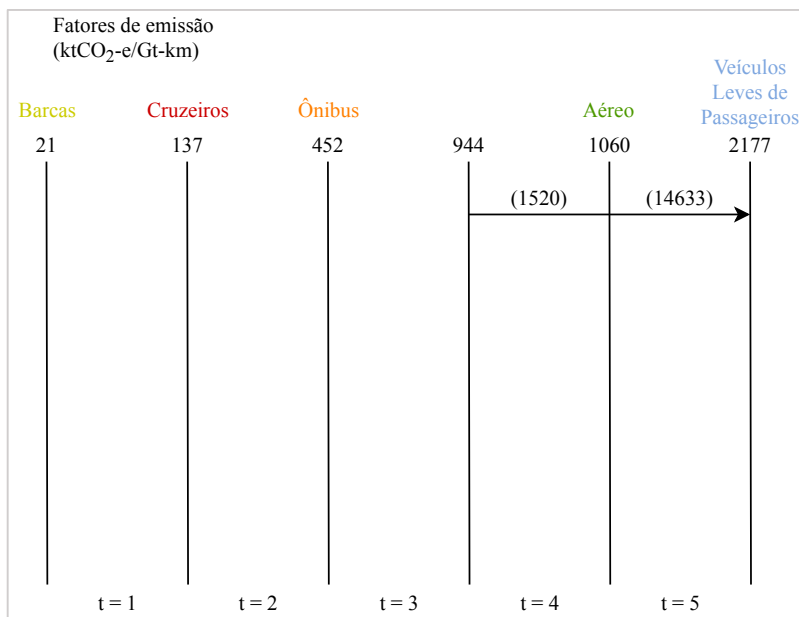


Figura 2.9 – Representação das fontes disponíveis para o transporte de passageiros.

2.6. Cálculo da quantidade requerida pelas demandas em cada intervalo

Neste Estudo de Caso, serão utilizadas regras heurísticas extraídas de Quaresma *et al.* (2018) e adaptadas para utilização no setor de transportes.

- Como trata-se de um cenário de baixo custo, utilizar a fonte com o maior fator de emissão de CO₂ que estiver disponível. Caso seja esgotada e ainda houver demanda, utilizar as outras fontes, seguindo uma ordem de fatores de emissão decrescente.
- Se uma demanda não for totalmente suprida em seu último intervalo, extrapolar a quantidade de CO₂ a ser emitida neste intervalo, de forma que a emissão limite exigida pela demanda não seja ultrapassada.

É importante notar que neste e em outros casos, como será visto adiante, essas regras poderão ser modificadas, dependendo da compatibilidade entre fontes e aplicações e da avaliação que se deseja realizar. Isto é, podem ser inseridas restrições de utilização de certa fonte em função das naturezas da disponibilidade e da demanda.

A partir da aplicação dessas regras em cada intervalo de demanda, pode-se calcular o respectivo consumo de cada fonte. Em alguns intervalos, é possível escolher mais de uma fonte, e dependendo da fonte usada, podem ser obtidas diferentes redes de

emissão de CO₂. Por causa desta característica, o DFC possibilita a análise de diferentes cenários e a consideração de restrições ao longo do procedimento (FRANCISCO, 2014).

O cálculo da quantidade necessária de uma determinada fonte para satisfazer um certo intervalo de demanda é realizado pela Equação (2.3). O uso da fonte é indicado por uma seta com início no seu fator de emissão e término no final do intervalo em que será utilizada (QUARESMA, 2016).

$$D_{i,j}^t = \frac{\Delta C_{j,t}}{(F_{\text{final},t} - F_{\text{inicial},t})} \quad (2.3)$$

sendo:

$\Delta C_{j,t}$: quantidade de CO₂ emitida no intervalo t (ktCO₂-e);

$D_{i,j}^t$: quantidade da fonte i, requerida pela demanda j, no intervalo t (Gt-km);

$F_{\text{inicial},t}$: fator de emissão no início do intervalo t (ktCO₂-e/Gt-km);

$F_{\text{final},t}$: fator de emissão no final do intervalo t (ktCO₂-e/Gt-km).

Com isso, pode-se iniciar a síntese da rede energética. Obedecendo à regra heurística (i), estabelece-se uma ordem na qual os meios de transporte são escolhidos. Portanto, a ordem de escolha dos meios de transporte no estudo em análise seria, para o transporte de cargas: Veículos Comerciais Leves (960 ktCO₂-e/Gt-km), Caminhões com menos de 15 t (408 ktCO₂-e/Gt-km), Caminhões com mais de 15 t (196 ktCO₂-e/Gt-km), Ferroviário (12 ktCO₂-e/Gt-km) e Marítimo (11 ktCO₂-e/Gt-km). Da mesma maneira, para o transporte de cargas, a ordem de escolha será: Veículos Leves de Passageiros (2177 ktCO₂-e/Gt-km), Aéreo (1060 ktCO₂-e/Gt-km), Ônibus (452 ktCO₂-e/Gt-km), Cruzeiros (137 ktCO₂-e/Gt-km) e Barcas (21 ktCO₂-e/Gt-km).

2.7. Aplicação da metodologia DFC para o transporte de cargas da Nova Zelândia

Observando-se a Figura 2.8, é possível notar que nos intervalos $t = 1$ e 2 não há demandas a serem atendidas, por isso parte-se para o intervalo $t = 3$. Há duas fontes disponíveis para suprir esta demanda: Marítimo e Ferroviário. Como a fonte Ferroviário possui um fator de emissão maior do que a Marítimo, opta-se por utilizá-la prioritariamente. Utiliza-se os 4,70 Gt-km disponíveis da fonte Ferroviário, esgotando-a. Então, calcula-se a quantidade de CO_2 que essa fonte emitirá no intervalo:

$$\Delta C_3 = 13.810 - 4,70 (196 - 12) = 12.945,20 \text{ ktCO}_2\text{-e} \quad (2.4)$$

Nota-se que a quantidade de CO_2 emitida pela fonte não atinge o valor previsto do intervalo. Então, seleciona-se a outra fonte disponível (Marítimo, com 80,30 Gt-km disponíveis, segundo a Tabela 2.1) e utiliza-se a Equação (2.3) a fim de calcular a quantidade a ser utilizada desta fonte:

$$D_{\text{Marítimo},j}^3 = \frac{12.945,2}{196 - 11} = 69,97 \text{ Gt-km} \quad (2.5)$$

Dessa forma, atende-se à demanda do intervalo $t = 3$. Assim, parte-se para o intervalo $t = 4$. Obedecendo à regra heurística, utiliza-se a fonte disponível com maior fator de emissão, no caso, Caminhões com mais de 15 t (196 $\text{ktCO}_2\text{-e/Gt-km}$). Assim, a quantidade de CO_2 emitida pela fonte no intervalo é:

$$\begin{aligned} \Delta C_4 &= 20.331 - (4,70 + 69,97 + 6,70) (408 - 196) \\ &= 3.080,56 \text{ ktCO}_2\text{-e} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Como a quantidade de CO₂ não alcançou o valor previsto, é necessário utilizar outra fonte para completar a demanda. A fonte Marítimo ainda possui 10,33 Gt-km disponíveis para uso. Portanto, utiliza-se novamente a fonte Marítimo a partir da Equação (2.3):

$$D_{\text{Marítimo},j}^4 = \frac{3.080,56}{408 - 11} = 7,76 \text{ Gt-km} \quad (2.7)$$

Dessa forma, é suprida a demanda do intervalo $t = 4$. No intervalo $t = 5$, calcula-se a quantidade de CO₂ emitida pela fonte no intervalo:

$$\Delta C_5 = 52.937 - 91,63(960 - 408) = 2.357,24 \text{ ktCO}_2\text{-e} \quad (2.8)$$

Novamente, a quantidade de CO₂ não alcançou o valor previsto desse intervalo. A fonte Marítimo ainda conta com 2,57 Gt-km disponíveis. Assim, utiliza-se mais uma vez essa fonte:

$$D_{\text{Marítimo},j}^5 = \frac{2.357,24}{960 - 11} = 2,48 \text{ Gt-km} \quad (2.9)$$

Assim, obtém-se o seguinte resultado, conforme a Figura 2.10.

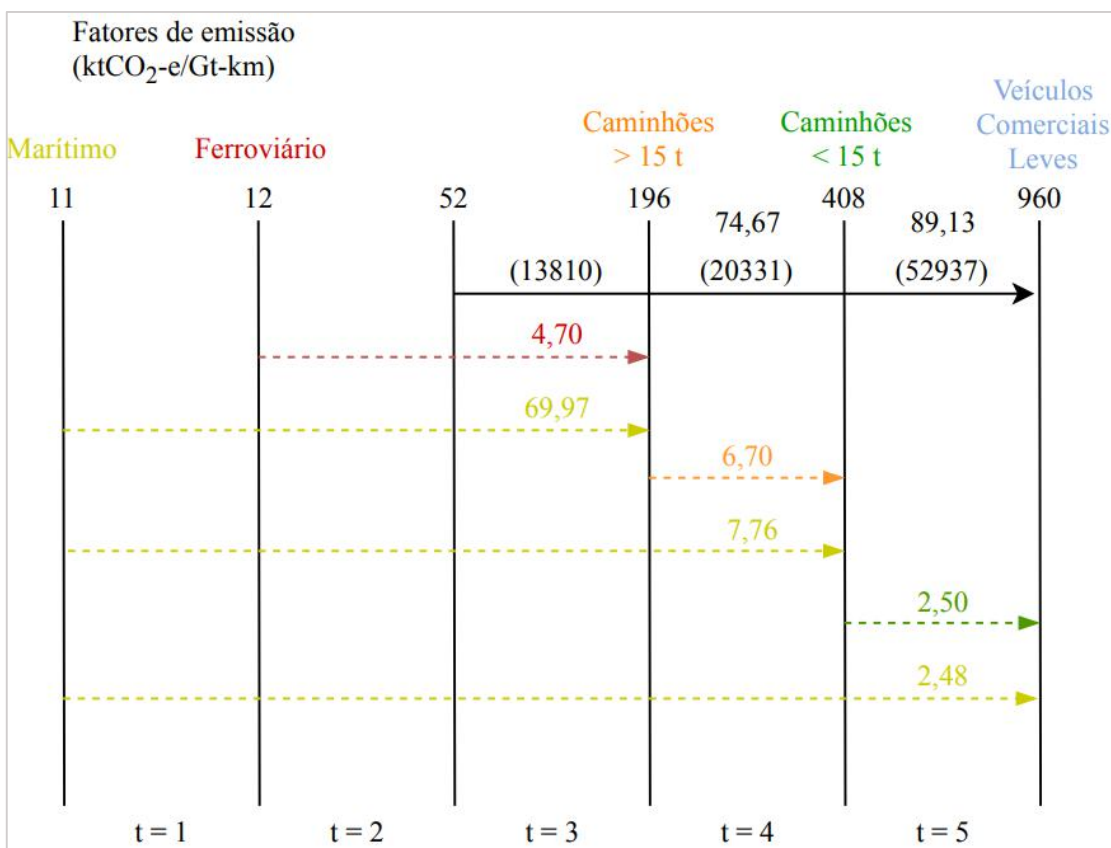


Figura 2.10 – Resultado parcial da metodologia DFC para o Estudo de Caso de Walmsley *et al.* (2015) aplicada ao transporte de cargas.

