



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO, DE CIÊNCIAS EXATAS E EDUCAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENG. DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E COMPUTAÇÃO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Alexia Mara Tavares

**Aplicação de células fotovoltaicas para otimização da eficiência energética de veículos a combustão: uma análise sobre o impacto na redução da emissão de CO<sub>2</sub>**

Blumenau  
2024

Alexia Mara Tavares

**Aplicação de células fotovoltaicas para otimização da eficiência energética de veículos a combustão: uma análise sobre o impacto na redução da emissão de CO<sub>2</sub>**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico, de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação.

Orientadora: Dra. Caroline Rodrigues Vaz

Blumenau

2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tavares, Alexia Mara

Aplicação de células fotovoltaicas para otimização da eficiência energética de veículos a combustão : uma análise sobre o impacto na redução da emissão de CO<sub>2</sub> / Alexia Mara Tavares ; orientadora, Caroline Rodrigues Vaz, 2024.

102 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,  
2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Emissão de CO<sub>2</sub>. 3. Eficiência energética . 4. Veículos a combustão . 5. Película fotovoltaica. I. Vaz, Caroline Rodrigues . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Controle e Automação. III. Título.

Alexia Mara Tavares

**Aplicação de células fotovoltaicas para otimização da eficiência energética de veículos a combustão: uma análise sobre o impacto na redução da emissão de CO<sub>2</sub>**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Blumenau, 26 de janeiro de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Profa. Dra. Caroline Rodrigues Vaz  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Profa. Dra. Fabiana Raupp  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Profa. Ms. Tainara Volan  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adriano e Jussara, por serem minha fonte de apoio e inspiração. Sem o amor, encorajamento e apoio de vocês, nada seria possível.

À minha avó, Cleide, por todo carinho e aconchego que me moldaram. Seu exemplo de vida e valores, sempre me guiaram nesta jornada acadêmica.

À minha professora orientadora, Caroline Vaz, por ser tão humana e impecável na sua orientação. Obrigada por ser tão inspiradora, por ter me apoiado e me incentivado em todos os momentos.

Aos meus professores, quero expressar minha eterna gratidão por sempre compartilharem os seus conhecimentos e experiências. Cada aula, cada conselho, cada mentoria, contribuiu infinitamente para o meu crescimento e aprendizado.

Aos meus amigos e colegas, por sempre compartilharem todos os desafios e conquistas e terem tornado minha jornada acadêmica ainda mais incrível e divertida.

À minha família, orientadora, professores e colegas, meu mais sincero obrigado! Vocês foram fundamentais na construção dessa trajetória.

## RESUMO

Em um cenário global onde as mudanças climáticas se tornaram uma realidade inegável, a urgência de adotar medidas sustentáveis é cada vez mais evidente. A necessidade de alterar nossos padrões de emissão de poluentes é crítica para mitigar os impactos ambientais adversos. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é analisar os impactos positivos de uma inovação específica no setor de transporte, um dos principais contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa. A inovação proposta consiste na instalação de uma película fotovoltaica na carroceria de veículos utilitários movidos a combustão. Utilizando o método do protocolo *Greenhouse gas* para cálculo de inventário de carbono, este estudo utiliza da metodologia de estudo de caso para quantificar os benefícios da aplicação tanto em termos de redução de emissões quanto em eficiência energética. A comparação da pegada de carbono entre veículos com e sem a aplicação da película revelou um ganho de 2% na redução das emissões, evitando a emissão de 496,5 quilos de dióxido de carbono na atmosfera. Relacionado a eficiência energética, foi observado um aumento de 2,24%, percorrendo 0,36 quilômetros a mais por litro de combustível consumido, resultando na prevenção da queima de 270 litros de combustível ao longo do ciclo de vida do produto. Considerando a aplicação da película fotovoltaica de fábrica em uma frota anual do veículo em estudo, seriam evitadas as emissões de 4.896.344 quilos de dióxido de carbono na atmosfera. Estes resultados são promissores, indicando que a aplicação da película fotovoltaica pode ser uma estratégia eficaz para reduzir as emissões de carbono no setor de transporte. A conclusão do estudo sugere que mesmo pequenas melhorias em eficiência energética e redução de emissões podem ter um impacto significativo quando aplicadas em larga escala. Para o futuro, recomenda-se a adoção de tais tecnologias em uma escala mais ampla, incentivando a pesquisa e desenvolvimento contínuo de soluções inovadoras para combater as mudanças climáticas. A implementação dessas tecnologias não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também oferece um caminho para a transição gradual para fontes de energia mais limpas e renováveis no setor de transporte.

**Palavras-chave:** Películas Fotovoltaicas; Veículos a Combustão; Eficiência Energética; GEE

## ABSTRACT

In a global scenario where climate change has become an undeniable reality, the urgency to adopt sustainable measures is increasingly evident. The need to change our pollutant emission patterns is critical to mitigate adverse environmental impacts. In this context, the purpose of this study is to analyze the positive impacts of a specific innovation in the transportation sector, one of the major contributors to greenhouse gas emissions. The proposed innovation involves the installation of CIGS photovoltaic film on the body of combustion engine utility vehicles. Using the Greenhouse Gas protocol method for carbon inventory calculation, this study quantifies the benefits of the application in terms of both emission reduction and energy efficiency. The comparison between vehicles with and without the film application reveals a 2% gain in emission reduction and a 2,24% increase in energy efficiency, resulting in the prevention of approximately 496.5 kilograms of carbon emissions into the atmosphere over the product's life cycle. These results are promising, indicating that the application of photovoltaic film can be an effective strategy to reduce carbon emissions in the transportation sector. The study's conclusion suggests that even minor improvements in energy efficiency and emission reduction can have a significant impact when applied on a large scale. For the future, it is recommended to adopt such technologies on a broader scale, encouraging ongoing research and development of innovative solutions to combat climate change. The implementation of these technologies not only contributes to environmental sustainability but also provides a path for the gradual transition to cleaner and renewable energy sources in the transportation sector.

**Keywords:** Photovoltaic Film; Combustion Vehicles; Energy Efficiency; GEE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mudança na temperatura da superfície global ao longo das décadas. . .	15
Figura 2 – Eco sistemas já impactados pelo aquecimento global. . . . .	16
Figura 3 – Sistemas humanos já impactados pelo aquecimento global. . . . .	16
Figura 4 – Mudança na temperatura da superfície global. . . . .	17
Figura 5 – Contribuições ao aquecimento de 2010-2019 com relação a 1850-1900. .	18
Figura 6 – Concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera. . . . .	19
Figura 7 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C. . . . .	19
Figura 8 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C. . . . .	20
Figura 9 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C. . . . .	21
Figura 10 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C. . . . .	22
Figura 11 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C . . . . .	23
Figura 12 – Etapas do Ciclo Otto. . . . .	28
Figura 13 – Funcionamento básico do sistema de arrefecimento. . . . .	29
Figura 14 – Sistema de alimentação. . . . .	30
Figura 15 – Funcionamento básico do sistema de ignição. . . . .	31
Figura 16 – Sistema de admissão de ar integrado. . . . .	32
Figura 17 – Sistema de partida. . . . .	34
Figura 18 – Sistema de partida. . . . .	35
Figura 19 – Catalisador. . . . .	36
Figura 20 – PROCONVE - Veículos Leves. . . . .	39
Figura 21 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia. . . . .	40
Figura 22 – Eixo 01 - Rota 2030. . . . .	42
Figura 23 – Capacidade global de energia solar instalada entre 2002 e 2021. . . .	46
Figura 24 – Diferença entre as células de silício monocristalino e policristalino. . . .	48
Figura 25 – Representação da forma construtiva de uma célula de silício amorfo em camadas. . . . .	49
Figura 26 – Representação da forma construtiva de uma célula de telureto de cádmio.	49
Figura 27 – Representação da forma construtiva de uma célula CIGS. . . . .	50
Figura 28 – Células fotovoltaicas de terceira geração. . . . .	51
Figura 29 – Protocolo GHG para cálculo da pegada de carbono de um produto. . .	55
Figura 30 – Dimensões da Película Flex60. . . . .	65
Figura 31 – Esquema da aplicação. . . . .	66
Figura 32 – Fluxograma do ciclo de vida do veículo. . . . .	67
Figura 33 – Fluxograma do ciclo de vida do veículo com a aplicação da película fotovoltaica. . . . .	68
Figura 34 – Interface <i>Google Maps</i> . . . . .	74
Figura 35 – Interface <i>ShipAtlas</i> . . . . .	74

Figura 36 – Fluxo de funcionamento do software Green. . . . .	75
Figura 37 – Rota 01. . . . .	77
Figura 38 – Rota 02. . . . .	78
Figura 39 – Calculo Rota 02. . . . .	79
Figura 40 – Rota 03. . . . .	79
Figura 41 – SOC da bateria ciclo FTP sem aplicação. . . . .	81
Figura 42 – Acionamento do alternador ciclo FTP sem aplicação. . . . .	81
Figura 43 – Velocidade do veículo no ciclo FTP sem aplicação. . . . .	82
Figura 44 – SOC da bateria ciclo HWFT sem aplicação. . . . .	83
Figura 45 – Acionamento do alternador ciclo HWFT sem aplicação. . . . .	83
Figura 46 – Velocidade do veículo no ciclo HWFT sem aplicação. . . . .	84
Figura 47 – SOC da bateria ciclo FTP com aplicação. . . . .	84
Figura 48 – Acionamento do alternador ciclo FTP com aplicação. . . . .	85
Figura 49 – Velocidade do veículo no ciclo FTP com aplicação. . . . .	85
Figura 50 – SOC da bateria ciclo HWFT com aplicação. . . . .	86
Figura 51 – Acionamento do alternador ciclo HWFT com aplicação. . . . .	86
Figura 52 – Velocidade do veículo no ciclo HWFT com aplicação. . . . .	87

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estimativa do consumo aparente de combustíveis no segmento rodoviário no estado de São Paulo de 2015 a 2021. . . . .	43
Quadro 2 – Propriedades da gasolina. . . . .	44
Quadro 3 – Propriedades do etanol. . . . .	45
Quadro 4 – PAS 2050 - Requisitos e Especificações. . . . .	54
Quadro 5 – Objetivos listados no protocolo GHG. . . . .	56
Quadro 6 – Requisitos e especificações - Protocolo GHG. . . . .	59
Quadro 7 – Aspectos Gerais ISO 14067. . . . .	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Metas Inovar Auto . . . . .	41
Tabela 2 – Especificações do veículo. . . . .	63
Tabela 3 – Informações técnicas <i>Sunflare</i> Flex60. . . . .	65
Tabela 4 – Parâmetros Ciclo FTP-75. . . . .	80
Tabela 5 – Parâmetros HWFT. . . . .	80
Tabela 6 – Cálculo das emissões totais. . . . .	88
Tabela 7 – Cálculo da eficiência energética. . . . .	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACV	Análise do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida
AR6	Sexto Relatório de Avaliação do IPCC
BSI	<i>British Standards</i>
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVT	Transmissão Variável Contínua
ECU	Unidade de Controle Eletrônico
FTP-75	Federal Test Procedure
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHG	Protocolo de Gases do Efeito Estufa
HWFET	Highway Fuel Economy Test
ICV	Inventário do Ciclo de Vida
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPCC	Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
IPI	Imposto sobre Produtos Industrializados
ISO	Organização Internacional de Normalização
LSFO	Óleo Combustível com Baixo Teor de Enxofre
MAPA	Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCI	Motor de Combustão Interna
ONGs	Organizações Não Governamentais
ONU	Organização das Nações Unidas
PBEV	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
PPM	Partes Por Milhão
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
SOC	<i>State of Charge</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO . . . . .</b>	<b>14</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA . . . . .	14
1.2	PROBLEMÁTICA DA PESQUISA . . . . .	20
1.3	OBJETIVOS . . . . .	22
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral . . . . .</b>	<b>23</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos . . . . .</b>	<b>23</b>
1.4	JUSTIFICATIVA DO TEMA . . . . .	24
1.5	DELIMITAÇÃO DO TRABALHO . . . . .	25
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO . . . . .	25
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1	VEÍCULOS A COMBUSTÃO . . . . .	27
<b>2.1.1</b>	<b>Funcionamento dos veículos a combustão . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1.1.1	<i>Sistema de Arrefecimento . . . . .</i>	28
2.1.1.2	<i>Sistema de Alimentação de Combustível . . . . .</i>	29
2.1.1.3	<i>Sistema de Ignição . . . . .</i>	31
2.1.1.4	<i>Sistema de Admissão de Ar . . . . .</i>	32
2.1.1.5	<i>Sistema de Partida . . . . .</i>	33
2.1.1.6	<i>Sistema de Alimentação Elétrica . . . . .</i>	33
2.1.1.7	<i>Sistema de Catalisação . . . . .</i>	35
2.1.1.8	<i>Sistema de Transmissão . . . . .</i>	37
<b>2.1.2</b>	<b>Emissão de poluentes por automóveis . . . . .</b>	<b>38</b>
2.1.2.1	<i>Legislação e políticas públicas no Brasil . . . . .</i>	38
2.1.2.1.1	Programa de Controle de Emissões Veiculares . . . . .	38
2.1.2.1.2	Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular . . . . .	39
2.1.2.1.3	Inovar Auto . . . . .	40
2.1.2.1.4	Rota 2030 . . . . .	41
2.1.2.2	<i>Emissão por tipo de combustível utilizado . . . . .</i>	42
2.1.2.2.1	Gasolina . . . . .	42
2.1.2.2.2	Etanol . . . . .	44
2.2	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS . . . . .	45
<b>2.2.1</b>	<b>Primeira geração . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Segunda geração . . . . .</b>	<b>47</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Terceira geração . . . . .</b>	<b>50</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Irradiação solar no Brasil . . . . .</b>	<b>51</b>
2.3	PEGADA DE CARBONO . . . . .	53
<b>2.3.1</b>	<b>PAS 2050 . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Protocolo GHG . . . . .</b>	<b>55</b>

2.3.3	ISO 14067 . . . . .	58
2.3.4	Análise do Ciclo de Vida . . . . .	60
3	<b>METODOLOGIA . . . . .</b>	<b>62</b>
3.1	DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS . . . . .	62
3.2	REVISÃO DE PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS . . . . .	62
3.3	DEFINIÇÃO DE ESCOPO . . . . .	63
3.3.1	<b>Definição do produto . . . . .</b>	<b>63</b>
3.3.1.1	<i>Veículo . . . . .</i>	<i>63</i>
3.3.1.2	<i>Película fotovoltaica . . . . .</i>	<i>64</i>
3.3.1.3	<i>Aplicação da película fotovoltaica na carroceria do veículo . . . . .</i>	<i>66</i>
3.4	DEFINIÇÃO DE LIMITES . . . . .	66
3.5	COLETA DE DADOS . . . . .	69
3.6	AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS . . . . .	71
3.7	CÁLCULO DE RESULTADOS . . . . .	72
3.8	SOFTWARES UTILIZADOS . . . . .	73
3.8.1	<i>Google Maps . . . . .</i>	<i>73</i>
3.8.2	<i>ShipAtlas . . . . .</i>	<i>73</i>
3.8.3	<i>Green . . . . .</i>	<i>74</i>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .</b>	<b>76</b>
4.1	CÁLCULO DAS EMISSÕES DE TRANSPORTE . . . . .	76
4.1.1	<b>Rota terrestre entre a fábrica e o porto de Los Angeles . . . . .</b>	<b>76</b>
4.1.2	<b>Rota marítima entre o porto de Los Angeles e o porto de Paranaguá . . . . .</b>	<b>77</b>
4.1.3	<b>Rota terrestre entre o porto de Paranaguá e a concessionária . . . . .</b>	<b>78</b>
4.2	CÁLCULO DAS EMISSÕES POR USO DO VEÍCULO . . . . .	80
4.2.1	<b>Veículo sem a aplicação da película fotovoltaica . . . . .</b>	<b>80</b>
4.2.2	<b>Veículo com a aplicação da película fotovoltaica . . . . .</b>	<b>82</b>
4.3	CÁLCULO DOS RESULTADOS FINAIS . . . . .	87
4.3.1	<b>Emissões totais . . . . .</b>	<b>87</b>
4.3.2	<b>Consumo de combustível e eficiência energética . . . . .</b>	<b>89</b>
5	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>92</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>96</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é realizada uma contextualização do tema abordado neste trabalho, além de expor a problemática de pesquisa. Também são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos, bem como a justificativa e a estrutura da pesquisa.

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

Em 1824 o matemático francês Joseph Fourier fez a primeira alusão ao que chamamos hoje de efeito estufa. Ao realizar um balanço entre a energia recebida e a energia emitida pela Terra, Fourier notou que a temperatura terrestre deveria ser mais baixa do que é. O matemático especulou então, que a atmosfera poderia reter calor, como uma estufa (ZULFEQUAR AHMAD KHAN, 2017). Anos depois, em 1896, o cientista sueco Svante August Arrhenius cunhou o termo efeito estufa, ao publicar um estudo relacionando a concentração de dióxido de carbono na atmosfera e a temperatura na superfície da Terra (STANNARD, 2018).

Apesar de ser comumente associado a catástrofes naturais e mudanças climáticas, por sua associação ao aquecimento global, o efeito estufa é um efeito natural e indispensável para manter as condições favoráveis à vida na Terra (FUMIÃ, 2022). O efeito estufa mantém a temperatura média do planeta em cerca de 14°C, sem a retenção de energia proporcionada pelo efeito estufa a temperatura média da Terra seria de -19°C, 33°C mais fria (KWEKU *et al.*, 2018).

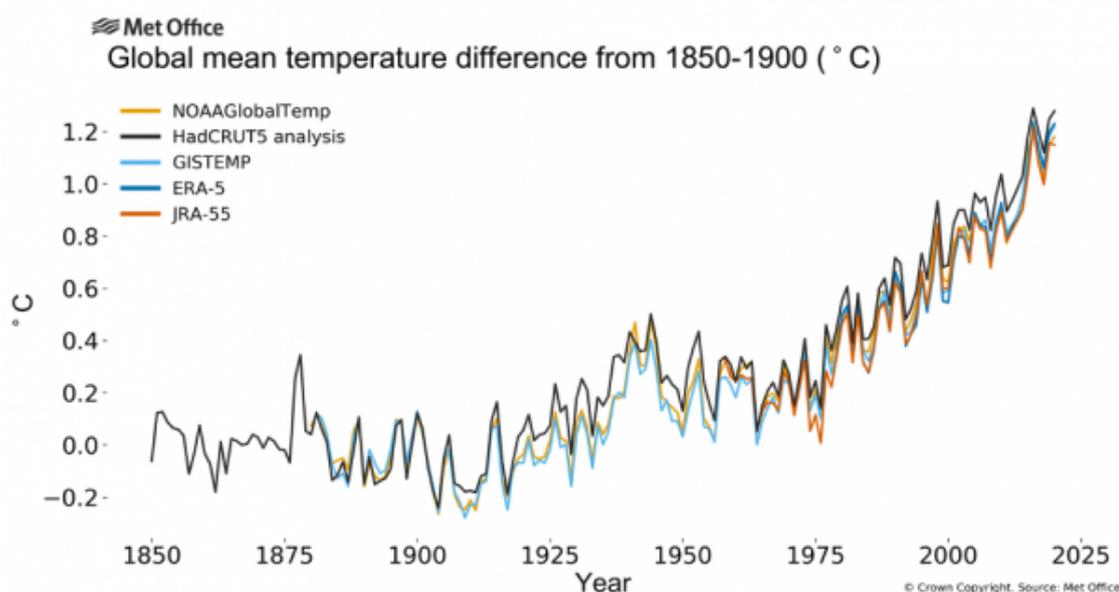
Essa retenção de calor é proporcionada graças a concentração dos gases do efeito estufa (GEE), na atmosfera. Os GEEs, diferente dos outros gases presentes na atmosfera, possuem uma estrutura complexa que permite a absorção de calor, mantendo a superfície da Terra aquecida (NASA - ESCT, 2023). Os principais GEEs são o dióxido de carbono, o vapor de água, o metano e o óxido nitroso. Quanto maior a concentração desses gases na atmosfera, maior será a quantidade de calor retida na atmosfera e, conseqüentemente, maior a temperatura na Terra (UCAR, 2023).

O efeito estufa combinado com o aumento crescente da concentração de GEEs na atmosfera causa o chamado aquecimento global (SHAHZAD, 2015). O aquecimento global é um fenômeno climático que, como o próprio nome sugere, provoca um aumento da temperatura média na superfície global (SILVA; PAULA, 2015). O gráfico apresentado na figura 1 mostra o aumento médio da temperatura global causado pelo aquecimento global ao longo das últimas décadas.

Todas as últimas quatro décadas foram mais quentes do que qualquer outra década que a precedeu desde 1850 (IPCC, 2019). O aquecimento global vivenciado ao longo deste século (XXI) será, provavelmente, o responsável pelo maior desequilíbrio antropogênico provocado nos sistemas naturais já vivenciado (DEUTSCH *et al.*, 2008). E os primeiros sinais desse desequilíbrio já são vivenciados ao longo do mundo todo, com temperaturas

mais elevadas, ondas de calor, tempestades mais severas, secas, inundações de áreas urbanas, aquecimento dos oceanos, derretimento de geleiras e quedas na produtividade da pesca e da agricultura (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2022). Além disso, o aquecimento global é apontado também como causador de uma das maiores extinções em massa já vivenciadas na Terra, causando a extinção de dezenas de espécies que não conseguem se adaptar as ondas de calor e secas prolongadas, e deixando outras dezenas de espécies em risco (WAGLER, 2018). O sexto relatório do IPCC ilustra os impactos já observados nos eco sistemas e nos sistemas humanos, como mostrado nas figuras 2 e 3.

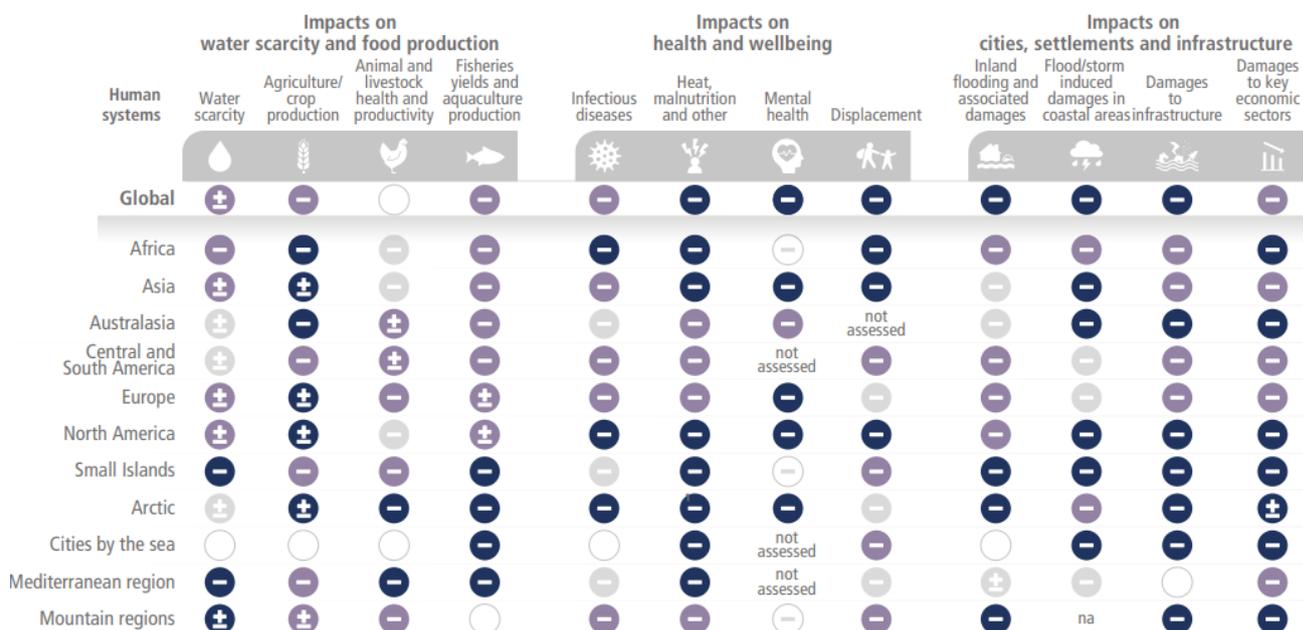
Figura 1 – Mudança na temperatura da superfície global ao longo das décadas.



Fonte: MetOffice, 2022.

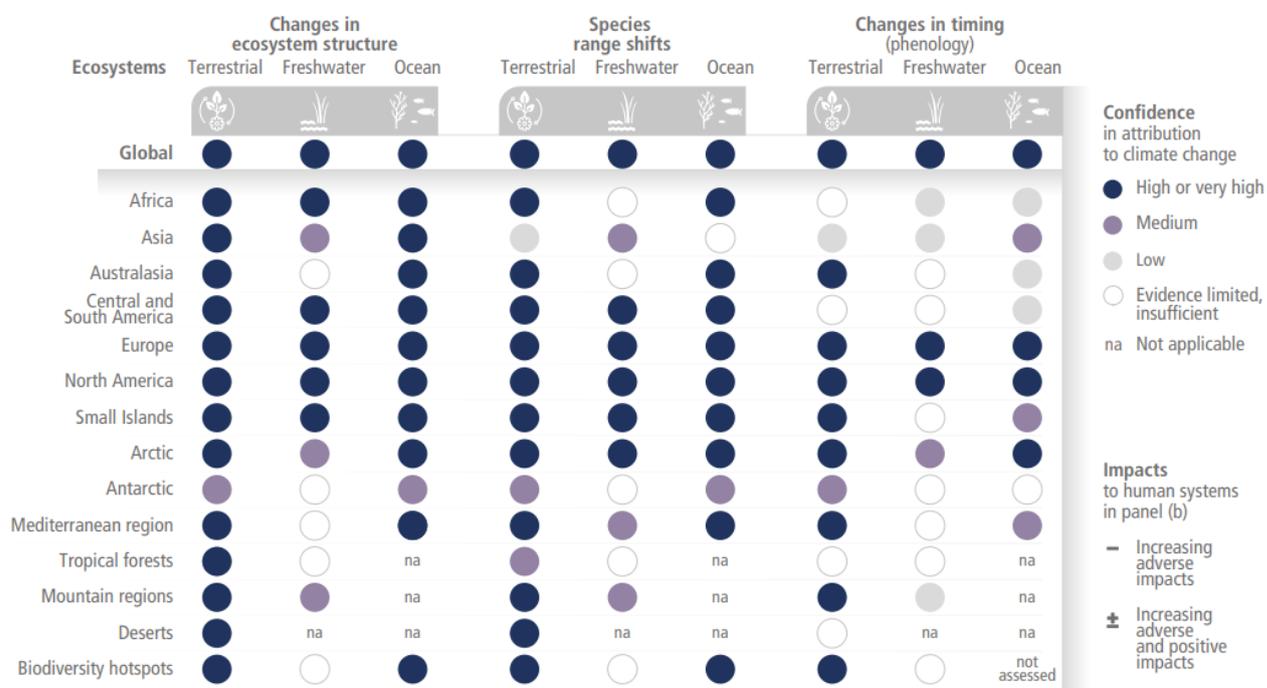
O painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC) aponta a emissão de GEEs por atividades humanas como sendo a responsável pelo aumento crescente da temperatura média global vivenciado nas últimas décadas e, conseqüentemente, responsável pelo impacto ambiental envolvido (IPCC, 2019). O gráfico apresentado na figura 4 compara a mudança na temperatura da superfície global (média anual) observada e simulada considerando fatores humanos e naturais e apenas fatores naturais. O sexto relatório do IPCC ilustra ainda as contribuições para as mudanças de temperatura dos componentes individuais da influência humana, incluindo emissões de GEEs, aerossóis e seus precursores; mudanças no uso da terra; e rastros de condensação da aviação, como mostra a figura 5 (IPCC, 2019). De acordo com o gráfico da figura 5, o CO<sub>2</sub> foi responsável, sozinho, pelo aquecimento de mais de 0,5°C na temperatura média da superfície global no período analisado.

Figura 2 – Eco sistemas já impactados pelo aquecimento global.



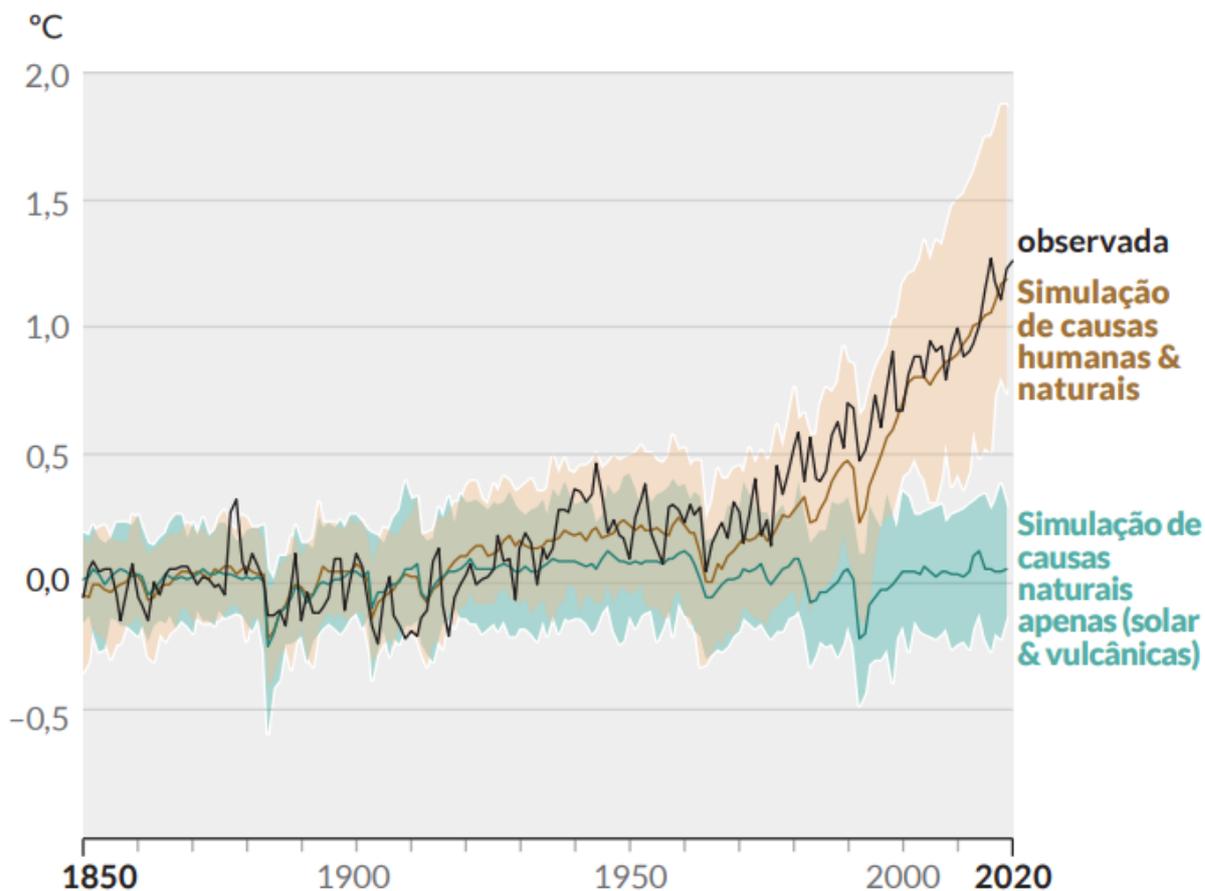
Fonte: Sexto Relatório do IPCC, 2017.

Figura 3 – Sistemas humanos já impactados pelo aquecimento global.



Fonte: Sexto Relatório do IPCC, 2017.

Figura 4 – Mudança na temperatura da superfície global.

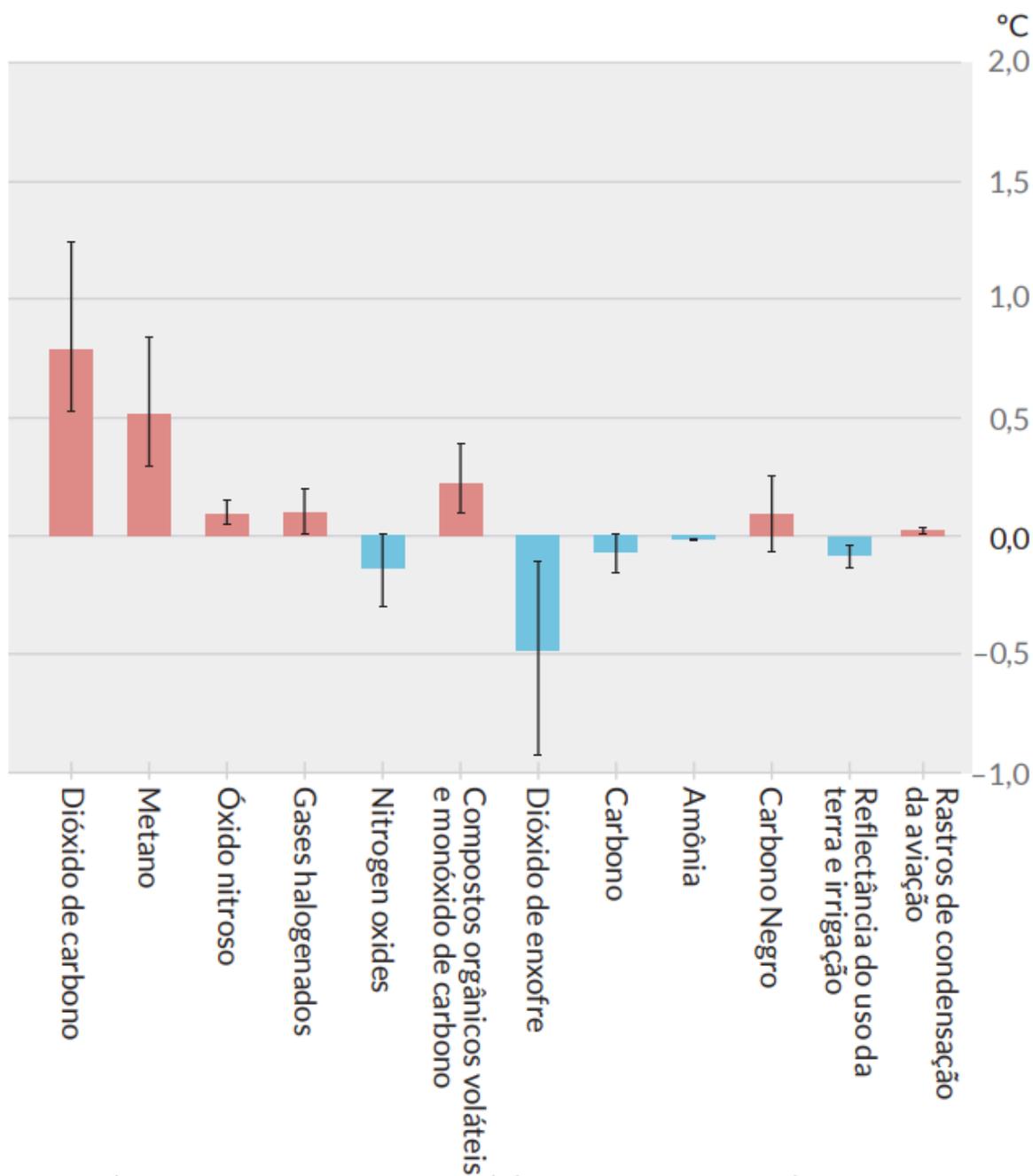


Fonte: Sexto Relatório do IPCC, 2017.

