

Avaliação dos Impactos na Utilização do Etanol: Energia, Ecologia e Economia

JULIANA ROCHA TAVARES

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
DEZEMBRO – 2013

Avaliação dos Impactos na Utilização do Etanol: Energia, Ecologia e Economia

JULIANA ROCHA TAVARES

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutora em Ciências Naturais.

Orientador: Prof. Marcelo Silva Stel

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE – UENF
CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
DEZEMBRO – 2013

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dom da vida e pelo Seu Amor incondicional.

Aos meus pais, por me ensinarem todos os dias, através de atos e de palavras, a sonhar com um mundo melhor e a lutar por esse mundo.

Ao professor Marcelo Silva Sthel, por ter sido bem mais que um excelente orientador de Doutorado, mas um orientador da vida, um amigo mais do que presente, um exemplo de alegria e esperança.

Aos demais professores do LCFIS, pela amizade e boa-vontade de todos os momentos.

Aos meus queridos colegas de trabalho Guilherme, Mila, Geórgia, Aline, Paulo Sérgio e Karize, que muito me auxiliaram durante todas as etapas do Doutorado, com boa-vontade para trabalhar, paciência para ensinar e palavras de incentivo para encorajar.

Aos amigos demais amigos do LCFIS, pela amizade sincera e pelo carinho de sempre.

Ao técnico Luís Antônio, pela competência e boa-vontade para nos socorrer nos momentos mais difíceis.

A todos os meus familiares e aos meus incontáveis e incitáveis amigos que sempre me incentivaram e apoiaram.

A toda a população do Estado do Rio de Janeiro, por garantirem a mim a maravilhosa oportunidade de me graduar, concluir o meu mestrado e doutorado em uma universidade pública de excelência.

*Senhor, fazei-me instrumento de vossa paz
Onde houver ódio, que eu leve o amor.
Onde houver ofensas, que eu leve o perdão.
Onde houver discórdia, que eu leve a união.
Onde houver dúvidas que eu leve a fé.*

*Onde houver erros, que eu leve a verdade.
Onde houver desespero, que eu leve a esperança.
Onde houver tristeza, que eu leve alegria.
Onde houver trevas, que eu leve a luz.*

*Ó Mestre, fazei que eu procure mais
Consolar que ser consolado,
Compreender que ser compreendido,
Amar que ser amado,
pois é dando que se recebe,
é perdoando que se é perdoado,
E é morrendo que se vivie
Para a vida eterna!*

Oração atribuída a São Francisco de Assis

SUMÁRIO

I. LISTA DE FIGURAS.....	iii
II. LISTA DE TABELAS.....	vii
III. RESUMO.....	viii
IV. ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO	
1.1. Introdução.....	1
1.2. Objetivos.....	5
CAPÍTULO 2. REVISÃO BILIOGRÁFICA	
2.1. Energia.....	6
2.1.1. Aspectos históricos.....	7
2.1.2. Energia no mundo.....	9
2.1.3. Energia no Brasil.....	15
2.2. Poluição Atmosférica.....	20
2.2.1. Aspectos históricos.....	23
2.2.2. Chuva ácida.....	26
2.2.3. Smog Fotoquímico.....	28
2.2.4. Aquecimento Global.....	30
2.2.5. Poluição do ar e saúde.....	38
2.3. Etanol combustível.....	39
2.3.1. Aspectos históricos da utilização do Etanol.....	43
2.3.2. A indústria brasileira de cana-de-açúcar.....	49
2.3.3. A indústria Norte Fluminense de cana-de-açúcar.....	53
2.3.4. Balanço Energético.....	57
2.3.5. Segurança Alimentar e Biodiversidade	66
2.3.6. Outros impactos ambientais.....	70
2.3.7. Aspectos Sociais.....	71
2.4. Fenômeno Fotoacústico.....	72

2.4.1. Aspectos históricos.....	73	
2.4.2. Aspectos teóricos na geração do sinal fotoacústico.....	75	
2.5. Laser de Cascata Quântica.....	79	
2.6. Analisadores Eletroquímicos.....	81	
CAPÍTULO 3. MODELOS GEOMÉTRICOS: ENERGIA, ECOLOGIA E ECONOMIA		
3.1. Modelo de Células Triangulares Sustentáveis.....	84	
3.2. Proposta de mitigação das emissões individuais de CO ₂ até o ano de 2030..	89	
3.3. Aplicação do Modelo de Células Triangulares Sustentáveis à proposta de Chakravarty et al.....	91	
CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS		
4.1. Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de CO ₂	96	
4.2. Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica.....	98	
4.3. Analisador Eletroquímico TEMPEST.....	100	
4.4. Procedimento de Coleta.....	101	
CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO		
5.1. Avaliação da emissão de etileno em veículos movidos a etanol.....	103	
5.2. Avaliação da emissão de CO, NO _x e SO ₂ em motocicletas flex.....	106	
5.3. Avaliação da emissão de CO, NO _x e SO ₂ em veículos de passeio flex.....	115	
CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO.....		124
PUBLICAÇÕES.....		126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		128

I. LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Matriz Energética Mundial em 2010. [33].....	10
Figura 2. Consumo energético por região em 2010. [33]	11
Figura 3. Emissão de CO ₂ por região em 2010. [33].....	12
Figura 4. Produção de energia por fonte de 1990 a 2035 em dois cenários possíveis. [33].....	13
Figura 5. Oferta Interna de Energia no Brasil em 2010. [35].....	16
Figura 6. Planejamento da Oferta Interna de Energia no Brasil em 2019. [35].....	17
Figura 7. Expansão controlado e planejada de fontes de energia renováveis (excluindo as hidrelétricas convencionais) entre 2010 e 2019. [35].....	18
Figura 8. Matriz de emissão de gases estufa em megatoneladas de CO ₂ por setor no período de 2010 a 2019. [35].....	19
Figura 9. Efeito Estufa: uma camada de gases que se comporta como um cobertor para nosso planeta. [52].....	32
Figura 10. Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos), obtidas a partir de testemunhos de gelo (símbolos com diferentes cores para os diferentes estudos) e amostras atmosféricas (linhas vermelhas). [10].....	33
Figura 11. Mudanças observadas na (a) temperatura média global da superfície; (b) média global da elevação do nível do mar a partir de dados de marégrafo (azul) e satélite (vermelho) e (c) cobertura de neve do Hemisfério Norte para março-abril. [10].....	34
Figura 12. Estimativas da média global do forçamento radiativo (FR) e faixas em 2005 para o dióxido de carbono (CO ₂), o metano (CH ₄), o óxido nítrico (N ₂ O) antrópicos e outros agentes e mecanismos importantes, juntamente com a extensão geográfica típica do forçamento e o nível de compreensão científica (NCC) avaliado. [10].....	35
Figura 13. Perfil da frota por combustível para veículos leves de 2009 a 2019. [35].....	47
Figura 14. Projeção da demanda de etanol no Brasil de 2009 a 2019. [35].....	48
Figura 15. Cadeia Sucroalcooleira no Brasil. [80].....	50

