

## **Determinação de uma equação para pegada de carbono de um sistema de transporte de cargas por meio da identificação dos fatores de influência e simulação**

### **Determining a carbon footprint equation of a cargo load transport system by means of identifying its influencing factors and simulation**

Rodrigo Salvador  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
[salvador.rodrigors@gmail.com](mailto:salvador.rodrigors@gmail.com)

Murillo Vetroni Barros  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
[murillo.vetroni@gmail.com](mailto:murillo.vetroni@gmail.com)

Fernanda Gomes de Andrade  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
[fgandrade02@gmail.com](mailto:fgandrade02@gmail.com)

Cassiano Moro Piekarski  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
[piekarski@utfpr.edu.br](mailto:piekarski@utfpr.edu.br)

Antonio Carlos de Francisco  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)  
[acfrancisco@utfpr.edu.br](mailto:acfrancisco@utfpr.edu.br)

#### **Resumo**

Os desafios enfrentados pela atual economia forçam as organizações a buscarem modos de otimizar seus processos produtivos. Sistemas de transporte de cargas possuem potencialidades de redução da pegada de carbono, poupando emissões de CO<sub>2</sub>. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi determinar uma equação que governasse o comportamento da pegada de carbono (CFP) de um determinado sistema de logístico de transporte de cargas, por meio da identificação dos fatores de influência da CFP por meio de simulação. Utilizou-se a ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida para determinação da pegada de carbono para uma carga do sistema estudado e foram então realizadas simulações a fim de determinar uma equação que governasse o comportamento da pegada de carbono do sistema. A identificação dos fatores de influência na CFP do sistema pode auxiliar no planejamento futuro do mesmo de modo a desdobrar ações que foquem na redução dos impactos causados pela atividade de transporte realizada. A identificação da equação que governa CFP do sistema estudado pode ser objeto de pesquisas futuras no que tange à inserção de tal informação em modelos/métodos de otimização multicritério visando a redução de potenciais impactos ambientais. Ainda, os métodos utilizados no presente estudo podem ser utilizados para determinação de fatores de influência em outros sistemas.

**Palavras-chave:** transporte de cargas, pegada de carbono, avaliação do ciclo de vida.

## Abstract

The challenges faced by the current economy force organizations to seek alternatives for optimizing their production processes. Cargo load transport systems have a potential reducing its carbon footprint by sparing CO<sub>2</sub> emissions. On those grounds, the objective of this paper was to determine the equation that governed the behaviour of the CFP of a certain cargo load transport system, by means of identifying the CFP's influencing factors using simulation. The LCA tool was used to determine the CFP for one load of the system under study, then a series of simulations were conducted to determine the equation governing the behaviour of the CFP of the system. The identification of the influencing factors of the system's CFP can assist in future planning so as to deploy actions that focus on reduction of the impacts caused by the transport activities. The identification of the equation that governed the system's CFP can be object of future research regarding the use of such information in multi-criteria optimization models/methods envisioning impact reduction. Yet, the methods used in the present study can be further utilized to determine influencing factors in other systems.

**Keywords:** cargo load transport, carbon footprint, life cycle assessment.

## 1. Introdução

O dinamismo do mercado, as forças competitivas, o desenvolvimento tecnológico e a criação e atualização de requisitos legais fazem com que as organizações vivam em constante mudança. Elas precisam adaptar-se cada vez mais rápidas às mudanças impostas por forças internas e externas para que possam continuar a desenvolver suas atividades produtivas de forma satisfatória (KOH et al., 2013).

Um dos fatores de influência às atividades produtivas é a sensibilização em relação à sustentabilidade ambiental, atentando às interações da organização com o meio em que está inserida (KANNAN, 2012). Em um sistema logístico, por exemplo, são retirados da natureza, *a priori*, os recursos necessários à produção dos combustíveis e dos meios de transporte utilizados. São, ainda, dispostos/emitidos ao meio as emissões de gases geradas pelo processamento dos combustíveis pelos meios de transporte e os componentes físicos que compõem os meios de transporte utilizados nas atividades produtivas do sistema.

Sistemas logísticos são marcados por intensas atividades de movimentação e transporte (BALLOU, 2006), sua principal característica resulta em emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) pela queima dos combustíveis utilizados, primordialmente de origem fóssil. Um GEE é descrito como um “componente gasoso da atmosfera, tanto natural quanto antropogênico, que absorve e emite radiação de comprimentos de onda específicos dentro do espectro de radiação infravermelha emitido pela superfície da Terra, pela atmosfera e pelas nuvens” (ABNT, 2015, p. 4), a exemplos o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e o CH<sub>4</sub> (gás metano). Tais emissões necessitam correta gestão, de modo a resultarem no menor impacto possível ao meio (KANNAN, 2012). Para tanto, é preciso propor ações que visem à prevenção, redução e/ou mitigação de emissões, prioritariamente nesta ordem. Estando a sociedade mundial enfrentando as consequências climáticas do aquecimento global é de grande relevância a investigação dos aspectos e impactos ambientais de sistemas logísticos.

À luz do contexto supraexposto o objetivo do presente trabalho foi determinar uma equação que governasse o comportamento da pegada de carbono (CFP) de um determinado sistema logístico de transporte de cargas, por meio da identificação dos fatores de influência da CFP por meio de simulação. O uso da ACV se deu por ser a ferramenta mais amplamente utilizada para a determinação da CFP, além de ser uma reconhecida técnica para determinação de impactos ambientais potenciais de produtos, processos e/ou serviços ao longo de seus ciclos de vida (BOCKEN et al., 2012).