Nota-se que a demanda do intervalo $t = 5$ ainda não foi suprida. De acordo com a Tabela 2.1, espera-se o uso de 95,90 Gt-km, mas somente 94,11 Gt-km foram alocados e a fonte Veículos Comerciais Leves não foi utilizada. Assim, para resolver esse impasse, segue-se a regra heurística (ii), que preconiza a extrapolação da quantidade de CO₂ a ser emitida no último intervalo caso a demanda não seja totalmente suprida, de forma que a emissão limite exigida pela demanda não seja ultrapassada. Utiliza-se, portanto, a fonte Veículos Comerciais Leves, que é a única disponível, para completar a demanda.

Dessa forma, obtém-se o diagrama final referente ao planejamento energético para o Estudo de Caso de Walmsley *et al.* (2015) feito para o transporte de cargas como mostra a Figura 2.11.

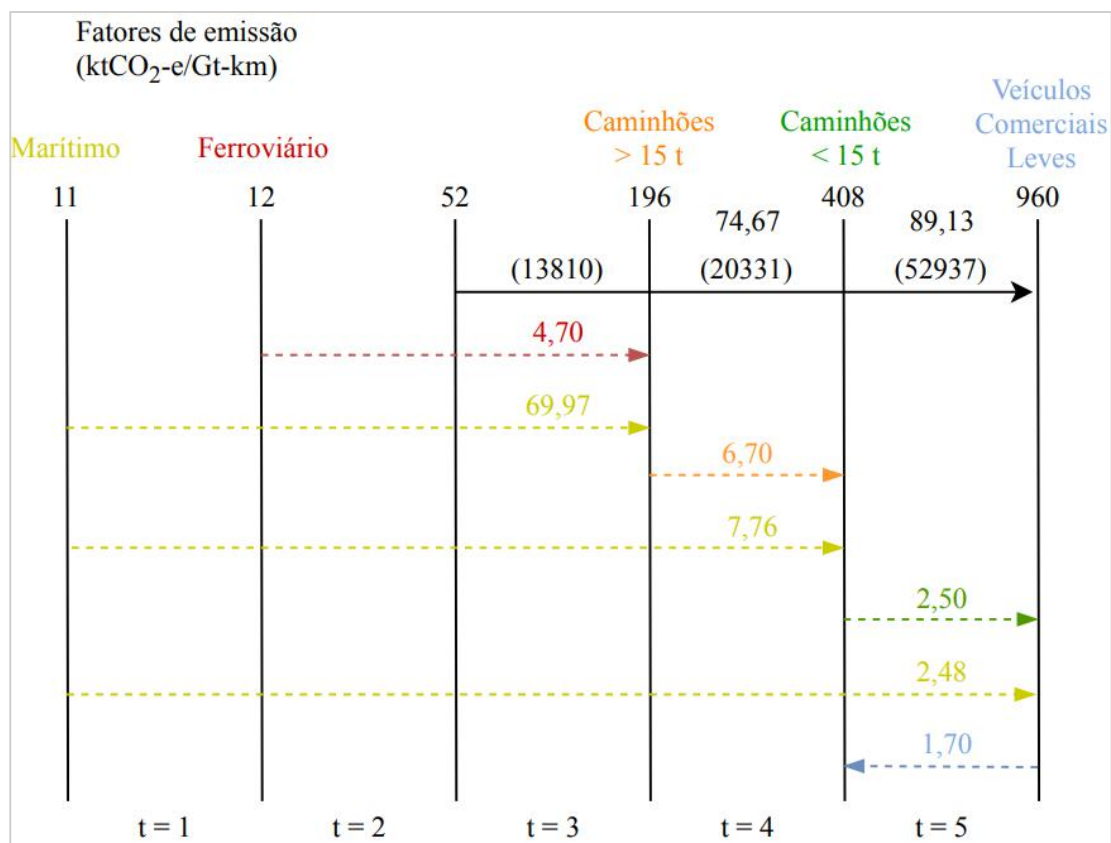


Figura 2.11 – Resultado final da metodologia DFC para o Estudo de Caso de Walmsley *et al.* (2015) aplicada ao transporte de cargas.

Assim, pode-se criar uma tabela a fim de comparar os resultados do método usado por Walmsley *et al.* (2015) com os da metodologia DFC, como mostra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Resultados da metodologia utilizada na literatura e da metodologia DFC.

<i>Metodologia</i>	<i>Quantidade utilizada (Gt-km)</i>	<i>Emissão total (ktCO₂)</i>
<i>CEPA</i>	95,90	4.986,60
<i>DFC</i>	95,81	4.903,91

Comparando-se os resultados de cada metodologia, é possível observar que a quantidade de transporte utilizada na metodologia DFC foi em torno de 0,1% menor que a utilizada na metodologia CEPA. A ligeira diferença pode ser explicada por uma possível imprecisão inerente ao uso do *software Pega Ponto 1.0* para calcular as quantidades disponíveis de cada fonte. A emissão total de CO₂ gerado na metodologia DFC também se mostrou bastante próxima à encontrada pelo método utilizado por Walmsley *et al.* (2015), o que mostra que o DFC foi bem-sucedido.

2.8. Aplicação da metodologia DFC para o transporte de passageiros da Nova Zelândia

De forma análoga ao transporte de cargas, será feito um planejamento energético relativo ao transporte de passageiros na Nova Zelândia com base nos dados de Walmsley *et al.* (2015), de forma a demonstrar novamente a aplicabilidade da metodologia DFC.

Observando-se a Figura 2.9, nota-se que não há demandas a serem atendidas nos intervalos $t = 1, 2$ e 3 . Logo, parte-se para o intervalo $t = 4$ e utiliza-se a fonte de maior fator de emissão entre as disponíveis, nesse caso, a fonte Ônibus. Esta fonte possui 0,70 Gt-km disponíveis para uso, conforme a Tabela 2.1. Utiliza-se essa quantidade disponível, portanto esgotando essa fonte. Calcula-se então a quantidade de CO₂ que essa fonte emitirá no intervalo:

$$\Delta C_4 = 1.520 - 0,70 (1.060 - 452) = 1.094,40 \text{ ktCO}_2\text{-e} \quad (2.10)$$

Nota-se que a quantidade de CO₂ emitida pela fonte não foi suficiente para suprir o valor previsto para este intervalo. Então, utiliza-se a fonte disponível de maior fator de emissão, Cruzeiros, com 4,3 Gt-km disponíveis para uso e calcula-se a quantidade a ser utilizada desta fonte:

$$D_{\text{Cruzeiros},j}^4 = \frac{1.094,40}{1.060 - 137} = 1,20 \text{ Gt-km} \quad (2.11)$$

Desta forma, atende-se à demanda do intervalo $t = 4$. Assim, parte-se para o intervalo $t = 5$. Obedecendo à regra heurística, utiliza-se prioritariamente a fonte disponível com maior fator de emissão, no caso a fonte Aéreo. Além disso, como a fonte Cruzeiros ainda dispõe de 3,10 Gt-km, também é utilizada. A quantidade de CO₂ emitida pela fonte no intervalo será:

$$\begin{aligned} \Delta C_5 &= 14.633 - (0,70 + 1,20 + 3,30 + 3,50) (2.177 - 1.060) \\ &= 4.915,10 \text{ ktCO}_2\text{-e} \end{aligned} \quad (2.12)$$

Como a quantidade de CO₂ não alcançou o valor previsto para o intervalo, utiliza-se a fonte Barcas, já que é a única restante, e calcula-se a quantidade a ser utilizada desta fonte:

$$D_{\text{Barcas},j}^5 = \frac{4.915,10}{2.177 - 21} = 2,30 \text{ Gt-km} \quad (2.13)$$

E assim obtém-se o seguinte resultado, conforme a Figura 2.12.

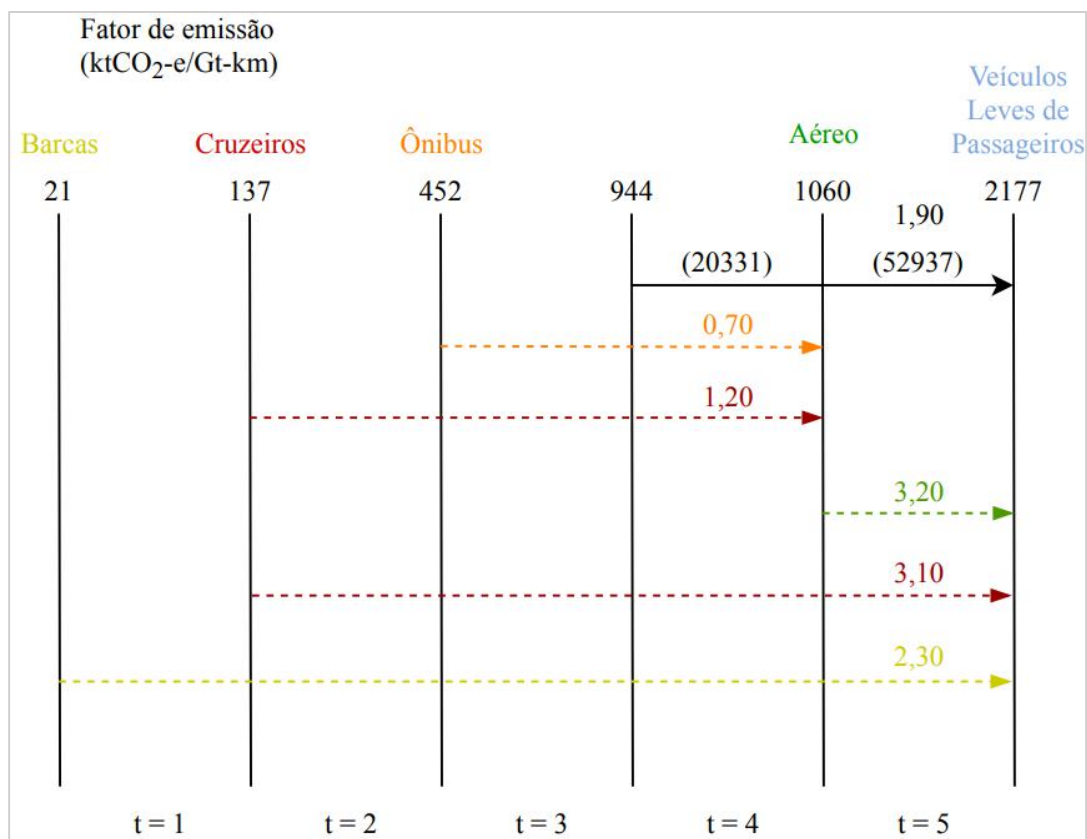


Figura 2.12 – Resultado parcial da metodologia DFC para o Estudo de Caso de Walmsley *et al.* (2015) aplicada para o transporte de passageiros.

Nota-se que a demanda do intervalo $t = 5$ ainda não foi completamente suprida. De acordo com a Tabela 2.1, espera-se o consumo total de 13,10 Gt-km, mas somente 10,00 Gt-km foram alocados. Utiliza-se, então, a fonte Veículos Leves de Passageiros, que ainda não havia sido utilizada e conta com 3,50 Gt-km disponíveis, para completar a demanda, como mostra a Figura 2.13.