Figura 16. Distribuição espacial das plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade. [87].....	52
Figura 17. Balanço energético das principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol. [62].....	62
Figura 18. Foto do acoplamento entre a cúpula e o canister nas áreas experimentais. [111].....	64
Figura 19. Fotos das dornas de fermentação alcoólica em operação.....	66
Figura 20. Representação do fofone construído por A. G. Bell. [127].....	74
Figura 21. Geração do sinal fotoacústico em amostras gasosas.....	76
Figura 22. Tunelamento de elétrons através dos poços quânticos presentes na banda de condução de um laser de cascata quântica.....	80
Figura 23. Membrana Hidrofóbica. [164].....	82
Figura 24. Esquema de um sensor eletroquímico típico. [164].....	82
Figura 25. Representação de um indivíduo da sociedade contemporânea (triângulo escaleno). [27].....	85
Figura 26. Transformação do triângulo escaleno em triângulo equilátero, através de ações de sustentabilidade propostas dentro da matriz econômica capitalista. [27].....	86
Figura 27. Inversão dos sentidos das setas no triângulo equilátero a partir da implementação de um novo paradigma de sustentabilidade. [27].....	87
Figura 28. Estrutura hexagonal regular: compartilhando recursos naturais (cooperação). [27].....	88
Figura 29.a) Acoplamento de hexágonos regulares, formando uma estrutura piramidal. b) Pirâmide hexagonal regular. [28].....	92
Figura 30. Pirâmide Regual Hexagonal respresentando a distribuição da população a partir da pegada ecológica dos indivíduos com limite superior de emissão de 10,8 tCO ₂ /ano e limite inferior de emissão de 1 tCO ₂ / ano para uma estimativa populacional de 8,1 bilhões de pessoas em 2030. [28].....	93
Figura 31. Pirâmide Regual Hexagonal respresentando a distribuição da população a partir da pegada ecológica dos indivíduos com limite superior de	

emissão de 9,6 tCO ₂ /ano e limite inferior de emissão de 1,5 tCO ₂ / ano para uma estimativa populacional de 8,1 bilhões de pessoas em 2030. [30].....	94
Figura 32. Esquema da montagem experimental do espectrômetro fotoacústico acoplado ao laser de CO ₂	96
Figura 33. Foto da célula fotoacústica ressonante.....	97
Figura 34. Esquema da montagem experimental do espectrômetro fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica.....	98
Figura 35. Foto da célula fotoacústica diferencial.....	99
Figura 36. Foto da montagem experimental do Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica.....	100
Figura 37. Analisador Eletroquímico TEMPEST 100.....	101
Figura 38. a) Foto do canister b) Foto da bomba coletora AVOCs.....	102
Figura 39. Concentração de etileno na exaustão de veículos movidos a etanol..	104
Figure 40.a) Espectro Fotoacústico de uma mistura certificada de 5 ppmV de etileno diluído em nitrogênio. b) Espectro obtido a partir da base de dados HITRAN de 1 mol de etileno a 25 °C e 1 atm. Espectro fotoacústico do etileno emitido em uma veículo movido a etanol nos modos: c) não acelerado e d) acelerado.....	105
Figura 41. Emissão de CO nas motocicletas Honda Fan 150 CC.....	107
Figura 42. Emissão de NO _x nas motocicletas Honda Fan 150CC.....	108
Figura 43. Emissão de SO ₂ nas motocicletas Honda Fan 150CC.....	109
Figura 44. Emissão de CO nas motocicletas Honda Broz 150CC.....	110
Figura 45. Emissão de NO _x nas motocicletas Honda Broz 150CC.....	111
Figura 46. Emissão de SO ₂ nas motocicletas Honda Broz 150CC.....	112
Figura 47. Emissão de CO nas motocicletas Honda Biz 120CC.....	113
Figura 48. Emissão de NO _x nas motocicletas Honda Biz 125 CC.....	114
Figura 49. Emissão de SO ₂ nas motocicletas Honda Biz 125 CC.....	114
Figura 50. Emissão de CO no veículo flex Fiat Pálio 2008.....	116

Figura 51. Emissão de NO _x no veículo flex Fiat Pálio 2008.....	116
Figura 52. Emissão de SO ₂ no veículo flex Fiat Pálio 2008.....	117
Figura 53. Emissão de CO no veículo flex Fiat Uno 2012.....	118
Figura 54. Emissão de NO _x no veículo flex Fiat Uno 2012.....	118
Figura 55. Emissão de SO ₂ no veículo flex Fiat Uno 2012.....	119
Figura 56. Emissão de CO no veículo flex Space Fox 2008.....	120
Figura 57. Emissão de NO _x no veículo flex Space Fox 2008.....	120
Figura 58. Emissão de SO ₂ no veículo flex Space Fox 2008.....	121
Figura 59. Emissão de CO no veículo flex HB 20 2013.....	122
Figura 57. Emissão de NO _x no veículo flex HB 20 2013.....	122
Figura 58. Emissão de SO ₂ no veículo flex HB 20 2013.....	123

II. LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais poluentes atmosféricos suas origens e conseqüências. [4]..	22
Tabela 2. Propriedades físicas do álcool etílico. [65].....	40
Tabela 3. Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol referentes à safra 2008/2009. [86].....	51
Tabela 4. Quantidade de cana-de-açúcar (em toneladas) necessária para a produção de 1 kg de açúcar, 1 litro de etanol anidro e 1 litro de etanol hidratado por região. [86].....	53
Tabela 5. Relação das indústrias sucroalcooleiras em atividade no Estado do Rio de Janeiro de 1970 a 2005. [93].....	56
Tabela 6. Consumo de energia fóssil (MJ) por tonelada de cana-de-açúcar. [104].....	59
Tabela 7. Energia Fóssil Consumida (MJ tc^{-1}), Energia Renovável Produzida (MJ tc^{-1}) e Balanço Energético do Etanol. [104].....	60
Tabela 8. Emissões evitadas ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}\text{m}^{-3}$) para cada litro de etanol hidratado e anidro. [104].....	61
Tabela 9. Concentração de N_2O dos quatro dias de experimento. [111].....	65
Tabela 10. Veículos movidos a etanol utilizados para detecção de etileno.....	103
Tabela 11. Motocicletas flex do modelo Honda Fan.....	106
Tabela 12. Motocicletas flex do modelo Honda Broz.....	109
Tabela 13. Motocicletas flex do modelo Honda Biz.....	112
Tabela 14. Veículos de passeio flex.....	115

RESUMO

No século XXI, crises ambientais, econômicas e energéticas, fortemente interconectadas, desafiam a sociedade moderna. No sistema econômico vigente (Economia), a demanda por produtos e serviços (Energia) cresce de forma significativa a cada dia. No entanto, a produção energética, baseada em grande parte em uma matriz fóssil, gera a emissão de gases poluentes (Ecologia), que prejudicar a saúde humana e ocasionam problemas ambientais, tais como a chuva ácida, o smog fotoquímico, o aquecimento global.

Neste contexto, modelos geométricos simples foram desenvolvidos, de modo a relacionar de forma sistêmica as questões ambientais, econômicas e energéticas. A partir destes modelos, foram elaboradas propostas para solucionar conjuntamente as crises, utilizando, para isso, soluções tecnológicas e não tecnológicas (cooperação).