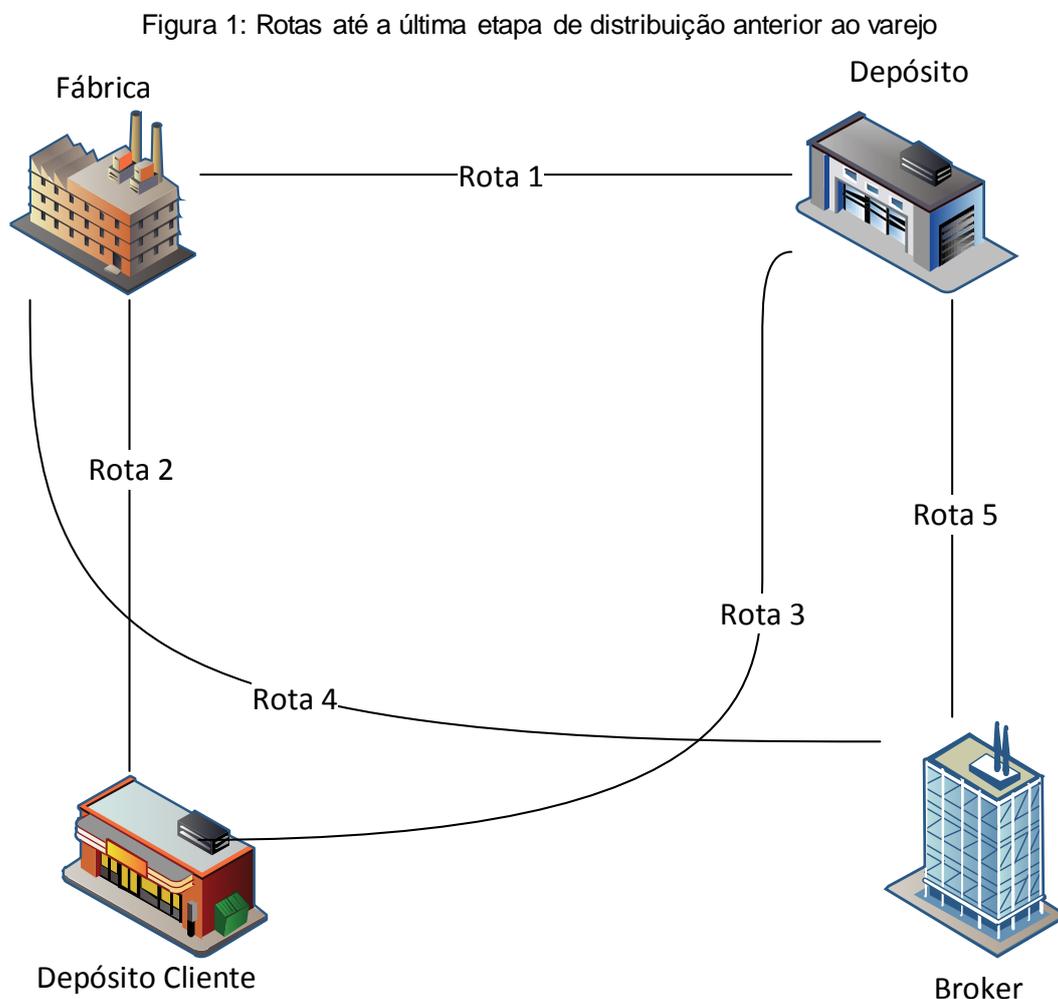
## 2. Métodos

Para determinação da equação da CFP foi necessário seguir os passos regulares para determinação da CFP de qualquer sistema e então identificar os fatores que influenciavam tal métrica. Para isso, foram levadas em conta as particularidades do sistema de transporte de cargas (Seção 2.1) e os requisitos e sugestões propostos pelas normas de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) (ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009) e de Pegada de Carbono (ABNT ISO/TS 14067:2015) para realizar o proposto na seção 2.2.

### 2.1. Definição das características do sistema de transporte de cargas

O sistema considerado neste estudo é parte do sistema de transporte de uma empresa multinacional do ramo de alimentos e bebidas. O transporte de todas as cargas é realizado por empresa terceira, não utilizando, a empresa onde o estudo foi realizado, veículos próprios para tal. Todavia, há certa padronização na frota contratada. Todos os veículos que realizam transporte de cargas têm capacidade efetiva em massa de 24 ton e em volume de 75m<sup>3</sup>.

O transporte de cargas pode ocorrer em diferentes configurações de origem e destino, conforme ilustrado na Figura 1.