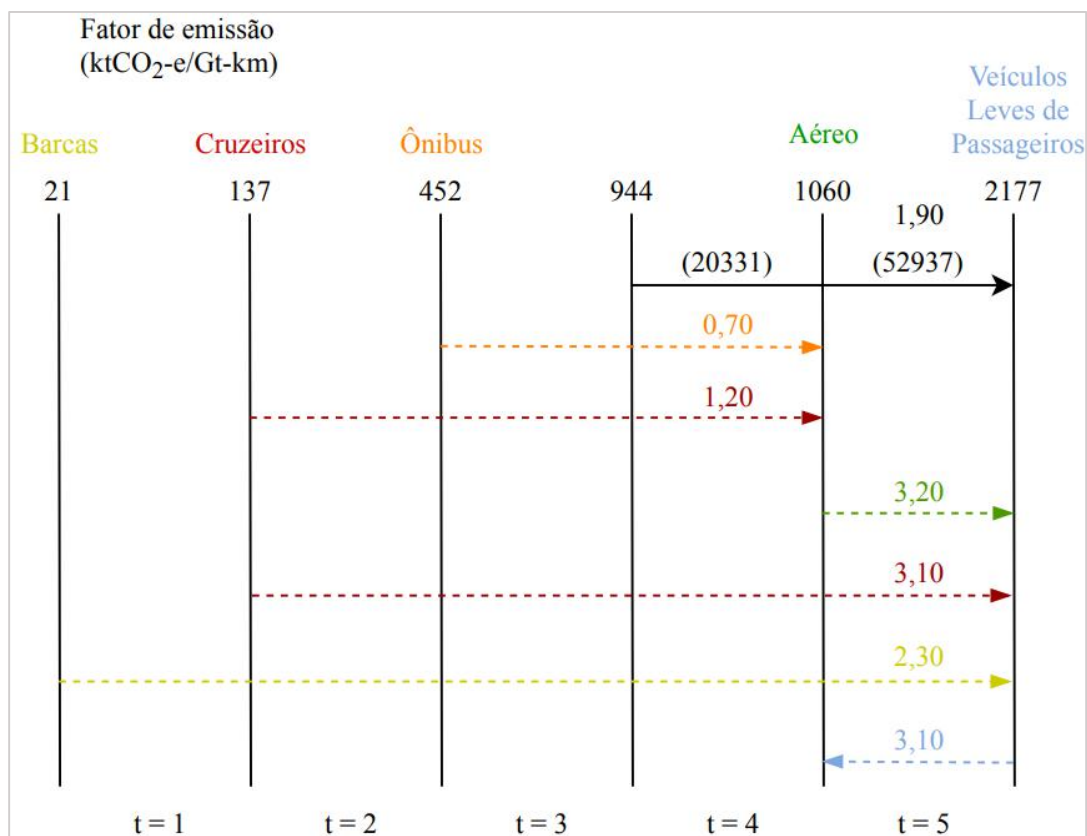


Figura 2.13 – Resultado final da metodologia DFC para o Estudo de Caso de Walmsley *et al.* (2015) aplicada para o transporte de passageiros.

A Tabela 2.3 mostra a comparação dos resultados entre o método usado por Walmsley *et al.* (2015) e os do DFC:

Tabela 2.3 – Resultados da metodologia utilizada por Walmsley *et al.* (2015) e do DFC.

<i>Metodologia</i>	<i>Quantidade utilizada (Gt-km)</i>	<i>Emissão total (ktCO₂)</i>
<i>CEPA</i>	13,10	12.366,40
<i>DFC</i>	13,10	12.234,50

Nota-se que as quantidades utilizadas em ambas as metodologias foram as mesmas e a diferença do valor de emissão de CO₂ resultante da metodologia DFC foi

em torno de 1% em relação ao resultado obtido na literatura. Conclui-se que a metodologia conseguiu demonstrar sua aplicabilidade, obtendo resultados bastante próximos aos da literatura. Ela será, portanto, aplicada ao setor de transportes brasileiro no próximo Capítulo.

CAPÍTULO 3

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DFC NO SETOR DE TRANSPORTE DE CARGAS BRASILEIRO

O transporte de cargas em um país de dimensões continentais como o Brasil é de suma importância. A movimentação de mercadorias entre as diferentes cidades e regiões deve se dar a partir de uma boa integração entre os modais existentes.

O setor de transportes do Brasil é regulado por diferentes agências autônomas, resultado de um processo de descentralização administrativa que teve como objetivo uma menor incidência de influência política direta. A Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) é responsável pela regulação das atividades realizadas na infraestrutura rodoviária e ferroviária federal. A Agência Nacional de Transportes Aquaviários regulamenta o transporte aquaviário no Brasil. Já a Agência Nacional de Aviação Civil supervisiona a atividade da aviação civil no Brasil.

Segundo o Plano Nacional de Logística (PNL), desenvolvido pela Empresa de Planejamento e Logística (EPL), que documenta os dados relativos aos diferentes modais de transporte no Brasil, a distribuição da utilização de cada modal e de sua respectiva emissão se dá conforme a Figura 3.1.

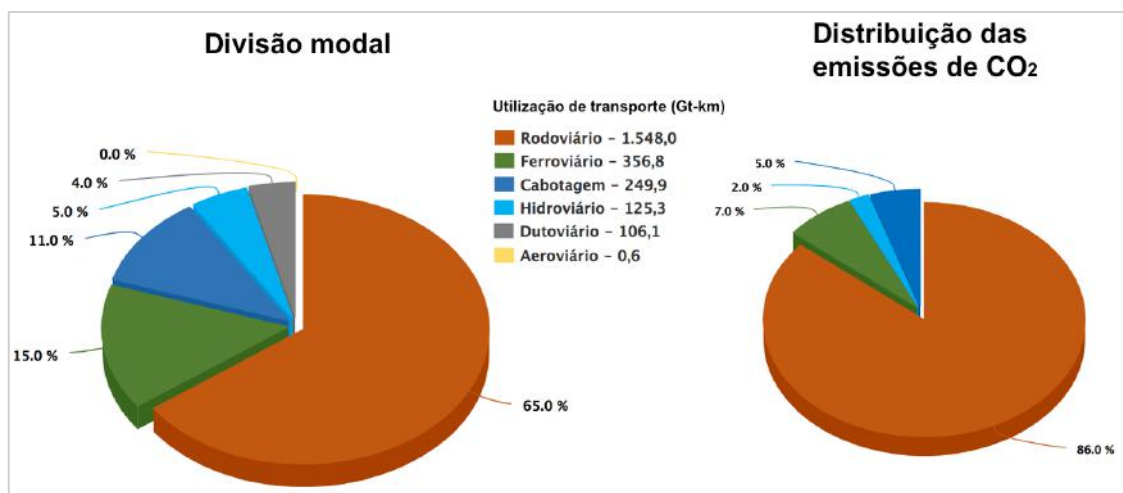


Figura 3.1 – Comparativo da divisão modal e das emissões de CO₂ do transporte de cargas no ano de 2015.

Fonte: Adaptado de EPL (2018).

O Brasil possui uma densa malha rodoviária, especialmente na região Centro-Sul do país. Há diversos projetos de construção, duplicação e adequação de rodovias federais no âmbito do Programa de Parcerias de Investimentos (PPI) e é esperado que haja uma melhoria na qualidade das rodovias e conseqüentemente no escoamento da produção com a inclusão de aproximadamente 7,8 mil quilômetros de obras em rodovias (EPL, 2018). A Tabela 3.1 reúne os projetos:

Tabela 3.1 – Empreendimentos em rodovias.

<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
<i>Programa Avançar - Rodovias</i>				
AL	101	Duplicação	Div. PE/AL - Div. AL/SE	193,0
BA	235	Construção	Div. SE/BA – Div. BA/PI	332,9
MG	146	Construção	Entr. MG-050 (Passos) - Entr. BR-491 (Guaxupé)	88,0
MG	381	Duplicação	Entr. BR-116/451 (Governador Valadares) - Entr. BR-262 (Anel de BH)	305,3

Tabela 3.1 – Empreendimentos em rodovias.

(continuação)

<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
MT	158	Construção	Entr. MT-420 (Castanheira) - Entr. MT-206/418 (Colniza)	267,6
MT	174	Construção	Entr. BR-158/MT-243 - Entr. BR-163/MT-242 (Sorriso)	433,9
PA	230	Construção	Entr. BR-153/155/222 (Marabá) - Medicilândia	486,3
PA	230	Construção	Medicilândia - Entr. BR-163 (Rurópolis)	256,0
PA	101	Construção	Entr. BR-163 (Rurópolis) - Entr. BR-163 (Campo Verde)	111,9
PE	101	Duplicação	Entr. PE-087/096 (Palmares) - Div. PE/AL	28,2
PR	487	Construção	Porto Camargo - Entr. BR-272 (anel viário de Campo Mourão)	166,0
RJ	101	Duplicação	Arco Rodoviário do Rio de Janeiro (Manilha - Santa Guilhermina)	26,0
RS	116	Duplicação	Entr. BR-290/386 (Porto Alegre) – Entr. BR-392/471	256,1
SC	163	Duplicação	Entr. BR-282/386 (p/ São Miguel do Oeste) - Div. SC/PR	58,3
SC	280	Duplicação	Porto de São Francisco do Sul - Entr. SC-416 (Jaraguá do Sul)	60,1
SC	470	Duplicação	Navegantes - Entr. BR-477 (p/ Blumenau)	54,6
SE	101	Duplicação	Div. AL/SE - Entr. SE-245/429 (Pedra Branca)	77,6
SP	116	Construção	Rodoanel de São Paulo: Trecho Norte (Rodovia Bandeirantes - BR-116)	44,0
TO	242	Construção	Entr. TO-110 (acesso Taguatinga) - Entr. TO-373 (Peixe)	298,4

Tabela 3.1 – Empreendimentos em rodovias.

(conclusão)

<i>Programa Avançar Parcerias - Rodovias</i>				
<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
MG/GO	365/364	Duplicação/ manutenção	Entr. BR-050/455/497 (Uberlândia) - Entr. BR- 060/GO	437,0
SC	101	Manutenção	Ponte Rio Madre - Div. SC/RS	220,4
<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
RO	364	Duplicação/ manutenção	Entr. BR-174 (Div. MT/RO) - Porto Velho (acesso Ulisses Guimarães)	703,6
<i>Investimentos programados em concessões existentes</i>				
<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
GO	50	Duplicação	Entr. BR-040/GO (Cristalina/GO) - Div. GO/MG	218,5
DF/GO	40	Duplicação	Brasília/DF (Posto PRF) - Div GO/MG	165,4
BA	116	Duplicação	Entr. BR-324/BA-502/503 (Feira de Santana/BA) - Div. BA/MG	521,6
<i>Relicitações de concessões existentes</i>				
<i>UF</i>	<i>BR</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
RJ/SP	116	Adequação	Entr. BR-101 (Trevo Margaridas) - Entr. BR050/272/374/381 (São Paulo/SP)	402,0
MG/RJ	040	Adequação	Juiz de Fora/MG - Acesso ao Rio de Janeiro/RJ	180,4
RJ	116	Duplicação	Entr. BR-393 - Entr. BR-040	142,5
TO/GO	153	Duplicação	Entr. TO-070 (Aliança do Tocantins/TO) - Entr. BR-060 (Anápolis/GO)	624,1

Fonte: EPL (2018).