A grande contribuição do CO<sub>2</sub> para o aquecimento global pode ser explicada pelas concentrações recordes de CO<sub>2</sub> na atmosfera vivenciadas nos últimos anos. Seguindo uma trajetória ascendente clara, como demonstrado na figura 6, a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera aumentou em cerca de 136 partes por milhão (PPM) desde 1970, saindo de uma concentração de 278 ppm no período pré industrial para uma concentração de mais de 414 ppm em 2021 (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2022)<sup>6</sup>. A taxa de aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, no período de 2020 para 2021, foi a maior da última década (MORICE *et al.*, 2021).

O Sexto Relatório de Avaliação (AR6) IPCC, que trata da mitigação do aquecimento global, indica que, se as emissões de CO<sub>2</sub> seguirem a mesma taxa de crescimento observada nos últimos anos, a superfície da Terra atingirá 1,5°C de aquecimento já no início da década de 2030, podendo ultrapassar 3°C ainda neste século. Um aquecimento acima de 1,5°C aumenta o impacto aos eco sistemas e sistemas humanos (figuras 7 e 8), trazendo danos possivelmente irreversíveis. Por esse motivo, o Acordo de Paris visa conter o aquecimento global em 1,5°C até o final do século.

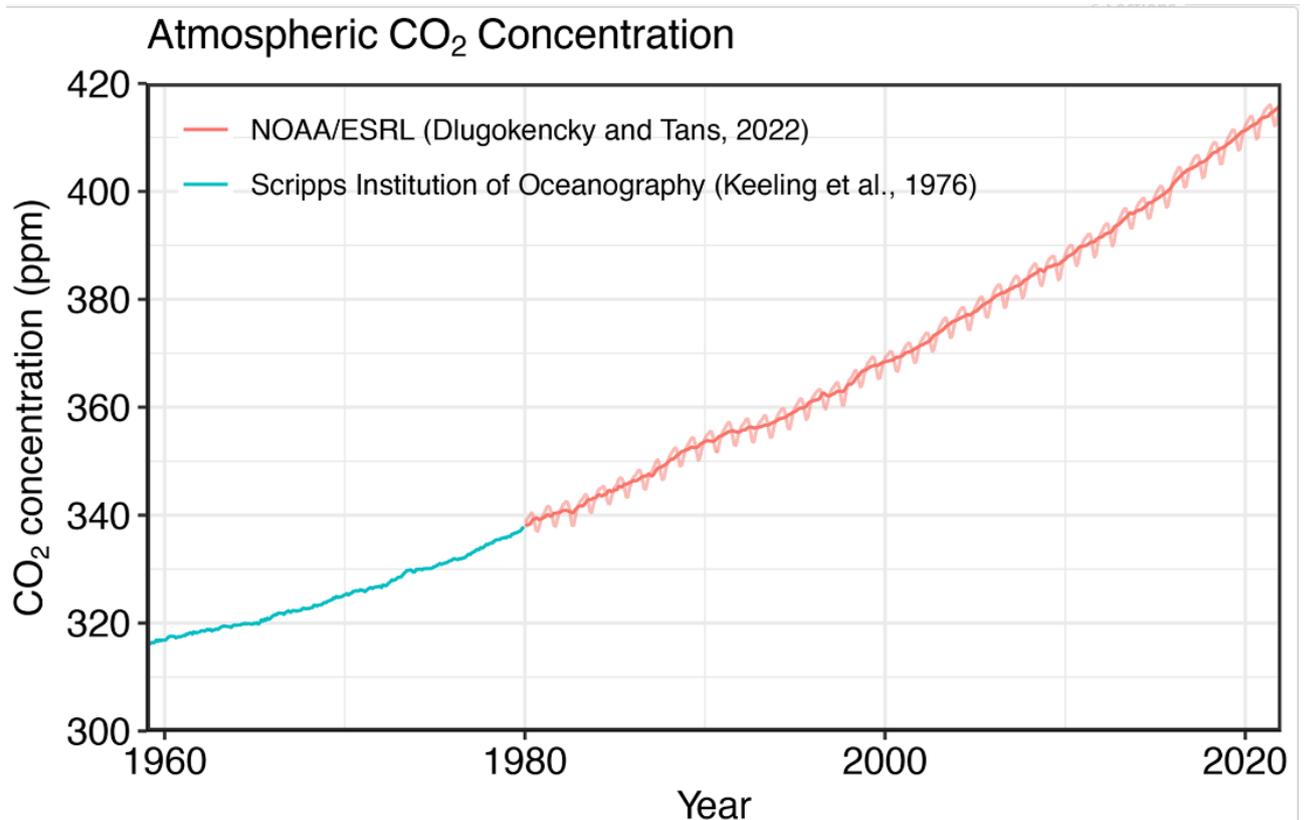
Figura 5 – Contribuições ao aquecimento de 2010-2019 com relação a 1850-1900.



Fonte: Sexto Relatório do IPCC, 2017.

Para limitar o aquecimento global a uma taxa de  $1,5^{\circ}\text{C}$ , comparado ao período pré industrial, é necessário reduzir em torno de 45% as emissões de  $\text{CO}_2$  até 2030 e zerar as emissões em meados de 2050 (IPCC, 2018). De acordo com o relatório especial do IPCC, é possível atingir essas taxas de redução e conter o aquecimento dentro da meta estipulada no acordo de Paris, mas para isso serão necessárias transições imediatas e de longo alcance em todos os setores envolvidos nas emissões.

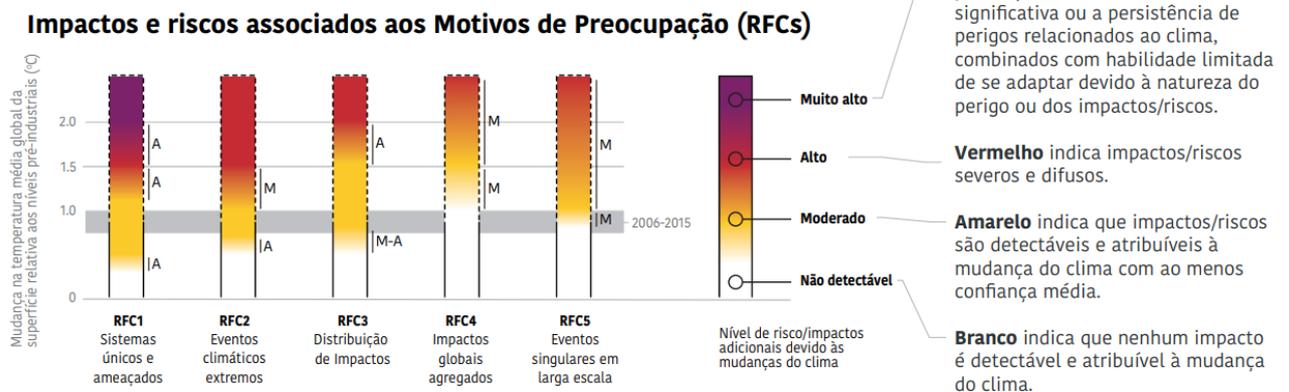
Figura 6 – Concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.



Fonte: Global Carbon Budget, 2022.

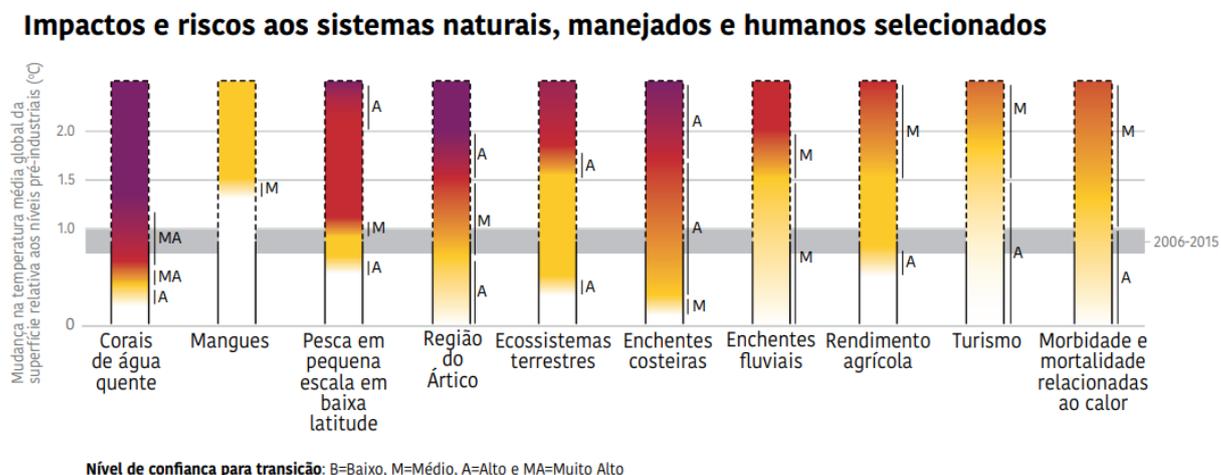
Figura 7 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C.

Cinco Motivos de Preocupação (RFCs) ilustram os impactos e riscos de níveis diferentes de aquecimento global para pessoas, economias e ecossistemas através de setores e regiões.



Fonte: Relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C, 2018.

Figura 8 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C.



Fonte: Relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5°C, 2018.

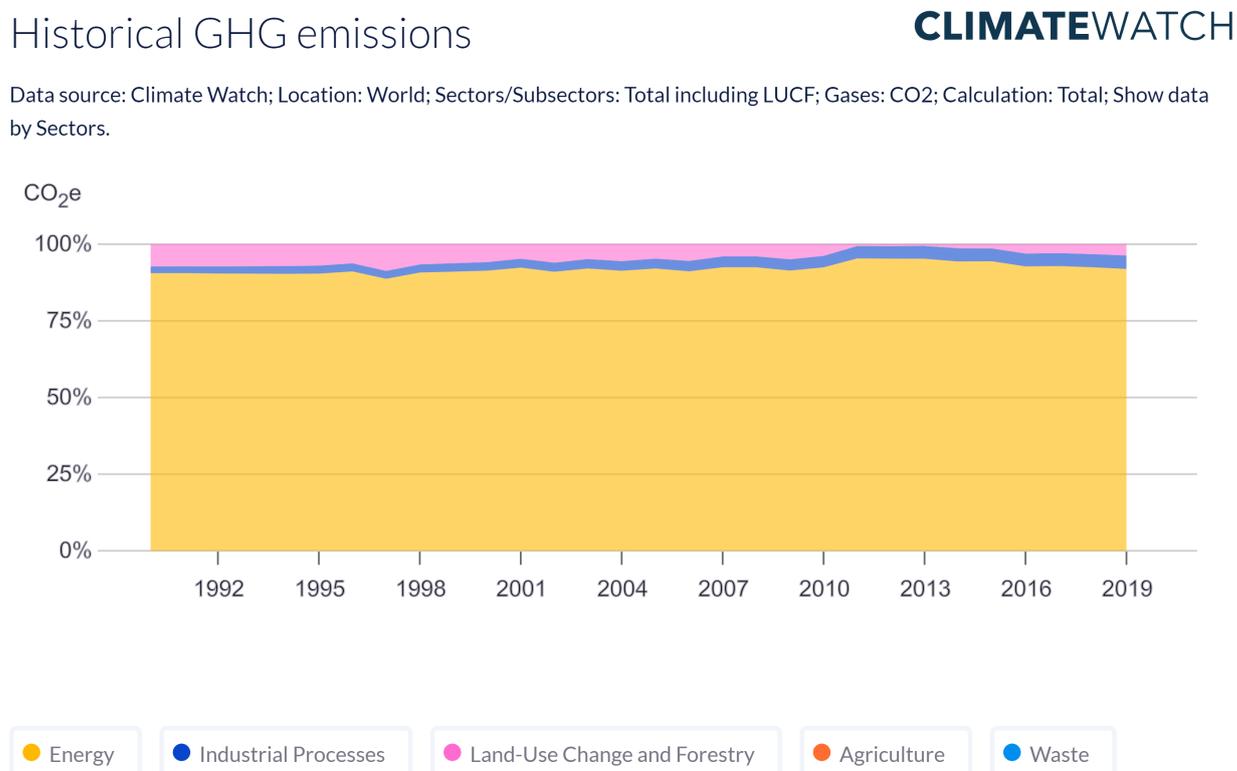
Para fornecer uma compreensão mais aprofundada e detalhada, a próxima seção desta pesquisa se dedicará a explorar e elucidar a problemática central do estudo. Este segmento irá detalhar os desafios específicos, as questões-chave e as nuances associadas ao tema abordado, estabelecendo assim uma base sólida para a análise subsequente.

## 1.2 PROBLEMÁTICA DA PESQUISA

Analisando as emissões de CO<sub>2</sub> ao longo das últimas décadas, o setor de energia foi o responsável por mais de 90% das emissões em todo mundo durante todos os anos analisados, chegando a contribuir com 33,90 Gt (giga-toneladas) de CO<sub>2</sub> na atmosfera no ano de 2019 (figura 9). Analisando as emissões apenas no Brasil, o cenário muda mas o setor de energia continua sendo o maior poluente, sendo responsável por 49% das emissões de CO<sub>2</sub> no Brasil em 2019 (figura 10) (FRIEDLINGSTEIN *et al.*, 2022).

O setor de energia representa as emissões geradas pelo uso de energia e é subdividido em 6 subsetores: eletricidade e aquecimento; construção; manufatura; transporte; combustão de outros combustíveis e emissões fugitivas. No Brasil, o subsetor de transportes foi o subsetor mais poluente nas últimas décadas, sendo responsável por mais de 40% de todas as emissões de CO<sub>2</sub> do setor de energia (figura 11). Os carros de passeio são os maiores poluidores, por possuírem uma frota elevada, estima-se que contribuam com cerca de 161,9 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas por ano, quase 50% das emissões do subsetor no Brasil (ANFAVEA, 2021).

Figura 9 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C.

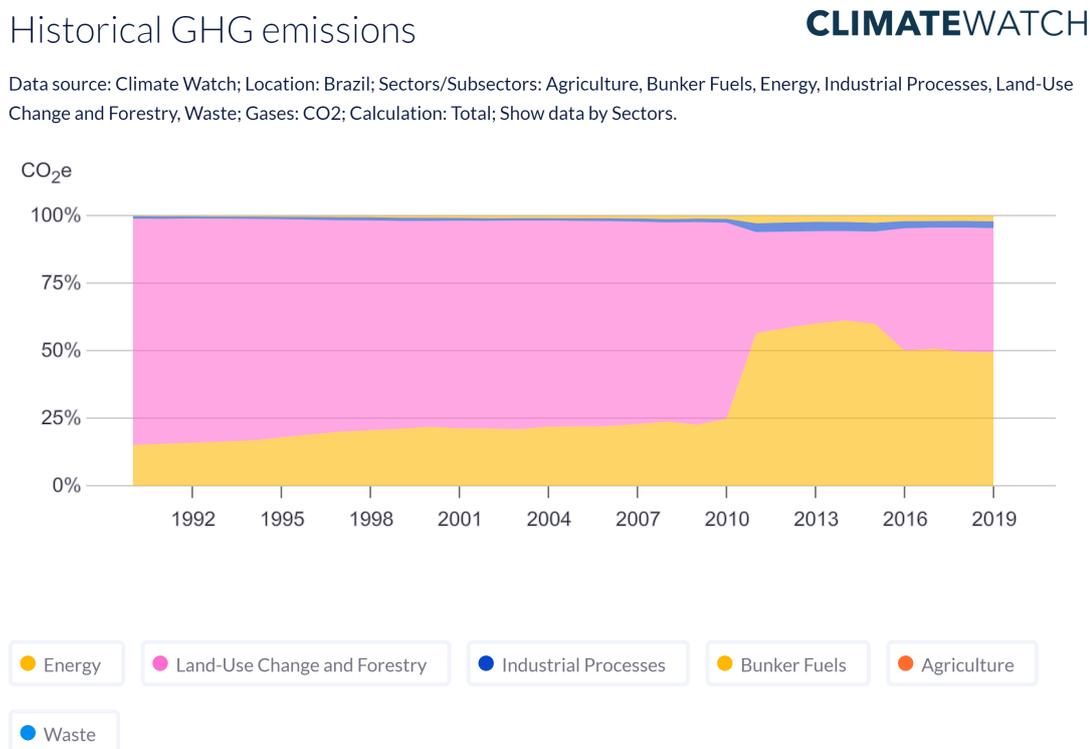


Fonte: *Global Carbon Budget, 2022*.

Analisando os números, fica claro que para reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e conter o aquecimento global, é imprescindível investir em soluções no setor de transportes brasileiro, especialmente nos carros de passeio. A difusão de veículos elétricos é uma excelente alternativa para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> por veículos de passeio mas ainda apresenta grande resistência no mercado brasileiro por conta dos altos custos, da baixa autonomia e da não existência de uma infraestrutura de recarga (CORDEIRO; LOSEKANN, 2018). O processo de popularização e difusão da mobilidade elétrica no Brasil provavelmente se estenderá por décadas, enquanto isso é preciso reduzir e controlar as emissões dos veículos circulantes a combustão com soluções de aplicação imediata.

Para reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> da frota de veículos a combustão já em circulação é necessário investir em soluções que aumentem a eficiência energética desses veículos. A eficiência energética dos veículos a combustão desempenha um papel crucial na quantidade de CO<sub>2</sub> liberada para a atmosfera durante sua operação, veículos mais eficientes consomem menos combustível para percorrer a mesma distância, resultando em menores emissões de CO<sub>2</sub> por quilômetro. Vários sistemas auxiliares de um veículo podem influenciar a

Figura 10 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C.



Fonte: *Global Carbon Budget, 2022.*

sua eficiência energética, investir em melhorias e adaptações nesses sistemas periféricos é uma alternativa para obter ganhos em eficiência energética. A aplicação de películas fotovoltaicas em automóveis a combustão pode ser uma alternativa viável de adaptação do sistema de alimentação elétrica para aumentar a eficiência energética e consequentemente reduzir as emissões.

Desta forma, a pergunta de pesquisa deste trabalho deu-se: "Como a implementação de células fotovoltaicas em veículos a combustão afeta a eficiência energética desses veículos e, consequentemente, qual é o impacto quantificável dessa tecnologia na redução das emissões de CO<sub>2</sub> no contexto do transporte urbano?"

### 1.3 OBJETIVOS

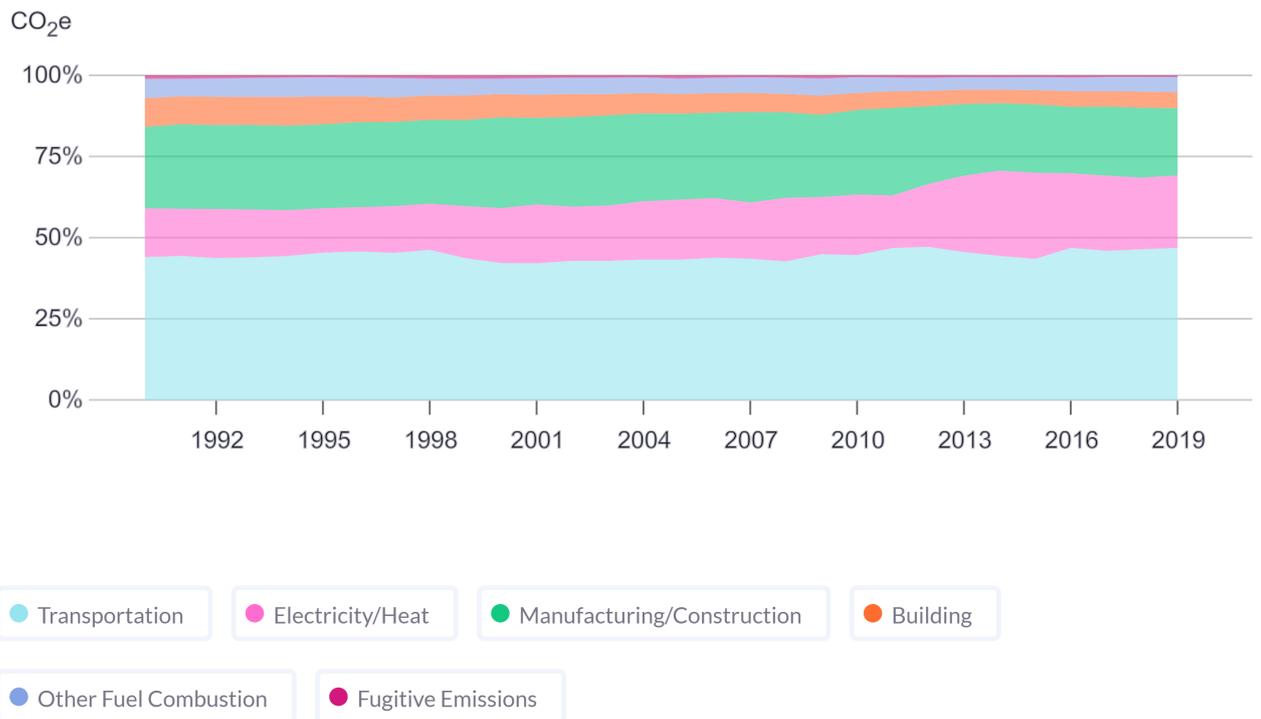
Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Figura 11 – Impactos e riscos do aquecimento global entre 1,5 e 2°C

## Historical GHG emissions

**CLIMATEWATCH**

Data source: Climate Watch; Location: Brazil; Sectors/Subsectors: Building, Electricity/Heat, Fugitive Emissions, Manufacturing/Construction, Other Fuel Combustion, Transportation; Gases: CO<sub>2</sub>; Calculation: Total; Show data by Sectors.



Fonte: *Global Carbon Budget, 2022*.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto ambiental da redução da emissão de CO<sub>2</sub> por meio do aumento da eficiência energética de veículos a combustão, utilizando células fotovoltaicas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Identificar a eficiência energética dos veículos a combustão com aplicação de células fotovoltaicas;
- Estimar o ganho em eficiência energética dos veículos a combustão com a aplicação de células fotovoltaicas em comparação aos veículos sem a aplicação;
- Quantificar a redução de emissão de CO<sub>2</sub> obtida com a aplicação das células fotovoltaicas se comparado a veículos sem a aplicação;
- Avaliar o impacto da redução da emissão de CO<sub>2</sub> para pegada de carbono.

## 1.4 JUSTIFICATIVA DO TEMA

É indiscutível que, diante do esforço global para mitigar as emissões de GEEs e atenuar o avanço do aquecimento global, o setor de transportes emerge como um alvo crítico para ações ambientais. Conforme apontado por Lawson *et al* (2018), este setor é um dos principais contribuintes para os danos ambientais. Neste contexto, veículos elétricos surgem como uma alternativa promissora aos veículos a combustão, beneficiando-se da evolução tecnológica em baterias e geração de energia em larga escala. No entanto, os veículos elétricos enfrentam desafios significativos, como preços elevados e autonomia limitada, o que restringe sua disseminação, especialmente em países em desenvolvimento.

Em 2020, por exemplo, veículos totalmente elétricos representavam apenas 7% das vendas no mercado brasileiro, com a falta de infraestrutura de carregamento adequada sendo um obstáculo adicional à eletrificação da frota no país (CENÁRIO SOLAR, s.d.).

De acordo com estudos da ANFAVEA, mesmo nos cenários mais otimistas, a participação de veículos elétricos ou híbridos na frota brasileira não ultrapassaria 18% até 2035. Essa projeção sugere que a eletrificação da frota ocorrerá de forma gradual, com um aumento significativo previsto somente a partir de 2030 (ANFAVEA, 2021).

Diante deste cenário e do alerta do último relatório do IPCC, que ressalta a necessidade de reduzir as emissões de GEEs nesta década para limitar o aquecimento global a 1,5°C, torna-se urgente investir em soluções imediatas para reduzir as emissões oriundas do setor de transporte.

Para reduzir as emissões de veículos a combustão é necessário investir em soluções que aumentem a eficiência energética dos automóveis. Veículos com maior eficiência energética, consomem menos combustível por quilômetro rodado e conseqüentemente emitem menos poluentes. Uma dessas soluções é a aplicação de películas fotovoltaicas em veículos a combustão, como investigado neste estudo. Essa tecnologia pode representar uma estratégia viável e eficiente para aumentar a eficiência energética e reduzir as emissões dos veículos já em circulação, diminuindo o consumo energético do sistema de alimentação elétrica do carro.

Além disso, para monitorar a eficácia dessas medidas, é essencial quantificar as emissões atuais. A metodologia da pegada de carbono, orientada pelo protocolo GHG e pela ISO 14067, oferece um meio confiável para medir as emissões de GEEs de um produto e avaliar seu impacto nas mudanças climáticas. A aplicação da película fotovoltaica, portanto, não apenas contribui para a redução imediata das emissões, mas também se alinha com os esforços globais de sustentabilidade e combate às mudanças climáticas.

A escolha do tema em questão se fundamenta na identificação de uma lacuna significativa na literatura acadêmica, uma vez que não foram encontradas pesquisas específicas no mesmo nicho. A ausência de estudos anteriores sobre esse tema ressalta a oportunidade de preencher uma lacuna no conhecimento existente e contribuir para a expansão dos estudos sobre novas alternativas para redução das emissões do setor de transporte. A

escassez de pesquisas prévias destaca a originalidade e a inovação da aplicação em estudo.

## 1.5 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho se delimitou a estudar apenas as etapas do ciclo de vida do produto com maior impacto para a análise dos ganhos obtidos com a aplicação da película fotovoltaica. Não serão detalhados dados técnicos e comerciais a respeito do veículo em estudo devido a um acordo de confidencialidade com a montadora do automóvel.

Não faz parte do escopo de estudo do presente trabalho analisar etapas individuais pertinentes aos processos de aquisição de matéria prima e processo produtivo da película fotovoltaica, visto que a pegada de carbono da película é divulgada pelo fabricante na ficha técnica do produto. Também não faz parte do escopo de estudo do presente trabalho realizar uma análise econômica e social da aplicação.

Não serão consideradas na análise eventuais emissões provenientes da instalação da película fotovoltaica. Considerando que não existem novas entradas de matéria prima e emissões diretas durante esse processo, a contribuição para o resultado final não foi considerada relevante ao estudo.

A etapa de desmanche e descarte de peças não é parte do escopo desse estudo, visto que foi pressuposto que todo o veículo passará pelo processo de logística reversa, reaproveitando e reciclando o que for possível e dando o descarte adequado as peças que não poderão ser reutilizadas ou recicladas.

Todas as rotas de transporte simuladas partem do pressuposto de que a aplicação da película fotovoltaica ocorrerá em uma concessionária de automóveis na cidade de São José dos Pinhais, no estado do Paraná, escolhida de maneira arbitrária. O trabalho se delimita a fazer a análise considerando que a película saíra das instalações do fabricante, localizado em La Verne, na Califórnia, e prioriza o frete internacional marítimo por apresentar um custo inferior se comparado aos demais tipos de transporte disponíveis.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresenta uma estrutura cuidadosamente delineada para abordar de maneira sistemática e abrangente o tema escolhido. O primeiro capítulo, a introdução, serve como a porta de entrada do trabalho, oferecendo uma visão geral do assunto, contextualizando-o e delimitando os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo, referencial teórico, apresenta uma revisão crítica da literatura relevante, elucidando conceitos e teorias que fundamentam o tema. Na sequência, o capítulo de metodologia detalha a abordagem adotada, os procedimentos e técnicas utilizados na coleta e análise de dados para obtenção da pegada de carbono do veículo com e sem a aplicação da película fotovoltaica. Os resultados obtidos são minuciosamente apresentados no capítulo subsequente, oferecendo uma análise interpretativa dos dados coletados. Finalmente, o capítulo de

conclusão sintetiza os principais achados, recapitula as contribuições do trabalho, discute suas limitações e aponta possíveis direções para pesquisas futuras, encerrando o TCC de maneira reflexiva e conclusiva.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é realizada a revisão bibliográfica necessária para o desenvolvimento deste trabalho, dividida em dividida em três (3) grandes tópicos: i) veículos a combustão; ii) células fotovoltaicas e iii) pegada de carbono.

### 2.1 VEÍCULOS A COMBUSTÃO

O motor de combustão interna (MCI), utilizado por veículos a combustão, é uma máquina térmica que transforma a energia química contida no combustível em energia mecânica, térmica e sonora. Nos veículos de passeio é mais comum que o MCI use o ciclo de funcionamento Otto (BRUNETTI, 2016).

Neste tópico serão abordados assuntos relacionados ao funcionamento e as emissões de veículos a combustão.

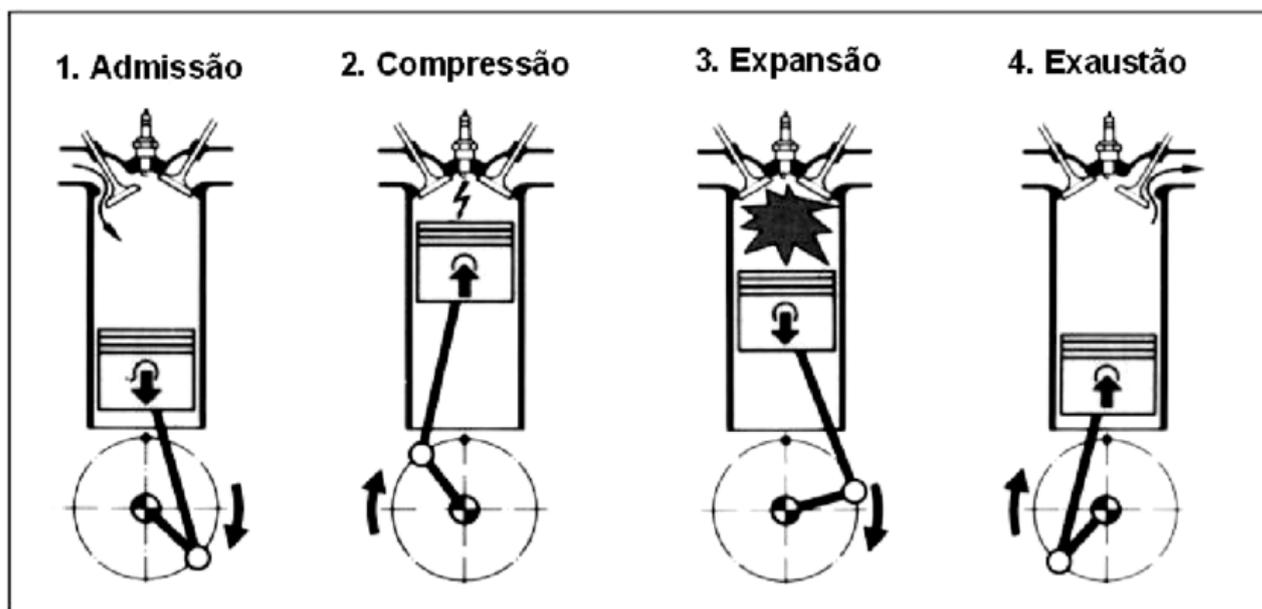
#### 2.1.1 Funcionamento dos veículos a combustão

O ciclo Otto de quatro (4) tempos, tem quatro etapas de movimentação do êmbolo que permitem seu funcionamento. Na primeira etapa, **etapa de admissão**, o êmbolo está no ponto morto superior (PMS) e seu movimento de descida, proveniente do ciclo anterior ou do motor de partida, expande a camada de combustão fazendo a sucção da mistura ar e combustível para dentro da câmara de combustão por meio de válvulas, essa etapa dura até o êmbolo chegar próximo ao ponto morto inferior (PMI). Na segunda etapa, **etapa de compressão**, o êmbolo está em movimento de subida fazendo a compressão da mistura ar combustível até que o pistão chegue próximo ao PMS. Na terceira etapa, **etapa de expansão**, a mistura de ar e combustível que está comprimida recebe uma centelha por meio da vela de ignição, a centelha gera a combustão fazendo que o êmbolo se movimente para baixo devido a expansão do volume da câmara de combustão. É nessa etapa que a energia química do combustível é convertida em energia mecânica. Na última etapa, **etapa de exaustão**, os gases resultantes da combustão são expelidos da câmara de combustão por meio de válvulas devido ao movimento de subida do êmbolo até o PMS e, com isso, pronto para começar mais um novo ciclo (BRUNETTI, 2016).

O MCI dos automóveis, e motocicletas de maior potência, tem vários pistões, associados e sincronizados na árvore de manivelas e necessita de muitos sistemas periféricos que podem influenciar na sua eficiência energética. Abaixo serão citados e detalhados os sistemas periféricos mais importantes envolvidos no funcionamento do MCI.

Todas as etapas do Ciclo Otto são ilustradas na figura 12.

Figura 12 – Etapas do Ciclo Otto.

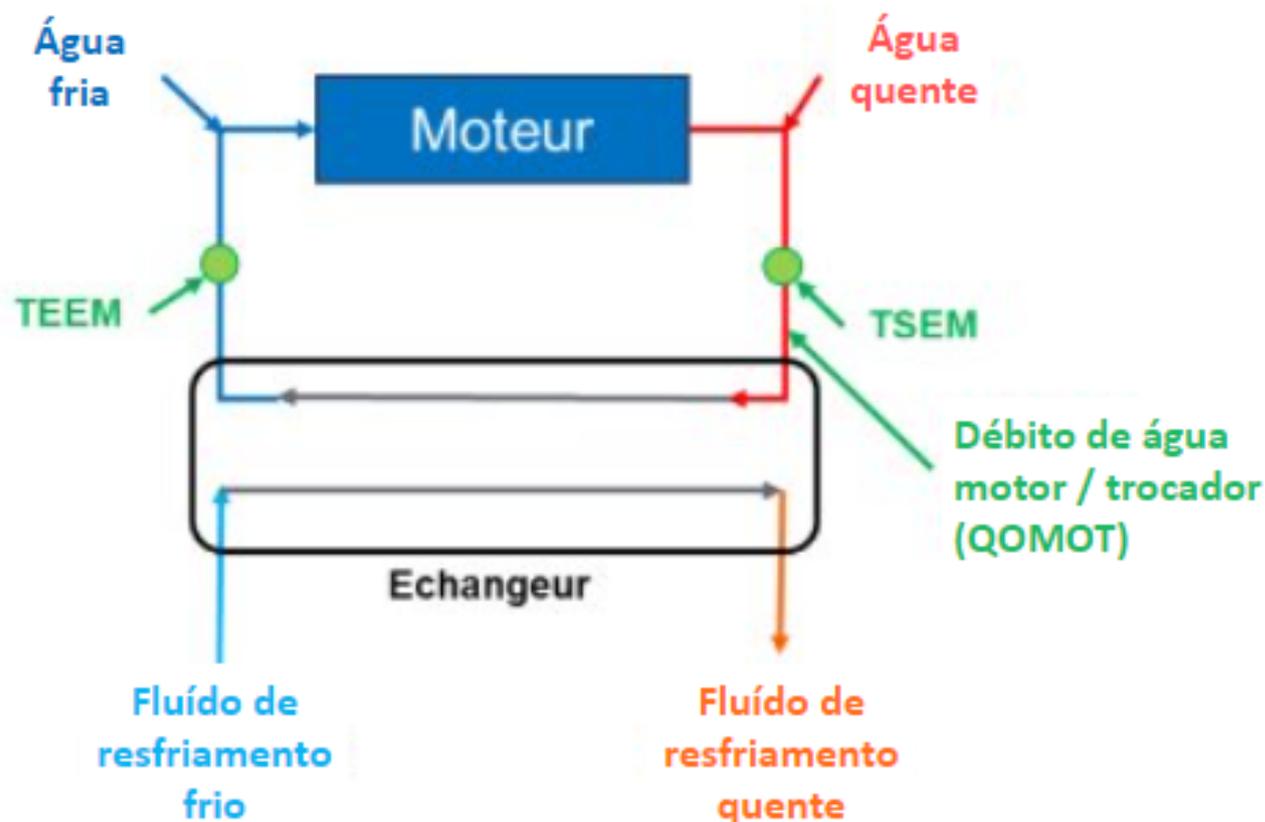


Fonte: Milhor, 2002.