- Rota 1: da fábrica ao depósito da empresa fabricante;

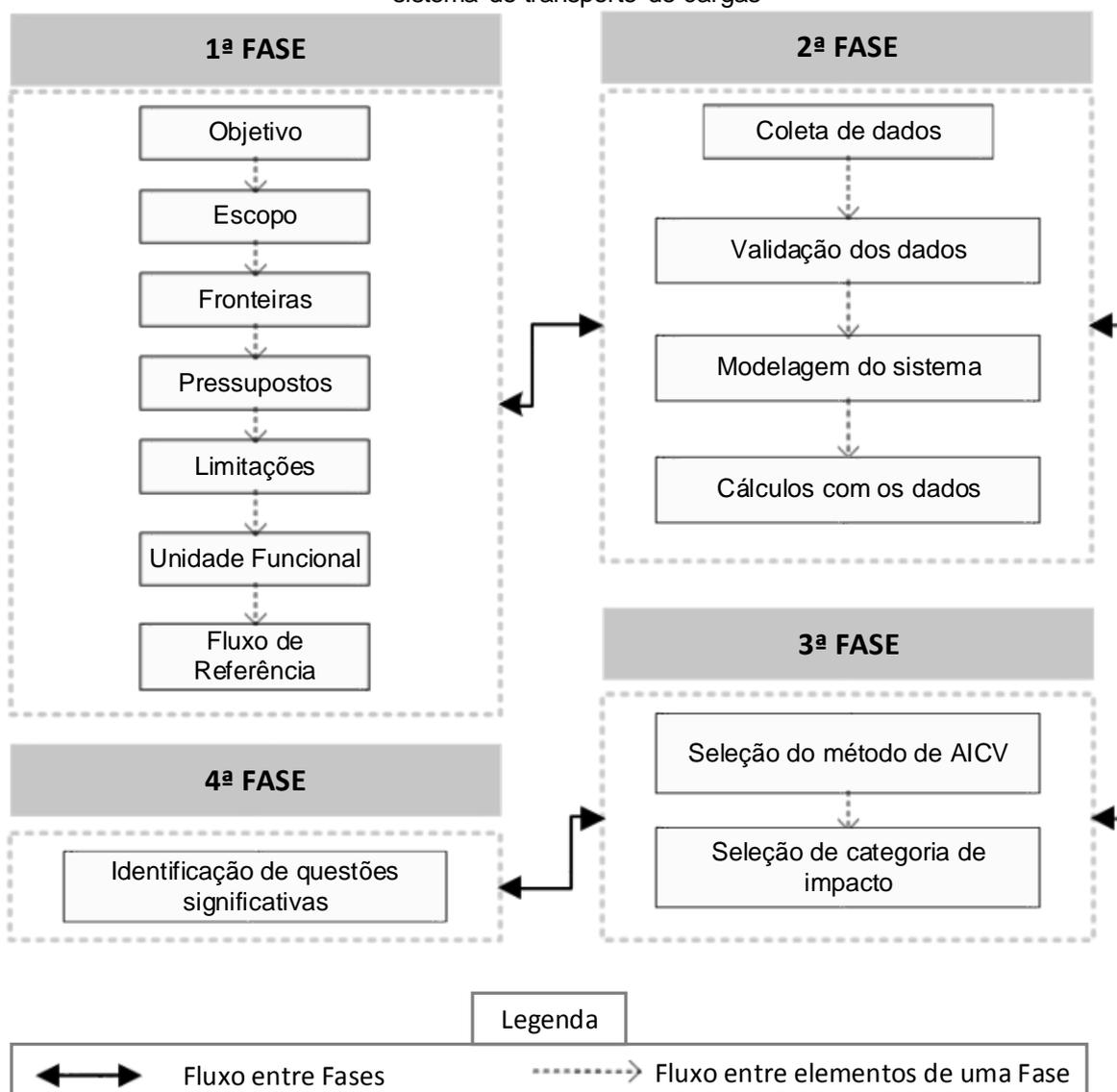
- Rota 2: da fábrica direto ao depósito do cliente;
- Rota 3: do depósito da empresa fabricante ao depósito do cliente;
- Rota 4: da fábrica ao cliente *broker*;
- Rota 5: do depósito da empresa fabricante ao cliente *broker*.

Todas essas rotas podem ser utilizadas para realizar a distribuição de produtos até a etapa anterior à venda direta ao consumidor final. A Rota utilizada no escopo deste estudo é a Rota 5: do depósito da empresa fabricante ao cliente *broker*. O cliente *broker* pode ser caracterizado como um agente terceiro da empresa fabricante, que negocia com varejos pequenos e com demanda baixa e diversa.

## 2.2. Determinação da equação relativa à pegada de carbono parcial de um sistema de transporte de cargas

A determinação da CFP seguiu os princípios da técnica de ACV. Portanto, foram aplicados os passos sugeridos pelas normas. Assim, foi seguida a sequência proposta na Figura 2.

Figura 2: Método para aplicação da técnica de ACV para determinação da pegada de carbono de um sistema de transporte de cargas



Fonte: Autores (2018); elaborado com base em ABNT (2009a, 2009b)

Como definido pelos parâmetros das normas ISO 14040 e ISO 14044, as fases e os passos definidos na Fonte: Autores (2018); elaborado com base em ABNT (2009a, 2009b)

mostram a sequência necessária a ser seguida para a condução da pesquisa. Foi necessário, primeiramente, identificar as características do sistema e definir os objetivos do estudo. A segunda fase possuiu foco na coleta de dados. Na terceira fase foi realizada a qualificação e quantificação dos impactos. A quarta e última fase compreendeu as conclusões traçadas a partir dos resultados obtidos. Ainda, há interatividade entre as fases, portanto sempre que necessário é possível retornar às fases anteriores para revisão e alteração das características do estudo, adição ou exclusão de elementos/dados, de acordo com o refinamento dos objetivos e escopo do estudo ao longo da aplicação. As etapas e os passos referidos são expostos nas seções a seguir.