A matriz de transporte de cargas brasileira é majoritariamente baseada no transporte rodoviário. Apesar de ser ideal para transportar cargas de pequeno e médio volume em pequenas distâncias, dada a sua agilidade e praticidade, este modal é utilizado para transportar grandes volumes de carga a grandes distâncias no Brasil. O mapa do carregamento de volumes de carga nas rodovias no Brasil, considerando-se a inclusão de rodovias que estarão operacionais em 2025, é mostrado na Figura 3.2.

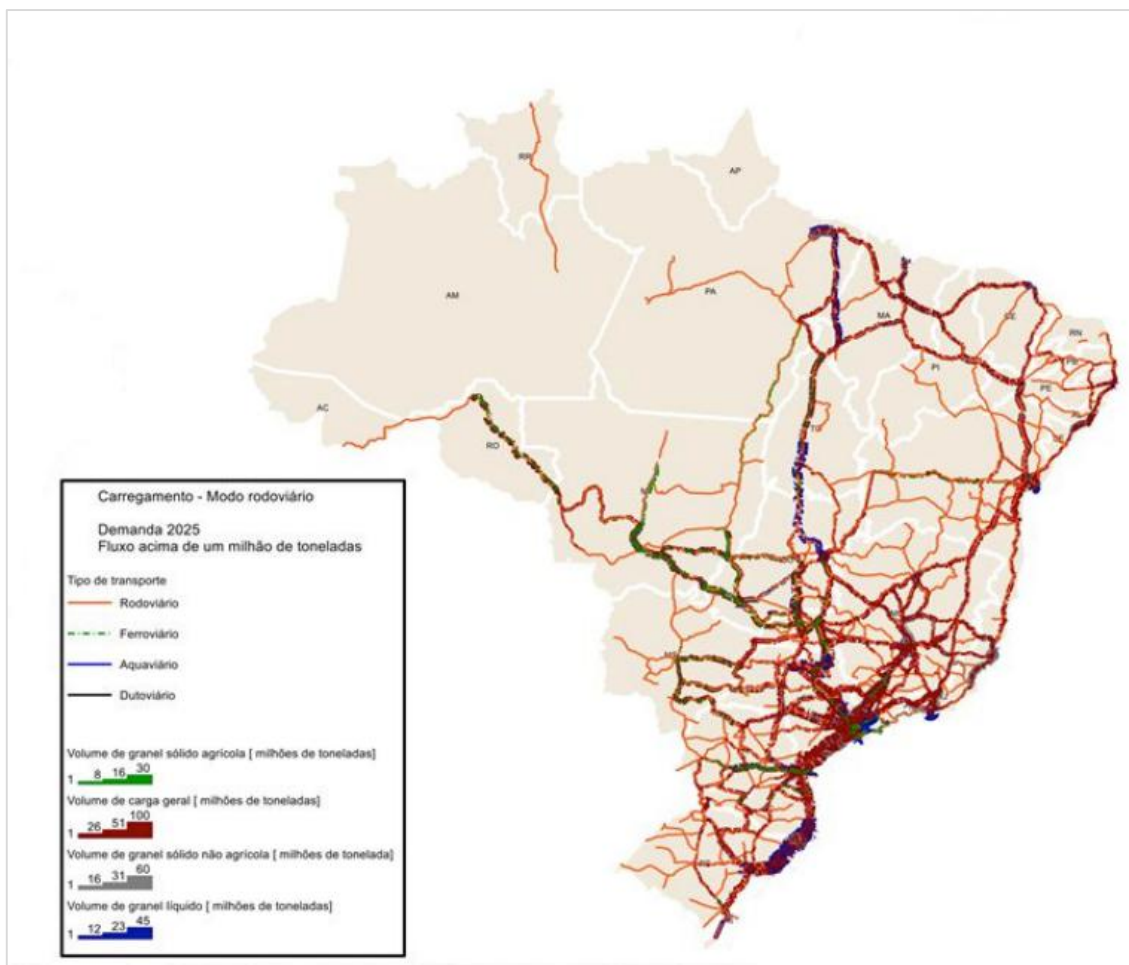


Figura 3.2 – Carregamentos nas rodovias estimados para o ano de 2025.

Fonte: EPL (2018).

As ferrovias possuem, apesar das dificuldades e tamanho da malha em condições operacionais, uma relevante participação no transporte de cargas no Brasil. Este modal apresenta como característica a possibilidade de se transportar cargas de grandes volumes em grandes distâncias, como, por exemplo, o minério de ferro. Destaca-se

como vantagem deste modal a maior eficiência quando comparado ao transporte rodoviário. Enquanto uma locomotiva percorre 213 km por uma tonelada de carga com o uso de um litro de combustível, um caminhão percorre 35 km (EPL, 2018).

As ferrovias estão presentes em todas as regiões, com destaque para as regiões Sul e Sudeste e uma menor densidade nas regiões Centro-Oeste, Nordeste e Norte. Alguns projetos de expansão e ampliação da capacidade da malha ferroviária estão em curso no Brasil atualmente. O Programa Avançar Parcerias prevê a construção de 3,2 mil quilômetros de novas vias, a Ferrovia Norte-Sul (FNS), Ferrovia Ferrogrão e Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL). Além disso, está prevista a ampliação da capacidade de cerca de 12 mil quilômetros de vias. A Tabela 3.2 lista esses projetos.

Tabela 3.2 – Empreendimentos em ferrovias.

<i>UF</i>	<i>Ferrovia</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
<i>Programa Avançar Parcerias - Ferrovias</i>				
BA	Ferrovia de Integração Oeste-Leste (FIOL)	Construção	Ilhéus/BA - Caetité/BA	537,0
PA/MT	Ferrovia Ferrogrão	Construção	Miritituba/PA - Sinop/MT	1.142,0
TO/GO/ MG/SP	Ferrovia Norte-Sul (FNS)	Construção	Palmas/TO - Estrela D'Oeste/SP	1.544,0
<i>Investimentos programados em concessões existentes</i>				
ES/MG	Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM)	Adequação	Malha concedida	905,0
MG/RJ/SP	MRS Logística S.A.	Adequação	Malha concedida	1.674,0

Tabela 3.2 – Empreendimentos em ferrovias.

(conclusão)

SE/BA/ES/ RJ/SP/MG/ GO/DF	Ferrovia Centro- Atlântica (FCA)	Adequação	Malha concedida	7.215,0
SP/MG	Rumo – Malha Paulista	Adequação	Malha concedida	1.989,0
PA/MA	Carajás (EFC)	Adequação	Malha concedida	892,0

Fonte: EPL (2018).

A Figura 3.3 representa o carregamento de volumes de carga nas ferrovias no Brasil, considerando-se a inclusão de ferrovias que estarão operacionais em 2025, bem como o aumento da capacidade de ferrovias existentes.

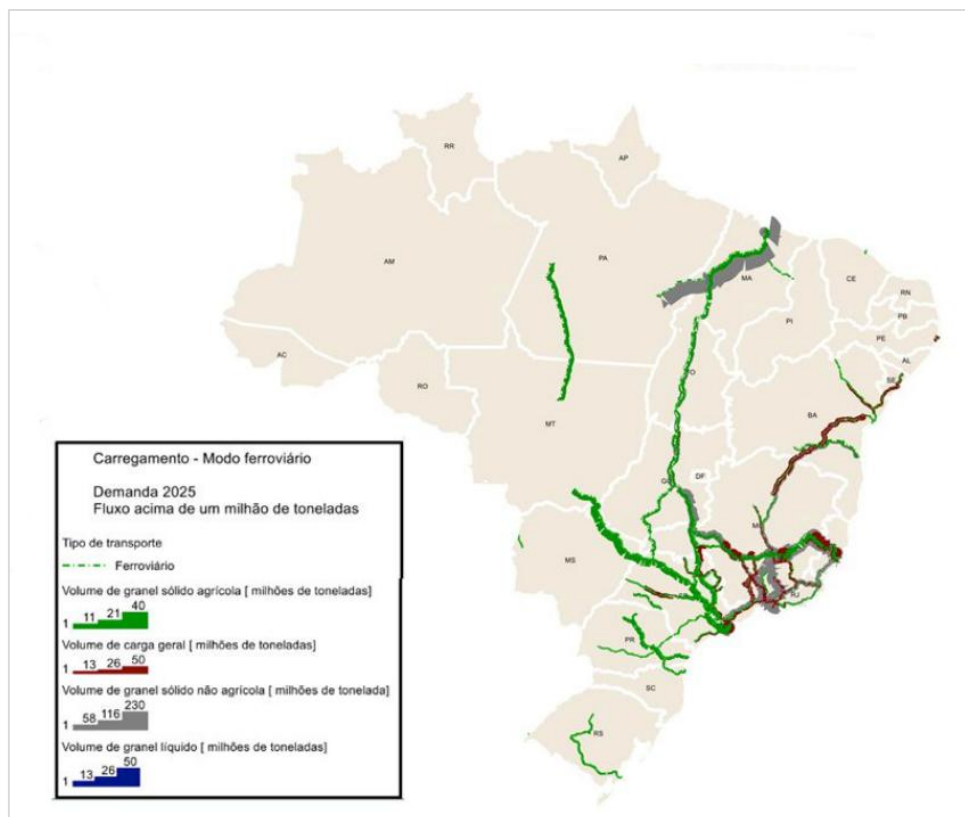


Figura 3.3 – Carregamentos nas ferrovias estimados para o ano de 2025.

Fonte: EPL (2018).

O uso do modal aquaviário para o transporte de cargas pode ser dividido em dois tipos: navegação interior e cabotagem (navegação costeira entre portos do mesmo país). É um modal de transporte que apresenta baixos custos de transporte e alta capacidade de movimentação de cargas a longas distâncias, sendo bastante vantajoso para transportar produtos homogêneos e de baixo valor agregado, como produtos agrícolas e minérios (BNDES Setorial, 2018).

O transporte aquaviário é um modal de grande importância na região Norte, na forma de transporte hidroviário, e está mais presente nas regiões Nordeste, Sudeste e Sul como navegação de cabotagem. No entanto, é um modal subaproveitado, dada a quantidade de hidrovias e o extenso litoral do país. Incrementos na oferta da cabotagem marítima, envolvendo melhorias no acesso ferroviário e rodoviário aos portos e terminais são essenciais para a evolução da capacidade desse modal. O derrocamento do Pedral do Lourenço, na Hidrovia do Tocantins, possibilitará a navegação no trecho de

560 quilômetros, entre Marabá/PA e Vila do Conde/PA, possui previsão de conclusão até 2025 (EPL, 2018), conforme Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Empreendimentos em hidrovias.

<i>UF</i>	<i>Ferrovias</i>	<i>Tipo</i>	<i>Trecho</i>	<i>Extensão (km)</i>
PA	Hidrovia do Tocantins	Derrocamento do Pedral do Lourenço	Marabá/PA – Vila do Conde/PA	560,0

Fonte: EPL (2018).

A Figura 3.4 representa o carregamento de volumes de carga do modal aquaviário no Brasil, considerando-se o incremento previsto na oferta da cabotagem marítima, bem como a obra prevista na Hidrovia do Tocantins.