#### 2.1.1.1 Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento é o sistema responsável por manter o motor em uma temperatura de funcionamento adequada, mais de um terço da energia térmica produzida pela combustão interna de um motor ciclo Otto é dissipada por esse sistema (HENRIQUE DIAS VAZ, 2019). O sistema é composto principalmente por um líquido de arrefecimento, uma bomba d'água, um radiador, um ventilador e uma válvula termostática. O líquido de arrefecimento é composto por água e aditivos, e sua eficiência pode variar de acordo com a viscosidade e condutividade térmica do fluido final. A bomba D'água é o componente responsável por fazer o líquido de arrefecimento circular. O radiador é constituído de tubos e aletas, e é responsável por resfriar o líquido de arrefecimento, o seu tamanho pode influenciar diretamente a eficiência energética do motor, por conta do arrasto aerodinâmico. O ventilador, por sua vez, mantém uma corrente de ar em espiral nas aletas do radiador para otimizar a troca de calor (HENRIQUE DIAS VAZ, 2019). Já a válvula termostática é o dispositivo responsável por realizar o controle do fluxo de líquido de arrefecimento. A válvula é calibrada de maneira que, enquanto o líquido está frio impede a sua circulação pelo radiador, permitindo apenas que circule diretamente para o bloco e conforme o líquido aquece, a válvula abre a saída para o radiador gradativamente, evitando variações bruscas de temperatura (HENRIQUE GUERRA MACHADO, 2015). A figura 13 ilustra de maneira simplificada o funcionamento do sistema de arrefecimento.

Figura 13 – Funcionamento básico do sistema de arrefecimento.



Fonte: Autor.

### 2.1.1.2 Sistema de Alimentação de Combustível

O sistema de alimentação de combustível de um automóvel é um componente vital para o funcionamento adequado do veículo, é o sistema responsável por garantir uma mistura correta de ar e combustível para obtenção de uma combustão eficiente. O sistema é composto principalmente por um tanque de combustível, uma bomba, um filtro e um sistema de injeção. Cada elemento desempenha um papel fundamental na entrega precisa do combustível para o motor, garantindo um desempenho eficiente, economia de combustível e baixas emissões (GABRIEL SCATOLINO; SILVA REIS, 2018).

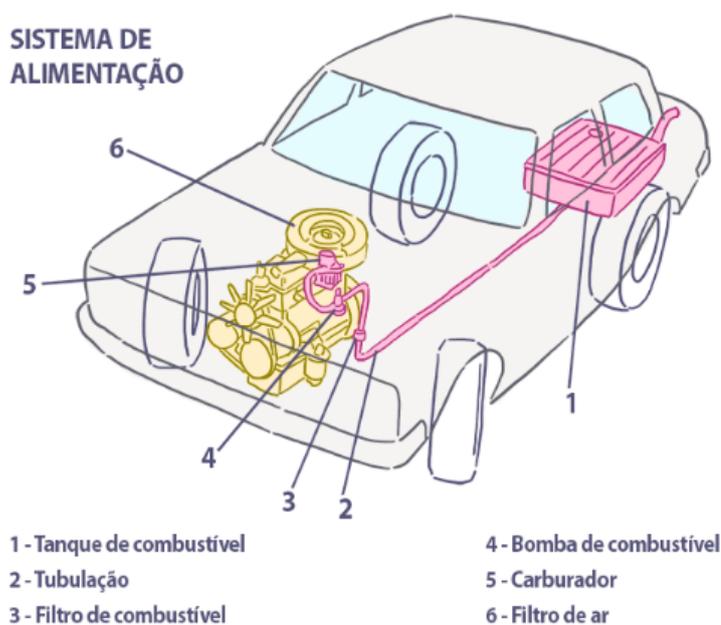
Parte fundamental do sistema de alimentação de combustível, o tanque de combustível, armazena o combustível líquido e é projetado para ser hermético, evitando a evaporação do combustível e mantendo-o seguro dentro do veículo. A bomba de combustível é responsável por enviar o combustível do tanque para o sistema de alimentação. Ela é acionada pelo motor ou por um motor elétrico e mantém uma pressão constante para garantir o fornecimento adequado de combustível. Ao sair da bomba de combustível, o combustível passa pelo filtro de combustível, que remove impurezas e partículas sólidas que podem danificar o sistema de injeção ou carburador. Em veículos mais antigos, o

carburador era responsável por misturar o combustível com o ar antes de entrar no motor. No entanto, a maioria dos veículos modernos utiliza o sistema de injeção eletrônica de combustível.

O sistema de injeção eletrônica utiliza sensores para medir o fluxo de ar, a temperatura do motor, a posição do acelerador e outros parâmetros importantes. Com base nessas informações, a unidade de controle eletrônico (ECU) calcula a quantidade exata de combustível necessária e injeta-o nos cilindros do motor através de injetores de combustível. Essa abordagem oferece maior precisão e controle sobre a mistura de ar e combustível, resultando em maior eficiência e redução das emissões. Além disso, os veículos mais recentes também estão adotando tecnologias como a injeção direta de combustível. Nesse sistema, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão, permitindo uma pulverização mais fina e melhorando a combustão. Isso resulta em maior potência, eficiência e menor consumo de combustível (ALEXANDRE CAPELLI, 2010).

Para maximizar o desempenho e a vida útil do sistema de alimentação de combustível, é importante manter a manutenção adequada. Isso inclui a limpeza periódica dos injetores de combustível, a substituição do filtro de combustível e a verificação dos sensores e cabos conectados ao sistema. A figura 14 mostra os principais componentes de um sistema de alimentação combustível.

Figura 14 – Sistema de alimentação.



Fonte: DETRAN, 2022.

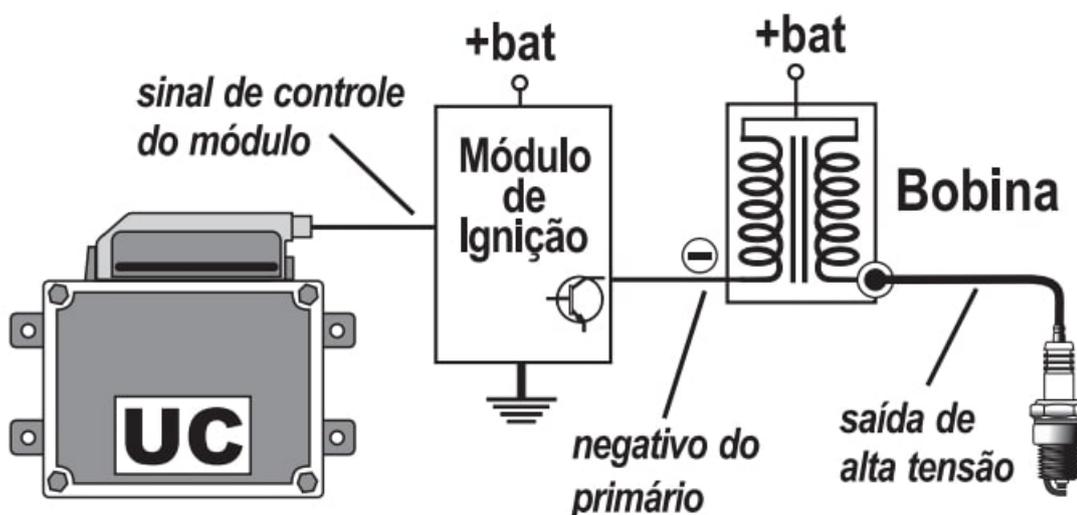
### 2.1.1.3 Sistema de Ignição

O sistema de ignição automotiva é responsável por iniciar a combustão do combustível dentro do motor de um veículo, através de uma centelha de ignição que inflama a mistura ar combustível. Como descrito em Bosch, “Esta centelha de ignição é gerada por uma descarga disruptiva entre os eletrodos de uma vela de ignição e assim a frente de chama se prolonga para dentro da câmara de combustão. [...]” (BOSCH, 2014).

O sistema de ignição é um dos sistemas que mais sofreu evoluções ao longo dos anos, para acompanhar os avanços em tecnologia dos motores modernos. Esse sistema é composto por vários componentes que trabalham juntos para garantir uma ignição confiável e eficiente. A bateria fornece a energia elétrica necessária para a operação do sistema, a bobina de ignição, por sua vez, transforma a baixa tensão da bateria em uma alta tensão e os cabos de ignição conduzem a corrente elétrica da bobina para as velas de ignição para que seja gerada a faísca que inicia a combustão. A unidade de controle do motor, recebe informações dos sensores do motor, como a posição do virabrequim e a temperatura do ar e do líquido de arrefecimento, para determinar o momento e a duração corretos da ignição (TAVARES; ROCHA, s.d.).

Um sistema de ignição eficiente e confiável é fundamental para o funcionamento adequado do motor, garantindo a potência, a economia de combustível e a redução das emissões (TAVARES; ROCHA, s.d.). A figura 15 ilustra o funcionamento do sistema de ignição.

Figura 15 – Funcionamento básico do sistema de ignição.



Fonte: Autor.

#### 2.1.1.4 Sistema de Admissão de Ar

O sistema de admissão de ar, como o próprio nome indica, é responsável por coletar o ar do ambiente e levá-lo até as válvulas de admissão. Essas válvulas são responsáveis por regular a entrada de ar na câmara de combustão do motor (ALMEIDA, 2020).

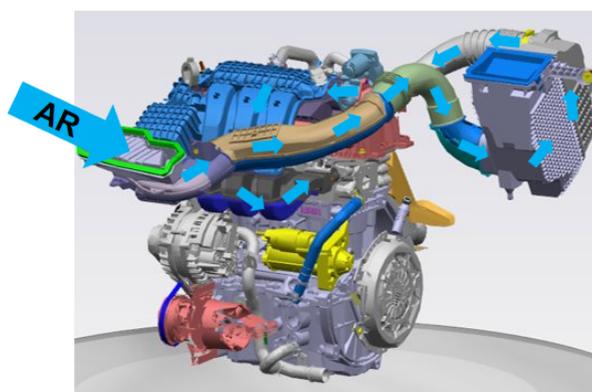
Além de coletar o ar do ambiente, o sistema de admissão de ar também precisa garantir que o ar admitido esteja isento de partículas sólidas que possam danificar o motor e que esteja em uma temperatura próxima da temperatura ambiente. Usualmente, para atender a legislação de ruídos e proporcionar maior conforto sonoro ao motorista e passageiros, são incluídos no sistema de admissão elementos que atenuam o ruído de admissão do motor.

Atualmente, existem basicamente dois tipos de sistema de admissão de ar: o sistema integrado e o sistema remoto. O sistema de admissão do tipo integrado fica localizado acima do motor, é mais compacto e conta com menos componentes. Já o sistema remoto, é fixado a carroceria do veículo, na região do cofre do motor, é mais robusto e conta com uma quantidade maior de componentes. Ambos os sistemas contam com os mesmos componentes essenciais: filtro de ar, dutos de admissão, medidor de massa de ar, coletor de admissão e válvulas de admissão. Os dois sistemas apresentam vantagens e desvantagens e a escolha entre um ou outro geralmente é pautada pela estratégia econômica da montadora (FRANCISCO BERNARDO, 2010).

As dimensões geométricas do sistema de admissão de ar influenciam diretamente o desempenho do motor, podendo influenciar diretamente na eficiência energética e emissão de poluentes, pela quantidade e modo como o ar se desloca dentro do sistema. (ALMEIDA, 2020).

A figura 16 mostra um sistema de admissão de ar integrado ao motor e demonstra o percurso percorrido pelo ar admitido no sistema.

Figura 16 – Sistema de admissão de ar integrado.



Fonte: Autor.

#### 2.1.1.5 Sistema de Partida

O sistema de partida de um veículo a combustível é composto por diferentes componentes essenciais (DIAS, 2022). A bateria, parte também de outros sistemas do veículo, atua no sistema de partida armazenando a energia elétrica e a disponibilizando para o sistema de partida quando a chave de combustão é girada (MATTEDE, 2023). Essa energia elétrica é então transformada pelo motor de partida em energia mecânica, que é utilizada para girar o motor de combustão e superar a resistência inicial (LALLI, 2019). A bateria exerce um papel fundamental no funcionamento do sistema de partida, pois é responsável por fornecer a energia necessária para iniciar o veículo.

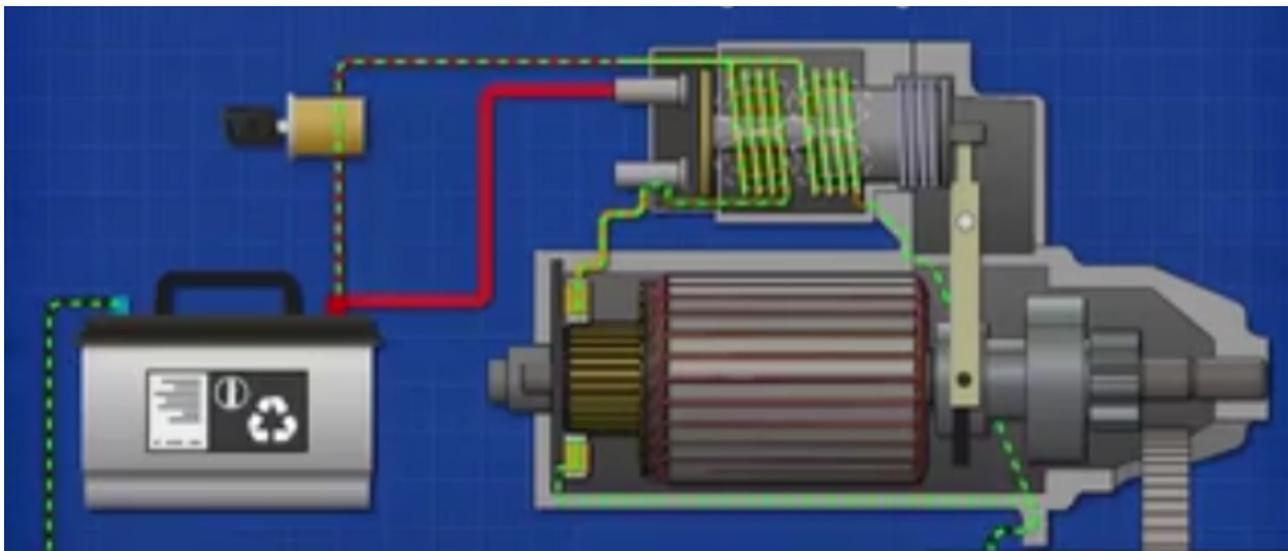
O motor de partida é outro componente crucial do sistema de partida de um veículo a combustão. Ele converte a energia elétrica proveniente da bateria em energia mecânica para girar o motor de combustão (TURBOBRASIL, s.d.) O motor de partida é acionado quando a chave de combustão é girada, enviando uma corrente elétrica para o motor de partida automática. Esse motor, por sua vez, engata e desengata o motor de partida no volante do motor, permitindo que o motor de ignição seja iniciado (TURBOBRASIL, s.d.). O motor de partida desempenha um papel vital no processo de partida do veículo, garantindo que o motor de combustão seja corretamente acionado.

A chave de combustão é o terceiro componente importante do sistema de partida de um veículo a combustão. É por meio da chave de combustão que o motorista ativa o sistema de partida e inicia o motor de combustão (MOURA, 2019). Ao girar a chave de combustão, a energia elétrica da bateria é enviada para o motor de partida, permitindo que o motor de combustão seja acionado (TURBOBRASIL, s.d.). É importante lembrar de seguir as instruções corretas ao utilizar a chave de ignição, evitando forçar o segundo estágio da chave por mais de 10 segundos, pois isso pode causar superaquecimento e danos ao sistema de partida (TURBOBRASIL, s.d.). A chave de combustão exercer um papel fundamental no processo de partida do veículo, permitindo que o motor de combustão seja ligado com segurança. A figura 17 ilustra a ligação entre os principais componentes do sistema de partida.

#### 2.1.1.6 Sistema de Alimentação Elétrica

Assim como para outros sistemas, a bateria é um componente crucial do sistema de alimentação elétrica, e é responsável por armazenar energia e distribuí-la por todo o veículo (MATTEDE, 2023). Diferentes tipos de baterias podem ser utilizadas em veículos a combustão, cada uma com suas características como autonomia, custo e vida útil (DIAS, 2022). Quando o motor está desligado, o sistema elétrico é alimentado exclusivamente pela bateria, fornecendo uma tensão de 12V para todos os consumidores elétricos. Isso destaca a importância de uma bateria confiável e eficiente para garantir o bom funcionamento dos componentes elétricos do veículo.

Figura 17 – Sistema de partida.



Fonte: Autor.

Outro componente essencial do sistema de fornecimento de energia elétrica para veículos a combustão é o alternador. Ao contrário dos veículos elétricos que dependem apenas da energia da bateria, os veículos a combustão requerem um alternador para gerar eletricidade enquanto o motor está funcionando (DIAS, 2022). O alternador tem duas funções principais: alimentar todo o sistema elétrico quando o motor não está funcionando e auxiliar a bateria no fornecimento de energia aos equipamentos do veículo por um tempo determinado. A tensão gerada pelo alternador é regulada por um regulador de tensão, garantindo uma tensão constante e adequada ao sistema elétrico (LUIZ DIAS, 2015). Isso garante que a bateria seja continuamente carregada e que todos os componentes elétricos recebam a energia necessária para o seu funcionamento.

Além da bateria e do alternador, o sistema de alimentação elétrica para veículos a combustão também inclui um regulador de tensão. O regulador de tensão, também conhecido como placa de diodo, converte a corrente alternada produzida pelo alternador em corrente contínua, garantindo uma tensão estável e consistente para o sistema elétrico e desempenha um papel crucial na manutenção de uma tensão constante para o alternador e no controle da corrente de descarga da bateria (LUIZ DIAS, 2015). Isso garante o bom funcionamento do sistema elétrico e evita danos à bateria ou outros componentes elétricos. A combinação desses componentes - bateria, alternador e regulador de tensão- forma um sistema confiável e eficiente de fornecimento de energia elétrica para veículos a combustão, fornecendo a energia elétrica necessária para todos os componentes elétricos do veículo. A figura 18 ilustra o funcionamento do sistema de alimentação elétrica.

Figura 18 – Sistema de partida.



Fonte: TECGAUSS, 2020.

#### 2.1.1.7 Sistema de Catalisação

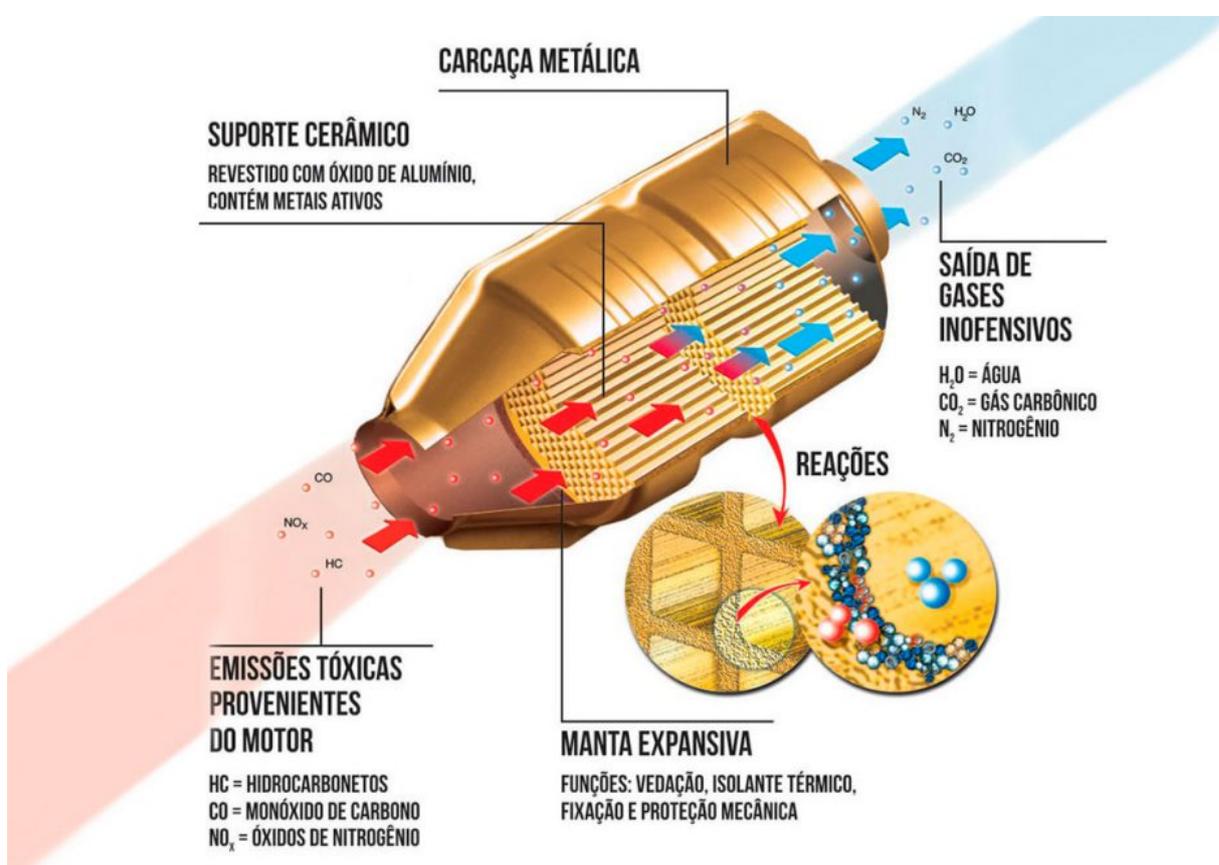
O sistema de catalisação é o sistema responsável por reduzir a quantidade de emissões poluentes liberadas pela queima do combustível. Um dos componentes essenciais de um sistema de catálise automotiva é o conversor catalítico, também conhecido como catalisador automotivo, geralmente feito de metais nobres. O conversor catalítico é responsável por transformar os gases poluentes liberados na combustão dos combustíveis em gases menos prejudiciais ao meio ambiente. Ele utiliza uma catálise heterogênea para realizar essa transformação química (GANDHI *et al.*, 1986). Essa peça é especialmente importante para reduzir o efeito do ar causado pelos veículos, sua função é purificar os gases de escape, convertendo os compostos em substâncias menos nocivas antes de serem liberadas na atmosfera. É geralmente instalado logo após o coletor de escape, próximo ao motor do veículo e desempenha um papel crucial na redução do carbono do ar e conseqüentemente na preservação da saúde e do meio ambiente.

Outro componente importante de um sistema de catálise automotiva é o sensor de oxigênio, também conhecido como sonda lambda. Os sensores de oxigênio são normalmente montados no coletor de escape ou antes do conversor catalítico. Eles são responsáveis por medir a quantidade de oxigênio presente nos gases liberados pelo motor do veículo (DELPHI, s.d.). Essas informações são essenciais para o funcionamento correto do automóvel e para otimização do desempenho do motor, pois ajudam a controlar a mistura

ar-combustível e garantir uma combustão mais eficiente. Além disso, os sensores de oxigênio também auxiliam no diagnóstico de problemas no sistema de combustão do veículo, como velas de combustão ou problemas de combustível (RODRIGUEZ, 2017).

O coletor de escape é outro componente importante do sistema de catalisação de um automóvel. Ele é responsável por coletar os gases de escape produzidos durante a combustão do motor e direcioná-los para o conversor catalítico. O coletor de escape é projetado para maximizar o fluxo de gases e garantir uma distribuição uniforme para o conversor catalítico. Além disso, o coletor de escape também desempenha um papel na redução do ruído do escapamento, ajudando a minimizar o impacto sonoro do veículo (FÁBIA, 2018). Portanto, o coletor de escape é uma peça fundamental para o funcionamento eficiente do sistema de catálise automotiva, garantindo o correto direcionamento dos gases de escape e garantindo a redução do escape sonoro. Além disso, alguns automóveis podem contar com um pré- catalisador adicional, posicionado mais próximo ao motor para iniciar o processo de catalisação mais rapidamente, e um filtro de partículas para capturar e armazenar partículas sólidas, principalmente em veículos a diesel. A figura 19 ilustra o funcionamento do catalisador.

Figura 19 – Catalisador.



Fonte: Jocar, 2019.

### 2.1.1.8 Sistema de Transmissão

A indústria automotiva experimentou avanços significativos em tecnologia, particularmente na área de sistemas de transmissão. A evolução e melhorias nos sistemas de transmissão automotiva resultaram no desenvolvimento de vários tipos de transmissões, incluindo transmissões manuais, automáticas e continuamente variáveis.

As transmissões manuais, um dos tipos mais comuns de transmissão, são responsáveis por canalizar a potência gerada pelo motor para acionar as rodas (STATE FARM, 2023). As marchas em uma transmissão manual são selecionadas com base na velocidade e no torque do carro, determinando a marcha apropriada para o desempenho ideal (STATE FARM, 2023). Os componentes de um sistema de transmissão manual incluem a embreagem, a caixa de câmbio, o diferencial, o eixo cardã e o semi-eixo. A embreagem é responsável por transmitir a potência do motor para a caixa de câmbio. A caixa de câmbio recebe a potência do motor e a transfere para as rodas, multiplicando ou desmultiplicando a velocidade de rotação. O diferencial permite que as rodas girem em velocidades diferentes durante as curvas, garantindo a estabilidade do veículo. O eixo cardã transmite a potência da caixa de câmbio para o diferencial. E o semi-eixo é responsável por transmitir a potência do diferencial para as rodas. As transmissões manuais exigem que o motorista troque as marchas manualmente usando uma alavanca de câmbio, proporcionando maior controle sobre o veículo (STATE FARM, 2023).

No entanto, com os avanços da tecnologia, a evolução das transmissões manuais levou ao desenvolvimento das transmissões automáticas. Os carros automáticos são projetados para mudar de marcha automaticamente sem a intervenção do motorista. O sistema de transmissão automático funciona de maneira similar ao sistema de transmissão manual no que diz respeito ao acoplamento de engrenagens, mas conta com uma caixa de marchas composta por um conjunto de engrenagens planetárias. Para a alternância de marcha, um conversor de torque envia a força do motor para o câmbio, conforme a pressão do pé do motorista no acelerador, o sistema muda as engrenagens e troca as marchas conforme as necessidades de rotação do motor e velocidade do veículo (SANTOS; TREML, 2018). No passado, as transmissões automáticas eram frequentemente consideradas menos eficientes em termos de combustível em comparação com as transmissões manuais (STATE FARM, 2023). No entanto, a tecnologia melhorou a eficiência de combustível das transmissões automáticas, tornando-as uma escolha popular para muitos motoristas.

As transmissões continuamente variáveis (CVT) são um exemplo de transmissões automáticas que possuem uma marcha variável que se ajusta a diferentes condições de direção, aumentando ainda mais a eficiência de combustível e o conforto de direção (STATE FARM, 2023). A transmissão CVT é constituída basicamente de duas polias e uma correia metálica. Uma das polias, chamada de polia motriz, recebe o torque gerado no motor e a segunda polia, chamada de polia movida, transmite o torque para as rodas. A correia metálica é quem une as duas polias e permite a transmissão de torque de uma para outra

(SANTOS; TREML, 2018).

### 2.1.2 Emissão de poluentes por automóveis

Grande parcela das emissões de GEEs provem dos veículos automotores. Nesse tópico será abordado um breve histórico das emissões, legislações vigentes e a relação entre emissão de poluentes e combustível utilizado.

#### 2.1.2.1 Legislação e políticas públicas no Brasil

##### 2.1.2.1.1 Programa de Controle de Emissões Veiculares

O PROCONVE foi instituído pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA em 1986 por meio de resoluções que estabelecem prazos e limites de emissões admissíveis por automóveis nacionais e importados. Em 1993, toda a sua normatização foi transformada em Lei (Lei nº 723, de 28 de outubro de 1993). Em 2002 foi incluído ainda o PROMOT, programa de controle das emissões das motocicletas e veículos similares e em 2011 foi implementado o controle da emissão de máquinas agrícolas e rodoviárias (CESAR DE MACEDO *et al.*, 2011).

A estratégia de controle do programa engloba a homologação de protótipos para garantir que os fabricantes e importadores aplicam recursos em fase projeto para garantir um baixo potencial poluidor a partir das especificações de engenharia. O programa inclui também o controle estatístico das linhas de produção e importação para assegurar uma baixa dispersão nos índices de poluentes dos veículos e responsabiliza os fabricantes e importadores por garantir rigorosamente as especificações apresentadas e homologadas e re-homologar todas as modificações subsequentes. O PROCONVE também estabelece responsabilidade ao fabricante no que diz respeito a orientação e recomendação do usuário quanto a necessidade de assistência técnica e fases pós venda, o PROCONVE, realiza ainda, a fiscalização do estado de manutenção dos veículos homologados em circulação (CESAR DE MACEDO *et al.*, 2011).

A redução dos níveis de emissão de poluentes conquistadas com o PROCONVE se dão pelos padrões de emissão estabelecidos para os diferentes tipos de veículos nas diferentes fases do projeto. O PROCONVE separa os veículos comercializados no Brasil em principalmente dois grandes grupos: os veículos leves (L) que são os automóveis de passageiros, e os veículos pesados (P), caminhões e ônibus. Para cada tipo de veículo produzido foram sendo estabelecidos, em um intervalo irregular de tempo, limites mais restritivos de emissões. Para que fosse possível atingir as exigências do programa, as montadoras começaram a investir cada vez mais em novas tecnologias para mitigar as emissões. Além disso, o programa instigou diversas evoluções nos combustíveis comercializados em território nacional (CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, s.d.).

A figura 20 mostra todas as etapas do PROCONVE (L1 até L8), datas e seus respectivos requisitos para os veículos leves.

Figura 20 – PROCONVE - Veículos Leves.

Requisitos	L1 - 1988	L2 - 1992	L3 - 1997	L4 - 2005	L5 - 2009	L6 - 2014	L7 - 2022	L8 - 2025
Limite de gases poluentes								
Limite de emissão de ruído								
Limite de Aldeídos								
Durabilidade de emissões		80.000 km	160.000 km	160.000 km				
Emissões evaporativas								
RVEP – Controle de produção								
OBD – Diagnose a bordo								
Procedimento opacidade								
Fator KI – Regeneração de dispositivo								
AECS – Descrição do software								
ORVR – Controle no abastecimento								
RDE – Emissões em uso real							Declarar	
Limite para amônia							Declarar	
Gestão de crédito de emissões								

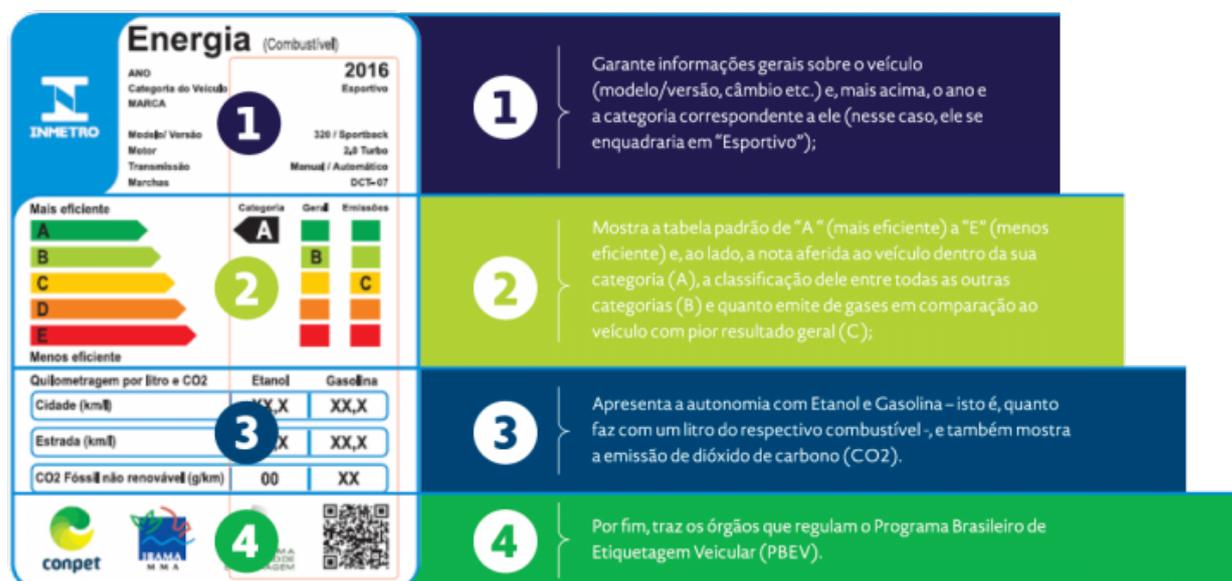
Fonte: ANFAVEA, 2020.

#### 2.1.2.1.2 Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

O Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) instituiu em 2008 o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV). O objetivo do programa é disponibilizar ao consumidor informações técnicas sobre consumo de combustível, eficiência energética e emissão de poluentes dos veículos, a fim de que essas informações sejam tomadas em conta no processo de compra de um automóvel. As informações são disponibilizadas para o consumidor em uma etiqueta aplicada nos veículos, onde há a informação de autonomia do veículo em quilômetros por litro, considerando o abastecimento com etanol ou gasolina e o trajeto em estrada ou em cidade, a categoria de eficiência energética comparando o veículo com outros similares e a emissão de CO2 fóssil não renovável em gramas por quilometro. Todos os dados apresentados na etiqueta são resultados de testes em laboratórios credenciados e fiscalizados pelo INMETRO. A figura 21 mostra a etiqueta utilizada no programa e detalha cada uma das informações apresentadas.

A participação das fabricantes de automóveis no PBEV é voluntária e não fornece nenhum tipo de benefício para os participantes. Na primeira edição do programa, em 2009, houve a participação de 5 marcas com 31 modelos e 53 versões. Já na última edição, em 2023, foram registradas 35 marcas com 852 modelos e versões registradas no programa. O PBEV tem induzido os consumidores a optarem por veículos mais eficientes e conseqüentemente, influenciando as montadoras a investirem em tecnologias para aumentar a eficiência dos veículos comercializados a fim de atender essa demanda.

Figura 21 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.



Fonte: Edenred,2017.

### 2.1.2.1.3 Inovar Auto

Inovar Auto é o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores, iniciativa do governo brasileiro com o intuito de fomentar a competitividade e desenvolvimento do setor automotivo, incentivando a produção de veículos mais econômicos e seguros, com investimento na cadeia de fornecimento, em tecnologia industrial e de desenvolvimento de produto. O programa foi criado pela lei nº 12.715 de 17 de setembro de 2012 e válido no período de 2013 a 2017.