Do ponto de vista tecnológico, uma medida importante seria a substituição de combustíveis fósseis por alternativas energéticas mais limpas no setor de transporte. Neste contexto, o etanol brasileiro constitui uma opção interessante, por ser um combustível renovável e mitigar as emissões de dióxido de carbono (CO_2). No entanto, se formos analisar toda a cadeia produtiva do etanol, diversos impactos sociais, ambientais e econômicos nas fases agrícola, industrial e de consumo do etanol.

Neste trabalho, utilizamos sensores fotoacústicos e eletroquímicos para avaliar a emissão de poluentes atmosféricos, tais como o etileno (C_2H_4), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO_2) na exaustão de motocicletas e veículos de passeio movidos a etanol.

Avaliando os impactos gerados na cadeia produtiva do etanol, notamos que as questões econômica, energética e ecológica estão profundamente associadas, ou seja, de acordo com o modelo geométrico proposto neste trabalho.

ABSTRACT

In the XXI century, environmental, economic and energetic crises, strongly interconnected, defy modern society. In the current economic system (Economy), the demand for products and services (Energy) grows significantly each day. However, energy production, based largely on fossil fuels, generates greenhouse gases emission (Ecology), which harm human health and cause environmental problems such as acid rain, photochemical smog, global warming.

In this context, simple geometric models were developed in order to relate in a systematic way environment, economy and energy. Using these models, proposals were elaborated to solve the crisis, using, for this, technological and non-technological solutions (cooperation).

Technological solutions involve the replacement of fossil fuels by alternative clean energy in the transportation sector. In this context, Brazilian ethanol is an interesting option, because it is a renewable fuel and mitigate emissions of carbon dioxide (CO₂). However, if all the ethanol production chain is examined, various social, environmental and economic impacts are generated in ethanol agricultural, industrial and consumer phases.

In this study, we used photoacoustic and electrochemical sensors to evaluate the emission of air pollutants, such as ethylene (C₂H₄), carbon monoxide (CO), nitrogen oxides (NO_x) and sulfur dioxide (SO₂) in the exhaust of ethanol vehicles and motorcycles, assessing the environmental viability of this fuel.

Assessing the impacts on the ethanol production chain, we can notice that the economic, energetic and ecologic issues are deeply linked, according to the geometric model proposed in this thesis.

CAPÍTULO 1. APRESENTAÇÃO

1.1. Introdução

No início deste século, a sociedade se depara com questões de máxima importância para o futuro da humanidade: a questão energética, a questão ambiental e a questão econômica. O grande desafio é buscar conciliar essas três questões, garantindo a manutenção dos recursos naturais e da biodiversidade para assegurar a sustentabilidade das futuras gerações.

A questão energética assume uma importância ímpar em um planeta onde cerca de um bilhão de pessoas são vítimas da fome [1] e grande parte da população mundial ainda é privada de luz elétrica. Ao mesmo tempo, nos grandes centros urbanos, hospitais, escolas, indústrias, automóveis, centros comerciais e residências dependem de uma quantidade cada vez maior de energia.

Essa demanda energética crescente, por sua vez, está interligada às questões econômicas, uma vez que, no sistema econômico vigente, o modelo de desenvolvimento é baseado no consumo em grande escala de bens e serviços, exigindo, dessa forma, um suprimento cada vez mais elevado de energia.

A produção e o consumo de energia, no entanto, produzem grandes impactos ambientais. Atualmente, mais de 80% da demanda mundial de energia é suprida por combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) [2] que, além de serem fontes não-renováveis de energia, contribuem para a emissão de importantes poluentes atmosféricos, como hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrogênio (NO, NO₂ e N₂O), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado, entre outros. [3,4]

Problemas como a chuva ácida, o smog químico e fotoquímico, a degradação da qualidade do ar, o aumento de oxidantes atmosféricos (como o ozônio), a inversão térmica, o aquecimento global e os diversos problemas respiratórios e cardiovasculares gerados pela poluição são alguns resultados de um consumo extremamente elevado de energia fóssil. [3,5-9]

Dentre estes problemas ambientais, podemos destacar o aquecimento global, que pode ocasionar o aumento das temperaturas médias globais do ar e do oceano, a redução nas superfícies de gelo na Groenlândia e na Antártida, a elevação do nível do mar, o aumento na incidência de eventos climáticos extremos, como seca, precipitação forte, ondas de calor e ciclones tropicais mais intensos, além da extinção de espécies animais e vegetais. [10-16] Se a tendência atual de aquecimento for mantida constante, as conseqüências poderão se tornar ainda mais sérias e as condições de vida no planeta poderão se tornar inadequadas para manutenção da vida humana. [17]

Neste contexto, o homem busca alternativas que o ajudem a solucionar as questões energética e ambiental, sem afetar o sistema econômico vigente. Para minimizar os impactos ambientais, o homem deve reduzir a utilização de combustíveis fósseis imediatamente. No entanto, para garantir à população mundial a contínua oferta de energia, é necessário utilizar fontes renováveis e, sobretudo, limpas. É necessário também que essas fontes energéticas sejam socialmente e economicamente viáveis, possibilitando uma substituição gradativa dos combustíveis fósseis.

No setor de transporte, ainda fortemente dependente dos derivados de combustíveis fósseis (gasolina, diesel e gás natural veicular), o desafio é enorme. Considerando que o número de veículos automotivos e motocicletas tem crescido de maneira significativa nos últimos anos, é essencial encontrar combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis. Ao lado de propostas mais inovadoras, como veículos elétricos e movidos a hidrogênio, uma solução apresentada em solo brasileiro em meados da década de 70, começa a ganhar espaço no cenário mundial. O etanol desponta no como um potencial substituto da hegemônica gasolina em veículos leves e motocicletas de todo o mundo, com a grande vantagem de ser renovável e reduzir a emissão do gás estufa dióxido de carbono (CO₂).

O perfil de sustentabilidade do etanol, no entanto, tem sido recentemente questionado por muitos pesquisadores. [18-20] As discussões mais frequentes incluem o impacto direto ou indireto do uso terra, a poluição e consumo de água,

além dos conflitos econômicos e sociais derivados da competição energia / alimento. [21]

É necessário, portanto, avaliar os impactos ambientais e sociais gerados em toda a cadeia produtiva do etanol para melhor compreender as vantagens e desvantagens na utilização deste combustível. Para avaliar a emissão de gases poluentes no ciclo de vida do etanol, a técnica fotoacústica oferece importantes vantagens, como a elevada sensibilidade, seletividade, capacidade multicomponente, possibilidade de medições em tempo real e *in situ*. [22-24] Associados à técnica fotoacústica, o Analisador Eletroquímico TEMPEST possibilita a detecção de diferentes espécies gasosas na faixa de ppmV (partes por milhão por volume), constituindo, uma importante técnica complementar na detecção de gases poluentes.