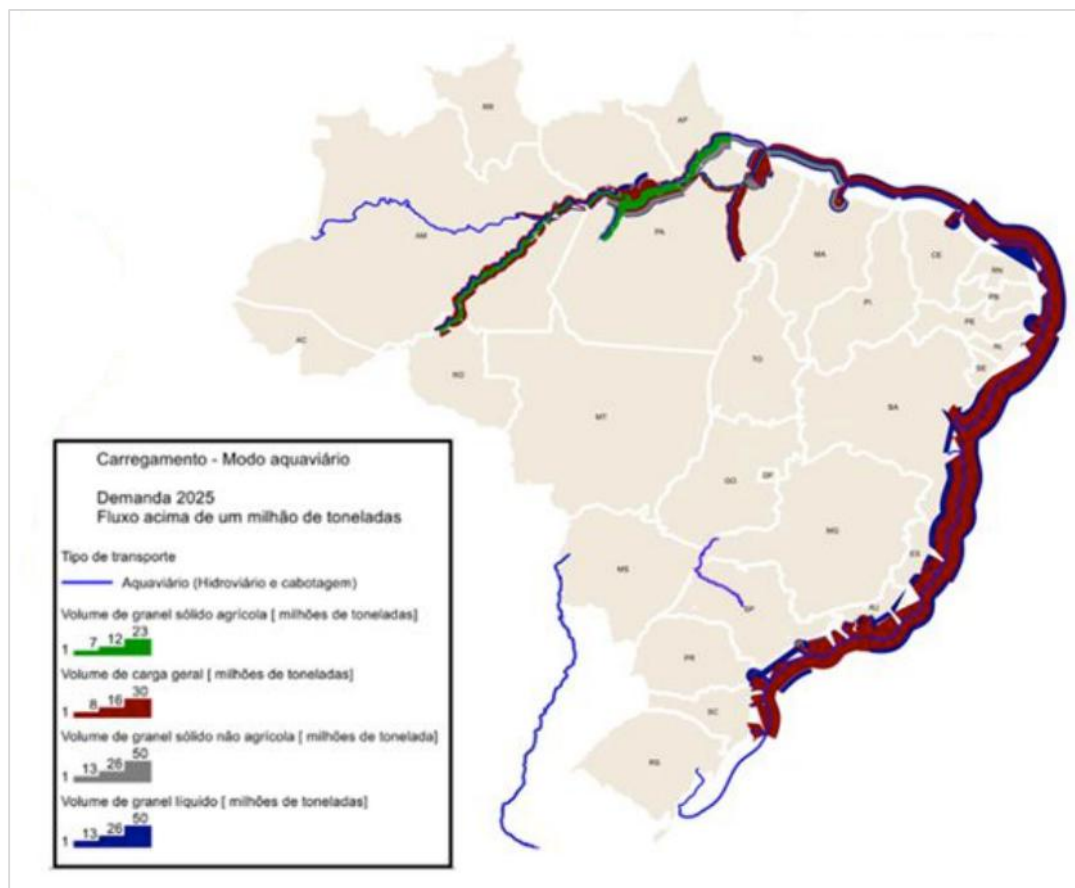


Figura 3.4 – Carregamentos nas hidrovias estimados para o ano de 2025.

Fonte: EPL (2018).

O modal dutoviário utiliza um sistema de tubos ou cilindros, formando uma fileira chamada de dutovia, um acesso que move produtos de um ponto a outro. As dutovias são capazes de transportar petróleo e seus derivados, gás natural, minério, cimento, entre outros. Ainda incipiente no Brasil, esse modal é responsável por 4% do total de transporte de cargas do país e não representa emissões de CO₂ significativas (EPL, 2018).

O modal aeroviário é o mais ágil e o que tem mais capacidade de alcançar áreas remotas do país. É utilizado principalmente para cargas de alto valor agregado ou encomendas que precisam chegar de forma rápida no seu destino. Segundo o PNL, apesar de possuir elevadas emissões específicas (emissões por tonelada-quilômetro transportada), esse modal, quando utilizado para transporte de cargas, gera emissões pouco expressivas no contexto das emissões totais, não chegando a 0,1%, devido a sua utilização limitada a bens específicos e ao seu elevado custo. Cabe ressaltar que,

diferentemente do que acontece no transporte de cargas, o transporte de passageiros no modal aeroviário responde por aproximadamente 5% das emissões totais do setor. Tal fato é explicado pela utilização muito maior do modal para esse fim (SEEG, 2018).

É possível afirmar que os três principais modais de transporte de cargas do Brasil (rodoviário, ferroviário e aquaviário) possuem características que os tornam mais ou menos adequados para cada necessidade, levando-se em conta a geografia do local, a distância ou o tipo de mercadoria a ser transportada. No entanto, é notável a vantagem dos modais ferroviário e aquaviário em relação ao modal rodoviário em termos de eficiência energética, conforme mostrado na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparativo entre os modais de transporte segundo a eficiência energética.

<i>Indicador</i>	<i>Modal aquaviário</i>	<i>Modal ferroviário</i>	<i>Modal rodoviário</i>
<i>Unidades equivalentes</i>	1 comboio, 6.000 t (4 chatas e 1 empurrador)	2,9 comboios Hopper, 86 vagões de 70 t	172 carretas de 35 t
<i>Consumo de combustível para transportar 1 t por 1.000 km</i>	4,1 litros	5,7 litros	15,4 litros
<i>Emissão de CO₂ (gCO₂ por km)</i>	20,0	23,3	101,2

Fonte: BNDES Setorial (2018).

Ao longo deste Capítulo, será apresentado um planejamento de utilização dos modais do transporte de cargas brasileiro de forma a avaliar o cumprimento das metas de reduzir em 37% as emissões de CO₂ no ano de 2025 em relação a 2005 e em 43% as emissões de CO₂ no ano de 2030 em relação a 2005, estabelecidas nas CND instituídas

no Acordo de Paris, do qual o Brasil é signatário. Os dados de emissões relativos ao ano de 2005 de cada modal foram retirados do Relatório de Emissões do SEEG. As emissões vindas do modal dutoviário e do modal aeroviário, como já apontado anteriormente, têm pouca importância no conjunto das emissões totais do transporte de cargas e por isso optou-se por não incluir esses modais de transporte no planejamento a ser apresentado.

A Tabela 3.5 mostra as emissões de CO₂ divididas por modal de transporte de cargas no ano de 2005, e as metas de emissões nos anos de 2025 e 2030. Por sua vez, a Tabela 3.6 mostra as emissões de CO₂ de 2005, divididas por região brasileira, bem como as metas de emissões nos anos de 2025 e 2030.

Tabela 3.5 – Emissões de CO₂ em 2005 e metas a serem alcançadas em 2025 e 2030 por modal de transporte.

<i>Modal</i>	<i>Emissões em 2005 (ktCO₂)</i>	<i>Meta de emissão em 2025 (ktCO₂)</i>	<i>Meta de emissão em 2030 (ktCO₂)</i>
<i>Rodoviário</i>	67.951	42.809	38.732
<i>Ferrovário</i>	3.598	2.267	2.051
<i>Aquaviário</i>	2.556	1.610	1.457
<i>Total</i>	74.105	46.686	42.240

Fonte: SEEG (2018).

Tabela 3.6 – Emissões de CO₂ em 2005 e metas a serem alcançadas em 2025 e 2030 por região brasileira.

<i>Região</i>	<i>Emissões em 2005 (ktCO₂)</i>	<i>Meta de emissão em 2025 (ktCO₂)</i>	<i>Meta de emissão em 2030 (ktCO₂)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	13.280	8.366	7.570
<i>Nordeste (NE)</i>	11.054	6.965	6.301
<i>Sudeste (SE)</i>	34.127	21.500	19.452
<i>Sul (S)</i>	15.644	9.855	8.917
	74.105	46.686	42.240

Fonte: SEEG (2018).

No Capítulo 2, o Estudo de Caso apresentado foi baseado em dados apresentados por Walmsley *et al.* (2015) de subdivisões dos modais rodoviário, ferroviário e aquaviário. Neste Capítulo, por não haver na literatura dados do setor de transportes brasileiro com esse grau de especificação, serão utilizados dados mais gerais desses modais.

A utilização do transporte é medida pela unidade Gt-km (gigatonelada de carga transportada por quilômetro útil). Os dados de utilização do transporte de cargas de 2005 e de 2015 e a projeção da demanda nacional por transporte de cargas para 2025 e para 2030 foram retirados e adaptados do PNL. A Figura 3.5 mostra esses dados.

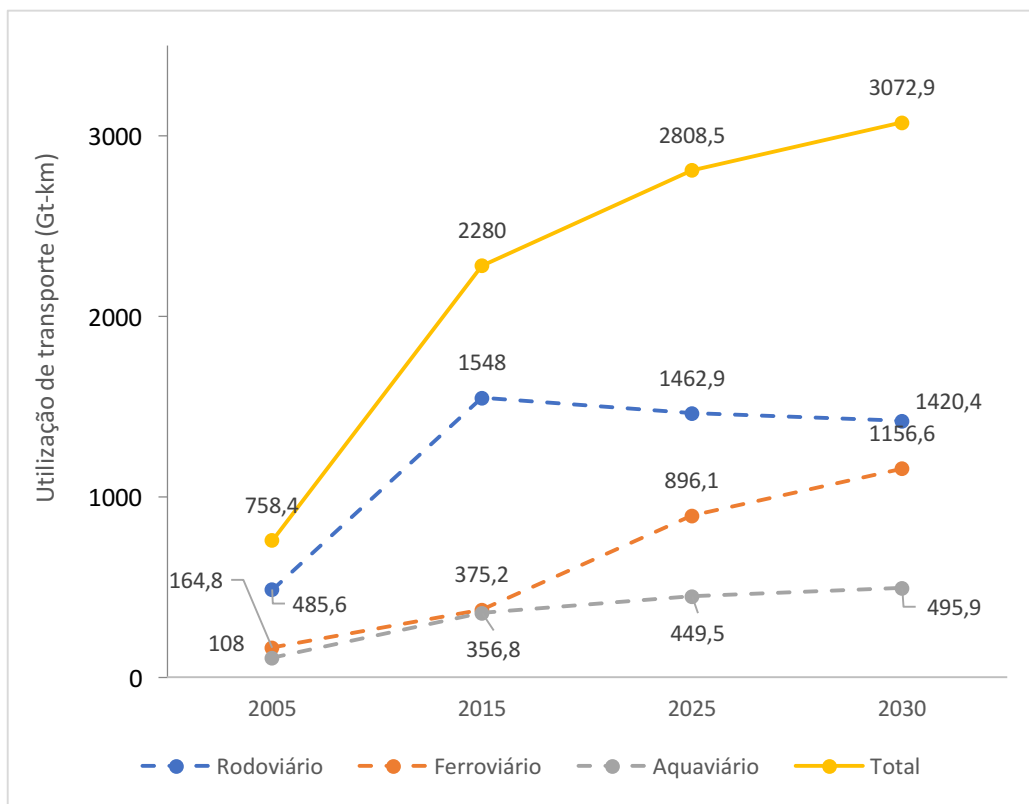


Figura 3.5 – Projeção de crescimento da utilização do transporte de cargas no Brasil.

Fonte: Adaptado de EPL (2018).