Diferentemente do PBEV o programa Inovar Auto ofereceu benefícios aos aderentes, como a redução do imposto sobre produtos industrializados (IPI) e exigiu metas específicas dos participantes. O programa estabeleceu metas em 7 eixos de desenvolvimento: novos investimentos e aumento da capacidade produtiva instalada; eficiência energética; pesquisa e desenvolvimento; tecnologia industrial e capacitação de fornecedores; etapas fabris do processo produtivo; participação no PBEV e desenvolvimento sustentável da indústria.

No eixo que tange a emissão de poluentes, relacionado a eficiência energética, a meta estabelecida como obrigatória para habilitação foi incrementar a eficiência energética dos veículos fabricados no país em 12,08% em relação aos veículos produzidos no ano de 2011, até o final de 2017. Além disso, foram estabelecidas metas adicionais para que as empresas pudessem melhorar ainda mais a eficiência energética e conquistar maiores reduções no IPI sobre os veículos. As empresas habilitadas que não atingissem a meta, estavam sujeitas a multas proporcionais ao descumprimento da meta. A tabela 1 ilustra as metas do programa entre a linha de base, 2011, e o fim da vigência do programa, 2017.

Tabela 1 – Metas Inovar Auto

METAS	Consumo energético MJ/KM	Incremento na eficiência energética
Linha de Base 2011	2,07	-
Meta para habilitação	1,82	12,08%
Meta para redução de 1 pp no IPI	1,75	15,46%
Meta para redução de 2 pp no IPI	1,68	18,84%

Fonte: Niquito, 2021.

Como resultado do programa, no eixo de eficiência energética, o relatório de avaliação de impacto do programa Inovar Auto, reportou um aumento de eficiência energética de 15,46%, acarretando numa redução de emissões de 1.221 toneladas de CO<sub>2</sub> ano (NIQUITO; CARRARO, 2021). O programa teve duas empresas beneficiadas com redução de 2 p.p na alíquota de IPI e oito com redução de 1 p.p.

#### 2.1.2.1.4 Rota 2030

Sucessor do programa Inovar Auto (que vigorou de 2013 à dezembro de 2017), o programa Rota 2030 - Mobilidade e Logística é uma iniciativa do governo federal para incentivar o desenvolvimento do setor automotivo. Tendo em vista o contexto global de mudanças no setor automotivo, desde o desenvolvimento tecnológico às mudanças nos contextos de mobilidade, o programa Rota 2030 visa alavancar a inserção global da indústria automotiva brasileira de maneira progressiva, aumentando a exportação de peças e veículos. Além disso, o programa também aborda princípios de cidadania e sustentabilidade ambiental, com incentivo a pesquisa e desenvolvimento. O programa foi instituído por meio do decreto 9.557 de 8 de novembro de 2018 e tem duração de 15 anos, dividido em ciclos quinquenais (ANFAVEA, 2020)

O programa é composto por três (3) eixos:

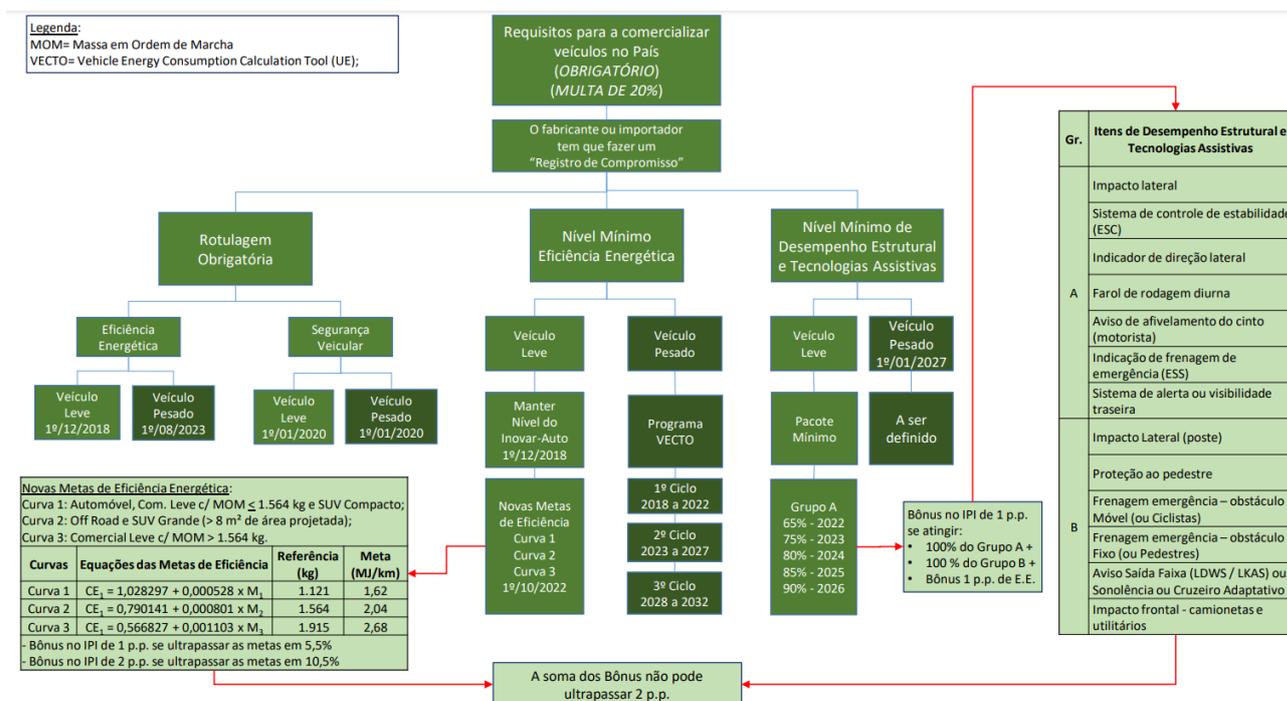
- Eficiência Energética e Segurança Veicular
- Incentivos para Pesquisa e Desenvolvimento
- Regime de Autopeças

O primeiro estabelece metas obrigatórias para a comercialização de veículos no país e as duas últimas são opcionais e fornecem benefícios fiscais em caso de investimento em pesquisa e desenvolvimento e isenção de alguns impostos na importação de peças sem similar nacional (ANFAVEA, 2020).

O primeiro eixo de eficiência energética e segurança veicular estabelece duas obrigações: a adesão ao PBEV por todos os veículos e um nível mínimo de eficiência energética

obrigatório. O objetivo do programa é atingir um incremento de 11% na eficiência energética média da frota até o final do programa. A figura 22 abaixo ilustra os principais requisitos solicitados pelo programa.

Figura 22 – Eixo 01 - Rota 2030.



Fonte: ANFAVEA,2020.

### 2.1.2.2 Emissão por tipo de combustível utilizado

Além de serem influenciadas pela tecnologia do motor, regularidade de manutenção e da maneira de condução do veículo, as emissões de poluentes por um automóvel variam de acordo com o combustível utilizado. Os principais combustíveis utilizados por veículos de passeio são a gasolina e o etanol hidratado (POZZAGNOLO, 2013). O quadro 1, construída com base no relatório de emissões de 2021 publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), mostra uma estimativa do consumo aparente por combustível no período de 2015 a 2021.

Nos próximos tópicos serão abordadas as características dos principais combustíveis utilizados por veículos de passeio e seus respectivos impactos nas emissões.

#### 2.1.2.2.1 Gasolina

A gasolina, um dos combustíveis mais utilizados em veículos de passeio no Brasil, é um derivado do petróleo e funciona como fonte de energia para motores ciclo Otto. No

Quadro 1 – Estimativa do consumo aparente de combustíveis no segmento rodoviário no estado de São Paulo de 2015 a 2021.

Combustível	Consumo anual em bilhões de litros						
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Gasolina C	9,44	9,99	10,47	8,42	7,95	7,18	8,85
Etanol Hidratado	9,46	8,36	7,69	9,96	11,70	10,14	8,47
Óleo Diesel	10,06	9,55	9,64	9,69	10,33	10,44	10,77

Fonte: Adaptada pelo autor, Iglesias, 2021.

Brasil, a Portaria 678 de 31 de agosto de 2011, do Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), exige que pelo menos 20% da gasolina comercializada seja composta por etanol anidro.

A gasolina comum comercializada hoje no Brasil, produzida pela Petrobras, possui um teor de enxofre máximo de 50mg/kg. As concentrações de enxofre na gasolina afetam o funcionamento do catalisador automotivo, quanto menor a quantidade de enxofre no combustível maior é a eficiência dos catalisadores ao converter gases poluentes em gases inertes (PETROBRAS, 2021). Além disso, a concentração de hidrocarbonetos aromáticos e olefínicos na gasolina comercializada atualmente, teve uma redução significativa que contribui para a redução das emissões de poluentes veiculares (PETROBRAS, 2021). Os valores mínimos de octanagem observados na gasolina comum são: MON 82 e RON 92, sendo RON o número de octanas pesquisa e MON o número de octanas motor. O RON representa o comportamento do combustível em baixas velocidades e ao acelerar, enquanto que o MON representa o comportamento em altas velocidades e cargas elevadas. Quanto maior a octanagem, maior é a capacidade da gasolina de resistir a detonação, permitindo que o motor funcione em melhor desempenho (PETROBRAS, 2021).

O PBEV de 2023, atualizado em fevereiro, registrou 162 modelos de automóveis com propulsão a combustão movidos exclusivamente a gasolina a venda no Brasil. Os automóveis a gasolina registrados no PBEV apresentam uma emissão média de 142 gramas de CO<sub>2</sub> fóssil não renovável por quilometro rodado. O modelo, registrado no programa, que mais emite é um utilitário esportivo da marca Lamborghini com uma taxa de 248 gramas de CO<sub>2</sub> por quilometro rodado, já o modelo que menos emite é um utilitário esportivo da marca BMW com uma taxa de 109 g/km (EDENRED, 2017).

Já no caso dos carros com motorização *flex fuel*, quando abastecidos com gasolina, a média de emissão de CO<sub>2</sub> por quilometro rodado ficou em 137. O modelo que mais emite, apresentou uma taxa de 181 enquanto que o que menos emite apresentou uma taxa de 84 gramas por quilometro rodado (EDENRED, 2017). O quadro 2 apresenta algumas propriedades gerais da gasolina.

A estequiometria da mistura ar combustível, considerando a gasolina como a mistura média de hidrocarbonetos representada por C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>, considerando uma combustão completa é definida na equação:

Quadro 2 – Propriedades da gasolina.

Combustível	Fórmula (fase)	Peso Molecular	Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )	Calor de Vaporização (kJ/kg)	(AC)est.
Gasolina	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> N (líquido)	10	0,72 - 0,78	350	14,6

Fonte: Heywood, 2019.



Considerando a massa dos elementos:

$$(12x8 + 1x18) + 12,5(16x2) \rightarrow 8(12 + 16x2) + 9(2x1 + 16) \quad (2)$$

$$(114gC_8H_{18}) + (400gO_2) \rightarrow (352gCO_2) + (162gH_2O) \quad (3)$$

Considerando a composição das massas dos elementos, é possível observar que a combustão de 1g de gasolina pura gera 3,08g de dióxido de carbono. Como a densidade da gasolina é de 0,740kg/l, conclui-se que cada litro de gasolina produz 2,28kg de gás carbônico. Considerando que na produção e distribuição do combustível são emitidos mais 0,5 kg de CO<sub>2</sub>, a taxa final é de 2,8kg de CO<sub>2</sub> por litro de gasolina pura.

#### 2.1.2.2.2 Etanol

O etanol começou a ser comercializado em larga escala no Brasil na década de 1970, em resposta a crise do petróleo de 1973, e desde então tem sido um dos combustíveis mais utilizados no país. No ano de 2019 foram produzidos 35.306.997 m<sup>3</sup> de etanol em todo território brasileiro, o país é o segundo maior produtor mundial de etanol e o primeiro em etanol oriundo da cana-de-açúcar. A substância é considerada um biocombustível pois sua produção se dá a partir da fermentação de açúcares, sem nenhum componente fóssil, utilizando cana de açúcar, milho ou mandioca.

Embora a queima de biocombustíveis também gere gás carbônico, não há aumento ou redução da quantidade de GEE na atmosfera, pois todo processo de fotossíntese realizado plantio da matéria prima do combustível já sequestrou carbonos presentes na atmosfera. Apesar disso, podem ocorrer emissões de GEE no transporte do combustível por caminhões a diesel, no uso do maquinário agrícola para plantio e até mesmo no desmatamento para expansão agrícola. Apesar dos biocombustíveis serem uma opção muito mais sustentável em termos de emissões de GEE, os carros abastecidos com etanol apresentam um rendimento 30% menor do que um veículo abastecido com gasolina, o que faz com que o preço relativo dos dois combustíveis influencie o consumidor na hora do abastecimento.

Aumentos nos preços da gasolina, acarretam em um consumo maior de etanol nos postos (MELO; SAMPAIO, 2014).

A resolução ANP nº 907/2022 regulamenta as especificações, concentrações e composições do etanol produzido e comercializado em território Brasileiro, a fim de garantir a qualidade da substância comercializada nos postos, o quadro 3 apresenta algumas propriedades químicas do etanol.

Quadro 3 – Propriedades do etanol.

Combustível	Fórmula (fase)	Peso Molecular	Densidade (kg/dm <sup>3</sup> )	Calor de Vaporização (kJ/kg)	(AC)est.
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O (líquido)	46,07	0,785	840	9,0

Fonte: Heywood, 2019.

A estequiometria da mistura ar combustível do etanol, considerando uma combustão completa é definida na equação:



Considerando a massa dos elementos:

$$(12x2 + 1x6 + 16) + 30(16x2) \rightarrow 2(12 + 16x2) + 3(2x1 + 16) \quad (5)$$



Considerando a composição das massas dos elementos, é possível observar que a combustão de 1g de etanol gera 1,91g de dióxido de carbono. Como a densidade do etanol é de 789 kg/l, conclui-se que cada litro de etanol produz 1,5kg de gás carbônico. Mas, conforme citado anteriormente, essas emissões são anuladas por todo processo de fotossíntese realizado no cultivo da matéria prima. Apesar disso, o manuseio, operações agrícolas e transporte do combustível requerem a utilização de energia de fontes fósseis. Um estudo publicada na Circular Técnica Embrapa (SOARES *et al.*, 2009), calculou todas as emissões envolvidas em todo ciclo de vida de produção e distribuição do etanol e estimou que as emissões de CO<sub>2</sub> de um veículo movido a etanol representam 20% das emissões do mesmo veículo utilizando gasolina pura. Considerando que cada litro de gasolina produz 2,8kg de gás carbônico, é possível estimar que cada litro de etanol produz 0,56 kg de gás carbônico.

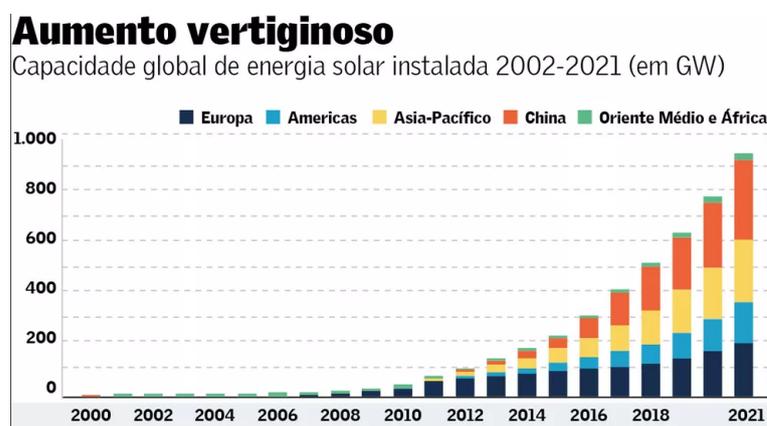
## 2.2 CÉLULAS FOTOVOLTAICAS

No ano de 1839 Alexandre Edmond descobriu a energia solar, enquanto realiza algumas experiências com eletrodos. Em um experimento contendo placas metálicas de

prata e platina, ele percebeu que com a luz do sol era possível obter energia elétrica. Quando mergulhadas as placas em um eletrólito e colocadas em contato com a luz solar, estas geram um pequeno potencial elétrico, então foi chamado esse fenômeno de efeito fotovoltaico. Mas apenas em 1884 apareceu a primeira célula fotovoltaica que usava selênio, com apenas 1% de eficiência. Foi apenas após a explicação de Albert Einstein, em 1905 que houve um melhor esclarecimento em torno do efeito fotoelétrico, e no ano de 1905 a mecânica quântica com a teoria das bandas de energia, física dos semicondutores com os processos de purificação e dopagem aplicadas aos transmissores, que o processo de produção de energia solar fotovoltaica começou a evoluir com essa descoberta (GREENBRAS, s.d.). Algumas décadas depois, em 1954, o químico dos laboratórios Bell dos Estados Unidos da America, Calvin Fuller, criou um novo processo de dopagem de silício com arsênio e boro, que foi capaz de aumentar a eficiência das células fotovoltaicas para 6%, com uma potência de cerca de 5mW e uma área de 2cm<sup>2</sup>.

A primeira grande industria a usar a energia fotovoltaica foi a indústria espacial. Por se tratar de uma fonte de energia confiável e não finita, as células fotovoltaicas se apresentaram como aliadas no impulsionamento do lançamento de satélites e missões espaciais. Algum tempo depois, em 1973, a crise do petróleo, fomentou a necessidade de investimento em novas fontes de energia, trazendo destaque para as células fotovoltaicas. Anos mais tarde, na década de 1990, a Organização das Nações Unidas (ONU) levantou a necessidade dos países reduzirem as suas emissões de poluentes, o que incentivou a criação de políticas governamentais de desenvolvimento na geração de energia fotovoltaica. Apesar de todo incentivo governamental, a difusão em larga escala da energia fotovoltaica, cresceu significativamente apenas após a primeira década do século XXI, isso porque o custo inicialmente era muito elevado. O gráfico da figura 23, mostra o crescimento na capacidade global de energia solar instalada durante o início do século XXI (SANTIAGO DOS SANTOS, 2018).

Figura 23 – Capacidade global de energia solar instalada entre 2002 e 2021.



Fonte: *Global Market Outlook for solar power*, 2022.

O crescimento da energia solar no mercado só foi possível graças as inúmeras pesquisas desenvolvidas para baratear custos e otimizar a produção de energia, utilizando diferentes materiais e aplicando diferentes técnicas de fabricação. A seguir serão detalhados diferentes tipos de células fotovoltaicas utilizadas atualmente de acordo com o material e método de fabricação separado por gerações.

### 2.2.1 Primeira geração

As tecnologias de primeira geração representam 85% do mercado, são baseadas no silício e podem ser classificadas de acordo com o processo de fabricação em películas de silício monocristalino e policristalino (MELO; SAMPAIO, 2014).

As células fotovoltaicas de silício monocristalino são assim chamadas porque são produzidas através do processo de Czochralski, no qual são produzidos cristais únicos redondos com vários metros de largura que serão fatiados para dar origem a diversas células a partir de um único cristal. Essas células são atualmente as mais utilizadas, por apresentarem uma das maiores eficiências do mercado, podendo chegar a uma eficiência de até 18% (ECOIA, 2014).

Já no caso das células de silício policristalino, o processo de fabricação é menos elaborado e vários cristais são fundidos em um único bloco. O bloco é partido em diversas laminas que darão origem as células fotovoltaicas. A estrutura policristalina dificulta a passagem dos elétrons, tornando as células de silício policristalino menos eficientes se comparadas as células de silício monocristalino, tendo uma eficiência média de 15%. Apesar disso, as células de silício policristalino possuem um custo mais baixo, por gastar menos energia no processo de fabricação (ECOIA, 2014). A diferença visual entre as células de silício monocristalino e policristalino pode ser visualizada na figura 24.

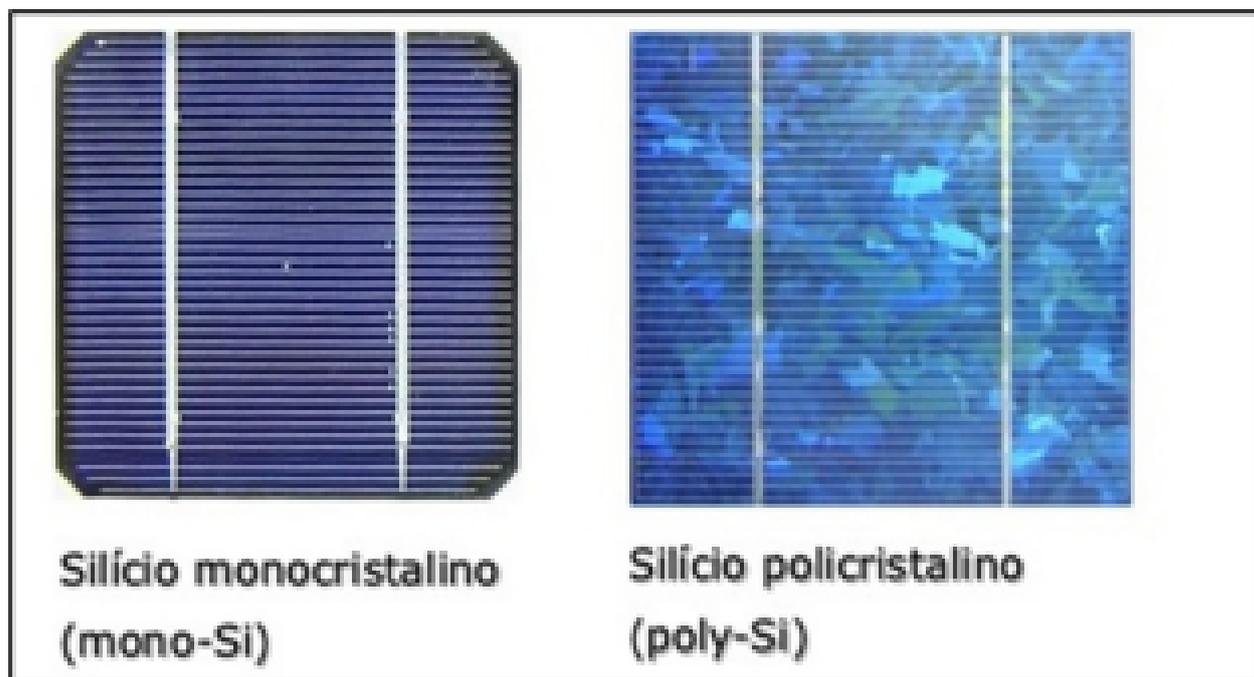
### 2.2.2 Segunda geração

As células de segunda geração são também chamadas de células de película fina. Essa geração surgiu na década de 90 com o objetivo de reduzir o consumo energético e o gasto de matéria prima na produção das células fotovoltaica (BAHNIUK, 2022). O processo de fabricação das células de película fina é muito mais simples e consiste basicamente em depositar finas camadas de um material semicondutor em um substrato. Esse processo de fabricação permite que as células tenham tamanho e formato irrestrito, e apresentem um custo muito inferior as células de primeira geração (PORTAL ENERGIA, 2004).

Apesar disso, as células de película fina apresentam uma eficiência menor do que as células de primeira geração. Os principais materiais presentes nesse mercado são: silício amorfo, telureto de cádmio e dissilente de cobre, índio e gálio.

O silício amorfo é a tecnologia de películas finas mais antiga e conhecida, o seu processo de fabricação constrói estruturas irregulares de cristal. Os custos de fabricação são atrativos mas em contra partida a eficiência desse tipo de célula está muito abaixo da

Figura 24 – Diferença entre as células de silício monocristalino e policristalino.



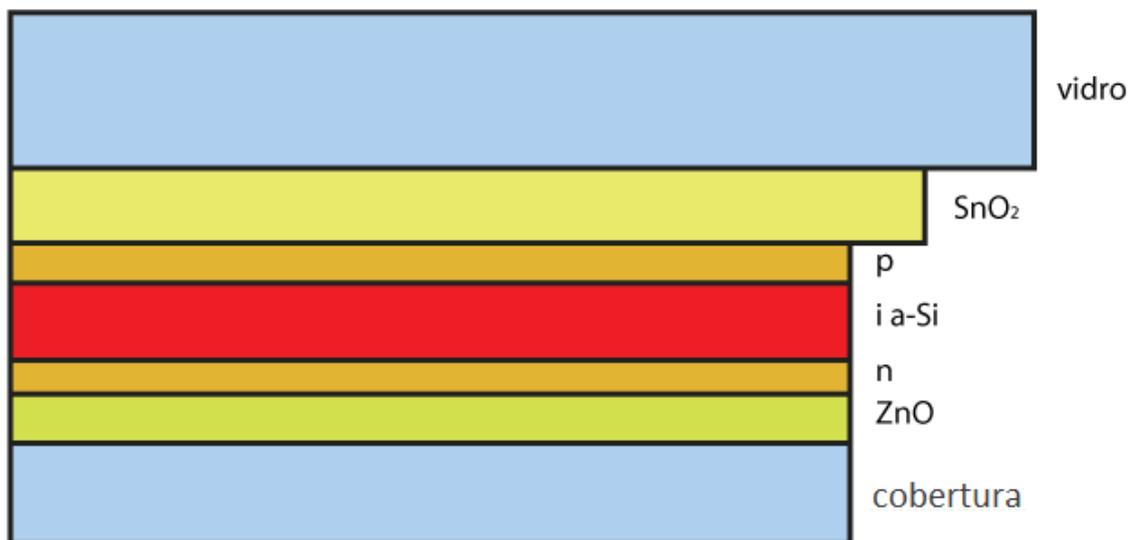
Fonte: Cepel, 2013.

eficiência demonstrada por células de primeira geração, girando em torno de 8%. Além disso, a eficiência decai ao longo dos primeiros 6 a 12 meses de vida útil da célula, por conta da degradação induzida pela luz. Para melhorar o rendimento e reduzir a degradação desse tipo de célula, muitas vezes são adotados métodos de fabricação com várias camadas, desse modo a degradação ao longo do tempo é reduzida e a célula pode atingir uma eficiência de até 12%. A figura 25 mostra a estrutura de uma célula de silício amorfo construída em camadas (SANTIAGO DOS SANTOS, 2018).

As células de silício amorfo são muito cotadas para aplicações em dispositivos eletrônicos como relógios e calculadoras, por sua flexibilidade e tamanho reduzido, com espessura entre 1 e 3 mm variando de acordo com o substrato utilizado. Além disso, ao longo do anos, vem ganhando destaque nas construções civis, com aplicações em fachadas e coberturas (JOYCE, 2019).

As células fotovoltaicas de telureto de cádmio também são uma tecnologia antiga e conhecida, informações datam a primeira fabricação de uma célula desse tipo em 1963. O telureto de cádmio se mostra um interessante para construção de células fotovoltaicas por apresentar um alto coeficiente de absorção do espectro solar e um baixo custo de fabricação das células, mas, em contra partida, o potencial de toxicidade da substância é um limitante para fabricantes e para o mercado. As células solares de telureto de cádmio são fabricadas sobre um substrato de vidro (figura 26), e apresentam uma eficiência modular de 6 a

Figura 25 – Representação da forma construtiva de uma célula de silício amorfo em camadas.



Fonte: BlueSol, 2018.

9%, com uma espessura de aproximadamente 3mm e coloração esverdeada. Diferente das células de silício amorfo, as células de telureto de cádmio não sofrem grande perda de eficiência por conta da degradação solar, mantendo pelo menos 90% da potência por até 25 anos (PORTAL ENERGIA, 2004).

Figura 26 – Representação da forma construtiva de uma célula de telureto de cádmio.

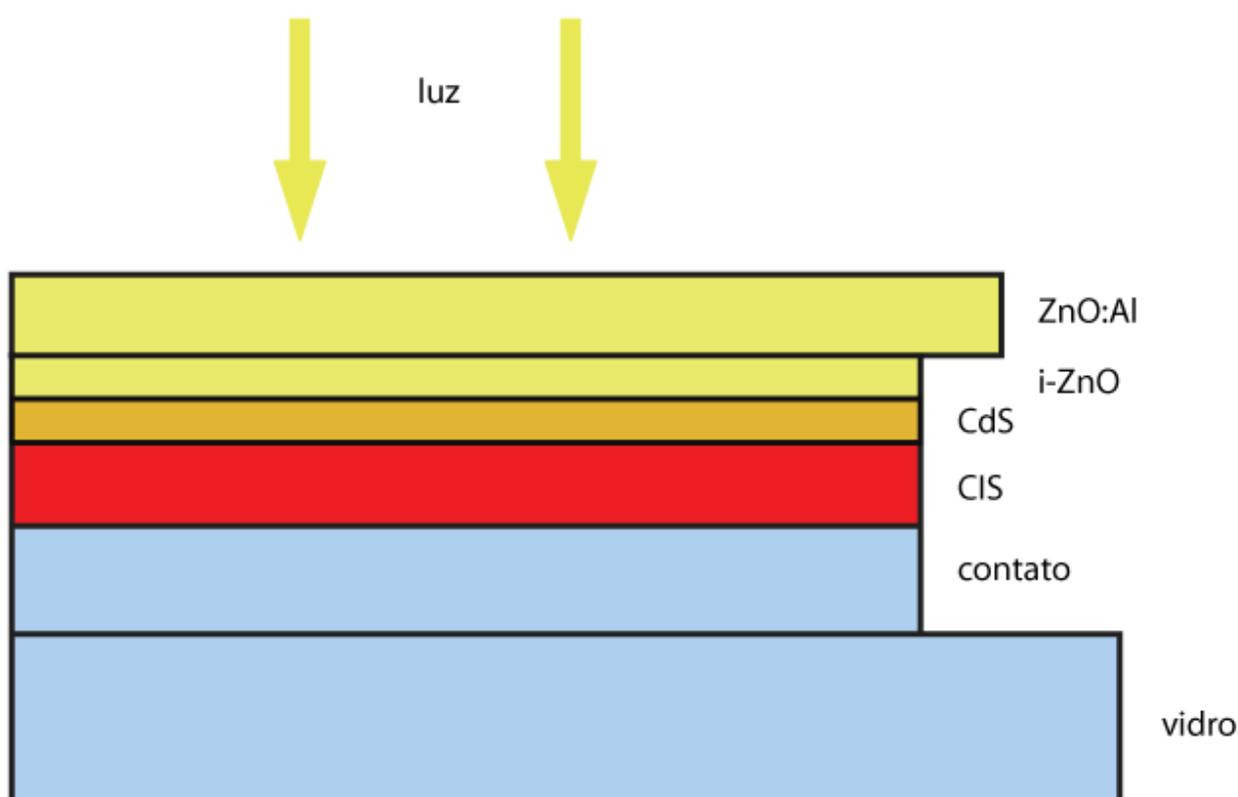


Fonte: BlueSol, 2018.

A comercialização das tecnologias fotovoltaicas CIS e CIGS se iniciou no final do século XX. As células CIS (CuInSe<sub>2</sub>), utilizam o cobre, o índio e o selênio e as células

CIGS utilizando os mesmos elementos mas com uma ligação entre o índio e o gálio para obtenção de melhor desempenho. A figura 27 mostra a estrutura de uma célula CIGS. Essa tecnologia, diferente das demais de segunda geração, apresenta um processo de fabricação complexo e mais caro, por conta do uso do Índio. As eficiências dos módulos CIS e CIGS são as mais altas das películas de filmes finos, apresentando uma eficiência máxima de 19,6% em laboratório e 15,7% em módulos comerciais (JOSE BÜHLER *et al.*, 2014). Assim como as outras células de segunda geração, as células CIS e CIGS apresentam uma espessura milimétrica de cerca de 3mm de acordo com o substrato.

Figura 27 – Representação da forma construtiva de uma célula CIGS.



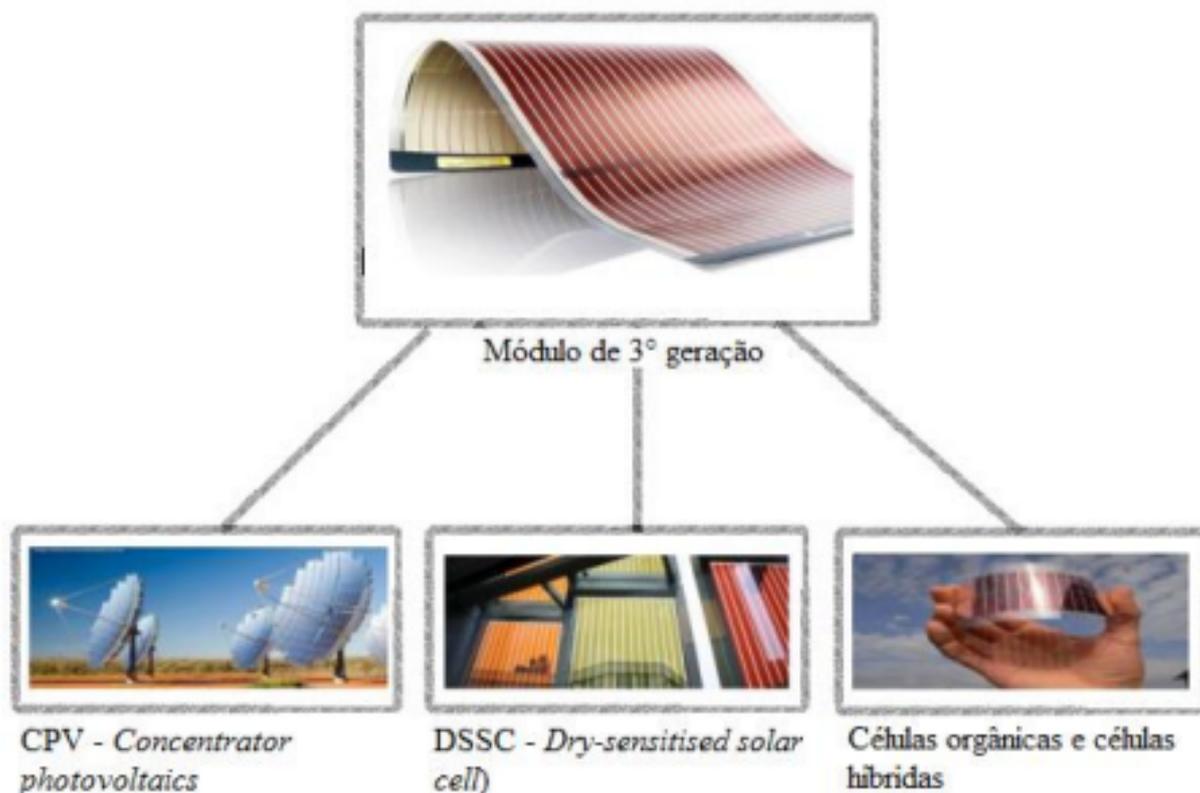
Fonte: BlueSol, 2018.

### 2.2.3 Terceira geração

As células solares de terceira geração surgiram com o objetivo de reduzir os custos de produção de células fotovoltaicas e atingir altos níveis de eficiência, mesclando tecnologias da primeira e segunda geração. As tecnologias de terceira geração ainda estão em estágios iniciais de desenvolvimento e englobam tecnologias orgânicas, pontos quânticos, células multijunção, células de portadores quentes, células sensibilizadas por corante e tecnologias

de *upconversion* (JOSÉ BÜHLER *et al.*, 2014). A figura 28 ilustra as tecnologias de terceira geração.

Figura 28 – Células fotovoltaicas de terceira geração.



Fonte: Fernandes Coelho, 2018.