Analisando o caso do etanol, podemos notar que os aspectos ambiental, econômico e energético estão fortemente conectados. Autores como Jeremy Rifkin [25,26] indicam que esses aspectos se configuram como crises, que não podem ser solucionadas separadamente, recebendo o nome de tripla armadilha. Diante desta complexa temática, foram desenvolvidos modelos geométricos [27,28] de forma a simplificar o entendimento da relação entre energia, ecologia e economia, de um forma sistêmica. Neste tese, os modelos puderam ser aplicados ao caso específico do etanol, que é uma fonte de energia extremamente importante para a economia do país.

No capítulo 2, realizamos uma ampla revisão bibliográfica a respeito da produção e do consumo de energia no Brasil e no mundo, a poluição atmosférica e suas consequências para o ambiente e para a saúde humana, o etanol combustível, relacionando os fatores ambientais, sociais e econômicos envolvidos em sua cadeia produtiva, além dos fundamentos teóricos técnicas utilizadas em nosso trabalho (Espectroscopia Fotoacústica e Sensores Eletroquímicos).

No capítulo 3, apresentamos o modelo de células triangulares sustentáveis, que relaciona de forma simples e sistêmica os conceitos de energia, ecologia e economia. Propusemos também uma aplicação deste modelo à proposta de

Chakravarty et al. [29], que propõe uma redução significativa das emissões de CO₂ até o ano de 2030.

No capítulo 4, apresentamos a metodologia para coleta e detecção de gases poluentes no escapamento de veículos de passeio e motocicletas, as montagens experimentais utilizadas (espectrômetros fotoacústicos) e o Analisador Eletroquímico TEMPEST 100.

No capítulo 5, apresentamos os resultados de emissão de poluentes como etileno (C₂H₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂) em veículos de passeio e motocicletas abastecidas com etanol e gasolina, discutindo os fatores relacionados à emissão desses poluentes nos veículos e motocicletas analisados. Por fim, no Capítulo 5 será apresentada a conclusão do estudo desenvolvido nesta tese.

1.2. Objetivos

O objetivo deste trabalho foi avaliar a utilização do etanol no transporte e suas implicações ambientais, apresentando as emissões de gases poluentes na exaustão de motocicletas e veículos de passeio, utilizando, para este fim, técnicas como a Espectroscopia Fotoacústica e Sensores Eletroquímicos.

Tambem foi objeto deste estudo a utilização de modelos geométricos simples para relacionar as crises ambientais, energética e econômica, através de uma visão sistêmica destas crises. Os modelos foram aplicados no estudo do uso do etanol no setor transporte onde fatores ambientais, sociais-econômicos e energeticos foram analisados.

CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Energia

A energia é um elemento presente no funcionamento de todos os sistemas vivos e não-vivos existentes no universo. Ela é fundamental para a realização de nossas atividades vitais, para o funcionamento dos aparelhos eletrodomésticos, para o transporte, iluminação e todos os serviços utilizados pela sociedade moderna.

A principal fonte de energia do planeta Terra é o sol. Direta ou indiretamente, é responsável pela maior parte do fornecimento de energia ao nosso planeta. A constante solar, grandeza que mede a quantidade de energia que chega, por unidade de tempo e por unidade de área, a uma superfície perpendicular aos raios solares, à distância média Terra-Sol, é de 1367 W/m^2 .

Parte da energia que chega à superfície da Terra é aproveitada pelos vegetais para realizar a fotossíntese. Nesse processo, os vegetais transformam a energia luminosa do sol em energia química. Os animais, ao se alimentar de plantas e de outros animais, absorvem parte dessa energia proveniente do sol. Como os combustíveis fósseis se originaram a partir da decomposição de matéria orgânica, sua energia também é de origem solar.

O sol também é responsável pelo ciclo hidrológico e pelo movimento das massas de ar atmosféricas (ventos), gerando duas importantes fontes de energia para o nosso planeta: a energia hidráulica e a energia eólica. Dentre as energias que não têm origem na energia solar, podemos citar a energia das marés, a energia geotérmica e a energia nuclear.

As fontes de energia podem ser divididas entre fontes renováveis e fontes não-renováveis. Uma fonte é considerada renovável se puder ser reabastecida num intervalo de tempo compatível com a escala de tempo humana. Entre as fontes renováveis de energia, podemos citar os alimentos que consumimos, a energia solar, hidráulica, eólica, os biocombustíveis, entre outros. Fontes de energia não-renováveis são aquelas, cuja formação é tão lenta ou existência tão

curta que, ao serem esgotadas, não poderão nos reabastecer num intervalo de tempo significativo para o ser humano. Entre elas, destacamos os combustíveis fósseis (que levam milhões de anos para serem formados) e os combustíveis nucleares.

É importante ressaltar que combustíveis renováveis não são necessariamente eternos. "Tanto os combustíveis fósseis como os biocombustíveis são quantitativamente não-renováveis quando queimados na quantidade excessiva exigida por nossa civilização superdimensionada e dependente de energia." [17]

2.1.1. Aspectos históricos

Num primeiro estágio da evolução humana, o homem era coletor. Extraía da natureza a quantidade de energia estritamente necessária para a sua sobrevivência, através da ingestão de sementes, frutos, folhas, raízes e pequenos animais. Seu consumo diário era de aproximadamente 2000 kcal.

O domínio do fogo garantiu ao homem, pela primeira vez, a possibilidade de controle sobre a geração de energia, diferenciando-o dos outros animais. O homem caçador tinha mais comida e passou a queimar madeira para cozinhar os seus alimentos. Ainda hoje, fora dos centros urbanos, grande parte da população pobre ainda usa o fogo proveniente da queima de madeira como principal recurso energético. [30]

A partir do advento da agricultura, que ocorreu há aproximadamente 11 mil anos atrás, o homem passou a programar a colheita dos alimentos e estocá-los por um tempo maior. Aliada a isso, a domesticação de animais e a atividade pecuária permitiram ao homem armazenar maior quantidade de energia. O homem passou, então, a utilizar diferentes fontes de energia, como o vento e a água. Desenvolveu também as chamadas máquinas simples, como alavancas, planos inclinados e roldanas. Como eram máquinas mecânicas, possuíam alta eficiência, com pequenas perdas, devido ao atrito. Paralelamente a esse desenvolvimento, o consumo de energia per capita também foi crescendo. Até

esse estágio, entretanto, o homem utilizava apenas fontes renováveis de energia (hidráulica, eólica, solar e biomassa). Em 1850, a biomassa representava 85% do consumo mundial de energia. [31]

O advento da máquina a vapor pelo engenheiro escocês James Watt no século XVIII provocou uma drástica mudança nesse cenário. Já em fins do século XVIII, o carvão, até então utilizado apenas no aquecimento residencial, passa a ter uma grande relevância. Em 1850, o carvão se torna responsável por 15% do consumo mundial de energia e, em fins do século XIX, o consumo de carvão alcança uma fatia de 50% do consumo energético do mundo. [31,32]

A partir da Revolução Industrial, o homem começa a substituir aceleradamente as fontes de energia renováveis pelas fontes fósseis. Primeiramente, o carvão e, posteriormente, o petróleo e o gás vão sendo incorporados na matriz energética mundial, possibilitando um aumento significativo na produção e o consumo de energia no planeta.