Será utilizada uma matriz origem/destino (O/D), retirada do Relatório de Transporte Interregional de Carga no Brasil – Panorama 2015, de forma a estimar a proporção da quantidade de cargas transportadas em cada região brasileira. Essa matriz mostra a quantidade total de carga movimentada entre duas regiões, sendo que o eixo horizontal representa a origem da carga e o eixo vertical representa o destino. A matriz é apresentada na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Matriz origem/destino de cargas transportadas agrupada por região, valor em 10⁶ t.

<i>Região</i>	<i>Norte</i>	<i>Nordeste</i>	<i>Sudeste</i>	<i>Sul</i>	<i>Centro-Oeste</i>	<i>Exterior</i>	<i>Total - Origem</i>
<i>Norte</i>	36,3	38,4	17,0	8,0	5,3	256,1	361,1
<i>Nordeste</i>	12,3	82,7	55,0	22,2	10,8	45,4	228,4
<i>Sudeste</i>	20,9	60,7	485,9	97,3	46,9	319,2	1.030,9
<i>Sul</i>	9,4	23,6	90,7	118,4	17,4	66,1	325,6
<i>Centro-Oeste</i>	10,1	16,8	53,4	28,4	35,7	75,8	220,2
<i>Exterior</i>	9,0	25,8	69,5	26,2	6,1	0,3	136,9
<i>Total - Destino</i>	98,0	248,0	771,5	300,5	122,2	762,9	2.303,1

Fonte: EPL (2018).

A partir dos dados da Tabela 3.7, a participação de cada região brasileira no transporte de cargas pode ser calculada. Na Tabela, os dados relativos à carga transportada de cada região de origem foram somados. Em seguida, o valor de cada região foi dividido pelo valor total. Assim, foram obtidas as porcentagens que cada região representa na utilização do transporte de cargas nacional. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Utilização de transporte de cargas esperado e meta de emissão em 2025 e 2030.

<i>Região</i>	<i>Participação (%)</i>	<i>Utilização esperada (2025) (Gt-km)</i>	<i>Meta de emissão (2025) (ktCO₂)</i>	<i>Utilização esperada (2030) (Gt-km)</i>	<i>Meta de emissão (2030) (ktCO₂)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	26,84	753,8	46.686	824,8	42.240
<i>Nordeste (NE)</i>	10,54	296,0		323,9	
<i>Sudeste (SE)</i>	47,59	1.336,6		1.462,4	
<i>Sul (S)</i>	15,03	422,1		461,8	
<i>Total</i>	100,00	2.808,5		3.072,9	

3.1. Ano de 2025

Será desenvolvido um planejamento de utilização dos modais de transporte de cargas brasileiro de forma tendo em vista o cumprimento da meta de reduzir em 37% as emissões de CO₂ no ano de 2025.

O primeiro passo para o desenvolvimento do DFC é a criação de uma Tabela de Oportunidades, conforme visto no Capítulo 2. As quantidades disponíveis de cada modal foram retiradas da projeção feita pelo PNL para o ano de 2025 e as emissões de cada modal são aquelas esperadas para que a meta daquele ano seja atingida. Os fatores de emissão dos modais de transporte e das regiões são calculados através da Equação (2.1). Os valores são mostrados nas Tabelas 3.9 e 3.10.

Tabela 3.9 – Modais de transporte de cargas, suas quantidades de transporte disponíveis, valores de emissão de CO₂ e fatores de emissão esperados em 2025.

<i>Modal</i>	<i>Quantidade disponível (Gt-km)</i>	<i>Emissão de CO₂ (ktCO₂)</i>	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>
<i>Rodoviário</i>	1.462,9	42.809	29,26
<i>Ferroviário</i>	896,1	2.267	2,53
<i>Aquaviário</i>	449,5	1.610	3,58
<i>Total</i>	2.808,5	46.686	

Fonte: EPL (2018), SEEG (2018).

Tabela 3.10 – Regiões brasileiras, suas utilizações de transporte, valores de emissão de CO₂ e fatores de emissão esperados em 2025.

<i>Região</i>	<i>Utilização de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissão de CO₂ (ktCO₂)</i>	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	753,8	8.366	11,10
<i>Nordeste (NE)</i>	296,0	6.965	23,53
<i>Sudeste (SE)</i>	1.336,6	21.500	16,09
<i>Sul (S)</i>	422,1	9.855	23,35
<i>Total</i>	2.808,5	46.686	

Fonte: SEEG (2018).

A partir dos dados obtidos, é possível criar a Tabela de Oportunidades do transporte de cargas para o ano de 2025, representada pela Tabela 3.11.

Tabela 3.11 – Tabela de Oportunidades do transporte de cargas em 2025.

<i>Modal de transporte</i>			<i>Região de demanda</i>		
	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>	<i>Quantidade disponível (Gt-km)</i>		<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>	<i>Utilização de transporte (Gt-km)</i>
<i>Rodoviário</i>	29,26	1.462,9	<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	11,10	753,8
<i>Ferrovário</i>	2,53	896,1	<i>Nordeste (NE)</i>	23,53	296,0
<i>Aquaviário</i>	3,58	449,5	<i>Sudeste (SE)</i>	16,09	1.336,6
			<i>Sul (S)</i>	23,35	422,1
<i>Total</i>		2.808,5			2.808,5

A Tabela 3.11 representa, de um lado, os modais disponíveis e suas quantidades e do outro, as regiões de demanda desses modais, com suas respectivas utilizações previstas. Neste Capítulo, a aplicação do DFC será feita por regiões, de forma que elas sejam atendidas separadamente e, assim haja um maior detalhamento das especificidades de cada uma. Todos os modais podem ser utilizados por todas as regiões, observadas as limitações de cada região.

O objetivo deste planejamento é alocar os modais de transporte disponíveis entre as regiões, calculando as suas quantidades necessárias e satisfazendo o limite de emissão predeterminado para o setor de transporte de cargas brasileiro no ano de 2025, de 46.686 ktCO₂/Gt-km.

Com essas informações, pode-se iniciar a síntese do DFC seguindo o procedimento descrito no Capítulo 2.

Primeiramente, deve-se organizar as demandas em ordem crescente de fator de emissão. Em seguida, calcula-se a quantidade de CO₂ a ser emitida em cada intervalo de demanda. Conforme visto no Capítulo 2, o cálculo da quantidade necessária de uma determinada fonte para satisfazer um certo intervalo de demanda é realizado pela Equação (2.3).

Será realizado um planejamento favorável ao meio ambiente, ou seja, que prioriza fontes limpas. Neste planejamento serão seguidas as seguintes regras heurísticas, baseadas no trabalho de QUARESMA (2016) e adaptadas para o setor de transportes brasileiro:

i. Limitações de região: todas as regiões poderão ser contempladas por todos os modais de transporte, desde que estejam disponíveis e que não se ultrapasse o limite de emissão da região, conforme dados da Tabela 3.10;

ii. Ordem de utilização das fontes: utilizar prioritariamente o modal disponível com o menor fator de emissão CO₂ de forma a gerar um cenário ambientalmente favorável;

iii. Complementação de demanda: se no último intervalo a demanda de transporte da região não tiver sido suprida, utilizar a fonte com maior fator de emissão para completá-la.

Assim, é possível obter o cenário para o setor de transporte de cargas brasileiro no ano de 2025, representado pela Figura 3.6:

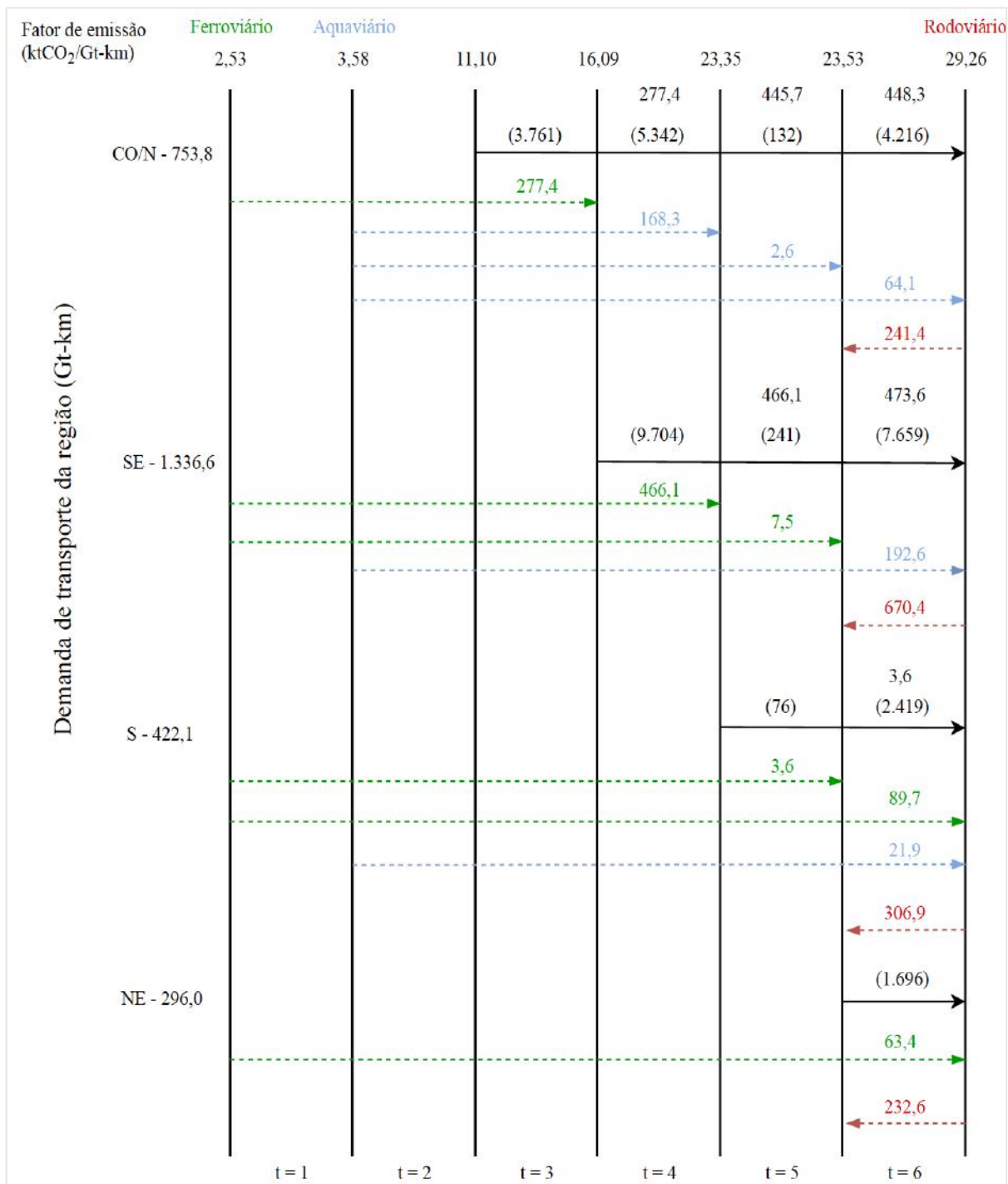


Figura 3.6 – DFC para o setor de transporte de cargas brasileiro em 2025.

A Tabela 3.12 apresenta, como resultados da aplicação da metodologia DFC, as quantidades necessárias dos modais de transporte em questão para cada região, bem como as emissões totais deles.

Tabela 3.12 – Utilização de cada modal de transporte e respectivas emissões, por região, em 2025.