A energia solar fotovoltaica de concentração é uma tecnologia de terceira geração que combina elementos da energia solar fotovoltaica e concentrada, utilizando espelhos ou lentes para direcionar e concentrar a luz solar em áreas menores de células fotovoltaicas, aumentando assim a intensidade da radiação. Outro tipo de célula de terceira geração ilustrada na imagem 28 são as células solares sensibilizadas por corantes naturais, um tipo de tecnologia de células solares que utiliza corantes orgânicos naturais para absorver a luz solar e gerar eletricidade. Por último, as células solares orgânicas utilizam materiais orgânicos, como polímeros conjugados, para converter a luz solar em eletricidade, e as células solares híbridas combinam materiais orgânicos e inorgânicos, buscando otimizar a eficiência e estabilidade na conversão de energia solar em eletricidade.

#### 2.2.4 Irradiação solar no Brasil

A irradiação solar refere-se à propagação da energia do sol sem a necessidade de um meio material. É medido em um intervalo de tempo e é expresso em termos da quantidade

de radiação solar recebida em uma determinada área, comumente é medida em watt-hora por metro quadrado ( $\text{Wh/m}^2$ ) (GANDELMAN, 2021). A irradiância solar total é definida como a potência total de energia proveniente do sol por unidade de área a uma distância conhecida entre o sol e a terra (GÓMEZ *et al.*, 2018).

Fatores como localização geográfica, sombreamento e clima afetam a intensidade e a frequência da irradiação solar, o que impacta diretamente na quantidade de energia que pode ser gerada a partir da energia solar (PATEL, 2023). A realização de estudos de viabilidade de instalações fotovoltaicas é essencial para determinar a disponibilidade de irradiação solar em um determinado local (MORAIS *et al.*, 2021). Além disso, entender os fatores que afetam a irradiação solar é crucial para o setor de energia, pois pode ajudar a identificar regiões com alto potencial de geração de energia solar e desenvolver estratégias para aumentar a eficiência dos sistemas de energia solar (GÓMEZ *et al.*, 2018).

A irradiação solar desempenha um papel significativo no setor de energia do Brasil, já que o país tem um alto potencial de geração de energia solar, principalmente nos estados do Nordeste, onde a quantidade de radiação solar é alta durante todo o ano (MORAIS *et al.*, 2021). A disponibilidade de irradiação solar varia em diferentes regiões do Brasil, e fatores como altitude, relevo e clima influenciam a quantidade de irradiação solar recebida em um determinado local (MORAIS *et al.*, 2021). Apesar das variações na irradiação solar em todo o país, o Brasil tem uma vantagem significativa sobre outros países quando se trata de geração de energia solar. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, o país conta com uma irradiação solar horizontal global média em torno de 5.153 watts hora por metro quadrado (PEREIRA *et al.*, 2017).

Para mensurar a radiação recebida, existem vários instrumentos de medição, incluindo piranômetros, que medem a irradiância horizontal global, irradiância horizontal difusa e irradiância de plano de matriz. Esses instrumentos são usados para o desenvolvimento de projetos de energia solar, pesquisa em aplicações de energia solar e avaliação do desempenho da planta. Além disso, existem soluções de baixo custo disponíveis para medição de irradiância e irradiação solar (KENJI SHIBUYA; HENG MEU LEI, 2022). A medição precisa da irradiação solar é crucial para o projeto e instalação adequados de sistemas fotovoltaicos.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado pela primeira vez em 2017 e atualizado em 2022, é um banco de dados abrangente que fornece informações sobre irradiação solar, temperatura e velocidade do vento para diferentes regiões do Brasil (PEREIRA *et al.*, 2017). Esta base de dados é um recurso valioso para a avaliação do potencial de energia solar no país e análise de viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos (MORAIS *et al.*, 2021). Além disso, existem várias outras ferramentas de mapeamento da irradiação solar disponíveis no Brasil, como a Ferramenta de Informação do Potencial Solar (INPE, 2019) e o mapa de insolação. Essas ferramentas fornecem informações para o planejamento e implementação de projetos de energia solar no Brasil. Como o Brasil possui um dos

maiores potenciais solares do mundo, a medição e análise adequadas da irradiação solar são cruciais para o crescimento e desenvolvimento do setor de energia solar no país.

### 2.3 PEGADA DE CARBONO

À medida que o consumo de recursos do planeta se intensifica, se torna cada vez mais importante medir o impacto humano no meio ambiente, a fim de criar parâmetros que alcancem o equilíbrio entre meio ambiente, sociedade e desenvolvimento econômico. Este equilíbrio é importante para avaliar a sustentabilidade do consumo de recursos e é idealmente caracterizado por uma equivalência entre a taxa de consumo e a taxa de renovação do ambiente (GONÇALVES PEREIRA, 2008). A pegada de carbono é um importante e muito conhecido indicador da sustentabilidade das emissões de GEEs e visa quantificar de maneira metodológica e estruturada as emissões gasosas associadas a atividades e produtos, a fim de observar a contribuição de determinado produto ou serviço para o aquecimento global (MINX; WIEDMANN, 2007).

Atualmente, existem três protocolos principais que orientam o cálculo da pegada de carbono: o PAS 2050, O protocolo GHG (Norma de contabilidade e relatório de ciclo de vida do produto) e a ISO 14067. Neste tópico serão apresentados e comparados os três métodos mencionados e abordado o conceito de análise do ciclo de vida de um produto.

#### 2.3.1 PAS 2050

O PAS 2050 é um protocolo público disponível gratuitamente, criado em 2008 e revisado em 2011, que visa avaliar as emissões de GEE ao longo de todo ciclo de vida de um produto. O protocolo foi desenvolvido de maneira conjunta pela BSI (*British Standards*), *Carbon Trust* e o Departamento de Meio Ambiente, Alimentação e Assuntos Rurais do Reino Unido. A metodologia do PAS 2050 foi construída com a contribuição e participação de diversas entidades e especialistas internacionais e aborda tanto bens quanto serviços, projetando dados tanto para fabricantes e outras empresas quanto para o consumidor final. No contexto empresarial, o protocolo permite que as empresas avaliem internamente as emissões ao longo de todo ciclo de vida dos produtos desenvolvidos e facilita análises de alternativas e inovações no âmbito da redução de emissões. Além de possibilitar que a empresa estabeleça um referencial para redução de emissões e compare o impacto ambiental de diferentes produtos e soluções. No contexto do consumidor final, o PAS 2050 confere confiabilidade às informações de emissões repassadas ao consumidor, fornecendo informações sólidas obtidas através de um método uniforme e padronizado, para auxiliar na decisão final de compra (BSI; DEFRA; CARBON TRUST, 2008).

O protocolo PAS 2050 traz um guia disponível publicamente que descreve os propósitos do método e um instrutivo para auxiliar na implementação do método na avaliação da pegada de carbono. O guia ressalta que o PAS 2050 concentra sua avaliação

apenas nas emissões de GEE, sem considerar outros impactos ambientais e sociais, tais como uso de água, biodiversidade e padrões de trabalho. O método descrito pode ser utilizado para avaliar as emissões de GEE do ciclo de vida de bens de consumo, bens de negócio para negócio e serviços. O guia é dividido em três tópicos principais:

- Início: essa seção abrange tópicos relacionados a definição e delimitação de objetivos no estudo, escolha do produto estudado e engajamento dos fornecedores;
- Cálculo da Pegada de Carbono: nesta seção são detalhados os passos para efetivamente iniciar o cálculo da pegada de carbono. Essa seção é subdividida em cinco etapas: construção de um mapa do processo, verificação de limites e prioridades, coleta de dados, cálculo da pegada de carbono e verificação de incertezas;
- Próximos passos: nesta seção são abordadas as validações dos resultados obtidos, a redução das emissões e tópicos relacionados a comunicação da pegada de carbono para reivindicar as reduções necessárias.

O quadro 4 ilustra os aspectos gerais do protocolo PAS 2050.

Quadro 4 – PAS 2050 - Requisitos e Especificações.

<b>Requisitos e especificações</b>	<b>PAS 2050</b>
Objetivos	Fornecer especificações uniformes para as emissões de GEE de bens e serviços
Estágios do ciclo de vida incluídos	<i>Crade-to-grave / Crade-to-gate</i>
Critérios de corte	Exclusão com base na materialidade (<1%); pelo menos 95% do ciclo de vida completo incluído
Bens de capital	Excluídos
Estoque de Carbono	Estoque de Carbono: O carbono armazenado dentro de 100 anos deve ser registrado e contabilizado
Emissões tardias de carbono	Um fator de ponderação é proposto

Fonte: Adaptada pelo autor, Wang, 2018.

### 2.3.2 Protocolo GHG

O Protocolo de GEE (GHG), lançado em 1998, foi construído colaborativamente por um grupo de empresas, organizações não governamentais (ONGs), governos e outras instituições. O protocolo tem como missão o desenvolvimento de padrões e ferramentas para contabilidade de GEEs aceitos internacionalmente, bem como promover sua adoção com o objetivo de atingir uma economia baseada em soluções de baixa emissão. Todos os padrões desenvolvidos dentro do protocolo GHG incluem orientações detalhadas para auxiliar empresas e outros usuários na implementação do método, essas orientações estão disponíveis gratuitamente no site do protocolo GHG.

Um dos guias desenvolvidos pelo protocolo GHG é o Padrão de Contabilidade e Relatórios do Ciclo de Vida do Produto, desenvolvido com o intuito de fornecer normas e procedimentos para o cálculo da pegada de carbono de um produto específico. A figura 29 mostra cada uma das etapas do protocolo GHG e abaixo são descritos cada um dos passos definidos pelo protocolo para obtenção e divulgação dos dados de emissão de carbono por um produto específico.

Figura 29 – Protocolo GHG para cálculo da pegada de carbono de um produto.



Fonte: Autor.

- Definição dos objetivos: inicialmente é necessário e mandatório definir quais são os objetivos do levantamento do inventário para que seja possível ter mais clareza e direcionamento na escolha do método mais apropriado bem como os dados relevantes para a construção do inventário. O quadro 5 descreve os quatro grandes objetivos elencados pelo guia:
- Revisão de princípios e fundamentos: todos os inventários de GEE elaborados a partir do protocolo GHG devem obrigatoriamente seguir os princípios listados abaixo (PANKAJ BHATIA *et al.*, 2008):

Quadro 5 – Objetivos listados no protocolo GHG.

<b>Objetivo</b>	<b>Descrição</b>
Gestão das mudanças do clima	Identificar novas oportunidades de mercado e incentivos regulatórios; Identificar riscos físicos e regulatórios relacionados ao impacto no clima no ciclo de vida de um produto; Avaliar riscos na flutuação do custo de energia e disponibilidade de material
Rastreamento de performance	Foco em aumento da eficiência e redução de custos através da redução de emissão de GEE ao longo do ciclo de vida; Definição de metas de redução de emissões para um determinado produto; Medir e avaliar performance de um produto ao longo do tempo; Quantificar ganhos na eficiência de um determinado produto
Gestão de fornecedores e clientes	Parceria com fornecedores para redução de GEE; Avaliação da performance dos fornecedores em relação a emissão de GEE; Reduzir o consumo de energia, as emissões de GEE, os riscos e custos na cadeia de suprimentos
Diferenciação de produto	Aquisição de vantagem competitiva através de redução de emissões; Recriar um produto com base nas preferências do consumidor; Melhorar a imagem de marca com produtos de baixa emissão

Fonte: Adaptada pelo autor, Pankaj, 2008.

- Relevância: O inventário de GEE deve ser concebido de modo a atender à todas necessidades do objetivo proposto;
- Integralidade: O inventário de GEE deve cobrir todas as emissões e remoções de GEE associadas ao produto ou processo em consideração, emissões ou remoções significativas excluídas devem ser divulgadas e justificadas;
- Consistência: Para permitir comparações significativas ao longo do tempo, é importante utilizar metodologias, dados e pressupostos consistentes ao realizar inventários de GEE;
- Transparência: Este princípio enfatiza a necessidade de documentar minuciosamente o processo de inventário, incluindo suposições e fontes de dados, para demonstrar a fiabilidade dos seus dados;
- Precisão: A precisão é crucial para garantir que as emissões e remoções de GEE comunicadas refletem de perto os valores reais, o relatório deverá minimizar a sobrestimação ou subestimação sistemática das emissões e reduzir ao máximo as incertezas.

Os princípios devem ser revisados e tomados em conta durante todo o processo de inventariação e visam demonstrar confiabilidade dos dados obtidos e garantir a integridade do inventário de GEE (PANKAJ BHATIA *et al.*, 2008).

- Definição de escopo: a definição de um bom escopo, juntamente com o uso dos princípios e definição dos objetivos do inventário de carbono, garantem o sucesso do mesmo. A primeira etapa para a definição do escopo, consiste na definição de qual produto será estudado, de acordo com o seu impacto no meio ambiente e estratégia comercial. Em seguida, é necessário definir a unidade de análise baseada nas funções do produto escolhido. É possível definir a unidade de análise baseada no uso do produto ou até mesmo em um tempo pré determinado. Para chegar na melhor escolha para o inventário é necessário analisar a função do produto analisado e o que impacta ou influencia na sua vida útil.
- Definição de limites: a definição de limites descrita pelo protocolo GHG é o que define que emissões e remoções serão consideradas no inventário. Durante a definição dos limites devem ser identificados todos os processos envolvidos durante o ciclo de vida do produto analisado e eventuais processos que possam impactar o seu desempenho. Os processos identificados são divididos em estágios do ciclo de vida e ilustrados em um fluxograma com a identificação de todos os materiais e recursos energéticos consumidos em cada etapa. Com o mapeamento de todos os processos e recursos consumidos, são definidas as emissões relevantes a serem consideradas no cálculo do inventário.
- Coleta de Dados: A coleta de dados é a etapa mais exaustiva para a construção de um bom inventário GEE e pode impactar diretamente a qualidade dos resultados obtidos. Para a etapa de coleta de dados, o GHG protocolo sugere o seguimento de sete etapas:
  - Etapa 01: Desenvolver uma estratégia de gerenciamento e coleta de dados documentada
  - Etapa 02: Identificar todos os dados necessários de acordo com o mapa criado na etapa de definição de limites
  - Etapa 03: Realizar uma triagem e concentrar os esforços na coleta de dados mais relevantes dentro do processo
  - Etapa 04: Identificar todos os tipos de dados
  - Etapa 05: Coletar dados primários de todos os processos sob controle da empresa
  - Etapa 06: Coletar dados primários e secundários e avaliar e documentar os dados relacionados a emissão à medida que são coletados
  - Etapa 07: Melhorar a qualidade dos dados, focando nos processos com impactos maiores.
- Alocação: A grande maioria dos produtos possui um ou mais processos envolvidos com múltiplas entradas e saídas, das quais nem sempre é possível mensurar

as emissões individualmente. Nesses casos, as emissões totais do processo comum precisa ser porcionado entre as diferentes entradas e saídas. Esse processo de fracionamento das emissões totais de um processo entra múltiplas entradas e saídas é a alocação, etapa crítica e fundamental do inventário de GEE.

- **Avaliação de incertezas:** A etapa de avaliação de incertezas é fundamental para a confiabilidade do inventário de GEE e consiste basicamente em avaliar a qualidade dos dados obtidos e estabelecer parâmetros de incertezas de acordo com os tipos de dados. A avaliação de incertezas pode incluir alocações, avaliações de potenciais de aquecimento global e modelos de cálculo.
- **Cálculo de resultados:** A etapa de cálculo de resultados estabelece uma série de métodos de cálculo para obtenção dos resultados efetivos do inventário de carbono baseado nos dados coletados, revisados e analisados nos passos anteriores. Essa é a etapa que vai efetivamente obter os números do inventário.
- **Execução de Garantia:** O protocolo GHG para inventário da pegada de carbono de um produto estabelece uma série de protocolos e requisitos para garantir a confiabilidade do inventário com uma auditoria de todo processo realizado. A auditoria pode ser realizada por um auditor interno da empresa que está trabalhando no inventário ou pode ainda ser um auditor externo credenciado para realizar o processo. A auditoria é feita baseada em todo registro do processo realizado e a confiabilidade de todos os dados é analisada para garantir que o processo realizado seguiu o protocolo e foi transparente.
- **Reportar Resultados:** Para divulgação dos resultados, o protocolo estabelece claramente quais dados devem ser divulgados e estabelece orientações sobre a maneira de divulgação para um reporte assertivo e que gere engajamento e confiabilidade.
- **Definir Objetivos de Redução:** Após a execução de todos os passos citados anteriormente, o protocolo estabelece ainda um guia de como estabelecer e seguir metas de redução de emissões de determinado produto estudado baseado nos resultados obtidos no inventário.

O quadro 6 ilustra os aspectos gerais do protocolo GHG.

### 2.3.3 ISO 14067

A ISO 14067, desenvolvida pela Organização Internacional de Normalização (ISO), é uma norma internacional sobre a quantificação de emissões de GEE associadas a produtos. A norma é baseada nas normas relacionadas às avaliações do ciclo de vida (ISO 14040/44) e define várias diretrizes e requisitos tanto para a avaliação quanto para a divulgação das pegadas de carbono associadas a produtos.

Quadro 6 – Requisitos e especificações - Protocolo GHG.

<b>Requisitos e especificações</b>	<b>GHG Protocol</b>
Objetivos	Fornecer guias detalhados de contabilização e divulgação
Estágios do ciclo de vida incluídos	<i>Cradle-to-grave / Cradle-to-gate</i>
Crítérios de corte	Sem critérios de corte pois é necessário 100% de completude
Bens de capital	Excluídos mas encorajados a serem incluídos quando relevantes
Estoque de Carbono	No caso do <i>cradle-to-gate</i> o crédito é dado para o armazenamento biogênico de carbono
Emissões tardias de carbono	Não deve ser incluído

Fonte: Adaptada pelo autor, Wang, 2018.

Ao contrário do protocolo GHG mencionado anteriormente, a norma ISO 14067 não descreve um método mas sim fornece algumas diretrizes e regras para o cálculo da pegada de carbono. Principais regras e metodologias indicadas pela ISO 14067:

- Escopo de estudo: a norma fornece diretrizes para estabelecer claramente o escopo de estudo, definindo quais gases serão analisados, qual o produto analisado e que etapas do ciclo de vida estão sendo tomadas em conta.
- Definição de limites: a definição de limites é descrita pela norma como uma das etapas mais importantes do estudo, visto que delimitar muito bem o escopo pode evitar duplicidade de dados e levantar quais etapas tem maior influência no resultado final.
- Metodologias de inventário: A ISO 14067 fornece orientações sobre as metodologias que devem ser usadas para quantificar as emissões de GEE em cada etapa do ciclo de vida do produto. Isso pode envolver o uso de padrões reconhecidos, como o Sistema de Inventário de GEEs (GHG Protocol), entre outros.
- Avaliação de incertezas: A norma exige que as organizações avaliem e relatem as incertezas associadas à quantificação das emissões de GEE. Isso ajuda a fornecer informações transparentes sobre a confiabilidade dos dados.
- Comunicação de resultados: A ISO 14067 estabelece diretrizes para a comunicação dos resultados, incluindo a apresentação de informações de forma clara e transparente, para que os consumidores e outras partes interessadas possam entender facilmente as emissões de GEE associadas ao produto.
- Verificação: A norma também fornece orientações para a verificação independente dos resultados, garantindo a precisão e a conformidade com as diretrizes

estabelecidas.

- Relatórios periódicos: As organizações são incentivadas a atualizar regularmente os inventários de emissões de GEE e a comunicação de resultados para refletir melhorias na eficiência e no desempenho ambiental ao longo do tempo.

O quadro 7 ilustra os aspectos gerais da ISO 14067.

Quadro 7 – Aspectos Gerais ISO 14067.

<b>Requisitos e especificações</b>	<b>ISO 14067</b>
Objetivos	Padronizar o processo de quantificação e de comunicação das emissões de GEE
Estágios do ciclo de vida incluídos	<i>Crade-to-grave</i> / <i>Crade-to-gate</i> / <i>Gate-to-gate</i> / Ciclo de vida parcial
Critérios de corte	Sem critério específico disponível
Bens de capital	Excluídos se não influenciam consideravelmente o resultado
Estoque de Carbono	Se o armazenamento de carbono for calculado, deve ser reportado separadamente
Emissões tardias de carbono	Não deve ser incluído

Fonte: Adaptada pelo autor, Wang, 2018.

### 2.3.4 Análise do Ciclo de Vida

A análise do ciclo de vida (ACV) de um produto é uma ferramenta metodológica que visa compreender e avaliar os impactos ambientais associados a todas as etapas do ciclo de vida de um produto, desde a extração de matérias-primas, passando pela produção, distribuição, uso e, finalmente, a disposição final. O método demonstrou-se muito relevante para a tomada de decisões estratégicas em empresas e tomada de decisões em políticas públicas relacionadas a sustentabilidade (MARCAL *et al.*, 2013).

A metodologia da ACV geralmente é dividida em quatro principais etapas:

- Definição do Escopo: Identificação do objetivo e do escopo da ACV, determinando claramente quais aspectos do ciclo de vida serão analisados e quais impactos ambientais serão considerados, incluído a definição do sistema de estudo, com limites geográficos, temporais e funcionais.
- Inventário do Ciclo de Vida ICV: Coleta de dados detalhados sobre todas as entradas (materiais, energia, etc.) e saídas (emissões, resíduos, etc.) associadas ao produto ao longo de cada fase do ciclo de vida.
- Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida AICV: Avaliação dos dados do inventário para determinar os impactos ambientais potenciais associados a cada fase do ciclo de vida, com a utilização de modelos de avaliação de impacto ambiental

para converter os dados brutos do inventário em indicadores específicos, como pegada de carbono, consumo de água, entre outros.

- **Interpretação:** Análise e interpretação dos resultados para identificar as áreas críticas do ciclo de vida, onde os maiores impactos ocorrem e formular recomendações e estratégias para melhorar o desempenho ambiental do produto.

Essa abordagem permite uma avaliação abrangente, considerando não apenas as emissões de GEEs, mas também outros impactos como o consumo de recursos naturais, a geração de resíduos e a toxicidade de substâncias utilizadas. A ACV proporciona uma visão holística, considerando não apenas os aspectos ambientais, mas também os sociais e econômicos, permitindo a identificação de pontos críticos ao longo do ciclo de vida do produto e possibilitando a implementação de práticas mais sustentáveis (MARCAL *et al.*, 2013)

Os conceitos apresentados neste capítulo servirão de subsídios para a análise que será desenvolvida nos próximos capítulos. Antes, porém, será apresentada a metodologia da pesquisa

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo destaca a metodologia empregada na investigação da pegada de carbono resultante da implementação de uma película fotovoltaica na carroceria de um veículo movido a combustão. O desenvolvimento do estudo foi baseado no protocolo GHG de Padrão de Contabilidade e Relatórios do Ciclo de Vida do Produto, por ser um método abrangente e adaptativo, e levou em conta as diretrizes da norma ISO 14067, sobre a quantificação de emissões de GEEs associadas a um produto. Este trabalho adota a classificação da pesquisa como um "estudo de caso" (EISENHARDT, 1989). Nesse contexto metodológico, a pesquisa se concentrou em uma análise aprofundada e descritiva de um caso específico, o estudo da aplicação da película *SunFlare 60* em um veículo utilitário na cidade de São José dos Pinhais. Não serão abordados detalhes técnicos do veículo em questão porque existe um acordo de confidencialidade com a montadora do veículo.

#### 3.1 DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS

O presente inventário de emissão de GEE tem como objetivo a diferenciação de produto. O inventário foi realizado com o intuito de demonstrar os impactos ambientais ao longo de todo ciclo de vida de uma aplicação de uma película fotovoltaica na carroceria de um veículo a combustão. Para ilustrar de maneira direta os impactos da aplicação, foi realizado o inventário de um mesmo veículo com e sem a aplicação da película fotovoltaica. A diferença entre os inventários será o impacto, de maneira quantitativa, proporcionado pela aplicação, tanto ambiental quanto em custo de consumo energético.

#### 3.2 REVISÃO DE PRINCÍPIOS E FUNDAMENTOS

Todo processo de cálculo do inventário de carbono dos veículos com e sem a aplicação seguiu os princípios e fundamentos estabelecidos pelo protocolo GHG. O relatório e a contabilização dos dados foi realizado de modo a atender às necessidades estabelecidas nos objetivos de maneira clara e contundente abordando todos, e apenas, os dados relevantes à análise proposta. Todos os dados que estão fora dos limites especificados e não foram considerados relevantes ao estudo, foram desconsiderados sob justificativa. Todos os dados, metodologias e pressupostos foram considerados de maneira a tornar possível e contundente a comparação dos dois inventários, do veículo com e sem a aplicação, e de maneira a conseguir os dados teóricos com a menor incerteza possível, para trazer maior confiabilidade aos dados. A contabilização seguiu os princípios estabelecidos na série de normas ISO 14040, de modo a tomar em conta todo ciclo de vida do produto, seguindo todos os passos estabelecidos no manual GHG para contabilização do inventário de carbono de produtos.

### 3.3 DEFINIÇÃO DE ESCOPO

#### 3.3.1 Definição do produto

O presente inventário de carbono tem por objetivo levantar e comparar a pegada de carbono de um veículo automotor com e sem a aplicação de uma película fotovoltaica. A seguir serão detalhados tecnicamente o veículo e a película fotovoltaica escolhidos para o estudo, o modelo e marca do veículo não serão divulgados por questões de confidencialidade da marca do setor automotivo.

##### 3.3.1.1 Veículo

O veículo de estudo é identificado no Programa Nacional de Etiquetagem Veicular como um Utilitário Esportivo Grande e foi escolhido por ser um veículo pesado com alta taxa de emissão e grande número de vendas, vendendo cerca de 2500 unidades mensais no Brasil, no ano de 2021. O veículo se encontra classificado na categoria A de eficiência em emissões, sendo considerado mais eficiente, e classificação C na categoria geral considerado com média eficiência.

O veículo possui cinco lugares e quatro portas e é equipado com um motor a combustão 1.3, movido a álcool e gasolina e possui câmbio automático CVT (Transmissão Variável Contínua) de 8 velocidades com tração dianteira e direção elétrica. O motor possui instalação dianteira com disposição transversal e 4 cilindros em linha, com 4 válvulas por cilindro. A alimentação se dá por injeção direta e a potência máxima é de 170 cavalos a álcool e 162 a gasolina. Os pneus traseiros e dianteiros são aro 17 e as dimensões do veículo são mostradas na tabela 2.

Tabela 2 – Especificações do veículo.

Comprimento	4376 mm
Capacidade do porta malas	475 litros
Peso	1353 kg
Altura mínima do solo	237 mm
Largura	1832 mm
Altura	1693 mm
Capacidade do tanque de combustível	46 litros
Carga útil	500 kg

Fonte: Autor.

O veículo conta com os seguintes sistemas de segurança do condutor e passageiros:

- *Airbags* frontais;
- Câmera traseira e câmera para visão 360°;
- Controle de tração;
- Sensores de estacionamento traseiro;

- Faróis de neblina;
- Repetidor lateral das luzes de direção;
- Controle de estabilidade;
- Assistente de partida em rampa;
- Alerta de ponto cego.

Os sistemas de conforto e entretenimento presentes no veículo são os seguintes:

- Ar condicionado
- Direção assistida
- Limitador de velocidade
- Controle elétricos dos vidros
- Ajuste elétrico dos retrovisores
- Luz no porta luvas
- Sistema *start and stop*
- Faróis com acendimento automático
- Luz no porta malas
- Luz de teto traseira
- Chave presencial
- Rádio
- Computador de bordo

O desprendimento energético causado pelos diversos sistemas elétricos do veículo é de aproximadamente 316 watts quando circulando na cidade e 318 circulando na estrada, de acordo com dados fornecidos pelo fabricante. Para fornecer a energia elétrica necessária, o veículo é equipado com uma bateria de 12V com capacidade de 60 Ah. A gestão de energia do alternador do automóvel é programada para requisitar energia do motor com um estado de carga (*State of Charge - SOC*) de 90% ou menos, para uma gestão eficiente da energia.

### 3.3.1.2 Película fotovoltaica

A película fotovoltaica do estudo é a Flex60, célula do tipo CIGS, produzida nos Estados Unidos pela empresa especialista em células solares, *Sunflare*. Segundo a empresa, o processo produtivo de alta precisão fabrica célula por célula para garantir máximo desempenho e durabilidade com uma pegada de carbono 90% menor do que as células de silício. A película possui um substrato flexível de aço inoxidável que garante durabilidade e resistência a rachaduras, sem a necessidade de suportes adicionais. A película tem uma espessura de 1,7 mm e conta com uma fita dupla face de alta aderência para

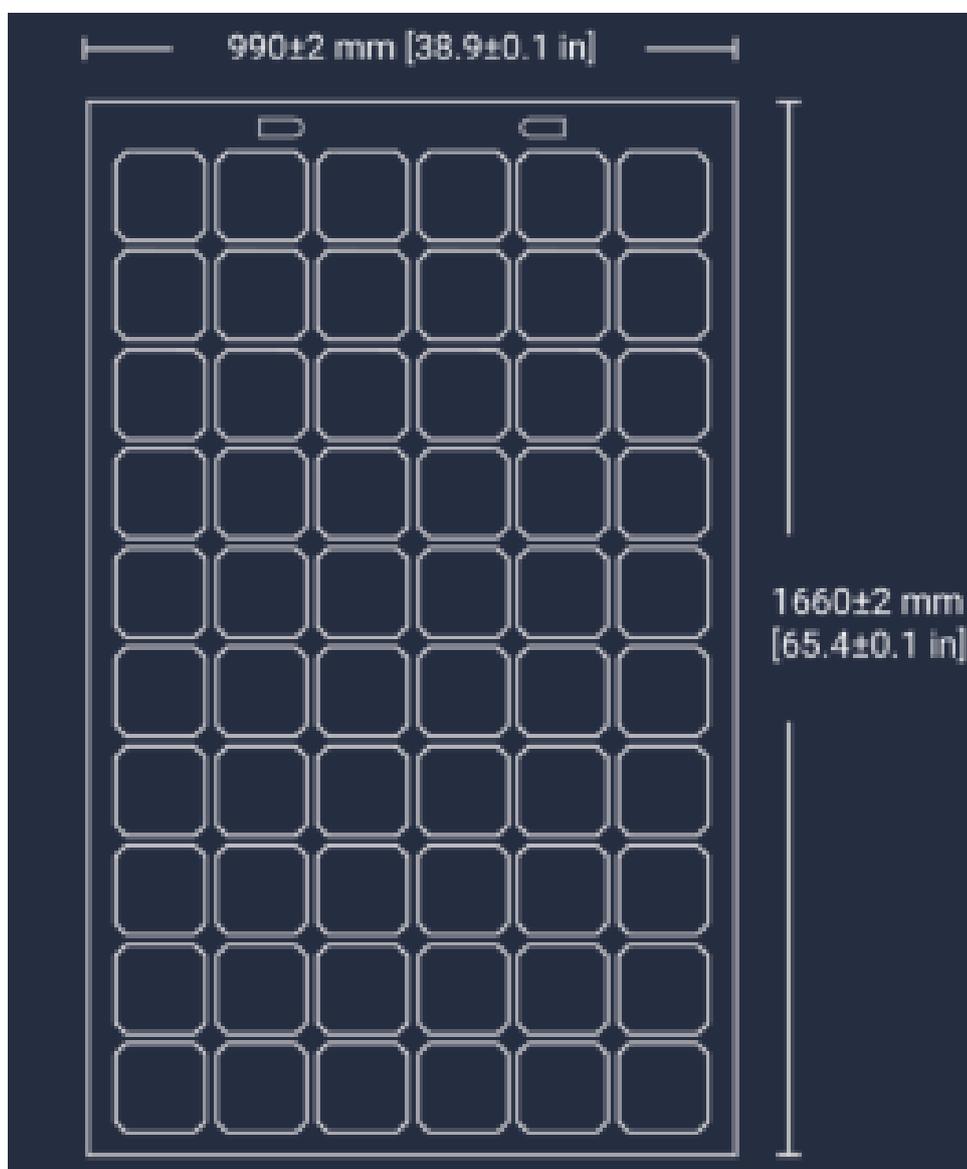
instalação simplificada e sem perfurações, as demais medidas são ilustradas na figura 30. As informações técnicas da película são mostradas na tabela 3.

Tabela 3 – Informações técnicas *Sunflare* Flex60.

Potência pico (+3/-3%)	185 W
Eficiência de abertura	15%
Tensão de pico	28,3 V
Corrente de pico	6,5 A
Voltagem de circuito aberto	36,6 V
Corrente de circuito aberto	7,5 A

Fonte: Ficha técnica *Sunflare* Flex60, 2020.

Figura 30 – Dimensões da Película Flex60.

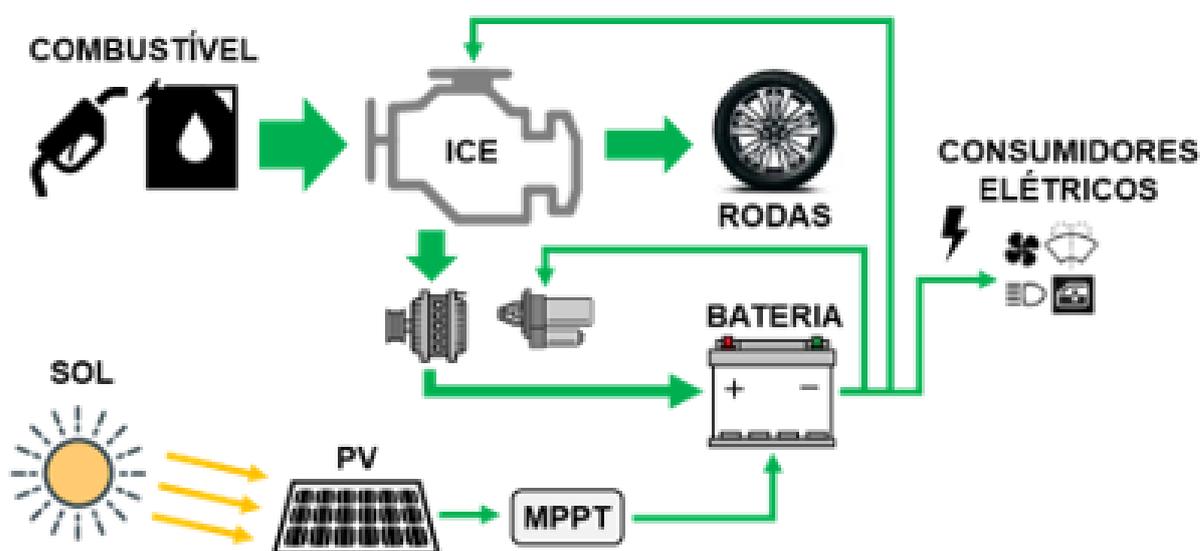


Fonte: Ficha técnica *Sunflare* Flex60, 2020.

### 3.3.1.3 Aplicação da película fotovoltaica na carroceria do veículo

A aplicação em estudo consiste em instalar a película fotovoltaica *Sunflare Flex60* na carroceria do teto do veículo utilitário esportivo descrito anteriormente. Conforme citado, a película conta com uma fita dupla face para instalação, não sendo necessário realizar nenhum tipo de perfuração, e será considerada como um acessório pós venda, sendo aplicado diretamente na concessionária de venda do veículo. Para a aplicação, a película fotovoltaica é conectada a um controlador MPPT, que por sua vez é ligado a bateria do automóvel. A figura 31 ilustra o esquema de funcionamento da aplicação.

Figura 31 – Esquema da aplicação.