### **2.3. 1ª Fase: definição de objetivo e escopo**

#### **a) Objetivo;**

Para o presente trabalho considerou-se apenas o processo de transporte de cargas, sendo, portanto, o objetivo da aplicação da ACV, a determinação de uma equação referente à CFP parcial de um sistema de transporte de cargas.

#### **b) Escopo;**

Foi considerado apenas um processo da fase de distribuição de uma cadeia de suprimentos, ou seja, o transporte de produtos acabados de um Centro de Distribuição (CD) até o cliente (*broker*).

#### **c) Fronteiras;**

A fronteira inicial do estudo é a expedição do produto realizada no CD e a fronteira final é a chegada do produto no cliente, sendo considerado, portanto, apenas o transporte de produtos acabados. Dentro da ACV, a fronteira utilizada neste estudo pode ser considerada uma adaptação de “*gate-to-grave*”, pois considera o transporte do produto acabado apenas depois de sua saída do CD até a fase de uso. Todavia, o processo utilizado (*lorry*, com o tipo *Result* – ver Pressupostos) considera os impactos desde a extração dos recursos naturais até o processo de transporte em si.

#### **d) Pressupostos;**

No que tange aos parâmetros utilizados na condução da ACV, para a definição do escopo utilizou-se a ACV baseada em processos, uma vez que são definidas de forma apropriada as informações relevantes da cadeia de suprimentos e fatores regionais (ZHAO et al., 2016) e não havendo agregação de setores industriais no processo (HENDRICKSON et al., 2006). Foi utilizada a ACV atribucional, pois como afirma Muniz (2012), apesar da possibilidade de baixa acurácia, possui alta precisão, diferindo da ACV consequential, com alta acurácia, porém baixa precisão. Como método de alocação foi utilizado o *cut-off*, assim todos os impactos são atribuídos ao processo que as gera, não penalizando outras entradas (ECOINVENT, 2018a).

Em relação ao sistema, para a modelagem de processos utilizando a base de dados *ecoinvent v.3.3*, considerou-se o uso de uma frota padronizada de caminhões, com padrões de emissão *Euro5*. Utilizou-se para a modelagem dos processos a Geografia *RoW* (*Rest of the World*), apesar de poder não representar de forma fiel a realidade brasileira, visto que dados de inventário para o cenário brasileiro não estão disponíveis na base de dados. A escolha se baseou no fato de a geografia *RoW* ser uma cópia exata da geografia *Global*, porém com ajuste de incerteza (ECOINVENT, 2018b). Outrossim, foi utilizado o tipo *Result* para processo, pois considera as trocas ambientais agregadas e os impactos do sistema de produto relacionado a um produto específico de uma atividade específica (WEIDEMA et al., 2013).

É assumido que o veículo que percorre a rota considerada parte da origem carregado chegando até o destino e, então, retorna do destino até a origem vazio,

percorrendo, portanto, o trajeto duas vezes, fazendo necessário considerar a quilometragem dobrada da origem até o destino na modelagem do sistema.

**e) Limitações;**

Uma das limitações a ser levantada é o uso de dados secundários, em função da utilização de bases de dados com processos que podem não representar de forma fiel o cenário brasileiro.

**f) Unidade Funcional;**

A unidade funcional adotada foi de 1ton (uma tonelada) de produto acabado transportada por uma distância de 1.514 km (757 km ida + 757 km volta), pois o veículo realiza a viagem da origem até o destino com a carga e retorna do destino até a origem vazio, sendo necessário contabilizar o percurso total para a correta contagem dos impactos.

**g) Fluxo de Referência.**

O fluxo de referência foi de 1ton de produto acabado.

## 2.4. 2ª Fase: inventário do ciclo de vida

Os dados para o inventário foram coletados de informações de relatórios gerenciais e seguiu-se os passos identificados a seguir.

**a) Coleta de Dados**

Os dados utilizados no inventário foram de fonte secundária. A obtenção primária foi realizada por profissionais que atuam diretamente na gestão do sistema de transporte de cargas estudado. Esses dados são disponibilizados em relatórios internos da organização na qual o referido sistema se encontra.

Assim, tem-se como entradas do sistema a massa a ser transportada, a distância a ser percorrida no trajeto, o tipo de transporte e veículo a ser utilizado. Os mesmos podem ser observados na Tabela 1, contendo os dados do inventário do sistema considerado.

**b) Validação de Dados**

Os dados foram submetidos a um processo de validação qualitativa em colaboração com os responsáveis por sua publicação na organização onde o sistema estudado se encontra.

**c) Modelagem do Sistema**

O processo de transporte foi modelado com auxílio do *software* Umberto NXT Universal v. 7.1.13 Educacional (ver Figura 3). Ainda, quando da modelagem do sistema no *software* Umberto, com o uso da base de dados *ecoinvent v3.3*, na definição dos processos foram utilizados os critérios a seguir:

- Método de alocação: *cut-off* (ver **Pressupostos**);
- Geografia: *RoW* (ver **Pressupostos**);
- Tipo: *Result* (ver **Pressupostos**).

**d) Cálculos com os Dados**

Para obter um perfil de cargas dentro escopo considerado, da saída do depósito do fabricante até o cliente *broker*, foi utilizada a distância da rota (origem até destino) e a capacidade do veículo utilizado, levando em conta os pressupostos apresentados. Os dados de inventário para a determinação da CFP para cada carga podem ser observados na Tabela 1.