<i>Região</i>	<i>Transporte rodoviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte ferroviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte aquaviário (Gt-km)</i>	<i>Utilização de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissões (ktCO₂)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	241,4	277,4	235,0	753,8	8.606
<i>Nordeste (NE)</i>	232,6	63,4	-	296,0	6.404
<i>Sudeste (SE)</i>	670,4	473,6	192,6	1.336,6	21.504
<i>Sul (S)</i>	306,9	93,3	21,9	422,1	9.857
<i>Total</i>	1.451,3	907,7	449,5		
	2.808,5			2.808,5	46.371

Na Tabela 3.12 observa-se que, com a configuração da rede de transportes apresentada, utilizou-se a totalidade da quantidade de transporte disponível prevista para 2025. Além disso, o limite de emissão total de CO₂ preestabelecido para o transporte de cargas, que era de 46.686 ktCO₂, foi respeitado. O DFC apresentou como resultado uma emissão total de 46.371 ktCO₂. A comparação entre as metas esperadas e o resultado do DFC é apresentada na Tabela 3.13.

Tabela 3.13 – Meta esperada e resultado obtido pelo DFC para o ano de 2025.

	<i>Transporte rodoviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte ferroviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte hidroviário (Gt-km)</i>	<i>Utilização total de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissão total (ktCO₂)</i>
<i>Meta esperada</i>	1.462,9	896,1	449,5	2.808,5	46.686
<i>DFC</i>	1.451,3	907,7	449,5	2.808,5	46.371

Analisando a Tabela 3.13, pode-se perceber que os resultados obtidos pela metodologia DFC, relativos a alocação da oferta de transporte disponível, foram muito próximos aos valores esperados. Além disso, o limite de emissão para o ano de 2025, objeto principal deste planejamento, foi respeitado.

3.2. Ano de 2030

De forma análoga, a metodologia DFC será aplicada para o ano de 2030, a fim de obter um planejamento de utilização dos modais do transporte de cargas, tendo em vista o cumprimento da meta de reduzir em 43% as emissões de CO₂ em relação a 2005. As regras heurísticas utilizadas neste caso serão as mesmas, de forma que seja gerado um planejamento favorável ao meio ambiente, ou seja, que prioriza fontes limpas.

Novamente, será necessária a criação de uma Tabela de Oportunidades. As quantidades disponíveis de cada modal foram retiradas da projeção feita pelo PNL para o ano de 2030 e as emissões de cada modal são aquelas esperadas para que a meta daquele ano seja atingida. Os fatores de emissão dos modais de transporte e das regiões são calculados através da Equação (2.1). Os valores obtidos são mostrados nas Tabelas 3.14 e 3.15. O objetivo deste planejamento é alocar os modais de transporte disponíveis entre as regiões, calculando as suas quantidades necessárias e satisfazendo o limite de emissão predeterminado para o setor de transporte de cargas brasileiro no ano de 2030, de 42.240 ktCO₂/Gt-km.

Tabela 3.14 – Modais de transporte de cargas, suas quantidades de transporte disponíveis, valores de emissão de CO₂ e fatores de emissão esperados em 2030.

<i>Modal</i>	<i>Quantidade disponível (Gt-km)</i>	<i>Emissão de CO₂ (ktCO₂)</i>	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>
<i>Rodoviário</i>	1.420,4	38.732	27,27
<i>Ferroviário</i>	1.156,6	2.051	1,77
<i>Aquaviário</i>	495,9	1.457	2,94
<i>Total</i>	3.072,9	42.240	

Fonte: EPL (2018), SEEG (2018).

Tabela 3.15 – Regiões brasileiras, seus consumos de transporte, valores de emissão de CO₂ e fatores de emissão esperados em 2030.

<i>Região</i>	<i>Utilização de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissão de CO₂ (ktCO₂)</i>	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	824,8	7.570	9,18
<i>Nordeste (NE)</i>	323,9	6.301	19,45
<i>Sudeste (SE)</i>	1.462,4	19.452	13,30
<i>Sul (S)</i>	461,8	8.917	19,31
<i>Total</i>	3.072,9	42.240	

Fonte: SEEG (2018).

Com os dados obtidos, é possível criar a Tabela de Oportunidades do transporte de cargas para o ano de 2030, representada pela Tabela 3.16.

Tabela 3.16 – Tabela de Oportunidades do transporte de cargas em 2030.

<i>Modal de transporte</i>			<i>Região de demanda</i>		
	<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>	<i>Quantidade disponível (Gt-km)</i>		<i>Fator de emissão (ktCO₂/Gt-km)</i>	<i>Utilização esperada (Gt-km)</i>
<i>Rodoviário</i>	27,27	1.420,4	<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	9,18	824,8
<i>Ferrovário</i>	1,77	1.156,6	<i>Nordeste (NE)</i>	19,45	323,9
<i>Aquaviário</i>	2,94	495,9	<i>Sudeste (SE)</i>	13,30	1.462,4
			<i>Sul (S)</i>	19,31	461,8
<i>Total</i>		3.072,9			3.072,9

A partir da Tabela de Oportunidades, é possível obter o cenário para o setor de transporte de cargas brasileiro no ano de 2030, representado pela Figura 3.7:

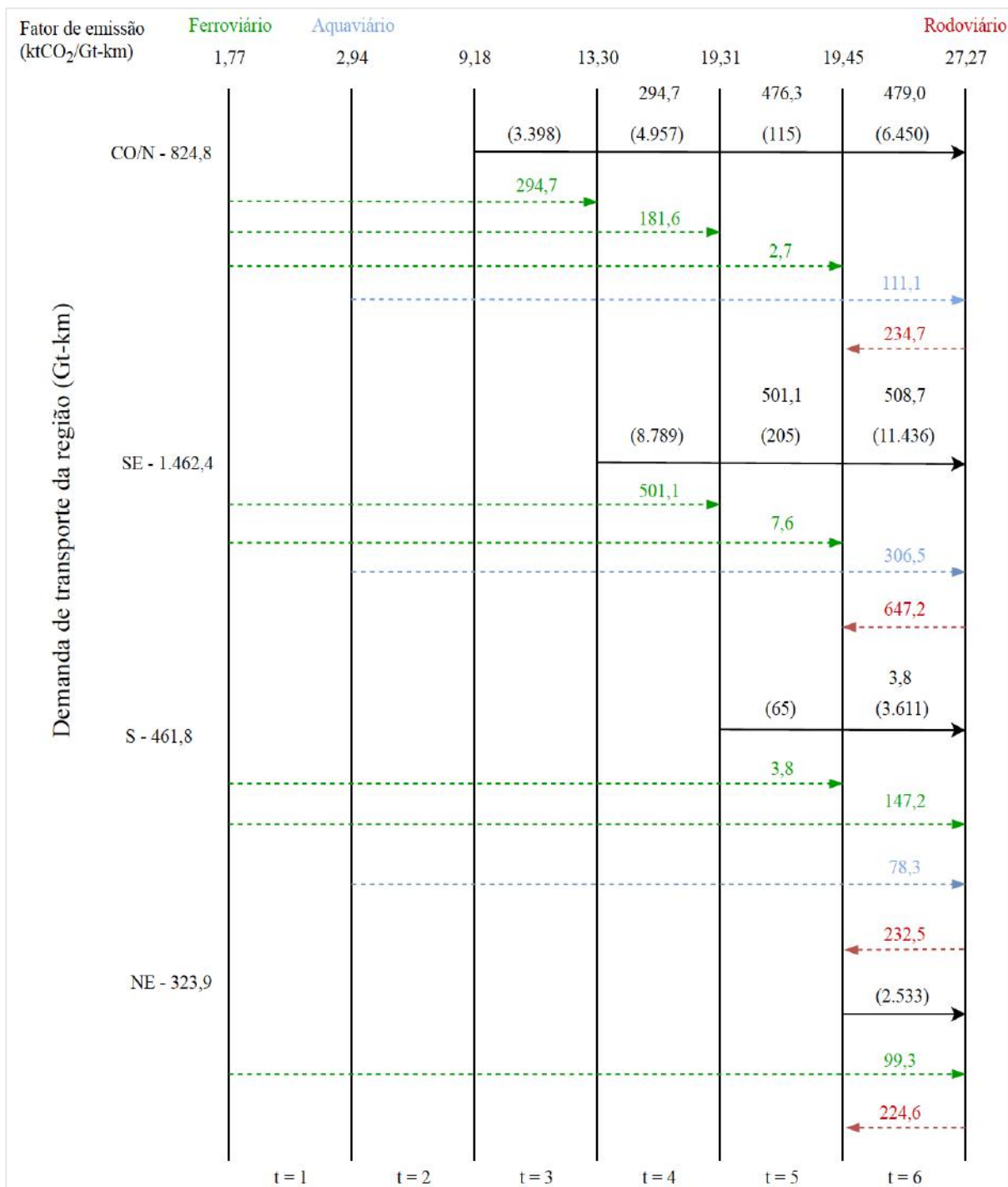


Figura 3.7 – DFC para o setor de transporte de cargas brasileiro em 2030.

A Tabela 3.17 apresenta, como resultados da aplicação da metodologia DFC, as quantidades necessárias dos modais de transporte em questão para cada região, bem como as emissões totais dos mesmos.

Tabela 3.17 – Utilização de cada modal de transporte e respectivas emissões, por região, em 2030.

<i>Região</i>	<i>Transporte rodoviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte ferroviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte aquaviário (Gt-km)</i>	<i>Utilização de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissões (ktCO₂)</i>
<i>Centro-Oeste/Norte (CO/N)</i>	234,7	479,0	111,1	824,8	7.575
<i>Nordeste (NE)</i>	224,6	99,3	-	323,9	6.301
<i>Sudeste (SE)</i>	647,2	508,7	306,5	1.462,4	19.451
<i>Sul (S)</i>	232,5	151,0	78,3	461,8	6.838
<i>Total</i>	1.339,0	1.238,0	495,9		
	3.072,9			3.072,9	40.164

Pode-se observar que, com a configuração da rede de transportes apresentada, utilizou-se uma quantidade de transporte equivalente à disponível prevista em 2030. Além disso, obteve-se um valor de emissão de CO₂ de 40.164 ktCO₂, respeitando-se o limite de emissão estipulado de 42.240 ktCO₂. A comparação entre as metas esperadas e o resultado do DFC é apresentada na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Comparativo entre as metas esperadas e do resultado obtido pelo DFC para o ano de 2030.

	<i>Transporte rodoviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte ferroviário (Gt-km)</i>	<i>Transporte hidroviário (Gt-km)</i>	<i>Utilização total de transporte (Gt-km)</i>	<i>Emissão total (ktCO₂)</i>
<i>Meta esperada</i>	1.420,4	1.156,6	495,9	3.072,9	42.240,0
<i>DFC</i>	1.339,0	1.238,0	495,9	3.072,9	40.164,0

3.3. Considerações

A metodologia DFC foi aplicada ao setor de transporte de cargas brasileiro para os anos de 2025 e 2030. A aplicação do método levou em conta as mudanças que ocorrerão nesse setor nos próximos anos. Foi considerada a previsão da utilização dos modais de transporte, bem como as restrições de cada região brasileira, de forma a tornar o resultado mais condizente com a rede planejada em cada região.