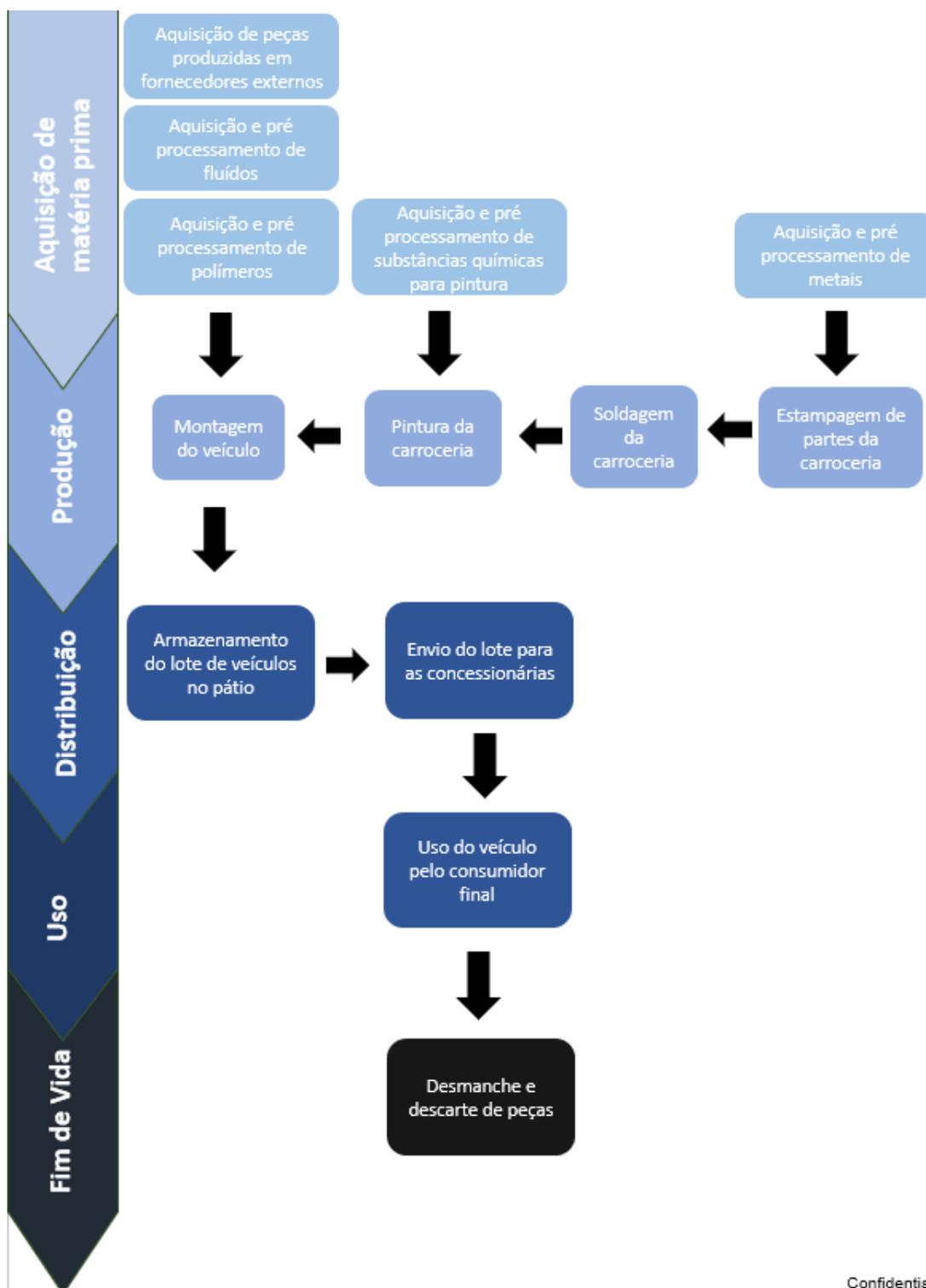
Fonte: Autor.

O funcionamento da gestão de bateria do automóvel permanece inalterado, acionando o alternador quando o SOC da bateria atinge 90%. As células fotovoltaicas permanecem carregando a bateria do veículo, estacionado ou em movimento, a fim de sempre manter a mesma com carga máxima, evitando assim o acionamento do alternador.

## 3.4 DEFINIÇÃO DE LIMITES

Para definição dos corretos limites pertinentes ao estudo, foi construído um fluxograma simplificado do ciclo de vida de um automóvel com e sem a aplicação da película fotovoltaica. Para construção do fluxograma foram considerados os cinco estágios de um ciclo de vida de produto: aquisição de matéria prima, produção, distribuição, uso e fim de vida. O fluxograma do veículo sem a aplicação da película é apresentado na figura 32 e o fluxograma do veículo com a aplicação é apresentado na figura 33.

Figura 32 – Fluxograma do ciclo de vida do veículo.

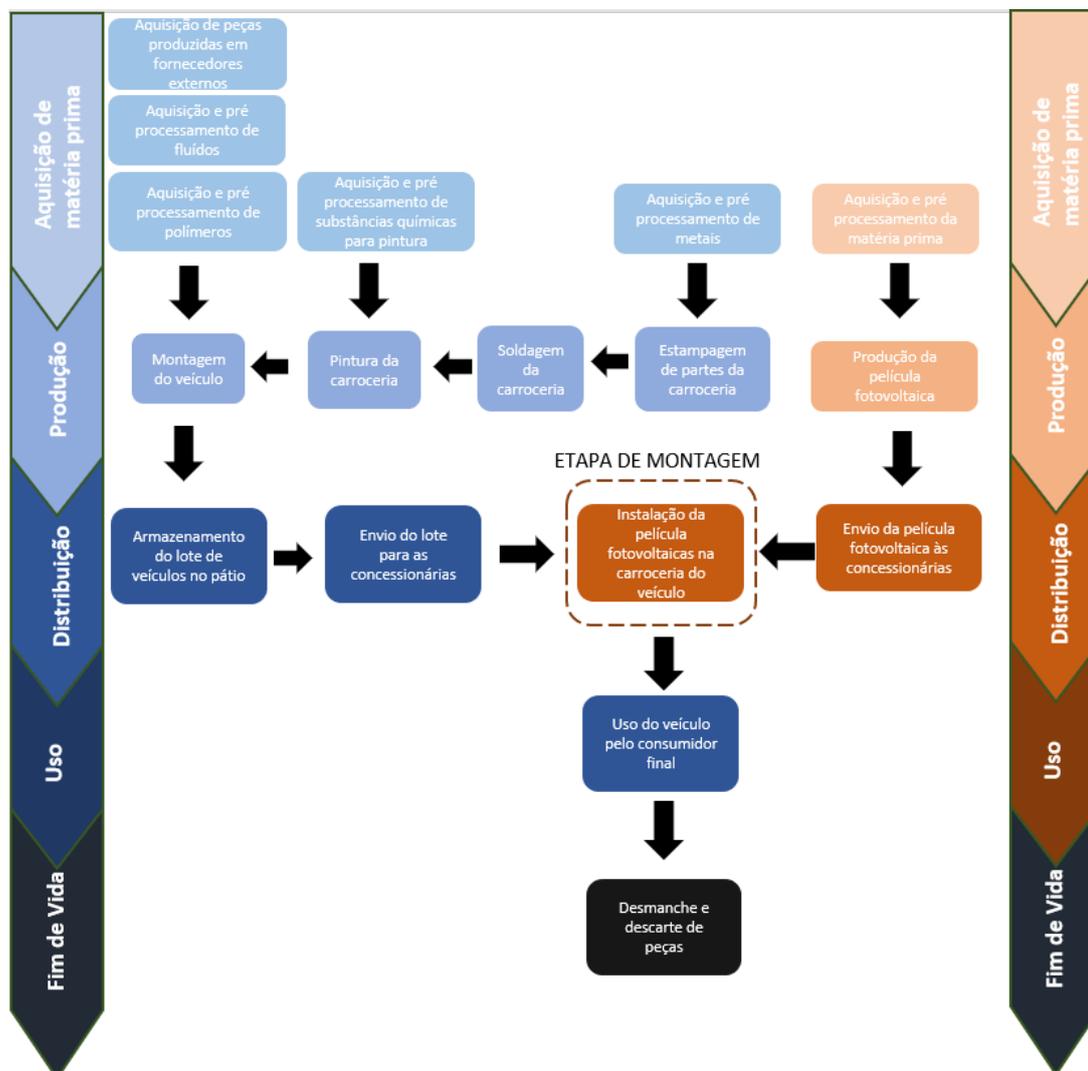


Confidential

Fonte: Autor.

As etapas ilustradas em tons de azul, são pertinentes ao ciclo de vida do veículo individualmente, em ambos os fluxogramas. As etapas ilustradas em tons de laranja são as etapas agregadas ao fluxograma do veículo após a aplicação da película fotovoltaica. Todas as etapas ilustradas consomem energia, as setas em preto indicam transferência

Figura 33 – Fluxograma do ciclo de vida do veículo com a aplicação da película fotovoltaica.



Fonte: Autor.

ou transformação de materiais. Realizando um comparativo entre os dois fluxogramas, foi possível notar que as etapas pertinentes ao ciclo de vida do veículo, em azul no diagrama, anteriores a etapa de montagem da película na carroceria no veículo são idênticas em ambos os fluxogramas, já que o veículo em questão é o mesmo, e irá consumir a mesma quantidade de matéria-prima e passar pelos mesmos exatos processo de produção, montagem e distribuição.

No segundo fluxograma, do ciclo de vida do veículo considerando a aplicação da película fotovoltaica, foram agregadas as etapas de coleta de matéria-prima e produção da película, bem como o transporte das mesmas para as concessionárias e a etapa de montagem da película no veículo. As etapas subsequentes a montagem da película no veículo são as mesmas mas com uma contribuição de carbono diferente pois as emissões ao longo do uso do veículo e o descarte são impactados pela aplicação. Portanto, como o

objetivo do presente inventário é realizar uma comparação da pegada de carbono do veículo com e sem a aplicação, as etapas em azul anteriores a aplicação da película no veículo foram desconsideradas, pois são idênticas em ambos os casos. A contribuição de emissões da coleta de matéria prima e produção da película fotovoltaica foram contabilizadas de acordo com dado público fornecido pelo fabricante e o estudo se concentrou em calcular as emissões de transporte da película até a concessionária, aplicação da mesma no veículo, uso do veículo pelo consumidor final e descarte. Na etapa de descarte, o descarte das peças originais do veículo não foi considerado pois é igual em ambos os casos, sendo considerado apenas o descarte da película.

### 3.5 COLETA DE DADOS

Neste tópico será detalhado todo processo relacionado a coleta, registro e tratamento dos dados para cada uma das etapas englobadas nos limites definidos.

- Etapa 01: Estratégia de gerenciamento e coleta de dados

Para facilitar a gestão dos dados, a coleta dos dados de emissões de cada uma das etapas foi pensada individualmente e posteriormente todos os dados coletados foram agrupados e registrados no *Excel*, editor de planilhas da *Microsoft*. Para cada uma das etapas em estudo, foram utilizadas estratégias diferentes para a coleta das informações, abaixo serão detalhadas as metodologias utilizadas em cada uma delas individualmente.

- **Aquisição de matéria prima e produção da película fotovoltaica:** o dado de carbono emitido durante a coleta de matérias primas e produção da película fotovoltaica foi obtido através de dados publicados pelo próprio fabricante. Não faz parte do escopo de estudo do presente trabalho analisar etapas individuais pertinentes a esses processos.
- **Envio da película para a concessionária:** Para obtenção da emissão de carbono causada pelo transporte das películas até as concessionárias foi utilizado o software *Google Maps* para estimar as rotas e distâncias percorridas durante o transporte terrestre. Já para as rotas marítimas foi utilizado o software *ShipAtlas*. Com as distâncias de cada trecho obtidas, foram utilizados os fatores de emissão de cada tipo de veículo definidos pelo Protocolo GHG para obter a emissão total de cada trecho mapeado. Para obter a quantidade exata de contribuição de cada película individualmente foram estimadas as capacidades dos veículos de transporte e a emissão total dividida pela capacidade máxima.

- **Instalação da película fotovoltaica:** não foram identificadas contribuições relevantes na etapa de instalação da película, considerando que não existe entrada de nova matéria prima ou emissões diretas, apenas mão de obra de trabalho. Portanto essa etapa foi desconsiderada no cálculo final.
  - **Uso do veículo pelo consumidor final:** para estimar as emissões derivadas do uso do veículo pelo consumidor final foi utilizado o software de simulações *Green*, criado pela Siemens em parceria com a montadora responsável por montar o veículo utilizado. Os dados de entrada foram os dados técnicos do veículo e a potência da película fotovoltaica utilizada e o dado de saída, obtido após as simulações, foi a emissão por quilometro rodado. Para estimar a emissão ao longo de todo ciclo de vida, a quilometragem percorrida ao longo de toda vida útil do veículo foi considerada como 200.000 km, conforme recomendações do fabricante do automóvel. Foram realizadas simulações considerando o automóvel sem a aplicação e posteriormente com a aplicação, considerando o funcionamento da película a 50% da potência máxima, a fim de considerar eventuais condições climáticas e oscilações na radiação solar.
  - **Desmanche e descarte de peças:** para o presente estudo foi considerado que todo o automóvel passará pelo processo de logística reversa, com reaproveitamento de peças e matérias e destinamento correto ao que não puder ser reciclado. Desse modo, a contribuição para a pegada de carbono dessa etapa, foi desconsiderada.
- Etapa 02: Identificar todos os dados necessários

Foram mapeados todos os dados necessários em cada uma das etapas relevantes ao inventário. Abaixo são listados os dados necessários em cada etapa:

- **Aquisição de matéria prima e produção da película fotovoltaica:** pegada de carbono da produção da película fotovoltaica.
- **Envio da película para a concessionária:** na etapa de envio da película, é necessário levantar a emissão de carbono nos seguintes trechos de transporte:
  - \* Rota terrestre da fábrica *Sunflare* até o porto de Los Angeles na Califórnia
  - \* Rota marítima do porto de Los Angeles ao porto de Paranaguá no estado do Paraná
  - \* Rota terrestre do porto de Paranaguá à concessionária na cidade de Curitiba no Paraná

- **Uso do veículo pelo consumidor final:** para estimativa do impacto do uso do veículo pelo consumidor final é necessário obter a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida a cada quilometro rodado em gramas por quilometro e posteriormente a quantidade total emitida ao longo de todo ciclo de vida do veículo, multiplicando esse valor pela quilometragem total do automóvel.
- Etapa 03: Triagem dos dados relevantes

Todos os dados listados no tópico anterior são relevantes e serão analisados, conforme filtragem anterior não podem ser desconsiderados da análise. O dado com maior impacto ao resultado final e onde serão dedicados mais esforços no estudo é a estimativa do dado de emissão durante o uso do veículo pelo consumidor final.

### 3.6 AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS

Abaixo são descritas as incertezas identificadas em cada uma das etapas analisadas:

- **Aquisição de matéria prima e produção da película fotovoltaica:** Na etapa relacionada ao processo produtivo, foi identificada uma possível incerteza de parâmetro, já que os dados de emissão fornecidos pela empresa fabricante da célula fotovoltaica não abrangem detalhes do processo de inventário de carbono, nem abordam incertezas.
- **Envio da película para a concessionária:** Na etapa de transporte da película foi identificada uma incerteza de cenário, visto que todas as rotas e meios de transporte foram estimados e podem eventualmente não refletir as escolhas reais em caso de efetiva produção e comercialização da aplicação em estudo.
- **Uso do veículo pelo consumidor final:** Na estimação das emissões durante a etapa de uso do veículo pelo consumidor final, foi identificada uma possível incerteza de modelo. Como todos os dados de emissões do veículo com a aplicação são obtidos exclusivamente de simulações através de softwares, existe a possibilidade de que o modelo simulado não reflita com 100% de precisão os parâmetros e condições reais. Como essa etapa é a etapa com maior impacto no estudo, para tentar minimizar a possível incerteza de modelo, os dados de emissão do veículo sem a aplicação que serão utilizados para o comparativo também serão obtidos através do mesmo software de simulação.

### 3.7 CÁLCULO DE RESULTADOS

Conforme citado anteriormente, cada uma das etapas foi calculada de maneira individual. Ao final de toda obtenção dos dados, todas as emissões identificadas foram somadas para obtenção do resultado final. Para obtenção do resultado final desejado, a quantificação do possível ganho em redução de emissões da aplicação, foram comparados os resultados obtidos do veículo sem e com a aplicação. O veículo sem a aplicação contabilizou apenas as emissões derivadas do uso do veículo pelo consumidor enquanto que o veículo com a aplicação contabilizou, além da emissão decorrente do uso do veículo, as emissões de transporte e produção da película fotovoltaica utilizada.

O ganho obtido, na redução das emissões totais ao longo do ciclo de vida do veículo, foi calculado da seguinte forma:

$$R = E_{01} - E_{02} \quad (7)$$

Onde:

$R$ : quantidade de emissão de  $CO_2$  evitada com o uso da aplicação, em  $KgCO_2e$

$E_{01}$ : Emissões totais do veículo sem a aplicação, em  $KgCO_2e$

$E_{02}$ : Emissões totais do veículo com a aplicação, em  $KgCO_2e$

As emissões totais do veículo sem a aplicação, em  $KgCO_2e$ , foram calculadas da seguinte forma:

$$E_{01} = (E_{FTP-75} * 0,55 + E_{HWFT} * 0,45) * KM \quad (8)$$

Onde:

$E_{01}$ : Emissões totais do veículo sem a aplicação, em  $KgCO_2e$

$E_{FTP-75}$ : taxa de emissão do veículo sem a aplicação no ciclo de condução FTP-75, em  $kgCO_2e/km$

$E_{HWFT}$ : taxa de emissão do veículo sem a aplicação no ciclo de condução FTP-75, em  $kgCO_2e/km$

$KM$  quilometragem percorrida pelo veículo ao longo do ciclo de vida

As emissões totais do veículo com a aplicação, em  $KgCO_2e$ , foram calculadas da seguinte forma:

$$E_{02} = ((E_{FTP-75} * 0,55 + E_{HWFT} * 0,45) * KM) + E_{R1} + E_{R2} + E_{R3} + (E_{CIGS} * (L * C)) \quad (9)$$

Onde:

$E_{02}$ : Emissões totais do veículo com a aplicação, em  $KgCO_2e$

$E_{FTP-75}$ : taxa de emissão do veículo com a aplicação no ciclo de condução FTP-75, em  $kgCO_2e/km$

$E_{HWFT}$ : taxa de emissão do veículo com a aplicação no ciclo de condução FTP-75, em  $kgCO_2e/km$

$KM$  : quilometragem percorrida pelo veículo ao longo do ciclo de vida

$E_{R1}$ : emissões da rota 01 de transporte de uma película fotovoltaica, em  $kgCO_2e$

$E_{R2}$ : emissões da rota 02 de transporte de uma película fotovoltaica, em  $kgCO_2e$

$E_{R3}$ : emissões da rota 03 de transporte de uma película fotovoltaica, em  $kgCO_2e$

$E_{CIGS}$ : taxa de emissão de CO<sub>2</sub> na produção da película CIGS, em kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>  
 $L$ : largura da película, em metros  
 $C$ : comprimento da película, em metros

Para o cálculo do consumo de combustível (gasolina E22) dos veículos com e sem a aplicação, foi utilizada a fórmula abaixo:

$$C_{E22} = \left( \frac{1}{E_{FTP-75}} * E_{E22} \right) * 0,55 + \left( \frac{1}{E_{HWFT}} * E_{E22} \right) * 0,45 \quad (10)$$

Onde:

$C_{22}$ : eficiência energética do veículo utilizando gasolina E22, em km/l  
 $E_{FTP-75}$ : taxa de emissão do veículo no ciclo de condução FTP-75, em kgCO<sub>2</sub>e/km  
 $E_{HWFT}$ : taxa de emissão do veículo no ciclo de condução FTP-75, em kgCO<sub>2</sub>e/km  
 $E_{E22}$ : emissão de CO<sub>2</sub> oriunda da queima de 1 litro de gasolina E22, em kg

### 3.8 SOFTWARES UTILIZADOS

Todos os softwares utilizados na etapa de coleta de dados serão detalhados a seguir.

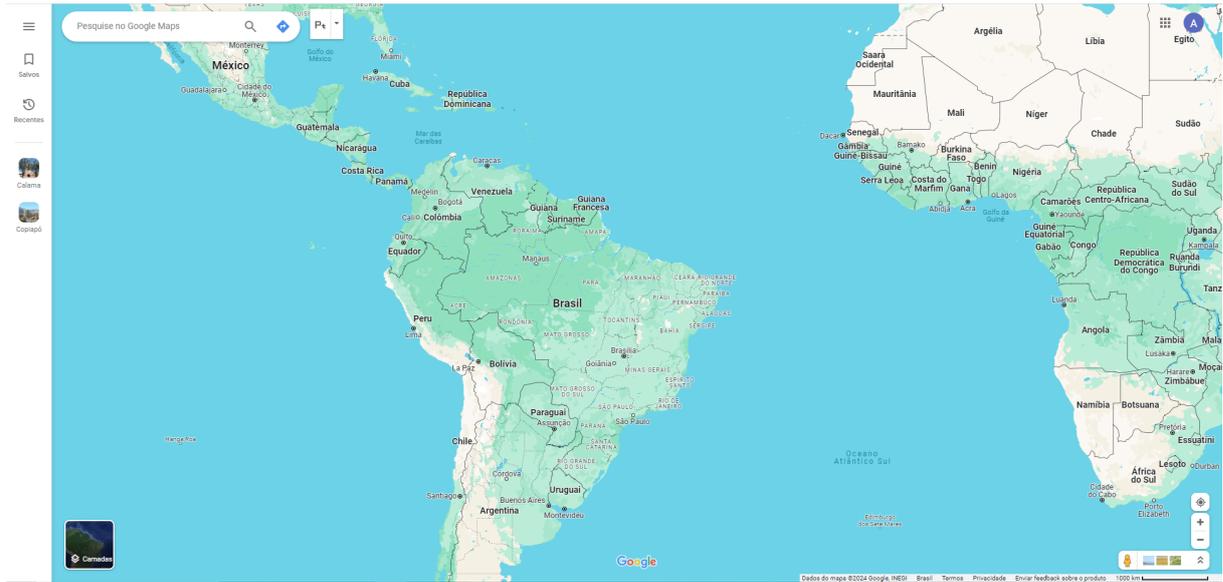
#### 3.8.1 *Google Maps*

O software utilizado para estimar as rotas terrestres foi o *Google Maps*. O *Google Maps* é uma aplicação de mapeamento online da *Google*, lançada em 2005, que oferece uma variedade de serviços abrangentes. Além de fornecer direções detalhadas para motoristas, ciclistas e pedestres, o *Google Maps* pode ser utilizado para simular rotas em qualquer lugar do mundo. Os usuários podem explorar informações sobre empresas locais e pontos de interesse. Com uma interface amigável e recursos de planejamento de rotas multimodais, o *Google Maps* é amplamente utilizado para navegação, exploração local e planejamento de viagens. A figura 34 mostra a interface do software.

#### 3.8.2 *ShipAtlas*

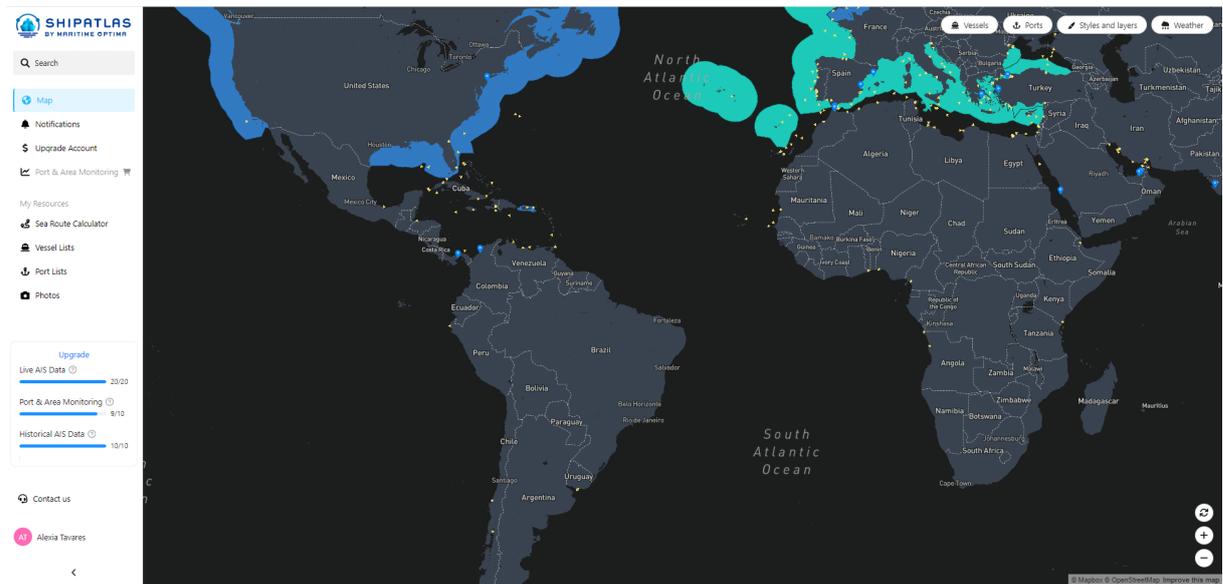
Para estimar a rota marítima foi utilizado o *ShipAtlas*. O *software*, fornecido pela *Maritime Optima*, é uma plataforma de mapeamento e monitoramento de navios que oferece uma visão abrangente e em tempo real da atividade marítima global. Permitindo acesso a informações detalhadas sobre a localização, rota e velocidade de várias embarcações, a ferramenta é projetada para fornecer uma visão abrangente do tráfego marítimo. Além disso, o *ShipAtlas* oferece recursos avançados para análise e otimização de operações marítimas, permitindo que sejam simuladas rotas marítimas para diferentes tipos de embarcação. A figura 35 mostra a interface do *software*.

Figura 34 – Interface *Google Maps*.



Fonte: Autor.

Figura 35 – Interface *ShipAtlas*.



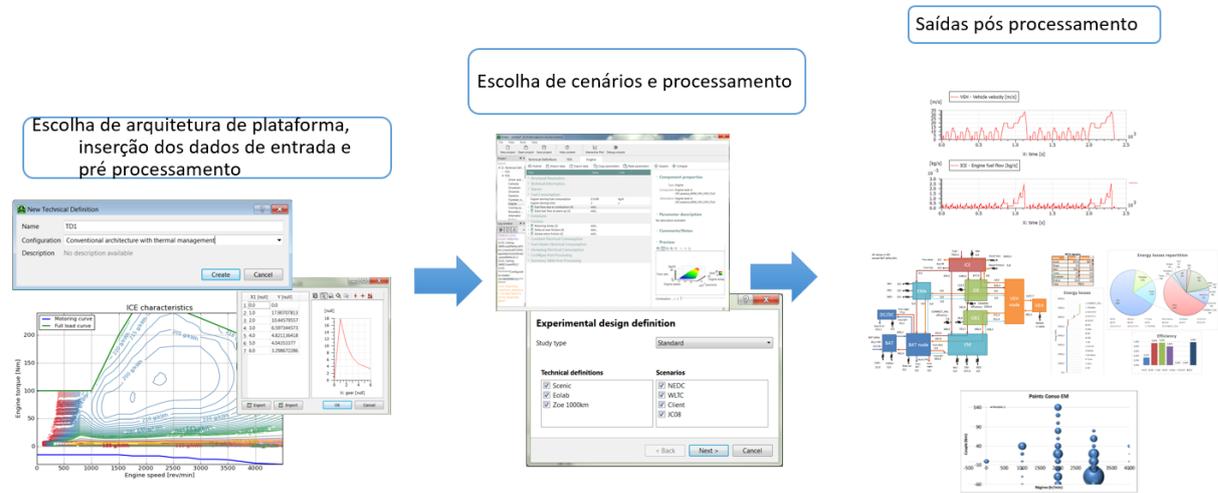
Fonte: Autor.

### 3.8.3 Green

Interface Gráfica do Usuário conectada a um modelo Amesim-Simulink para a simulação de economia de combustível, desempenho e autonomia de veículos à combustão, híbridos e elétricos. O *software* permite combinar diferentes tipos de caixa de câmbio, arquitetura de plataforma, motores e tipos de condução para diferentes tipos de análises (Economia de Combustível, CO2, Desempenho, Dirigibilidade, Gerenciamento de Energia

da Rede Elétrica, análises de *trade-off*). A figura 36 mostra o fluxo de trabalho do *Green*.

Figura 36 – Fluxo de funcionamento do software *Green*.



Fonte: Autor.

Para conduzir as simulações, inicia-se escolhendo o tipo de arquitetura da plataforma do veículo e inserindo os dados da definição técnica do veículo. Em seguida, o *software* realiza um pré-processamento desses dados. Após essa etapa, é necessário selecionar o cenário de simulação, ou seja, os ciclos de condução que se pretende simular. Com os ciclos escolhidos, procede-se ao processamento dos dados, resultando, finalmente, na obtenção dos dados de saída para análises. O *software* oferece uma variedade de informações, incluindo taxas de emissão de poluentes, consumo energético, gráficos de acionamento de componentes e sistemas, bem como estimativas de consumo de combustível.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo da presente seção serão abordados todos os processos relacionados a coleta de dados: levantamento das emissões em todos os trechos de transporte das películas, levantamento das emissões por quilometro rodado do veículo com e sem a aplicação da película, estimativa das emissões por rotação ao longo de todo ciclo de vida do veículo. Além disso, será abordado o cálculo dos resultados finais.

### 4.1 CÁLCULO DAS EMISSÕES DE TRANSPORTE

A rota de transporte da película fotovoltaica da fábrica de produção até a concessionária onde foi montada no veículo foi dividida em três grandes rotas principais, duas rotas terrestres e uma rota marítima. Para estimar as distâncias percorridas foram utilizados *softwares* de simulação de rotas. Abaixo é detalhado a estimativa e cálculo de emissões de cada uma das rotas.

#### 4.1.1 Rota terrestre entre a fábrica e o porto de Los Angeles

A fábrica onde é produzida a película fotovoltaica fica localizada na cidade de La Verne na Califórnia e o porto mais próximo é o porto de Los Angeles. A estimativa da distância terrestre percorrida nesse trecho, feita utilizando o *Google Maps*, é apresentada na figura 37:

A rota percorre 51 milhas. Considerando que cada milha equivale a 1,6 quilômetros, foi possível obter a distância de 82 quilômetros percorridos entre a fábrica e o porto. Sendo  $E$  as emissões,  $FEV$  o fator de emissão do veículo,  $D$  a distância percorrida e  $PC$  o peso da carga em toneladas, a equação abaixo foi utilizada para obter o valor das emissões provenientes do transporte de apenas uma unidade da película fotovoltaica.

$$E(kgCO_2e) = FEV \left( \frac{kgCO_2e}{km} \right) * D(km) * PC(ton) \quad (11)$$

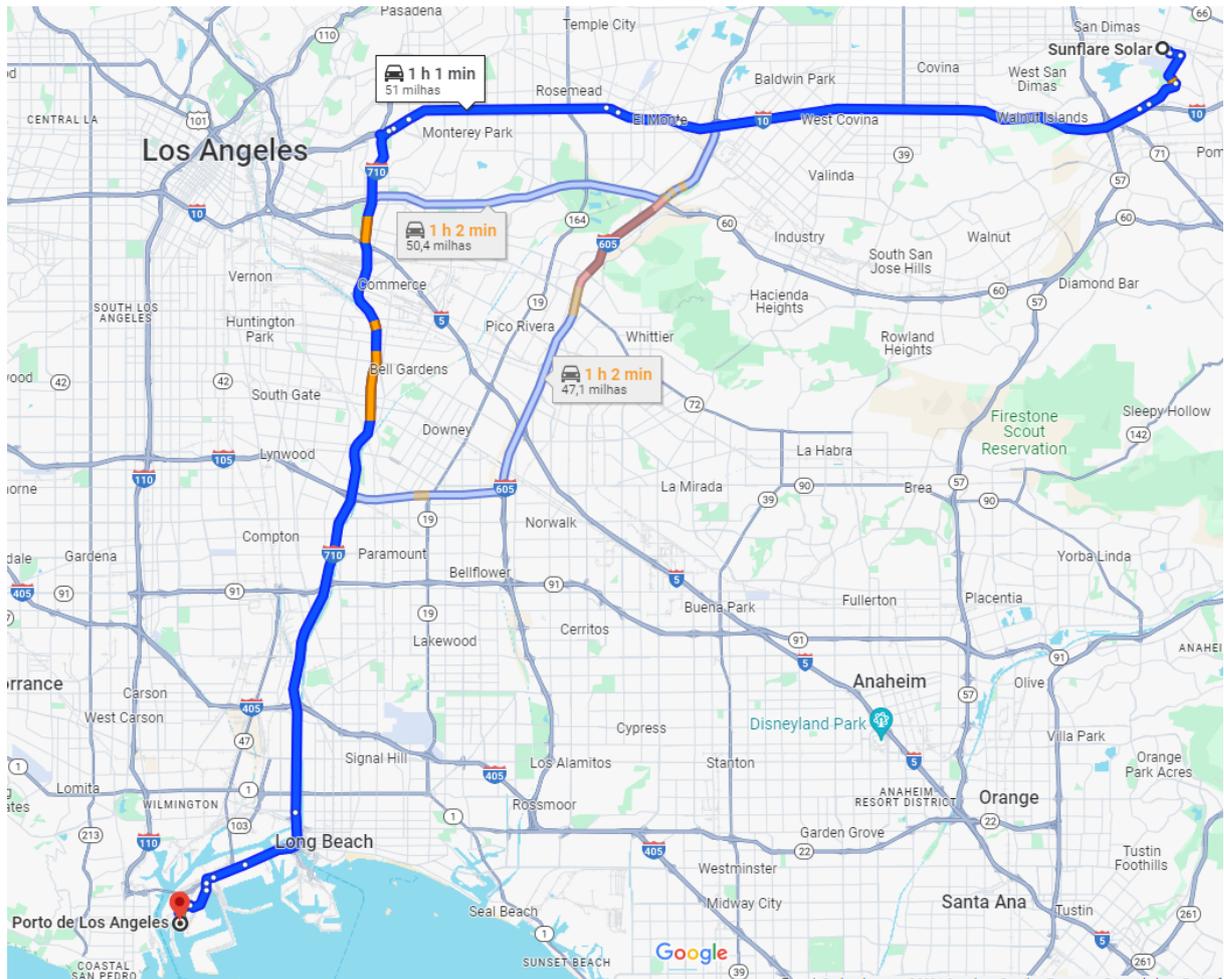
O fator de emissão do veículo foi obtido através da tabela de fatores de emissão de veículos para cargas fracionadas, disponível no protocolo GHG. O veículo escolhido para simular o trajeto foi um caminhão rígido com fator de emissão de 0,19612 (kgCO<sub>2</sub>e/ton\*km) e o peso da carga, retirado da ficha técnica do produto é estimado em 0,006 toneladas. Considerando a distância obtida de 82 quilômetros, foi obtido o seguinte resultado:

$$E(kgCO_2e) = 0,19612 \left( \frac{kgCO_2e}{km} \right) * 82 * 0,006 \quad (12)$$

$$E(kgCO_2e) = 0,0964kgCO_2e \quad (13)$$

Portanto a emissão do primeiro trecho é de 0,0964 kgCO<sub>2</sub>e a cada unidade da película fotovoltaica.