## 2.5. 3ª Fase: avaliação do impacto do ciclo de vida

**a) Escolha do Método de AICV**

O método utilizado para a determinação da pegada de carbono foi o *IPCC 2013 - climate change, GWP 100a*. A escolha do método se baseou em alguns fatores, como ter sido o método desenvolvido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

(*Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC*); os conceitos pregados pelo IPCC quanto a cálculos de emissões de GEEs serem utilizados como referência na área (MASULLO, 2017; BERNARDI, GIAROLA, e BEZZO, 2012; CHAABANE et al., 2012; TANAKA et al., 2012; NETO; DIAS; MACHADO, 2013); o Painel ser responsável por previsões em relação ao clima mundial baseado nos princípios e cálculos desenvolvidos e pregados pelo mesmo (GOULDSON; SULLIVAN, 2013; IPCC, 2008).

#### **b) Escolha da Categoria de Impacto**

Seguindo o objetivo do estudo, a categoria de impacto considerada no estudo é a de mudança climática, fornecendo, assim, a base para determinação da equação da CFP para o sistema de transporte de cargas considerado.

### **2.6. 4ª Fase: interpretação**

Dadas as características do sistema estudado foram identificados os fatores de influência sobre a CFP do mesmo, as quais foram contabilizadas na equação da CFP para o sistema sob estudo. Para isso foram analisados os comportamentos de massa e distância sobre a CFP e realizadas simulações com ambos os indicadores de modo a determinar a tendência de cada um na CFP do sistema. A Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam os dados para as simulações mencionadas, bem como os resultados de impacto para as mesmas.

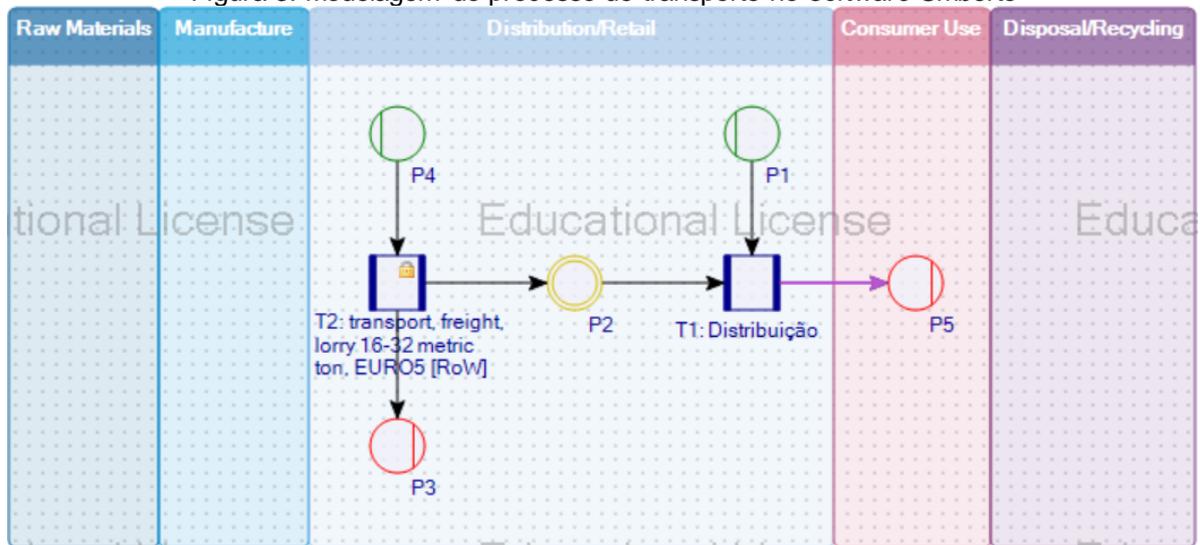
### **3. Pegada de carbono e equação da pegada de carbono do sistema de transporte de cargas**

Para determinação da CFP de uma carga e da equação relativa à CFP do sistema de transporte de cargas foi utilizada a técnica ACV considerando o método de avaliação *IPCC 2013 - climate change, GWP 100a* e a categoria de impacto *potencial de aquecimento global (GWP)* com a unidade funcional de 1 ton de produto acabado em uma rota de 1.514 km (757 km ida + 757 km volta) e um fluxo de referência de 1 ton de produto acabado.

#### **3.1. Modelagem de processo no software Umberto NXT Universal v. 7.1.13 Educacional**

Para que fosse possível a determinação da CFP do sistema de cargas de modo a ser possível a determinação da mesma dentro do modelo matemático apresentado na seção 4.3, foi realizada a modelagem do processo de transporte no *software Umberto*, conforme ilustrado na Figura 3 e foram realizadas simulações de modo a avaliar o comportamento das emissões para o sistema considerado.

Figura 3: Modelagem do processo de transporte no software Umberto



Fonte: Autores (2018)

A partir dessa modelagem o *software* realiza balanços de massa e energia necessários. Foram, então, realizadas simulações para determinar a equação relativa à CFP do sistema de transporte de cargas considerado.

### 3.1. Considerações a respeito da determinação da equação relativa à CFP

Foram realizadas simulações com variação de distância e variação de massa, para identificar os fatores de influência na CFP do sistema. Para ambos, foram utilizados intervalos de valores dentro de um intervalo normal para o sistema considerado e dois valores extrapolados para verificar se o comportamento identificado das variáveis não era apenas local.