A utilização dos combustíveis fósseis no lugar da biomassa constituiu um avanço na época, uma vez que a utilização de biomassa tal qual era realizada, estava causando a destruição de florestas e a degradação do solo. A partir de então, a biomassa passou a ser utilizada preferencialmente nos países pobres e subdesenvolvidos. [32]

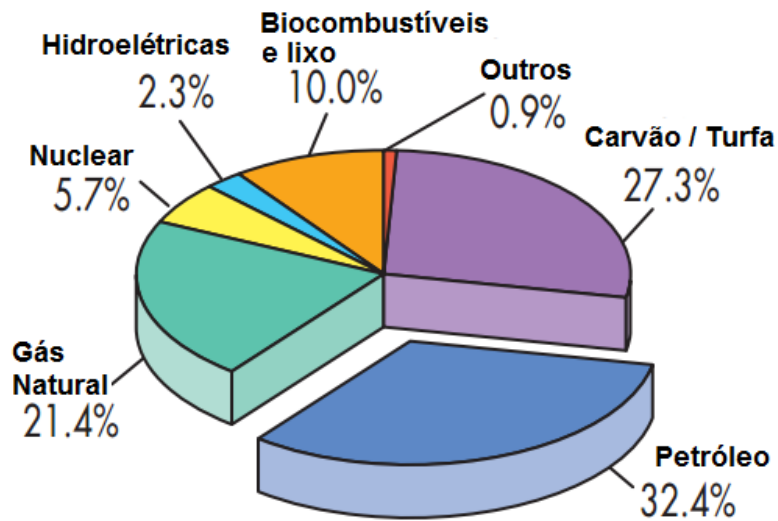
No entanto, ao iniciar um processo acelerado de queima de combustíveis fósseis, a Revolução Industrial acionou o gatilho para o explosivo aumento da concentração do dióxido de carbono no período pós-industrial. A Revolução Industrial expandiu-se pela Europa, Estados Unidos e também por antigas colônias, como o Brasil, que passaram a ver no industrialismo a superação de problemas econômicos e o alívio de suas tensões sociais, com mais empregos e melhores condições de vida.

O mundo tornou-se um grande mercado para a circulação dos produtos. O Capitalismo, já em fins do século XIX, se generalizou como um sistema dominante. A consequência desse processo foi uma pressão exagerada e nunca antes mensurada sobre o meio ambiente.

Recentemente, a biomassa reaparece no cenário mundial como uma possível alternativa aos combustíveis fósseis. Existem projeções de que a utilização da “biomassa moderna” cresça de maneira significativa no século XXI, podendo atingir 20% de toda a energia usada pela humanidade. O recente interesse na energia da biomassa está focado principalmente na utilização de combustíveis líquidos (etanol e biodiesel) no setor de transporte. [31]

2.1.2. Energia no mundo

O quadro mundial de produção de energia encontra-se na contramão da sustentabilidade do planeta, já que se concentra na utilização dos combustíveis fósseis, principais emissores de diversos poluentes atmosféricos, que prejudicam a biosfera e a saúde humana. Segundo a Agência Internacional de energia [33], os combustíveis fósseis ocupam uma fatia de mais de 80% da matriz global de energéticos primários, como podemos observar na figura 1. Notamos que o petróleo é o combustível hegemônico, respondendo por 32,4% da energia primária produzida no planeta. O carvão, apesar de ser o combustível fóssil que mais prejuízos causa ao ambiente, ocupa ainda uma posição de bastante relevância, correspondendo a 27,3% da matriz energética mundial. Em seguida, o gás natural é responsável por 21,4% da energia primária produzida no mundo. As hidrelétricas, a energia nuclear e os combustíveis renováveis ainda ocupam um espaço ínfimo na matriz energética mundial diante do seu potencial.



**Outros inclui energia geotérmica, solar, eólica, etc.*

Figura 1. Matriz Energética Mundial em 2010. [33]

Um outro fator relevante é que a demanda de energia não está distribuída de maneira uniforme pelo globo. A figura 2 refere-se ao consumo energético em diferentes regiões do globo. Podemos observar que os países mais ricos do mundo, que compoem a OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), são responsáveis por um consumo superior a 40% da demanda mundial de energia. A China, com um desenvolvimento acelerado, também possui um papel de destaque, sendo responsável por 19,1% da demanda energética global. Enquanto isso, os países pobres da América Latina e da África consomem apenas 4,6% e 5,4% da energia mundial, respectivamente.

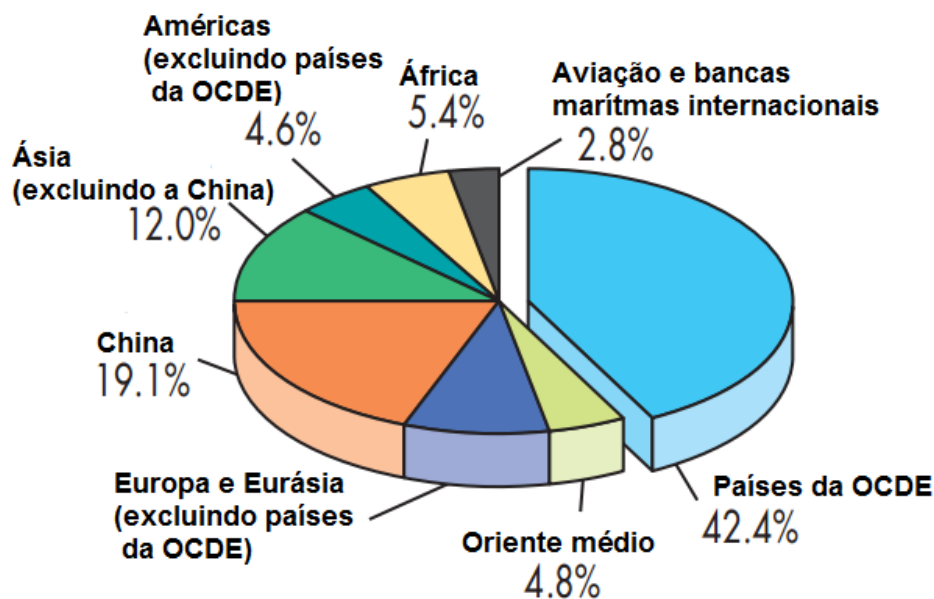


Figura 2. Consumo energético por região em 2010. [33] .

De acordo com outro relatório, o World Energy Assessment: Energy and The Challenge of Sustainability [2], os 20% mais ricos da população mundial consomem 55% da energia primária produzida no mundo, enquanto os 20% mais pobres, consomem apenas 5%. Segundo o mesmo relatório, não é possível prever um futuro sustentável com as políticas e as tendências de desenvolvimento vigentes.

Por consumirem mais energia, os países desenvolvidos possuem uma responsabilidade muito maior na emissão de poluentes atmosféricos que os países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento. Se analisarmos apenas a emissão do CO₂, o mais importante dos gases estufa, podemos perceber que os países que compõem a OCDE são responsáveis por 41% das emissões deste gás, enquanto os países da América Latina e da África unidos somam apenas 6,6% das emissões de CO₂, como podemos observar na figura 3. É notável também que a China, responsável por 19,1% da demanda energética mundial, responde por 24,1% da emissão mundial de CO₂, o que se justifica pela elevada utilização do carvão mineral por parte desse país.