Para o ano de 2025, obteve-se um cenário em que a emissão foi de 46.371 ktCO₂, respeitando-se o limite estipulado de 46.686 ktCO₂. Analogamente, para o ano de 2030, obteve-se um cenário em que a emissão foi de 40.164 ktCO₂, respeitando-se novamente o limite de emissão de 42.240 ktCO₂. A Tabela 3.19 apresenta os resultados resumidos dos cenários obtidos pela metodologia DFC.

Tabela 3.19 – Comparativo dos cenários obtidos pelo DFC.

	2005		Cenário 2025		Cenário 2030	
<i>Modal de transporte</i>	<i>Utilização (Gt-km)</i>	<i>Emissão (ktCO₂)</i>	<i>Utilização (Gt-km)</i>	<i>Emissão (ktCO₂)</i>	<i>Utilização (Gt-km)</i>	<i>Emissão (ktCO₂)</i>
<i>Rodoviário</i>	485,6	67.951	1.451,3	42.465	1.339,0	36.515
<i>Ferroviário</i>	108,0	3.598	907,7	2.297	1.238,0	2.191
<i>Aquaviário</i>	164,8	1.610	449,5	1.609	495,9	1.458
<i>Total</i>	758,4	74.105	2.808,5	46.371	3.072,9	40.164

Os modais ferroviário e aquaviário apresentam previsão de aumentos de capacidade nos próximos anos. O Governo Federal sinalizou que pretende ampliar a participação do modal ferroviário nos próximos anos a partir da atração de investimentos privados em infraestrutura, da retomada de obras e da repactuação de contratos de concessão. Segundo o governo, justifica-se a utilização de parcerias e

investimentos privados pela escassez de recursos para investimentos públicos no país (SENADO, 2019).

Projetos importantes estão atualmente em curso, como a construção da Extensão Sul da Ferrovia Norte-Sul e a adequação da Ferrovia Centro-Atlântica, contribuindo para o aumento da capacidade desse modal nos próximos anos. Também há projetos para rodovias. Até 2030 são esperados avanços na qualidade das rodovias e uma consequente melhora no escoamento de cargas com a construção, duplicação e adequação de diversas vias. Apesar das melhorias esperadas, que irão ajudar a reduzir o fator de emissão desse transporte, a utilização do modal terá tendência de queda até 2030, enquanto o modal ferroviário crescerá em participação. Quanto às hidrovias, não há previsão de ampliação significativa da capacidade desse modal de transporte nos próximos anos, no entanto, é uma boa opção para regiões costeiras e com rios, visto que possui um fator de emissão baixo.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÃO

O aumento da demanda por energia tem levado a um aumento do uso de combustíveis e conseqüentemente a uma elevação das emissões de GEE na atmosfera, afetando populações e ecossistemas. O Acordo de Paris é um importante marco no combate às crescentes emissões. O Brasil, como signatário deste tratado, se comprometeu a reduzir as suas emissões de GEE a um nível 37% inferior ao de 2005, em 2025, além de cumprir uma meta indicativa subsequente de 43% menos emissões em relação a 2005, em 2030.

O setor de transportes brasileiro, entre os setores de energia, é responsável pela maior parte das emissões de GEE na atmosfera. É fundamental, portanto, que esse setor seja tratado como prioridade no Brasil no âmbito do Acordo de Paris. Mostra-se necessária uma política pautada pela substituição de combustíveis e meios de transporte mais poluentes por fontes mais limpas. Entretanto, essa substituição nem sempre é fácil, pois esbarra em limites tecnológicos e orçamentários.

A metodologia do Diagrama de Fontes de Carbono, o DFC, se insere neste contexto pois permite o desenvolvimento de um planejamento da utilização dos modais de transporte de modo que o país cumpra uma meta de emissão preestabelecida.

Dois objetivos principais estiveram presentes neste trabalho. Primeiramente, o objetivo foi apresentar a metodologia do DFC e ratificar sua viabilidade no setor de transportes, a partir de sua aplicação no Estudo de Caso apresentado por Walmsley *et al.* (2015). O DFC levou a um valor semelhante para o consumo do transporte e da correspondente emissão de CO₂ em comparação com os valores obtidos pela metodologia gráfica utilizada por Walmsley *et al.* (2015).

Em seguida, a metodologia do DFC foi aplicada no cenário do transporte de cargas brasileiro para obter um cenário desejável para os anos de 2025 e 2030, utilizando os três principais modais de transporte de cargas no Brasil – rodoviário, ferroviário e aquaviário, tendo como base a demanda de transporte de cada região e os limites de emissão estipulados pelo Acordo de Paris.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que com a distribuição dos modais de transporte obtida pelo DFC, o setor de transporte de cargas cumpriria as metas de redução de emissões de CO₂ estabelecidas nas CND. Ressalta-se, porém, que o planejamento foi realizado com base em projeções da utilização de transporte para os próximos anos, portanto, o cumprimento das metas dependerá da continuidade dos projetos atualmente considerados.

A partir da aplicação da metodologia DFC, uma ferramenta de simples aplicação, precisa e que permite a confecção de múltiplas redes simultaneamente, obteve-se resultados compatíveis com o cenário nacional, o que indica a sua viabilidade para aplicação em outros Estudos de Caso do setor de transportes. Futuramente, a ferramenta pode ser utilizada para obter um planejamento similar envolvendo o setor de transporte de passageiros ou ambos.

CAPÍTULO 5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTAQ. **Panorama das Hidrovias Brasileiras**. Disponível em:

<<http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2016/12/%E2%80%9CPanorama-das-Hidrovias-Brasileiras%E2%80%9D-Jos%C3%A9-Alex-Botelho-de-Oliva.pdf>>. Acesso em 11 jul. 2019.

ANTAQ. **TKU da navegação interior e de cabotagem**. Disponível em:

<<http://portal.antaq.gov.br/wp-content/uploads/2017/03/Transporte-de-Cargas-nas-Hidrovias-Brasileiras-2015-TKU.pdf>>. Acesso em 11 jul. 2019.

ATKINS, M. J.; MORRISON, A. S.; WALMSLEY, M. R. W. Carbon Emissions Pinch Analysis (CEPA) for emissions reduction in the New Zealand electricity sector. **Applied Energy**, v. 87, n. 3, p. 982–987, mar. 2010.

BNDES. **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil**. Disponível em:

<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2423/1/BS%2024%20%20A%20Ind%C3%BAstria%20de%20Implementos%20Rodovi%C3%A1rios%20e%20sua%20Import%C3%A2ncia%20para%20o%20Aumento%20da%20Efici%C3%A2ncia_P.pdf>. Acesso em 19 mar. 2019.

BNDES. **O Acordo de Paris e a transição para o setor de transportes de baixo carbono: o papel da plataforma para o biofuturo**. Disponível em:

<<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/conhecimento/noticias/noticia/biocombustiveis-transportes-baixo-carbono>>. Acesso em 14 mai. 2019.

CNT. **Pesquisa CNT de Rodovias 2018**. Disponível em:

<<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em 14 mai. 2019.

EPE. **Plano decenal de expansão de energia 2026**. Disponível em: <

http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/topico-66/Cap2_Texto.pdf>. Acesso em 27 mar. 2019.

EPL. **Plano Nacional de Logística – 2025**. Disponível em:

<<https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>>. Acesso em 14 mai. 2019.

EPL. **Transporte Inter-regional de carga no Brasil – Panorama 2015**. Disponível

em: <<https://www.epl.gov.br/transporte-inter-regional-de-carga-no-brasil-panorama-2015>>. Acesso em 14 mai. 2019.

FRANCISCO, F. S.; FERNANDES, G. L.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F.L.P. (2014).

Diagrama de Fontes de Carbono – Uma nova ferramenta para o planejamento energético. COBEQ – XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, p. 6557-6564, 2015.

GOLDENSTEIN, Marcelo; ALVES, Marcelo de Figueiredo; AZEVEDO, Rodrigo Luiz

Sias de. **A indústria de implementos rodoviários e sua importância para o aumento da eficiência do transporte de cargas no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 24, p. 241-260, set. 2006.

GUIMARÃES, Claudinei de Souza. **Controle e monitoramento de poluentes atmosféricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2018.

IEA. **CO₂ Emissions From Fuel Combustion – Highlights 2017**. Disponível em: <

<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsfromFuelCombustionHighlights2017.pdf>>. Acesso em: 21 ago. 2018.

IPEA. **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros**. Disponível em:

<http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=9567>. Acesso em 27 mar. 2019.

MAPA. **Plano Nacional de Logística Integrada**. Disponível em:

<<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-tematicas/infraestrutura-e-logistica/anos-antiores/plano-nacional-de-logistica-integrada-pnli-51.pdf>>. Acesso em 21 mar. 2019.

MINFRA. **Rodovias Federais**. Disponível em:

<<https://www.infraestrutura.gov.br/rodovias-brasileiras.html>>. Acesso em 11 jul. 2019.

MMA. **Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC)**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas>>.

Acesso em: 27 mar. 2019.

MMA. **Plano setorial de transporte e de mobilidade urbana para mitigação e adaptação à mudança do clima.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80076/Transporte.pdf>>. Acesso em 27 mar. 2019.

MME. **MME publica resolução com aumento gradual da mistura de biodiesel ao diesel para 15%.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/mme-publica-resolucao-com-aumento-gradual-da-mistura-de-biodiesel-ao-diesel-para-15->. Acesso em 8 nov. 2018.

NTU. **Anuário 2017-2018.** Disponível em: <<https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub636687203994198126.pdf>>. Acesso em 23 fev. 2019.

NRDC. **The road from Paris: Brazil's progress toward its climate pledge.** Disponível em: <<https://www.nrdc.org/sites/default/files/paris-climate-agreement-progress-2017-brazil-ib.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2018.

QUARESMA, A. C. de L. **Redução das Emissões de CO₂ no Setor Elétrico Brasileiro Utilizando a Metodologia Diagrama de Fontes de Carbono.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

QUARESMA *et al.* Carbon Emission Reduction in the Brazilian Electricity Sector using Carbon Sources Diagram. **Elsevier**, 2018.

SEEG. **Tabela geral de emissões.** Disponível em: <<http://seeg.eco.br/tabela-geral-de-emissoes/>>. Acesso em: 12 set. 2018.

SEEG. **Emissões de GEE no Brasil e suas implicações para políticas públicas e a contribuição brasileira para o Acordo de Paris.** Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/08/Relatorios-SEEG-2018-Sintese-FINAL-v1.pdf>>. Acesso em 12 set. 2018.

SEEG. **Emissões dos setores de energia, processos industriais e uso de produtos.** Disponível em: <<http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/05/Relato%CC%81rios-SEEG-2018-Energia-Final-v1.pdf>>. Acesso em 27 mar. 2019.

SENADO. **Ministro da Infraestrutura expõe planos para rodovias, ferrovias e aeroportos.** <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2019/02/26/ministro-da->

infraestrutura-expoe-planos-para-rodovias-ferrovias-e-aeroportos>. Acesso em 28 jul. 2019.

TEIXEIRA *et al.* **Navegação Interior Brasileira**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 47, p. 437-482, mar. 2018.

WALMSLEY *et al.* Carbon Emissions Pinch Analysis for emissions reductions in the New Zealand transport sector through to 2050. **Energy**, p. 569–576, 2015.