Figura 37 – Rota 01.

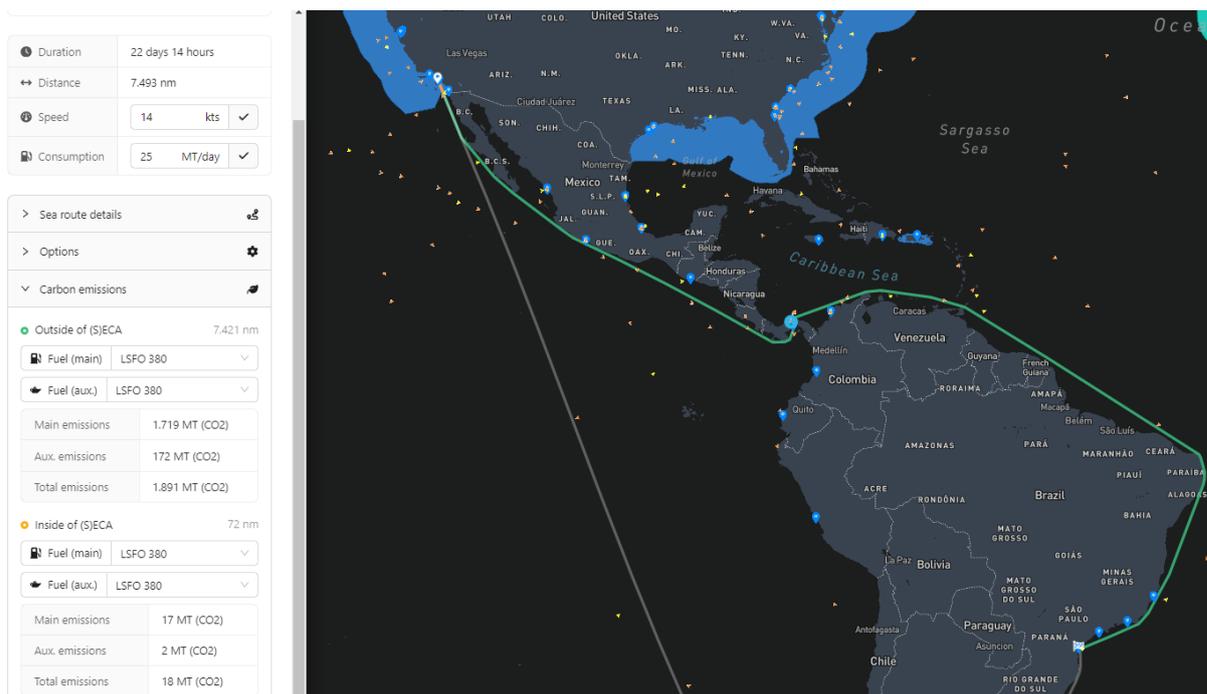


Fonte: Autor.

#### 4.1.2 Rota marítima entre o porto de Los Angeles e o porto de Paranaguá

A rota marítima estimada entre os portos de Paranaguá e Los Angeles passa pelo canal do Panamá e tem uma duração total de 22 dias e 14 horas, percorrendo 7493 milhas náuticas, ou 13877 quilômetros. Segundo dados do próprio aplicativo, considerando que o navio é abastecido com óleo combustível com baixo teor de enxofre (LSFO), a emissão total de carbono durante o trajeto será de 1909 MT. Os detalhes da rota são mostrados na figura 38.

Figura 38 – Rota 02.



Fonte: Autor.

Para o cálculo da emissão do trecho marítimo foi utilizada a calculadora de emissões da *EcoTrasIT World*, considerando os pontos de partida e de chegada como as coordenadas de cada porto, conforme figura 39. As coordenadas foram obtidas através do *Google Maps* e o resultado obtido foi de 0.00060 toneladas de CO<sub>2</sub>e, ou seja, 0,6 kgCO<sub>2</sub>e a cada película fotovoltaica transportada na rota marítima.

#### 4.1.3 Rota terrestre entre o porto de Paranaguá e a concessionária

A concessionária escolhida para simular a rota foi uma concessionária da marca do automóvel estudado, localizada na cidade de São José dos Pinhais no estado do Paraná, com fácil acesso ao porto de Parnaguá. A rota simulada utilizando o *Google Maps* percorre 84 quilômetros e é ilustrada na figura 40.

Para o cálculo das emissões provenientes deste trecho foram usadas as mesmas premissas de cálculo do primeiro trecho, veículo escolhido para simular o trajeto foi um caminhão rígido com fator de emissão de 0,19612 (kgCO<sub>2</sub>e/ton\*km) e o peso da carga estimado em 0,006 toneladas. Considerando o trecho percorrido de 84 quilômetros, o resultado obtido é apresentado abaixo.

$$E(kgCO_2e) = 0,19612 \left( \frac{kgCO_2e}{km} \right) * 84 * 0,006 \tag{14}$$

$$E(kgCO_2e) = 0,0988kgCO_2e \tag{15}$$

Figura 39 – Calculo Rota 02.

CALCULATION PARAMETERS

**Input mode** Standard

**Freight**

<u>Amount</u>	<u>Weight</u>
0,006	Bulk and Unit Load (Tonnes)

**Origin** Coordinates

<small>Latitude</small>	<small>Longitude</small>
33.743783	-118.195578

**Choose transport modes:**  
Multiple choice possible

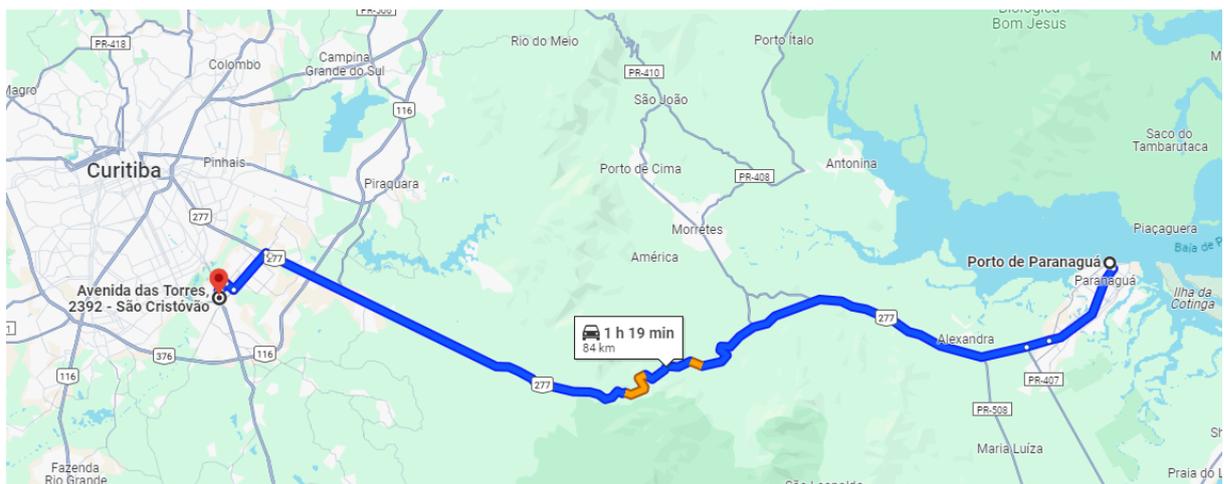
Truck	Train	Airplane	Sea ship	Barge

**Destination** Coordinates

<small>Latitude</small>	<small>Longitude</small>
-25.501335	-48.502732

Fonte: Autor.

Figura 40 – Rota 03.



Fonte: Autor.

Portanto, o resultado obtido é de que são emitidos 0,0988 kgCO<sub>2</sub>e a cada película fotovoltaica no último trecho terrestre.

## 4.2 CÁLCULO DAS EMISSÕES POR USO DO VEÍCULO

Para estimar as emissões oriundas do uso do veículo pelo consumidor final, foi utilizado o *software Green*. O *software* criado pela Siemens em parceria com uma montadora de automóveis simula o funcionamento de um dinamômetro para avaliação do consumo de combustível e emissões de um determinado veículo. O *software* foi calibrado para simular as condições do ciclo de condução FTP-75 (*Federal Test Procedure*) e o HWFET (*Highway Fuel Economy Test*), ciclos desenvolvidos pela Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos e atualmente utilizados no Brasil para determinação e homologação dos fatores de emissão de automóveis. O combustível definido para as simulações foi a gasolina E22 com uma concentração de 22% de etanol e os parâmetros de cada ciclo são apresentados nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Parâmetros Ciclo FTP-75.

Parâmetro Ciclo FTP-75	
Duração (s)	1877
Distância percorrida (km)	17,77
Velocidade máxima (km/h)	91,25
Velocidade média (km/h)	34,20

Fonte: Autor.

Tabela 5 – Parâmetros HWFT.

Parâmetro HWFET	
Duração (s)	765
Distância percorrida (km)	16,50
Velocidade máxima (km/h)	96,40
Velocidade média (km/h)	77,7

Fonte: Autor.

A simulação dos ciclos de condução para um veículo sem e com a aplicação é detalhado nos tópicos seguintes.

### 4.2.1 Veículo sem a aplicação da película fotovoltaica

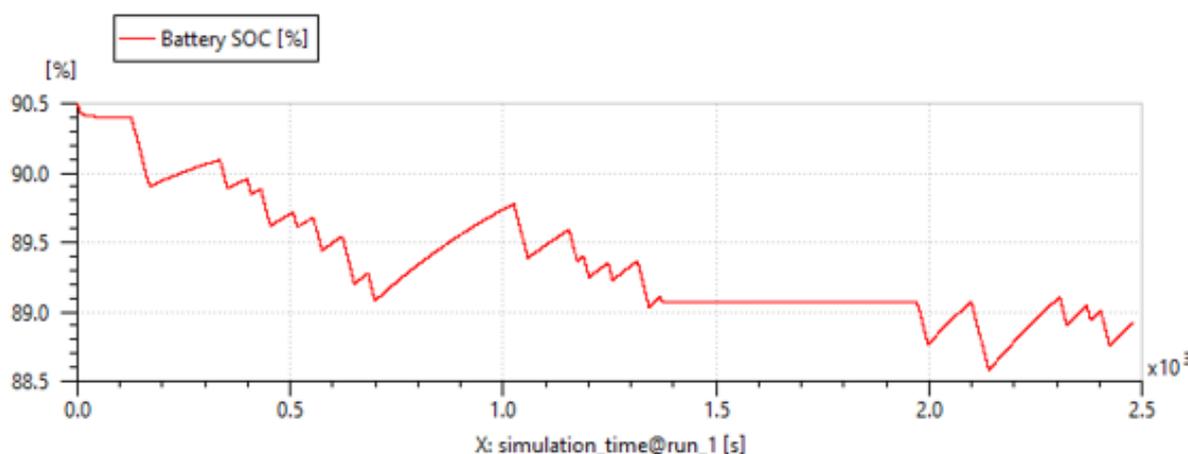
Para a simulação do veículo sem a aplicação da película fotovoltaica foram inseridos no software todos os dados padrões da ficha técnica do veículo: peso, especificações técnicas da motorização, especificações do tipo de caixa de câmbio, especificações técnicas da bateria e o consumo energético do veículo.

#### Ciclo FTP-75

Para o ciclo FTP o SOC da bateria foi configurado para iniciar em 90% conforme padrão pré-estabelecido para as validações e de acordo com as configurações de gestão

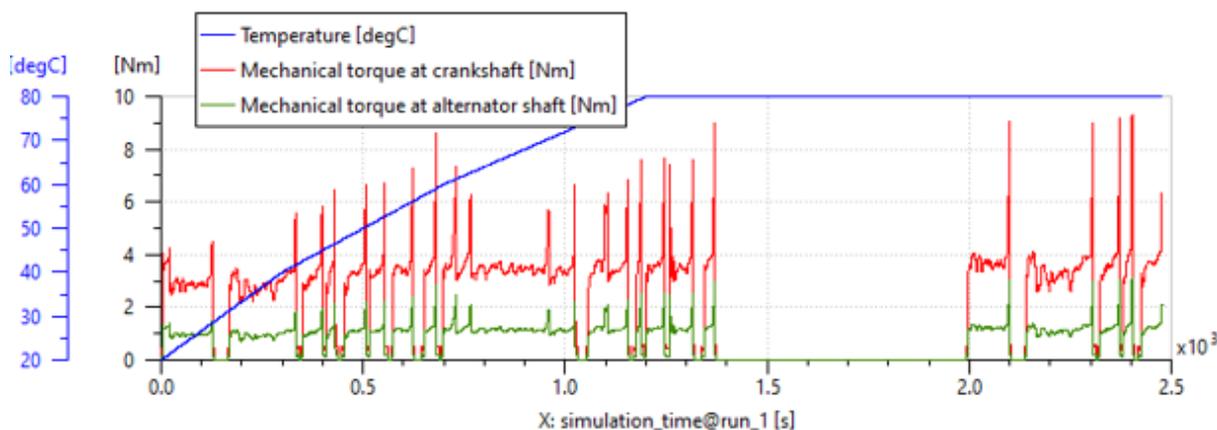
de energia do veículo, e o desprendimento energético considerado, causado pelos sistemas elétricos do veículo, foi de 316W. O gráfico da figura 41 mostra o SOC da bateria ao longo do tempo de simulação, o valor iniciado em 90% finalizou o ciclo FTP em 88,91%. Conforme gráfico mostrado na figura 42, o alternador foi acionado para recarregar a bateria durante todo o trajeto, ficando desacionado apenas nos instantes em que o veículo estava parado, de acordo com o gráfico de velocidade do ciclo (figura 43). O ciclo de condução FTP do veículo convencional sem a película fotovoltaica, considerando a descarga da bateria e acionamento contínuo do alternador, resultou em um índice de emissão de 136,9 gCO<sub>2</sub>e por quilômetro percorrido.

Figura 41 – SOC da bateria ciclo FTP sem aplicação.



Fonte: Autor.

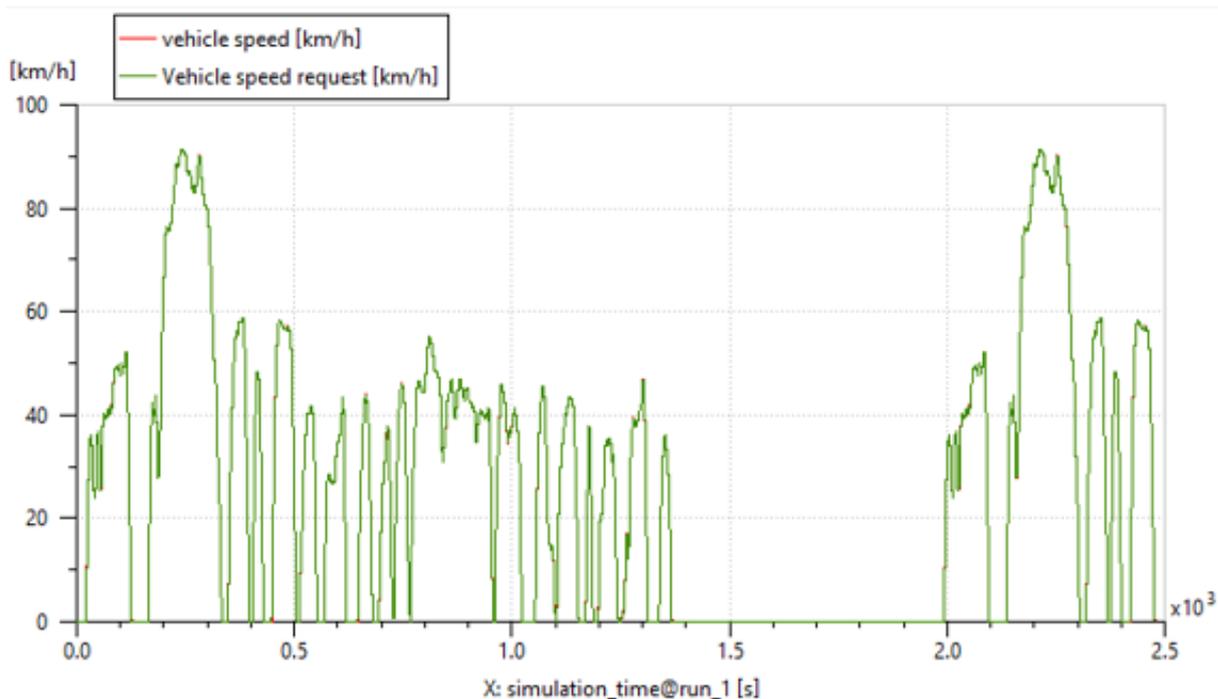
Figura 42 – Acionamento do alternador ciclo FTP sem aplicação.



Fonte: Autor.

Os resultados obtidos foram os resultados esperados para um veículo a combustão convencional em um ciclo de condução na cidade.

Figura 43 – Velocidade do veículo no ciclo FTP sem aplicação.



Fonte: Autor.

### Ciclo HWFT

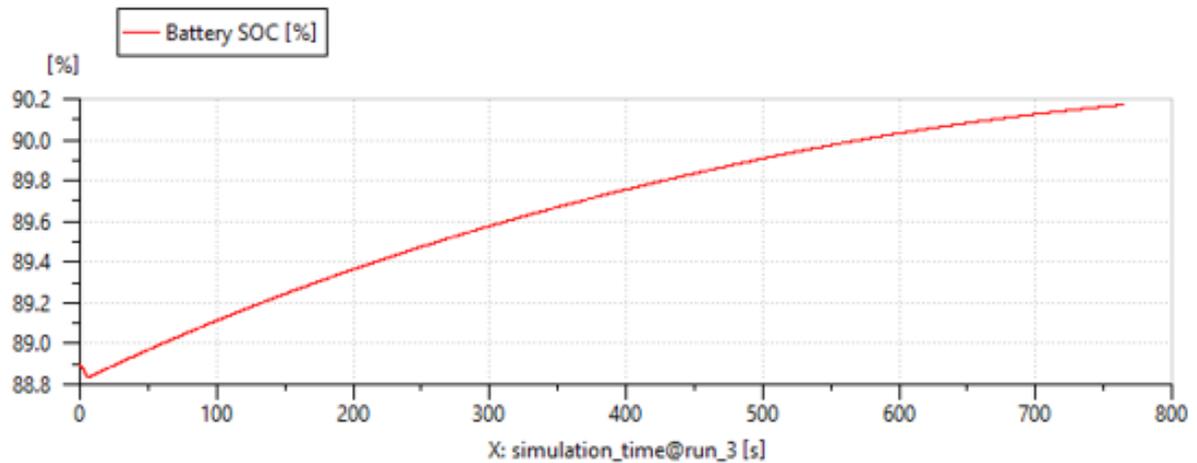
Como o ciclo HWFT tem início logo após o fim do ciclo FTP, o SOC da bateria foi configurado para iniciar em 88,91%, valor do SOC da bateria ao final do primeiro ciclo, conforme mostrado anteriormente no gráfico da figura 41. O desprendimento energético considerado para o ciclo HWFT foi de 318W, conforme dados técnicos do veículo fornecidos pela montadora do automóvel. O gráfico da figura 44 mostra o SOC da bateria ao longo do tempo de simulação, o valor iniciado em 88,91% finalizou o ciclo FTP em 90,17%. Conforme gráfico mostrado na figura 45, o alternador permaneceu acionado durante todo o trajeto. Diferente do ciclo FTP, no ciclo HWFT o veículo permaneceu em movimento durante todos os instantes da simulação (figura 46). O ciclo de condução HWFT do veículo convencional sem a película fotovoltaica, considerando o acionamento contínuo do alternador, resultou em um índice de emissão de 123,17 gCO<sub>2</sub>e por quilômetro percorrido.

Os resultados obtidos foram os resultados esperados para um veículo a combustão convencional em um ciclo de condução em auto estrada.

#### 4.2.2 Veículo com a aplicação da película fotovoltaica

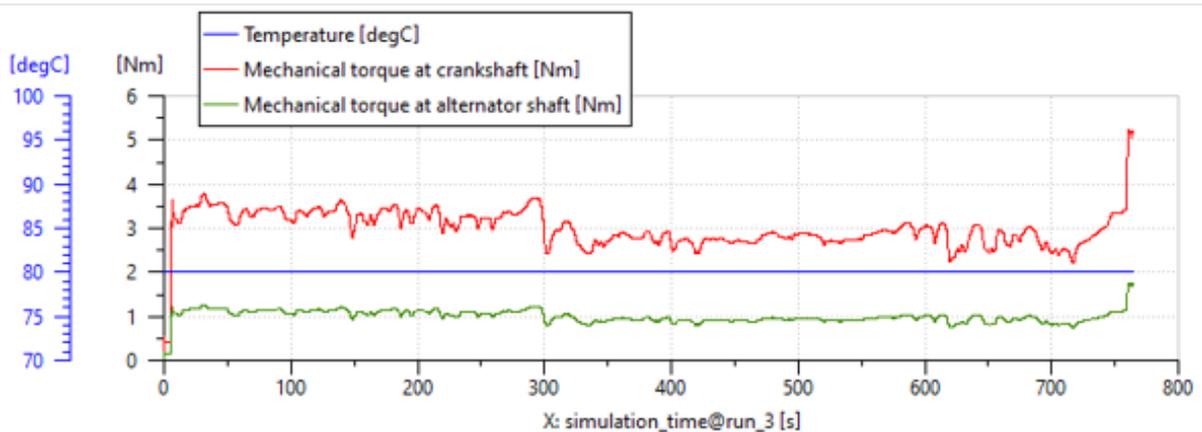
Para a simulação do veículo com a aplicação da película fotovoltaica foram inseridos no software todos os dados padrões da ficha técnica do veículo, conforme realizado para a simulação do veículo sem aplicação. Para simular o funcionamento da película, foi descontado do valor padrão de desprendimento energético do veículo o valor da energia

Figura 44 – SOC da bateria ciclo HWFT sem aplicação.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Acionamento do alternador ciclo HWFT sem aplicação.



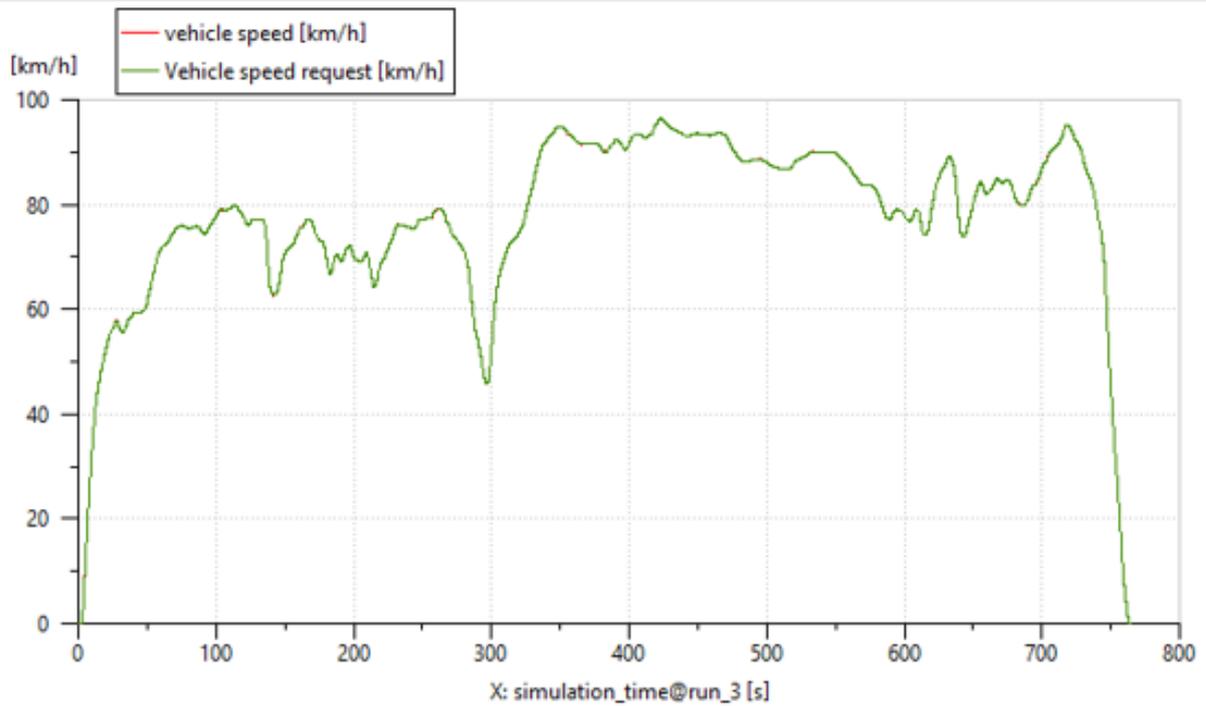
Fonte: Autor.

produzida pela película fotovoltaica, considerando 50% de radiação solar, ou seja, 50% da potência de pico da película, para simular condições reais.

### Ciclo FTP-75

Para o ciclo FTP o SOC da bateria foi configurado para iniciar em 100%, tendo em vista que enquanto o veículo está desligado, a película permanece produzindo energia e alimentando a bateria do veículo até atingir 100%. Como a potência de pico da película é de 185W, considerando 50% de radiação solar, são fornecidos 92,5W para a bateria do veículo, descontando esse valor do desprendimento energético padrão do veículo no ciclo FTP (316W), o desprendimento energético considerado para o veículo com a aplicação foi de 224W. O gráfico da figura 47 mostra o SOC da bateria ao longo do tempo de simulação, o valor iniciado em 100% finalizou o ciclo FTP em 89,6%. Conforme gráfico mostrado na

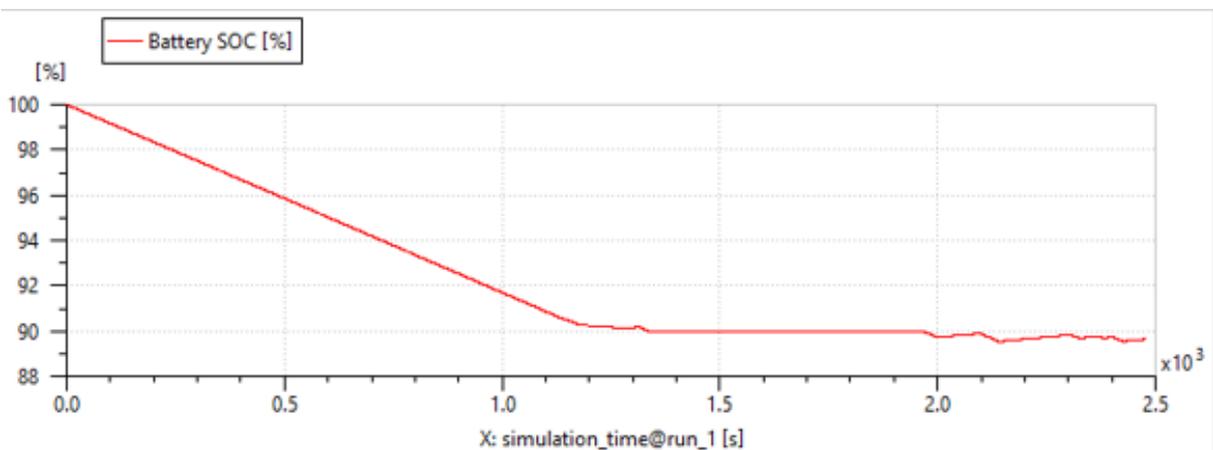
Figura 46 – Velocidade do veículo no ciclo HWFT sem aplicação.



Fonte: Autor.

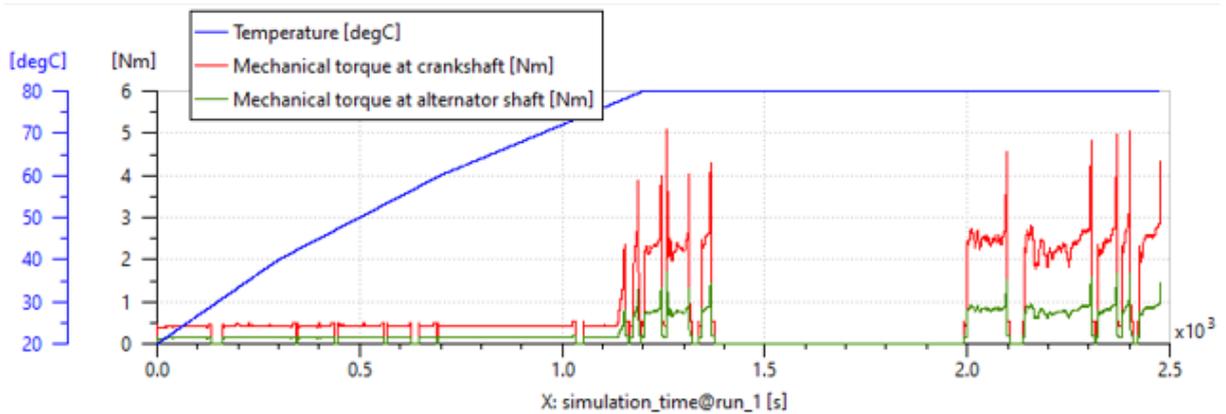
figura 48, o alternador só foi acionado para recarregar a bateria pouco depois de 1000 segundos de ciclo, quando o SOC da bateria atingiu 90%. As velocidades praticadas, conforme figura 49, foram as mesmas da simulação do veículo sem a película, conforme padrão. O ciclo de condução FTP do veículo com a aplicação da película fotovoltaica, considerando uma incidência solar de 50%, resultou em um índice de emissão de 132,4 gCO<sub>2</sub>e por quilômetro percorrido.

Figura 47 – SOC da bateria ciclo FTP com aplicação.



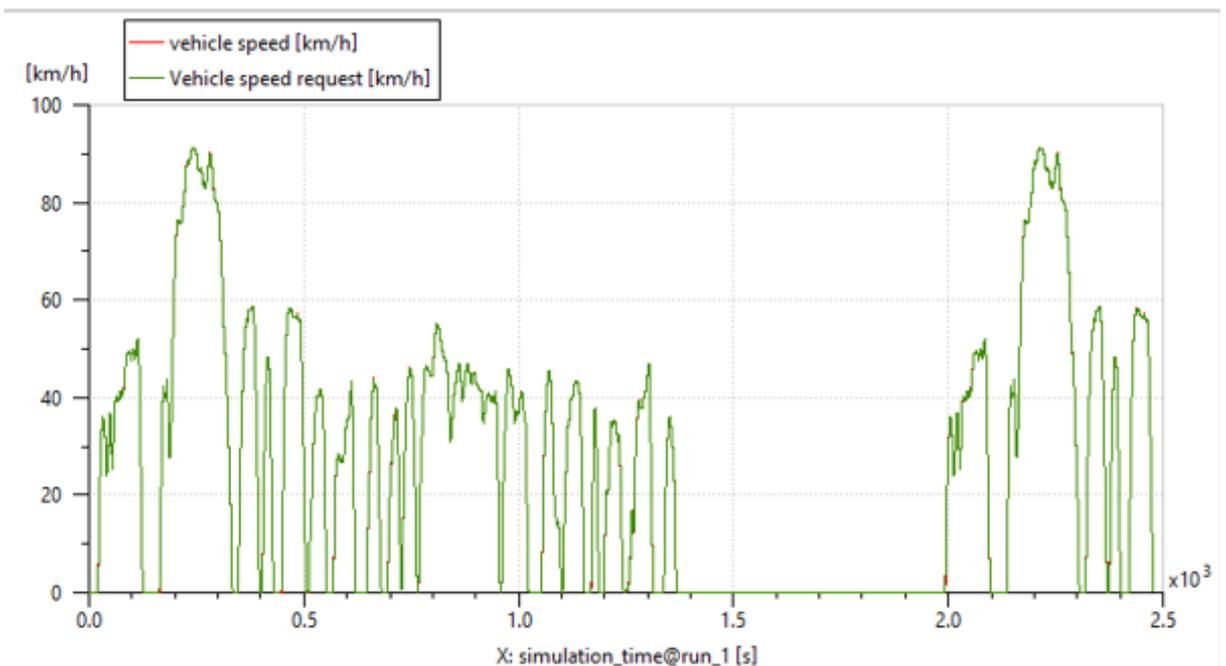
Fonte: Autor.

Figura 48 – Acionamento do alternador ciclo FTP com aplicação.



Fonte: Autor.

Figura 49 – Velocidade do veículo no ciclo FTP com aplicação.



Fonte: Autor.

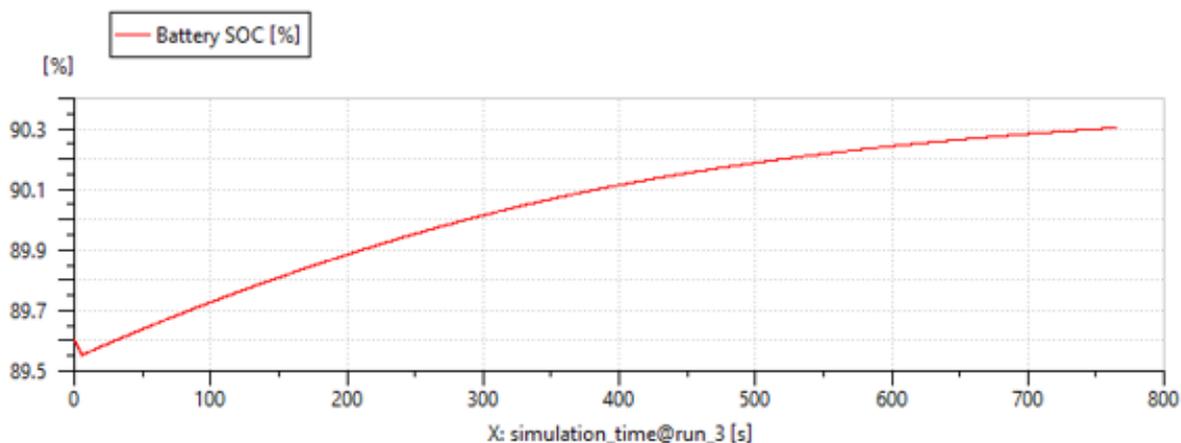
Os gráficos de SOC (figura 47) e acionamento do alternador (figura 48) indicam um resultado positivo na redução do consumo de combustível e consequente redução das emissões, já que se comparado ao resultado obtido na simulação do veículo sem a aplicação da película fotovoltaica, nas mesmas condições, houve um acionamento mais intenso do alternador.