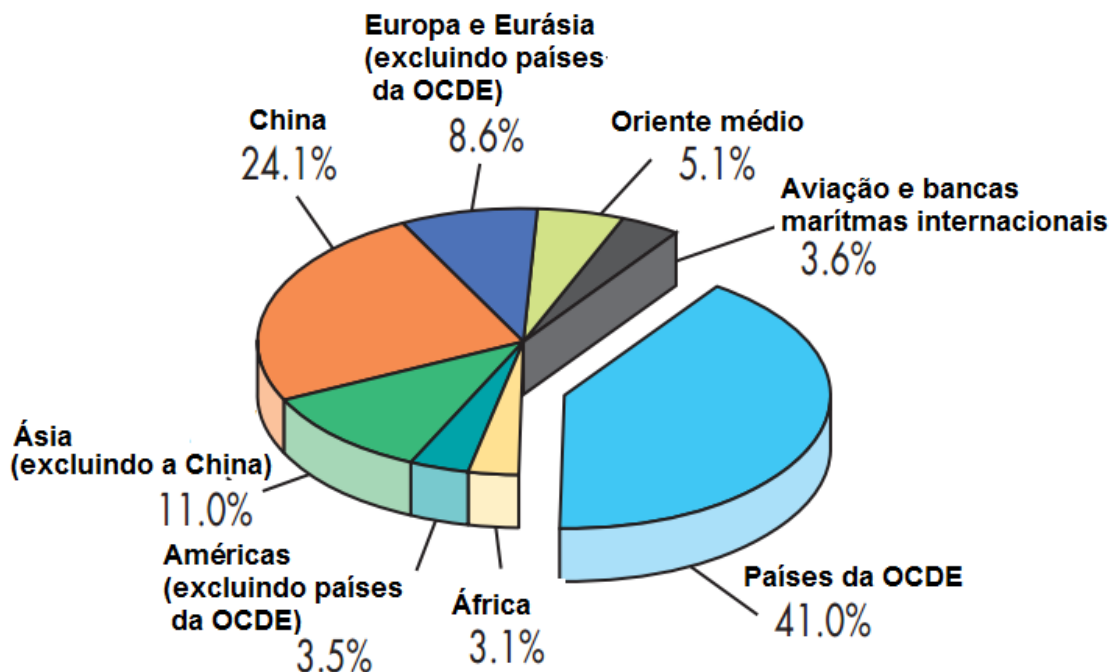


Figura 3. Emissão de CO₂ por região em 2010. [33]

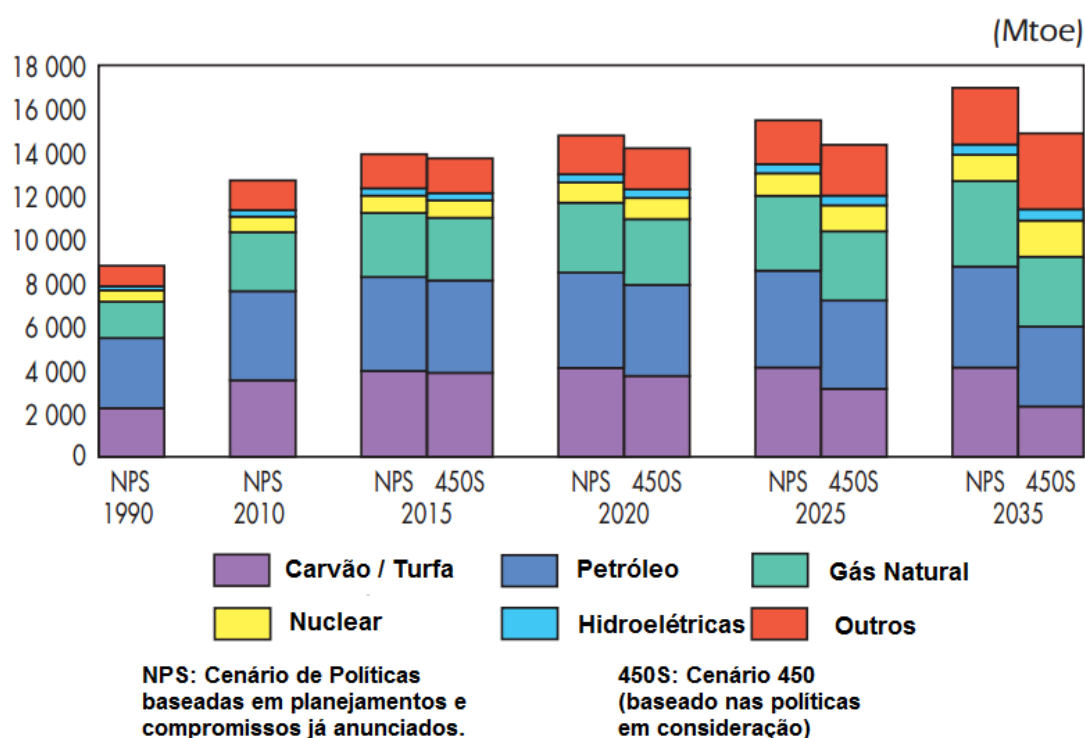
As figuras 2 e 3 refletem de forma clara a desigualdade no consumo energético mundial e indicam que a responsabilidade dos países ricos pelos problemas ambientais é muito maior que a dos países pobres. Aqueles devem ser, portanto, os primeiros a promover políticas eficientes que visem diversificar sua matriz energética e reduzir o consumo de seus habitantes. Ao invés disso, muitos países optam por medidas paliativas, como a compra de créditos de carbono, que transfere aos países em desenvolvimento a responsabilidade que lhes cabe em reduzir a emissão de poluentes.

O desequilíbrio no consumo energético e na emissão de poluentes atmosféricos nas regiões do globo nos sugere ainda que não é possível exigir de forma homogênea que todos os países reduzam seu consumo energético. Alguns países pobres, onde a subnutrição predomina e onde a luz elétrica é privilégio de poucos, merecem consumir mais energia para que a população tenha acesso a alguns direitos básicos. Em paralelo, países desenvolvidos precisam reduzir de forma drástica o seu consumo de energia. Dessa forma, podemos notar que a

questão não é apenas reduzir o consumo de energia globalmente, mas melhor distribuí-lo.

Podemos nos questionar: é possível melhorar a qualidade de vida de parcela da população, manter a qualidade de vida de quem já a possui, reduzindo o consumo energético? Neste modelo desenvolvimentista imposto pelo sistema econômico vigente talvez não seja possível. A política do aumento do consumo deve ser substituída por uma política de melhor distribuição de renda, geração de empregos, educação de qualidade e conscientização da população para um outro modelo possível.

A Agência Internacional de Energia [33] faz algumas projeções sobre como deve se comportar o consumo energético no mundo até o ano de 2030. (figura 4).