Na construção do inventário para a determinação da CFP de uma carga foram necessários dados de massa (ton) dos produtos a serem transportados e a distância (km) percorrida na rota do transporte. Os dados do inventário, bem como os resultados de emissões para cada uma das simulações são apresentados, respectivamente, em Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 1: Tabela de inventário para determinação da CFP de uma carga para o sistema de transporte de cargas

Processo	Nome	Entradas				Saídas		
		Identificação no Inventário	Base de Dados	Quantidade	Unidade	Nome	Quantidade	Unidade
Distribuição	Produto acabado	produto acabado	Material Intermediário Criado para o Modelo	24	ton	Produto entregue ao Cliente	24	ton
	Transporte de Produtos Acabados	transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO5 [RoW]	Ecoinvent (v3.3)	36.336	t.km			

Fonte: Autores (2018)

Os dados apresentados na tabela de inventário (Fonte: Autores (2018)) são relativos a uma carga para o sistema considerado. Para uma carga de 24 toneladas transportada na rota mencionada a CFP é de 258,11 kgCO<sub>2</sub>-e.

Na Tabela 2 observa-se os dados utilizados para realizar a simulação dos valores da CFP do sistema com variações nos valores de distância, mantido um valor constante de massa.

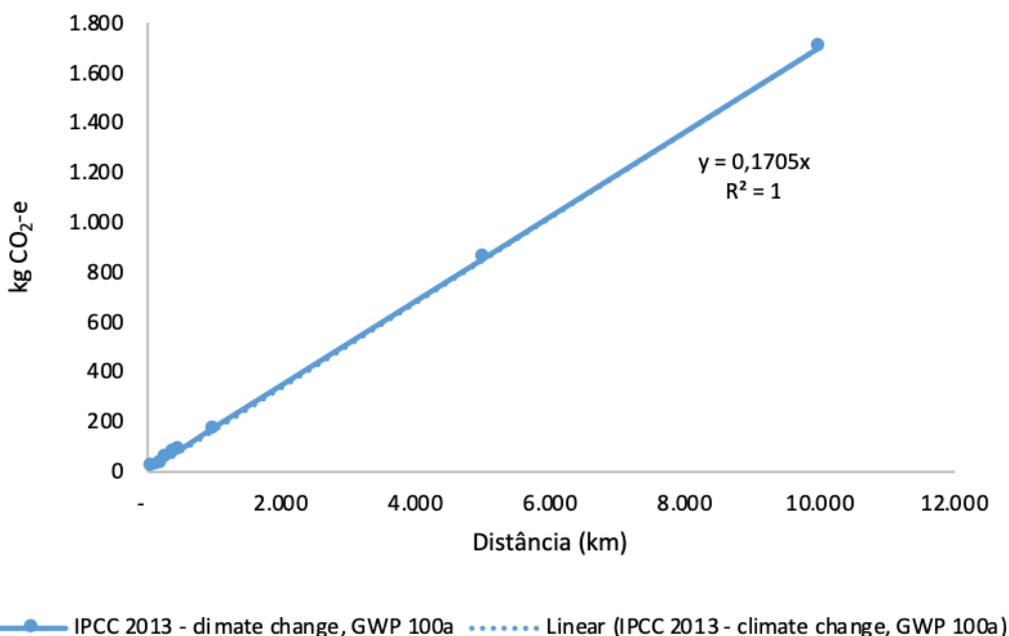
Tabela 2: Inventário e resultados – simulação por variação de distância (para: um produto genérico; massa constante de 20 ton; fluxo de referência de 1 ton)

Massa (ton)	Distância (km)	ton.km	IPCC 2013 - climate change, GWP 100a (kgCO <sub>2</sub> -e)
20	100	2.000	17,05
20	200	4.000	34,10
20	300	6.000	51,15
20	400	8.000	68,19
20	500	10.000	85,24
20	1.000	20.000	170,48
20	5.000	100.000	852,42
20	10.000	200.000	1.704,84

Fonte: Autores (2018)

Analisando os dados da Tabela 2 e por meio da ilustração dos mesmos na Figura 4, pode-se perceber que a distância afeta a CFP de forma diretamente proporcional.

Figura 4: Influência da distância (km) na CFP (kgCO<sub>2</sub>-e) de acordo com IPCC 2013 - *climate change*, GWP 100a



Fonte: Autores (2018)

A CFP cresce na mesma proporção que o aumento da distância percorrida para uma massa constante. Pode-se, ainda, observar que o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) é igual a 1, ou seja, os dados apresentam correlação perfeita. Conclui-se, portanto, que a distância é uma variável que precisa ser levada em conta na determinação da CFP do sistema considerado.

Paralelamente, analisou-se a influência da massa na CFP do sistema. De maneira similar à realizada para distância, nesse caso considerou-se um valor constante para distância e valores variáveis para massa. Os resultados podem ser observados na Tabela 3 e na Figura 5.