### Ciclo HWFT

Para o ciclo HWFT o SOC da bateria foi configurado para iniciar em 89,6%, de

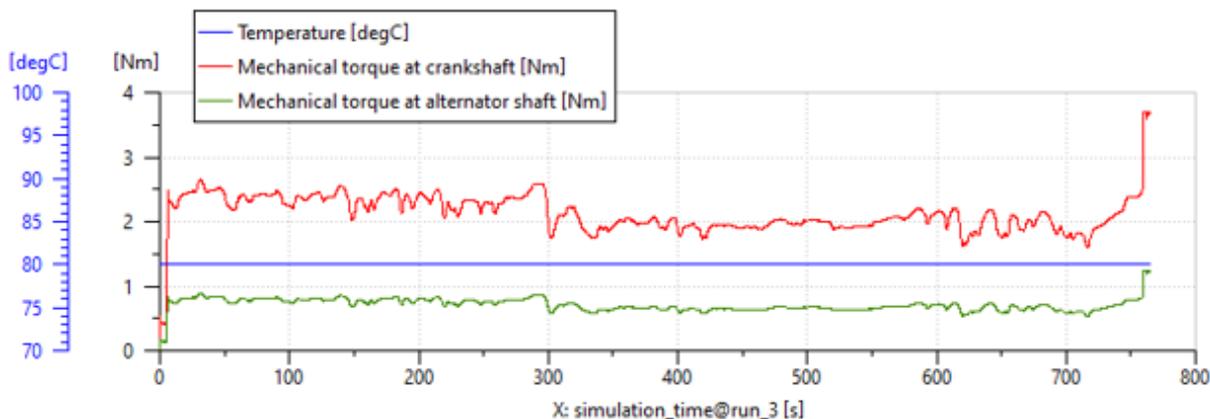
acordo com o SOC observado ao final do ciclo FTP. Como a potência de pico da película é de 185W, considerando 50% de radiação solar, são fornecidos 92,5W para a bateria do veículo, descontando esse valor do desprendimento energético padrão do veículo no ciclo HWFT (318W), o desprendimento energético considerado para o veículo com a aplicação foi de 226W. O gráfico da figura 50 mostra o SOC da bateria ao longo do tempo de simulação, o valor iniciado em 89,6% finalizou o ciclo FTP em 90,3%, com uma curva de carga contínua. Conforme gráfico mostrado na figura 51, o alternador foi acionado durante todo o percurso até a bateria atingir o SOC de 90%. As velocidades praticadas, conforme figura 52, foram as mesmas da simulação do veículo sem a película, conforme padrão. O ciclo de condução HWFT do veículo com a aplicação da película fotovoltaica, considerando uma incidência solar de 50%, resultou em um índice de emissão de 122 gCO<sub>2</sub>e por quilômetro percorrido.

Figura 50 – SOC da bateria ciclo HWFT com aplicação.



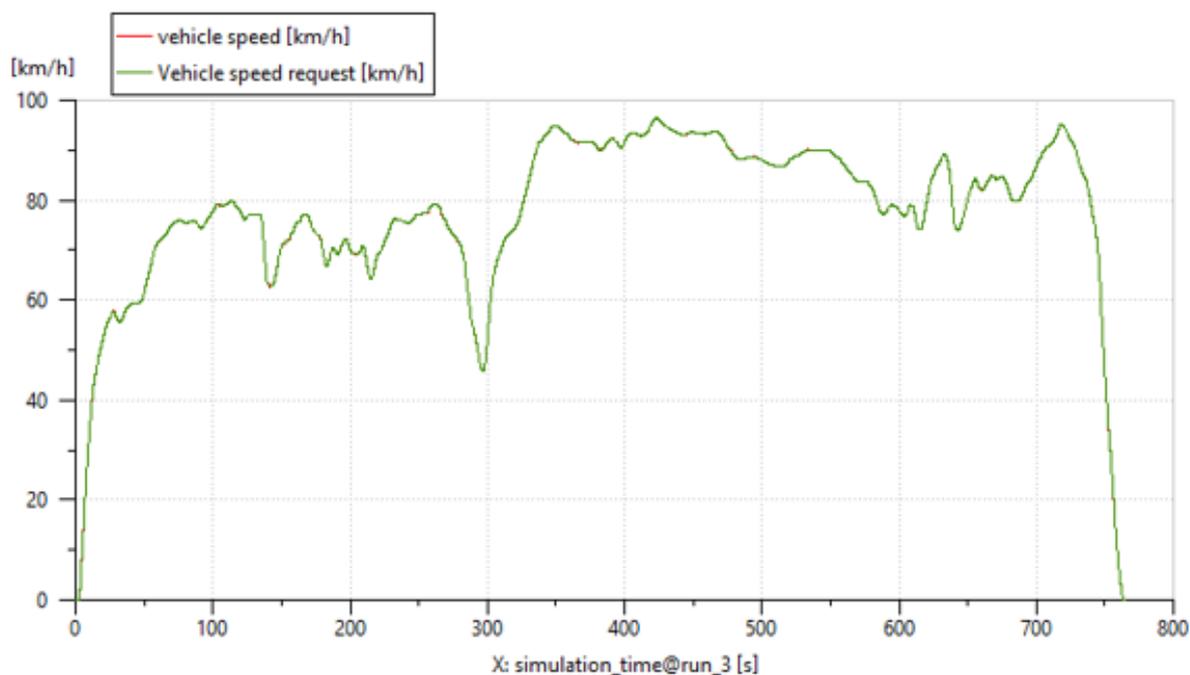
Fonte: Autor.

Figura 51 – Acionamento do alternador ciclo HWFT com aplicação.



Fonte: Autor.

Figura 52 – Velocidade do veículo no ciclo HWFT com aplicação.



Fonte: Autor.

Mais uma vez os gráficos de SOC (figura 50) e acionamento do alternador (figura 51) indicam um resultado positivo na redução do consumo de combustível e emissões, já que o alternador foi acionado de maneira menos intensa do que observado no gráfico de saída do alternador do veículo sem a aplicação da película fotovoltaica no ciclo HWFT.

### 4.3 CÁLCULO DOS RESULTADOS FINAIS

#### 4.3.1 Emissões totais

Para o cálculo das emissões totais dos veículos com e sem a aplicação fotovoltaica, foram utilizadas as fórmulas (9) e (8), considerando uma condução na cidade (ciclo FTP-75) em 55% da quilometragem de uso do veículo e condução em estrada (ciclo HWFT) 45% da quilometragem de uso do veículo.

A tabela 6 mostra todos os valores utilizados nos cálculos e os resultados obtidos a partir da fórmula (7).

Ao comparar os valores da tabela, podemos observar algumas diferenças significativas entre as emissões de CO<sub>2</sub>e dos veículos com e sem a aplicação da película fotovoltaica. Resultados obtidos em cada etapa do ciclo de vida:

- **Produção da película fotovoltaica:**

- Com a aplicação: 102,96 kgCO<sub>2</sub>e
- Sem a aplicação: 0 kgCO<sub>2</sub>e

Tabela 6 – Cálculo das emissões totais.

ETAPA DO CICLO DE VIDA	Veículo	
	Com a aplicação	Sem a aplicação
<b>PRODUÇÃO DA PELÍCULA FOTOVOLTAICA (kg CO2e)</b>	<b>102,96</b>	-
<b>TRANSPORTE DA PELÍCULA FOTOVOLTAICA (kg CO2e)</b>	<b>0,7952</b>	-
ROTA 01 - FÁBRICA AO PORTO DE LOS ANGELES (kg CO2e)	0,0964	-
ROTA 02 - PORTO DE LOS ANGELES AO PORTO DE PARANAGUA (kg CO2e)	0,6	-
ROTA 03 - PORTO DE PARANAGUA A CONCESSIONÁRIA (kg CO2e)	0,0988	-
<b>USO DO VEÍCULO PELO CONSUMIDOR FINAL (kg CO2e)</b>	<b>25544</b>	<b>26144,3</b>
Ciclo FTP-75 (kg CO2e/km)	0,1324	0,1369
Ciclo HWFT (kg CO2e/km)	0,122	0,12317
<b>TOTAL DE EMISSÕES (kg CO2e)</b>	<b>25647,7552</b>	<b>26144,3</b>
Ganho obtido (kg CO2e)	496,5448	

Fonte: Autor.

Na primeira etapa do ciclo de vida analisada, o veículo sem a aplicação sai em vantagem já que não contabiliza nenhum tipo de emissão nessa etapa, visto que a película fotovoltaica não faz parte do produto. O veículo com a aplicação da película inicia o inventário com uma emissão de 102,96 kg CO<sub>2e</sub> maior do que o veículo sem a aplicação.

- **Transporte da película fotovoltaica:**

- Com a aplicação: 0,7952 kgCO<sub>2e</sub>
- Sem a aplicação: 0 kgCO<sub>2e</sub>

Na etapa de transporte da película, assim como na etapa anterior, o veículo sem a aplicação não contabiliza nenhuma emissão. Somando a contribuição de CO<sub>2e</sub> observada nas duas etapas, o veículo com a aplicação conta agora com 103,75 kg CO<sub>2e</sub> a mais do que o veículo sem a aplicação.

- **Uso do veículo pelo consumidor final:**

- Com a aplicação: 25.544 kg CO<sub>2e</sub>
- Sem a aplicação: 26.144,3 kg CO<sub>2e</sub>

Na etapa de uso do veículo pelo consumidor final é onde são observados os ganhos fornecidos pela aplicação da película fotovoltaica. Enquanto o veículo sem a aplicação emite um total de 26.144,3 kg CO<sub>2e</sub>, o veículo com a aplicação emite 3% a menos nessa etapa, com um índice de 25544 kg CO<sub>2e</sub>, evitando a emissão de 600 kg CO<sub>2e</sub> nessa etapa do ciclo de vida do produto.

- **Total de emissões:**

- Com a aplicação: 25.647,7552 kg CO<sub>2e</sub>
- Sem a aplicação: 26.144,3 kg CO<sub>2e</sub>

No total das emissões, o veículo sem a aplicação conta apenas com as emissões oriundas da etapa de uso do veículo pelo consumidor final, enquanto que o veículo com a aplicação conta também, além das emissões oriundas do uso do veículo pelo consumidor, com as emissões relativas a produção e transporte da película fotovoltaica. Mesmo contabilizando emissões em mais etapas do que o veículo sem a aplicação, o veículo com a aplicação da película fotovoltaica apresentou um desempenho superior no total de emissões. Foi observada uma redução de 2% nas emissões totais de CO<sub>2</sub>e, evitando a emissão de 496,5448 kg CO<sub>2</sub>e na atmosfera.

A redução observada significa que, ao incorporar a aplicação da película fotovoltaica, ao longo do ciclo de vida do veículo, houve uma diminuição líquida nas emissões de GEEs. Esse impacto pode contribuir positivamente para a mitigação das mudanças climáticas, uma vez que a atmosfera será menos sobrecarregada com esses gases. É importante notar que as mudanças climáticas resultam de somas acumulativas de emissões ao longo do tempo. Portanto, qualquer redução nas emissões contribui para desacelerar o aumento das concentrações desses gases na atmosfera, reduzindo assim os impactos potenciais relacionados ao aquecimento global, como alterações nos padrões climáticos, aumento do nível do mar e eventos climáticos extremos.

Embora a redução de 496,5448 kg CO<sub>2</sub>e seja relativamente pequena em termos absolutos, contribui para a conscientização sobre a importância da eficiência ambiental e práticas sustentáveis na fabricação e uso de veículos, destacando a necessidade de iniciativas que visem à redução contínua das emissões de GEEs.

Se a frota mensal do veículo em questão, 2500 veículos, viesse de fábrica com a aplicação da película fotovoltaica, seria evitada a emissão de 1.241.362 quilos de dióxido de carbono na atmosfera ao longo de todo ciclo de vida dos veículos vendidos. Se a análise for ampliada para a frota vendida em um ano, seriam evitadas as emissões de 14.896.344 quilos de dióxido de carbono. Os resultados alcançados por meio da aplicação em uma frota vendida anualmente são impressionantes e altamente positivos. Essa significativa diminuição nas emissões de carbono destaca não apenas a eficácia da iniciativa, mas também seu impacto ambiental substancial.

### 4.3.2 Consumo de combustível e eficiência energética

Assim como nos cálculos anteriores, foi considerado um uso do veículo para condução na cidade (ciclo FTP-75) em 55% da quilometragem e condução em estrada (ciclo HWFET) em 45% do uso. A tabela 7 mostra todos os valores utilizados nos cálculos e os resultados obtidos a partir da fórmula (10).

Foram observados resultados relevantes relacionados ao ganho de eficiência energética comparando o veículo com e sem a aplicação da película fotovoltaica. Os principais

Tabela 7 – Cálculo da eficiência energética.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	Veículo	
	Com a aplicação	Sem a aplicação
Taxa de emissão Ciclo FTP-75 (kg CO <sub>2</sub> e/km)	0,1324	0,1369
Taxa de emissão Ciclo HWFT (kg CO <sub>2</sub> e/km)	0,122	0,12317
Emissão de CO <sub>2</sub> oriunda de um litro de gasolina E22 (KG)	2,098	
Consumo Ciclo FTP-75 (km/l) (Gasolina E22)	15,84592145	15,32505478
Consumo Ciclo HWFT (km/l) (Gasolina E22)	17,19672131	17,03336852
<b>Consumo médio (km/l)</b>	<b>16,45378139</b>	<b>16,09379596</b>
Ganho (km/l)	0,359985424	

Fonte: Autor.

pontos observados são elencados a seguir.

- **Taxa de emissão (Ciclos FTP-75 e HWFT):**

- Com a aplicação: 0,1324 kg CO<sub>2</sub>e/km (FTP-75), 0,122 kg CO<sub>2</sub>e/km (HWFET)
- Sem a aplicação: 0,1369 kg CO<sub>2</sub>e/km (FTP-75), 0,12317 kg CO<sub>2</sub>e/km (HWFET)

Os valores de emissão de CO<sub>2</sub>e por quilômetro mais baixos apresentados pelo veículo com a aplicação indicam uma queima de menos combustível por quilômetro percorrido, o que implica em uma eficiência energética superior no caso do veículo com a aplicação da película fotovoltaica.

- **Consumo (Ciclos FTP-75 e HWFT):**

- Com a aplicação: 15,84592145 km/l (FTP-75), 17,19672131 km/l (HWFET)
- Sem a aplicação: 15,32505478 km/l (FTP-75), 17,03336852 km/l (HWFET)

Ao considerar o Ciclo FTP-75, o veículo com a aplicação demonstra um consumo 3,39% mais eficiente, percorrendo 15,84592145 km com um litro de gasolina E22, em comparação com os 15,32505478 km do veículo sem a aplicação. Da mesma forma, durante o Ciclo HWFET, o veículo com a aplicação apresenta uma eficiência 0,96% superior, atingindo 17,19672131 km/l, enquanto o veículo sem a aplicação alcança 17,03336852 km/l.

- **Consumo médio:**

- Com a aplicação: 16,45378139 km/l
- Sem a aplicação: 16,09379596 km/l

A média global de consumo também reflete a tendência observada em cada um dos ciclos, o veículo com a aplicação registra consumo médio de 16,45378139

km/l, superando os 16,09379596 km/l do veículo sem a aplicação, apresentando uma eficiência energética 2,23% melhor.

Os resultados indicam melhorias na eficiência do veículo, com ganhos percentuais variando de 0.96% a 3.39%, dependendo do ciclo de condução considerado. Essas melhorias sugerem uma gestão mais eficaz do combustível e uma redução proporcional nas emissões de GEEs, contribuindo para uma operação mais sustentável e economicamente eficiente do veículo.

## 5 CONCLUSÃO

As mudanças climáticas, cada vez mais evidentes, destacam a urgência de alterar os padrões de produção e emissão da sociedade moderna. O aumento global da temperatura em 1,5 °C já é uma realidade, acarretando consequências catastróficas como o derretimento de geleiras, inundações em áreas habitadas, deslocamento de fauna e extinção de espécies. No Brasil, o setor de transporte é responsável por mais de 40% das emissões de dióxido de carbono do setor energético, com veículos de passeio emitindo 161,9 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente. Embora a eletrificação da frota seja uma alternativa para a neutralidade de carbono, sua implementação é lenta em países emergentes como o Brasil, devido a custos elevados e infraestrutura inadequada.

A aplicação de película fotovoltaica em veículos a combustão surge como uma solução imediata e inovadora frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas. Esta tecnologia possui um papel crucial, especialmente considerando as condições climáticas atuais e a necessidade urgente de reduzir emissões de carbono.

Em primeiro lugar, a película fotovoltaica aproveita uma fonte de energia renovável e abundante: a luz solar. Com a intensificação das mudanças climáticas, tem-se observado um aumento na frequência e intensidade de fenômenos climáticos extremos, incluindo períodos mais longos de intensa radiação solar. A película fotovoltaica transforma essa realidade em uma oportunidade, capturando energia solar para manter a carga da bateria dos veículos, mesmo quando estacionados.

Além disso, ao fornecer energia durante a condução, esta tecnologia contribui para um estado de carga da bateria acima de 90% por mais tempo. Isso tem um impacto direto na redução da necessidade de acionamento do alternador, que é um dos componentes que mais consomem energia em um veículo a combustão. Menos acionamento do alternador significa menor consumo de combustível e, conseqüentemente, menor emissão de dióxido de carbono.

A relevância dessa tecnologia se amplia ainda mais ao considerarmos os cenários projetados de aumento de temperatura e alterações nos padrões climáticos. Com a expectativa de mais dias ensolarados e temperaturas mais altas, a eficiência das películas fotovoltaicas pode aumentar, potencializando ainda mais os benefícios ambientais e econômicos.

Por fim, é importante ressaltar que a adoção dessa tecnologia não apenas contribui para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, mas também alinha-se com as metas globais de transição para energias renováveis e sustentabilidade. Ao reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aproveitar fontes de energia limpa, a aplicação de películas fotovoltaicas em veículos a combustão representa um passo significativo em direção a um futuro mais sustentável.

Neste trabalho, obtive os resultados que indicaram uma redução média de emissões de 2% , equivalente a 496,5448 quilos de carbono ao longo de 200.000 quilômetros, e um

aumento na eficiência energética de 2,24% . Apesar de parecerem modestos, esses ganhos podem ser significativos se aplicados em grandes frotas.

Além disso, o aumento de 2,24% na eficiência energética significa que os veículos consomem menos combustível. Para um veículo individual, essa economia pode parecer pequena, mas em uma frota de grande porte, a economia acumulada de combustível pode ser substancial, resultando em reduções consideráveis nos custos operacionais e na dependência de combustíveis fósseis.

Portanto, embora os ganhos por veículo individual sejam relativamente pequenos, eles representam mudanças significativas quando aplicados em um contexto mais amplo, como em frotas corporativas ou públicas. A adoção desta tecnologia poderia, portanto, ser um passo importante em direção a uma mobilidade mais sustentável e econômica, alinhada com as metas globais de redução de emissões e combate às mudanças climáticas.

Os objetivos propostos para a análise do impacto ambiental da redução da emissão de CO<sub>2</sub> por meio do aumento da eficiência energética de veículos a combustão, utilizando células fotovoltaicas, foram plenamente alcançados, revelando resultados expressivos e elucidativos. A identificação da eficiência energética dos veículos a combustão com a aplicação de células fotovoltaicas permitiu estimar um ganho efetivo, evidenciando uma redução de 2,23% no consumo médio e uma eficiência energética superior de 16,45378139 km/l em comparação aos 16,09379596 km/l dos veículos sem a aplicação. Na análise detalhada das emissões ao longo do ciclo de vida, embora tenha sido observada uma emissão inicial maior na produção da película fotovoltaica, a implementação da tecnologia resultou em uma redução total de 496,5448 kg CO<sub>2</sub>e, representando uma diminuição de 2% nas emissões totais. Estes resultados não apenas corroboram os objetivos específicos, incluindo a quantificação da redução de emissão de CO<sub>2</sub> e a avaliação do impacto para a pegada de carbono, mas também evidenciam a eficácia e a relevância ambiental da aplicação de células fotovoltaicas na busca por soluções mais sustentáveis no setor de transporte.

Os objetivos propostos para a análise do impacto ambiental da redução da emissão de CO<sub>2</sub> por meio do aumento da eficiência energética de veículos a combustão, utilizando células fotovoltaicas, foram plenamente alcançados, revelando resultados expressivos e elucidativos. A identificação da eficiência energética dos veículos a combustão com a aplicação de células fotovoltaicas permitiu estimar um ganho efetivo, evidenciando uma redução de 2,23% no consumo médio e uma eficiência energética superior de 16,45378139 km/l em comparação aos 16,09379596 km/l dos veículos sem a aplicação. Na análise detalhada das emissões ao longo do ciclo de vida, embora tenha sido observada uma emissão inicial maior na produção da película fotovoltaica, a implementação da tecnologia resultou em uma redução total de 496,5448 kg CO<sub>2</sub>e, representando uma diminuição de 2% nas emissões totais. Estes resultados não apenas corroboram os objetivos específicos, incluindo a quantificação da redução de emissão de CO<sub>2</sub> e a avaliação do impacto para

a pegada de carbono, mas também evidenciam a eficácia e a relevância ambiental da aplicação de células fotovoltaicas na busca por soluções mais sustentáveis no setor de transporte.

O estudo sobre a aplicação de películas fotovoltaicas em veículos a combustão representa uma significativa contribuição para a academia, promovendo uma convergência entre a eficiência energética e a inovação tecnológica no setor automotivo. A incorporação dessas películas nos veículos tradicionalmente movidos por combustíveis fósseis apresenta uma abordagem pioneira para mitigar os impactos ambientais, reduzindo a dependência exclusiva de fontes não renováveis. Além disso, o desenvolvimento de tecnologias que integram sistemas fotovoltaicos aos automóveis amplia as possibilidades de eficiência energética, contribuindo para a transição para uma mobilidade mais sustentável. Dessa forma, esse estudo não apenas amplia o conhecimento sobre a aplicação de energias renováveis no contexto automotivo, mas também promove uma visão inovadora e interdisciplinar, unindo os campos da engenharia, energia renovável e design automotivo. Essa abordagem integrada é crucial para enfrentar os desafios contemporâneos relacionados à sustentabilidade e mobilidade, evidenciando a importância do avanço científico nesse domínio.

Para uma montadora de automóveis, o estudo assume uma relevância estratégica, combinando benefícios ambientais e vantagens competitivas. Ao incorporar tecnologias sustentáveis como películas fotovoltaicas nos veículos, a montadora não apenas contribui para a redução das emissões de carbono e para a preservação ambiental, mas também atende às crescentes demandas dos consumidores por opções ecologicamente conscientes. Além disso, ao adotar inovações que promovem a eficiência energética, a montadora destaca-se no mercado como uma líder comprometida com a sustentabilidade, ganhando a preferência de consumidores que valorizam práticas ambientalmente responsáveis. Essa abordagem não apenas fortalece a imagem da montadora como uma empresa socialmente responsável, mas também impulsiona sua competitividade ao se posicionar à frente das tendências globais em direção à mobilidade sustentável.

Para trabalhos futuros, este trabalho recomenda-se:

- 1) Realizar um estudo da viabilidade econômica da aplicação da película fotovoltaica CIGS na carroceria de um veículo a combustão.
- 2) Realizar um estudo social relacionado a aceitação do público quanto à aplicação da película fotovoltaica CIGS na carroceria de veículos de passeio a combustão e em grandes frotas de transporte público.
- 3) Ampliação da área de cobertura da película fotovoltaica, incluindo outras partes do veículo, como o capô, para aumentar a produção de energia.
- 4) Introdução de uma bateria adicional para armazenar energia enquanto o veículo está estacionado, prolongando o tempo de carga da bateria principal acima de 90% , reduzindo ainda mais o acionamento do alternador e as emissões.
- 5) Pesquisa e desenvolvimento de películas fotovoltaicas mais eficientes, visando

aumentar ainda mais a redução das emissões e a eficiência energética dos veículos.

6) A adoção dessas medidas poderá ampliar significativamente os benefícios ambientais dessa tecnologia, contribuindo para uma mobilidade urbana mais sustentável e reduzindo o impacto do setor de transporte nas mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDRE CAPELLI. **Eletroeletrônica Automotiva Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados de Alexandre Capelli**. 1. ed. São Paulo: Erica, jul. 2010. v. 1.
- ALMEIDA, Vinícius da Silva. **III Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande: coletânea de artigos**. 1. ed. [S.l.]: Editora Poisson, ago. 2020. v. 1. ISBN 9788570422071.
- ANFAVEA. **Caminhos da descarbonização**. [S.l.], 2021.
- ANFAVEA. **O QUE É O PROGRAMA ROTA 2030?** [S.l.: s.n.], 2020.
- BAHNIUK, Gabriela (Ed.). **Revista Técnico-Científica do CREA-PR**. 2023. ed. Paraná: TECIE, ago. 2022. v. 33.
- BOSCH. **Fundamentals of Automotive and Engine Technology**. Edição: Konrad Reif. [S.l.: s.n.], 2014.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. 4. ed. [S.l.: s.n.], 2016. v. 1.
- BSI; DEFRA; CARBON TRUST. *Guide to PAS 2050*. In.
- CENÁRIO SOLAR. **O retardo da eletrificação da frota de veículos no Brasil**. [S.l.: s.n.].
- CESAR DE MACEDO, Paulo; MORAES GOMES, Danielle de; ALVES PEREIRA, Eudes; BERALDO VELOSO, Márcio. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores**. 3. ed. Brasília: PROCONVE/PROMOT, ago. 2011.
- CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/proconve/>.
- CORDEIRO, Ana Carolina; LOSEKANN, Luciano. Os desafios do processo de difusão do carro elétrico no Brasil. In: *BLUCHER Engineering Proceedings*. São Paulo: Editora Blucher, ago. 2018. P. 728–737.

DELPHI. **Qual é a função do sensor de oxigênio?** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.delphiautoparts.com/pt-br/centro-de-recursos/artigo/qual-a-fun%C3%A7%C3%A3o-do-sensor-de-oxig%C3%AAnio>.

DEUTSCH, Curtis A.; TEWKSBURY, Joshua J.; HUEY, Raymond B.; SHELDON, Kimberly S.; GHALAMBOR, Cameron K.; HAAK, David C.; MARTIN, Paul R. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 18, p. 6668–6672, mai. 2008. ISSN 0027-8424.

DIAS, DANIEL. **As baterias são um acessório importante nos carros a combustão e peça fundamental nos elétricos.** [S.l.: s.n.], ago. 2022.

ECO.A. **Os benefícios da energia solar para o Brasil.** [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <https://ecoa.org.br/os-beneficios-da-energia-solar-para-o-brasil/>.

EDENRED. **Você conhece o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV)?** [S.l.: s.n.], ago. 2017.

EISENHARDT, Kathleen M. The Academy of Management Review Building Theories from Case Study Research. **C Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, 1989.

FÁBIA, Moraes. **PROJETO DOS COLETORES DE ADMISSÃO E ESCAPE DE UM VEÍCULO AUTOMOTOR TIPO FÓRMULA SAE.** Ago. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Guaratinguetá.

FRANCISCO BERNARDO, Giovanni. **Método para instalação robusta do sensor medidor de vazão mássica de ar (MAFS) em sistemas de admissão de ar para motores de combustão interna.** Jul. 2010. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre *et al.* Global Carbon Budget 2022. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 11, p. 4811–4900, nov. 2022. ISSN 1866-3516.

FUMIÃ, Herman Fialho. Fourier revisitado: um modelo simplificado para o efeito estufa. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 44, 2022. ISSN 1806-9126.

GABRIEL SCATOLINO, CAIO; SILVA REIS, PALOMA. **Aplicação do scanner técnico de reparação automotiva para análise e correção de problemas no**

**sistema de alimentação combustível.** Jul. 2018. Tese (Doutorado) – UNIVERSIDADE DE TAUBATE, TAUBATÉ - SÃO PAULO.

GANDELMAN, Ariel. **Irradiação solar: sua importância no conforto.** [S.l.: s.n.], ago. 2021.

GANDHI, H S; WILLIAMSON, W B; GOSS, R L; MARCOTTY, L A; LEWIS, D. Silicon contamination of automotive catalysts. *In.*

GÓMEZ, J.M. Rodríguez; CARLESSO, F.; VIEIRA, L.E.; DA SILVA, L. A irradiância solar: conceitos básicos. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, n. 3, ago. 2018. ISSN 1806-9126.

GONÇALVES PEREIRA, Lucas. **SÍNTESE DOS MÉTODOS DE PEGADA ECOLÓGICA E ANÁLISE EMERGÉTICA PARA DIAGNÓSTICO DA SUSTENTABILIDADE DE PAÍSES.** Ago. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GREENBRAS. **energia solar e o Prêmio Nobel de Einstein.** [S.l.: s.n.]. Disponível em: <http://greenbras.com/energia-%20fotovoltaica/energia-solar-e-o-premio-Nobel-de-Einstein/>.

HENRIQUE DIAS VAZ, ABELAR. **NANOFLUIDOS EM UM SISTEMA DE ARREFECIMENTO AUTOMOTIVO.** Jul. 2019. Tese (Doutorado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, Uberlândia - MG.

HENRIQUE GUERRA MACHADO, FRANK. **SISTEMA DE ARREFECIMENTO DE MOTORES AUTOMOTIVOS A COMBUSTÃO INTERNA.** Jul. 2015. Tese (Doutorado) – CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS, Varginha.

INPE. **Novo sistema facilita consulta sobre potencial de energia solar.** [S.l.: s.n.], ago. 2019.

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C. **Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas**, 2018.

IPCC. Aquecimento Global de 1,5°C: Sumario para Formuladores de Políticas. **IPCC**, 2019.

JOSÉ BÜHLER, Alexandre; PERIN GASPARIN, Fabiano; ARNS RAMPINELLI, Giuliano; KRENZINGER, Arno. UMA ANÁLISE SOBRE EFEITOS METAESTÁVEIS EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS CI(G)S POR EXPOSIÇÃO À LUZ SOLAR. **Revista Brasileira de Energia Solar**, ago. 2014.

JOYCE, António. **O fotovoltaico em Portugal : recente evolução**. [S.l.: s.n.], ago. 2019.

KENJI SHIBUYA, Marcelo; HENG MEU LEI, Gir. **DESENVOLVIMENTO DE MEDIDOR DE IRRADIÂNCIA E IRRADIAÇÃO SOLAR DE BAIXO CUSTO PARA FINS DIDÁTICOS**. Florianópolis: CBENS, ago. 2022.

KWEKU, Darkwah; BISMARCK, Odum; MAXWELL, Addae; DESMOND, Koomson; DANSO, Kwakye; OTI-MENSAH, Ewurabena; QUACHIE, Asenso; ADORMAA, Buanya. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. **Journal of Scientific Research and Reports**, v. 17, n. 6, p. 1–9, fev. 2018. ISSN 23200227.

LALLI, Fernando. Conheça o motor de partida. **Terra**, jul. 2019.

LUIZ DIAS, Anderson. **Funcionamento e detalhes do alternador do sistema elétrico dos automóveis com motor de combustão interna**. [S.l.: s.n.], jul. 2015.

MARCAL, Luciana Maichaki; FRANCISCO, Antonio Carlos de; LUZ, Leila Mendes da; PIEKARSKI, Cassiano Moro. Fundamentos Da Análise Do Ciclo De Vida. **XXXIII Enegep**, p. 12, 2013.

MATTEDE, Henrique. **Veja como funciona o sistema elétrico de carros!** [S.l.: s.n.], jul. 2023.

MELO, André de Souza; SAMPAIO, Yony de Sá Barreto. IMPACTOS DOS PREÇOS DA GASOLINA E DO ETANOL SOBRE A DEMANDA DE ETANOL NO BRASIL. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 18, n. 1, p. 56–83, ago. 2014. ISSN 1415-9848.

MINX, Jan; WIEDMANN, Thomas. **A Definition of “Carbon Footprint”**. [S.l.], jul. 2007.

- MORAIS, Fabrício Higo Monturil de;  
SILVA, Osvaldo Augusto Vasconcelos de Oliveira Lopes da;  
MORAES, Albemerc Moura de; BARBOSA, Fábio Rocha. Influência da Irradiação Solar na Análise de Viabilidade Econômica de Sistemas Fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 723–734, ago. 2021. ISSN 1982-4351.
- MORICE, C P; ZHANG, H M; GISTEMP, Team; ROHDE, R A; HERSBACH, H; KOBAYASHI, S. State of the Global Climate 2021 WMO provisional report. **World Meteorological Organization**, 2021.
- MOURA. **Como funciona o sistema de ignição dos automóveis?** [S.l.: s.n.], jul. 2019.
- NASA - ESCT. **What is the greenhouse effect?** [S.l.: s.n.], nov. 2023. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/faq/19/what-is-the-greenhouse-effect/#:~:text=The%20greenhouse%20effect%20is%20the,it%20would%20be%20without%20them>.
- NIQUITO, Thais Waideman; CARRARO, André. Efeitos do programa inovar-auto sobre a indústria de veículos no Brasil. **Economia Aplicada**, v. 25, n. 2, 2021. ISSN 19805330.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas**. [S.l.: s.n.], 2022.
- PANKAJ BHATIA; CYNTHIA CUMMIS; ANDREA BROWN; LAURA DRAUCKER; DAVID RICH; HOLLY LAHD. **Product Life Cycle Accounting and Reporting Standard**. [S.l.: s.n.], 2008.
- PATEL, Neil. **Irradiação solar: o que é, como captar e produzir energia**. [S.l.: s.n.], ago. 2023.
- PEREIRA, Enio *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. [S.l.]: Universidade Federal de São Paulo, ago. 2017. ISBN 9788517000898.
- PETROBRAS. **GASOLINA - INFORMAÇÕES TÉCNICAS**. [S.l.: s.n.], 2021.
- PORTAL ENERGIA. **Energia Fotovoltaica - manual sobre tecnologias, projecto e instalação**. 1. ed. [S.l.]: Portal Energia, ago. 2004. v. 3.

- POZZAGNOLO, Marcelo. **Análise das emissões de gases em veículos automotores do ciclo otto**. Ago. 2013. Tese (Doutorado) – Centro Universitario UNIVATES, Lajeado.
- RODRIGUEZ, Henrique. **Para que serve e como funciona a sonda lambda**. [S.l.: s.n.], ago. 2017.
- SANTIAGO DOS SANTOS, Alana. **O ESTADO DA ARTE DAS CÉLULAS FOTOVOLTAICAS**. Jul. 2018. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- SANTOS, MS; TREML, AE. Desenvolvimento da Transmissão de um protótipo Fórmula SAE. **The Academic Society Journal**, 2018.
- SHAHZAD, Umair. Global Warming: Causes, Effects and Solutions. **Durreesamin Journal Australia**, ago. 2015.
- SILVA, Robson Willians da Costa; PAULA, Beatriz Lima de. Causa do aquecimento global: antropogenica versus natural. **Terrae Didatica**, v. 5, 2015.
- SOARES, L. H. de B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. **Mitigação da emissão de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil**. Seropédica: Seropédica: Embrapa Agrobiologia, ago. 2009.
- STANNARD, Warren. The Greenhouse Effect: An Evaluation of Arrhenius' Thesis and a New Energy Equilibrium Model. **Natural Science**, v. 10, n. 01, p. 1–10, 2018. ISSN 2150-4091.
- STATE FARM. **Manual vs. automatic transmissions**. [S.l.: s.n.], mai. 2023. Disponível em: <https://www.statefarm.com/simple-insights/auto-and-vehicles/manual-vs-automatic-transmissions>.
- TAVARES, Ruben; ROCHA, Tiago. **Sistemas de Ignição**. Tese (Doutorado).
- TURBOBRASIL. **Automático do motor de partida**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <https://www.turbobrasil.com.br/automatico-do-motor-de-partida/#:~:text=O%20autom%C3%A1tico%20do%20motor%20de,superar%20a%20resist%C3%A4ncia%20ao%20movimento.%5C>.

UCAR. **The Greenhouse Effect**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em:

<https://scied.ucar.edu/learning-zone/how-climate-works/greenhouse-effect>.

WAGLER, R. 6th Mass Extinction. *In*: **ENCYCLOPEDIA of the Anthropocene**. [S.l.]: Elsevier, 2018. P. 9–12.

ZULFEQUAR AHMAD KHAN, Md. Causes and Consequences of Greenhouse Effect & Its Catastrophic Problems for Earth. **International Journal of Sustainability Management and Information Technologies**, v. 3, n. 4, p. 34, 2017. ISSN 2575-5102.