*Mtoe: Megatoneladas equivalentes de Petróleo

Figura 4. Produção de energia por fonte de 1990 a 2035 em dois cenários possíveis. [33]

A primeira projeção, identificada como NPS (*New Policies scenario* ou Cenário de Novas Políticas) considera a utilização de políticas já anunciadas nos

compromissos e planejamentos dos países. A projeção identificada como 450S (*450 Scenario ou Cenário 450*), está baseada em um quadro plausível de políticas climáticas que devem ser estabelecidas após 2012 para estabilizar a concentração de gases estufa em 450 ppmV de CO₂ equivalente.

No primeiro cenário (NPS), notamos que o consumo de carvão, petróleo e gás deve continuar aumentando até 2035. Os problemas ambientais decorrentes do consumo de combustíveis fósseis nesse cenário devem atingir proporções cada vez alarmantes, com resultados cada vez mais nocivos à população. Percebemos também que o consumo de energia hidráulica, nuclear e de outras fontes renováveis também deve crescer, mas este crescimento não ocorrerá no sentido de substituir as fontes fósseis, mas apenas de aumentar ainda mais o consumo energético global, gerando outros impactos característicos destas fontes de energia.

No segundo cenário (450S), as políticas adotadas com objetivo de limitar a emissão de gases estufa devem contribuir para uma redução gradual na utilização de carvão, mas o petróleo e o gás natural continuam ocupando um lugar de destaque na matriz energética mundial em 2035. Podemos observar ainda um crescimento significativo na utilização de energia nuclear e outras energias renováveis, embora a utilização de energia hidráulica cresça de maneira tímida.

No segundo cenário, portanto, apesar das vantagens que podem ser observadas com a adoção de políticas climáticas, percebemos que os combustíveis fósseis continuam predominando em 2035. Notavelmente, é um cenário bem mais promissor que o primeiro cenário, mas continua limitado pelas diretrizes do sistema econômico vigente. Não é possível afirmar, portanto, que as políticas sugeridas pelo Cenário 450S sejam suficientes para mitigar problemas ambientais, como o aquecimento global.

Diante dessas incertezas, o modelamento climático prevê a possibilidade de cenários catastróficos para o futuro do planeta. As geleiras estão previstas para desaparecer por volta do ano 2050 e a calota polar do Ártico deve se extinguir em 2070. A Corrente do Golfo poderá entrar em colapso por volta de 2100. O gelo da Groenlândia deve desaparecer por volta de 2300, causando um aumento de 7 m

nos nível do mar. As incertezas são elevadas, devido à complexidade dos fatores relacionados ao clima. [10]

Para impedir que tais cenários se tornem reais, a produção de energia no futuro deve ser baseada numa proposta mais diversificada e ousada do que aquela apresentada no Cenário 450S, incluindo maior participação da energia nuclear, solar, hidrogênio, eólica e biocombustíveis. Na utilização remanescente de combustíveis fósseis, deve-se buscar sequestrar carbono de modo mais eficiente. [34]

Acima de tudo, um cenário mais promissor seria aquele onde o consumo consciente de bens e de energia prevalecesse e onde houvesse uma melhor distribuição de energia entre as pessoas que vivem no mundo. Vale lembrar que todas as formas de energia produzem efeitos do ambiente e o conceito de energia completamente limpa ainda é utópico. Produzir e consumir mais energia fóssil ou renovável significa aumentar os problemas ambientais. Economizar energia é a forma mais racional de atuação para melhoria do meio ambiente. Podemos destacar aqui algumas possibilidades para economizar energia, como utilizar cada vez mais o transporte público em detrimento do transporte individual, reduzir o consumo de bens e embalagens (que requerem energia em sua produção), melhorar a eficiência dos equipamentos, melhorar a eficiência na produção de energia, buscando implantar processos de cogeração, entres outros. As soluções são diversificadas e requerem vontade política e conscientização da população.

2.1.3. Energia no Brasil

O Brasil é reconhecido internacionalmente por possuir uma matriz energética mais “limpa” e renovável. O Plano de Decenal de Energia (PDE 2019) analisa e faz projeções a respeito do consumo, produção e a comercialização de energia em âmbito nacional. A figura 5 apresenta a participação das diferentes fontes de energia na Oferta de Energia Interna do Brasil no ano de 2010.

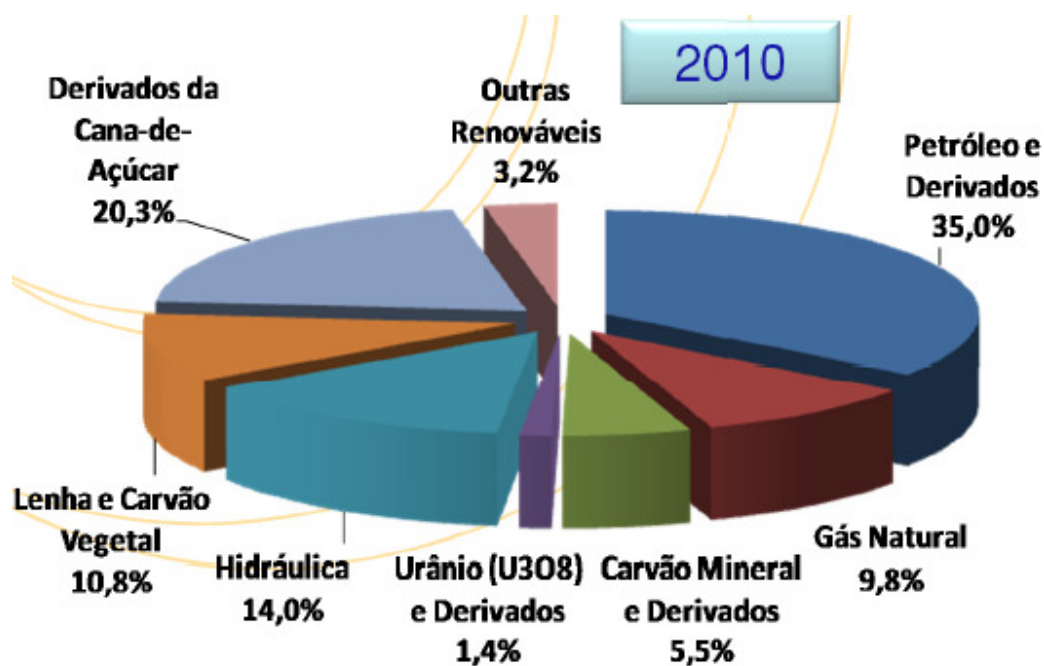


Figura 5. Oferta Interna de Energia no Brasil em 2010. [35]

A energia hidráulica é utilizada amplamente no Brasil para a produção de energia elétrica, respondendo por 14% da energia produzida em território brasileiro. No mundo, as hidrelétricas fornecem pouco mais de 2% da oferta energética. Outros combustíveis renováveis, como derivados da cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal ocupam uma fatia de 34,3% da oferta energética brasileira, contra o valor 10% de energia renovável produzida pelo mundo. Por esses fatores, nossa dependência de energia fóssil é bem menor do que a média mundial. Os combustíveis fósseis correspondem a pouco mais de 50% da oferta energética brasileira e a mais de 80% da oferta energética mundial.