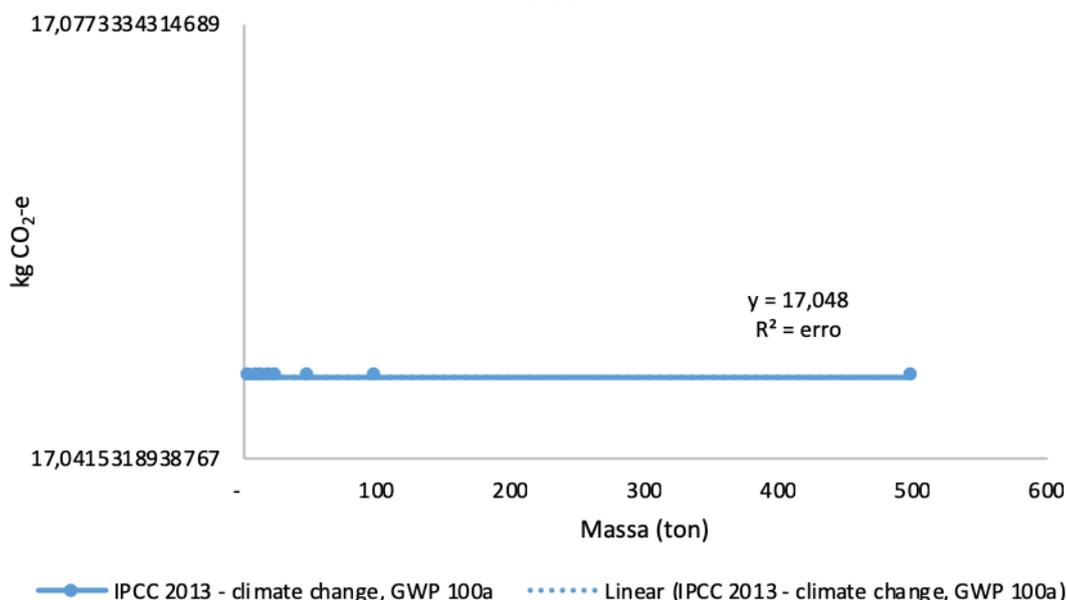
Tabela 3: Inventário e resultados – simulação por variação de massa (para: um produto genérico; distância constante de 100 km; fluxo de referência de 1 ton)

Massa (ton)	Distância (km)	ton.km	IPCC 2013 - climate change, GWP 100a (kgCO <sub>2</sub> -e)
5	100	500	17,05
10	100	1.000	17,05
15	100	1.500	17,05
20	100	2.000	17,05
25	100	2.500	17,05
50	100	5.000	17,05
100	100	10.000	17,05
500	100	50.000	17,05

Fonte: Autores (2018)

Como pode-se observar na Tabela 3, variando a massa, mas mantendo uma distância constante, o valor da CFP não se altera. Os resultados são ilustrados na Figura 5.

Figura 5 - Influência da massa (ton) na CFP (kgCO<sub>2</sub>-e) de acordo com IPCC 2013 - climate change, GWP 100a



Fonte: Autores (2018)

Por meio da Figura 5 pode-se perceber que a variação da massa não tem influência sobre a CFP do sistema. Ainda, o coeficiente de ajuste ( $R^2$ ) apresenta erro, por haver uma divisão por zero no cálculo do  $R^2$ , indicando não haver correlação entre a massa e a CFP. Conclui-se, portanto, que a massa não é uma variável que precisa ser levada em conta na determinação da CFP do sistema considerado.

Desta forma tendo a distância e a massa como entradas para a determinação da CFP, com a massa não apresentando correlação com a CFP, apenas a distância

percorrida deve ser considerada na determinação da equação da CFP. Como indicado na Figura 4, o comportamento da CFP do sistema é regido pela Eq. (1).

$$y = 0,170483512343705x \quad Eq.(1)$$

Onde,

$$y = CFP \text{ (kg CO}_2\text{e)} \quad Eq.(2)$$

$$x = \text{distância total percorrida (km)} \quad Eq.(3)$$

Reescrevendo a Eq. (1), tem-se a Eq. (4):

$$CFP = 0,1705 \times (\text{distância total percorrida (km)}) \quad Eq.(4)$$

É necessário, todavia, considerar que em uma aplicação prática pode ser possível observar que um veículo realizando um determinado trajeto carregado e vazio pode apresentar diferenças no consumo de combustível e, portanto, na emissão de GEEs. Ademais, os processos utilizados da base de dados *ecoinvent v3.3* podem não condizer com a realidade brasileira/regional.

#### 4. Considerações finais

O objetivo do presente trabalho foi determinar uma equação que governasse o comportamento da pegada de carbono (CFP) de um determinado sistema de logístico de transporte de cargas. O objetivo proposto para a realização do presente trabalho foi alcançado. Mapeou-se o processo de transporte de cargas bem como foram apresentadas as suas características, limitações e particularidades e a partir da definição das características do sistema foi possível, com auxílio da ACV e apoio das normas de ACV e Pegada de Carbono, e uso do *software* Umberto, determinar a CFP de uma carga do sistema, bem como identificar os fatores de influência sobre a mesma e definir uma equação que define a pegada de carbono para o sistema considerado.

A identificação dos fatores de influência na CFP do sistema pode auxiliar no planejamento futuro do mesmo de modo a desdobrar ações que foquem na redução dos impactos causados pela atividade de transporte realizada.

Também observou-se que a massa (e o mesmo pode ser dito em relação ao volume) das cargas não tem grande influência sobre a pegada de carbono do sistema. Contudo, nos resultados das simulações pode-se observar que o método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida não considerou a variação no consumo de combustível que pode ser observada na prática quando o caminhão realiza o mesmo trajeto carregado *versus* vazio, afetando, assim, o impacto total do sistema, havendo, portanto, certa influência da massa na CFP do sistema.

Ainda, é necessário fazer algumas considerações a respeito da aplicação do método de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida e do uso da base de dados *ecoinvent v.3.3*. O método IPCC 2013 não é regionalizado, portanto não é possível levar em consideração aspectos locais, nem ao menos nacionais na contabilização dos impactos. Ademais, o uso de processos provenientes da base de dados *ecoinvent v.3.3* leva às mesmas limitações, a geografia utilizada foi *RoW*, não sendo possível considerar aspectos locais, regionais ou mesmo nacionais, visto que a base não conta com inventários sob o cenário brasileiro.

Sobretudo, a identificação da equação que governa a CFP do sistema estudado pode ser objeto de pesquisas futuras no que tange à inserção de tal informação em modelos/métodos de otimização multicritério visando a redução de impactos, bem como ser objeto de comparação com estudos similares. Ademais, estudos futuros podem

investigar a influência da escolha do método de avaliação de impacto para determinação da pegada de carbono a fim de observar as variações geradas por diferentes métodos.

## Agradecimentos

Este estudo foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

## Referências

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **ABNT ISO/TS 14067**: Gases de efeito estufa – Pegada de carbono de produtos – Requisitos e orientações sobre quantificação e comunicação. Brasil, 2015.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura. Brasil, 2009a.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e Orientações. Brasil, 2009b.

BALLOU, R.H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**: logística empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BERNARDI, A.; GIAROLA, S.; BEZZO, F. Optimizing the economics and the carbon and water footprints of bioethanol supply chains. **Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr**, v. 6, n. 6, p. 656-672, 2012.

BOCKEN, N.M.P; ALWOOD, J.M.; WILLEY, A.R.; KING, J.M.H. Development of a tool for rapidly assessing the implementation difficulty and emissions benefits of innovations. **Technovation**, v. 32, p. 19–31, 2012.

CHAABANE, A.; RAMUDHIN, A; PAQUET, M. Design of sustainable supply chains under the emission trading scheme. **International Journal of Production Economics**, v. 135, n. 1, p. 37-49, 2012.

ECOINVENT (Suíça). Allocation cut-off by classification. 2018a. **The system model "Allocation, cut-off by classification", or cut-off system model in short, is based on the Recycled Content, or Cut-off, approach.** Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html> >. Acesso em: 03 agosto 2018.

ECOINVENT (Suíça). What do the shortcuts, such as CH, RER, RoW and GLO mean? 2018b. **Methodology of ecoinvent 3.** Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/support/faqs/methodology-of-ecoinvent-3/what-do-the-shortcuts-such-as-ch-rer-row-and-glo-mean.html> >. Acesso em: 03 agosto 2018.

WEIDEMA, B. P.; BAUER, C.; HISCHIER, R.; MUTEL, C.; NEMECEK, T.; REINHARD, J.; VADENBO, C.O.; WERNET, G. **Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.** St. Galle: Swiss Centre For Life Cycle Inventories, 2013. 169 p. (3). Disponível em: <[https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline\\_ecoinvent\\_3\\_20130506.pdf](https://www.ecoinvent.org/files/dataqualityguideline_ecoinvent_3_20130506.pdf)>. Acesso em: 07 maio 2017.

GOULDSON, A.; SULLIVAN, R. Long-term corporate climate change targets: What could they deliver? **Environmental Science & Policy**, v. 27, n. 3, p. 1-10, 2013.

HENDRICKSON, C.T.; LAVE, L.B.; MATTHEWS, H.S. **Environmental Life Cycle Assessment of Goods and Services: An Input-Output Approach**. RFF Press, 260 p., 2006.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). **Climate Change 2007: Synthesis Report**. 4. ed. Geneva, 2008. 112 p.

KANNAN, D.; DIABAT, A.; ALREFAEI, M.; GOVINDAN, K.; YONG, G. A carbon footprint based reverse logistics network design model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 67, n. 10, p.75-79, 2012.

KOH, S. C. L.; GENOVESE, A.; ACQUAYE, A.A.; BARRAT, P.; RANA, N.; KUYLENSTIERNA, J.; GIBBS, D. Decarbonising product supply chains: design and development of an integrated evidence-based decision support system - the supply chain environmental analysis tool (SCEnAT). **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 7, p. 2092-2109, 2013.

MASULLO, A. Organic wastes management in a circular economy approach: Rebuilding the link between urban and rural areas. **Ecological Engineering**, v. 101, n. 4, p. 84–90, 2017.

MUNIZ, V.C.F. **Análise da Fundamentação da Avaliação do Ciclo de Vida Consequencial**. 2012. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

NETO, B.; DIAS, A. C.; MACHADO, M. Life cycle assessment of the supply chain of a Portuguese wine: from viticulture to distribution. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 18, n. 3, p. 590-602, 2013.

TANAKA, K.; BERNTSEN, T.; FUGLESTVEDT, J.S.; RYPDAL, K. Climate Effects of Emission Standards: The Case for Gasoline and Diesel Cars. **Environmental Science & Technology**, v. 46, n. 9, p. 5205-5213, 2012.

ZHAO, Y.; ERCAN, T.; TATARI, O. Life cycle based multi-criteria optimization for optimal allocation of commercial delivery truck fleet in the United States. **Sustainable Production and Consumption**, v. 8, n. 4, p. 18-31, 2016.