Apesar de já possuir larga vantagem em relação aos demais países do mundo na produção de energia renovável e limpa, o potencial brasileiro não está esgotado. O Brasil possui ainda enorme potencial na produção de energias renováveis e limpas, devido à sua dimensão territorial (áreas agricultáveis), seu clima e disponibilidade de recursos hídricos.

Com base nos planejamentos do Plano Decenal de Energia, foi formulado um quadro com a participação de diferentes fontes de energia na oferta de energia

interna brasileira no ano de 2019 (Figura 6). A participação do petróleo, em termos relativos, deve ser reduzida. Em contrapartida, os demais combustíveis fósseis (carvão mineral e gás natural) devem aumentar sua participação na matriz energética brasileira, prejudicando seu caráter de sustentabilidade. A energia hidráulica diminui a sua participação percentual, enquanto a utilização de outras energias renováveis, derivados da cana-de-açúcar e energia nuclear se torna maior nesse período.

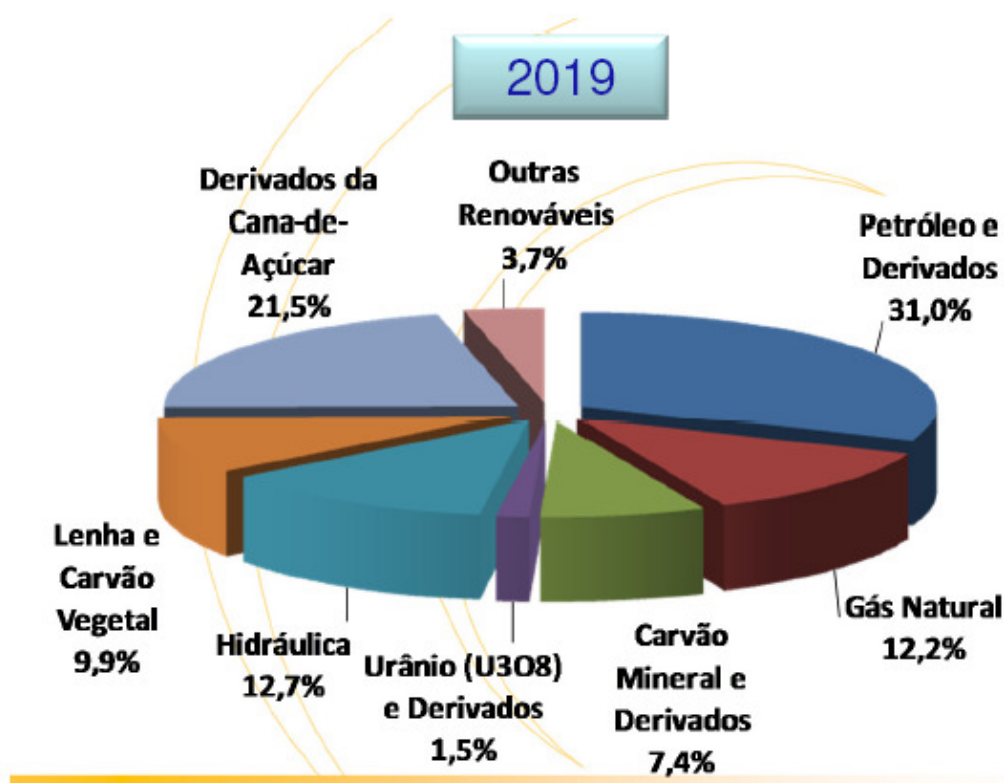


Figura 6. Planejamento da Oferta Interna de Energia no Brasil em 2019. [35]

Em termos absolutos, o PDE 2019 estabelece um aumento geral na utilização de diversas fontes energéticas. A utilização de hidrelétricas convencionais na geração de energia elétrica, por exemplo, tende a se expandir bastante no período de 2010 a 2019, resultando num acréscimo de potência instalada de 35.245 MW. [35]

Outras fontes renováveis de energia, como a biomassa, as pequenas centrais hidrelétricas (PCH) e a energia eólica também devem receber incentivos nesse período. A figura 7 se refere à expansão (controlada e planejada) na utilização de fontes renováveis de energia (excluindo as hidrelétricas convencionais). A utilização de energia de biomassa é que mais deve crescer nesse período, seguida pela energia eólica e pelas pequenas centrais hidrelétricas (PCH). No total, de acordo com o planejamento, o acréscimo de potência instalada proveniente dessas fontes de energia será de 14.655 MW em 2019.

Expansão Contratada + Planejada

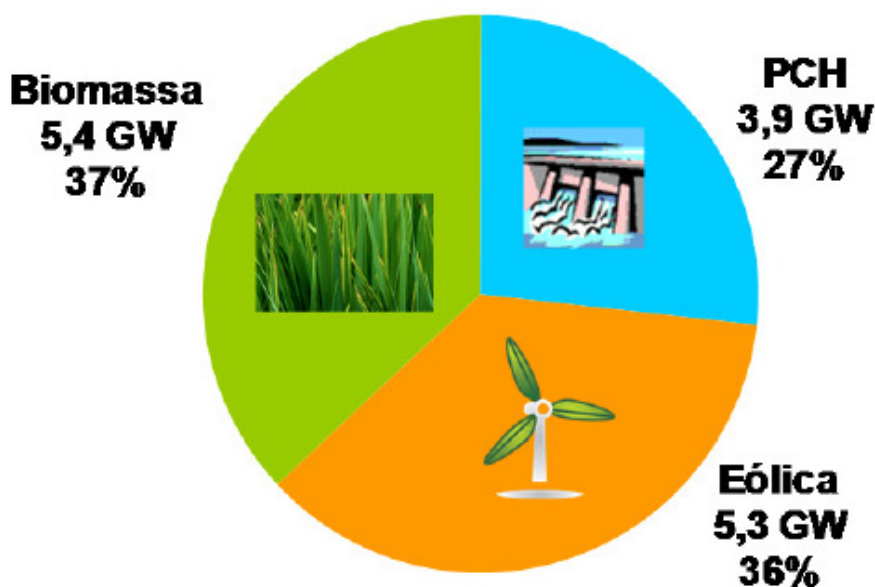


Figura 7. Expansão controlado e planejada de fontes de energia renováveis (excluindo as hidrelétricas convencionais) entre 2010 e 2019. [35]

Avaliando o crescimento na utilização de energias renováveis, podíamos esperar que a utilização de fontes fósseis fosse reduzida no Brasil durante este período. No entanto, planeja-se também uma expansão na utilização de termoelétricas fósseis, com um acréscimo de 12.175 MW de potência instalada até o ano de 2019.

Essa expansão do setor energético brasileiro deve levar a um acréscimo na emissão de poluentes atmosféricos, em especial, gases de efeito estufa. A figura 8

retrata o aumento de emissão de gases estufa em megatoneladas equivalentes de CO₂ durante o período considerado, destacando os setores responsáveis pelas emissões. Percebe-se que o setor de transportes, junto com o setor industrial, é responsável por um crescimento acentuado na emissão de gases estufa.

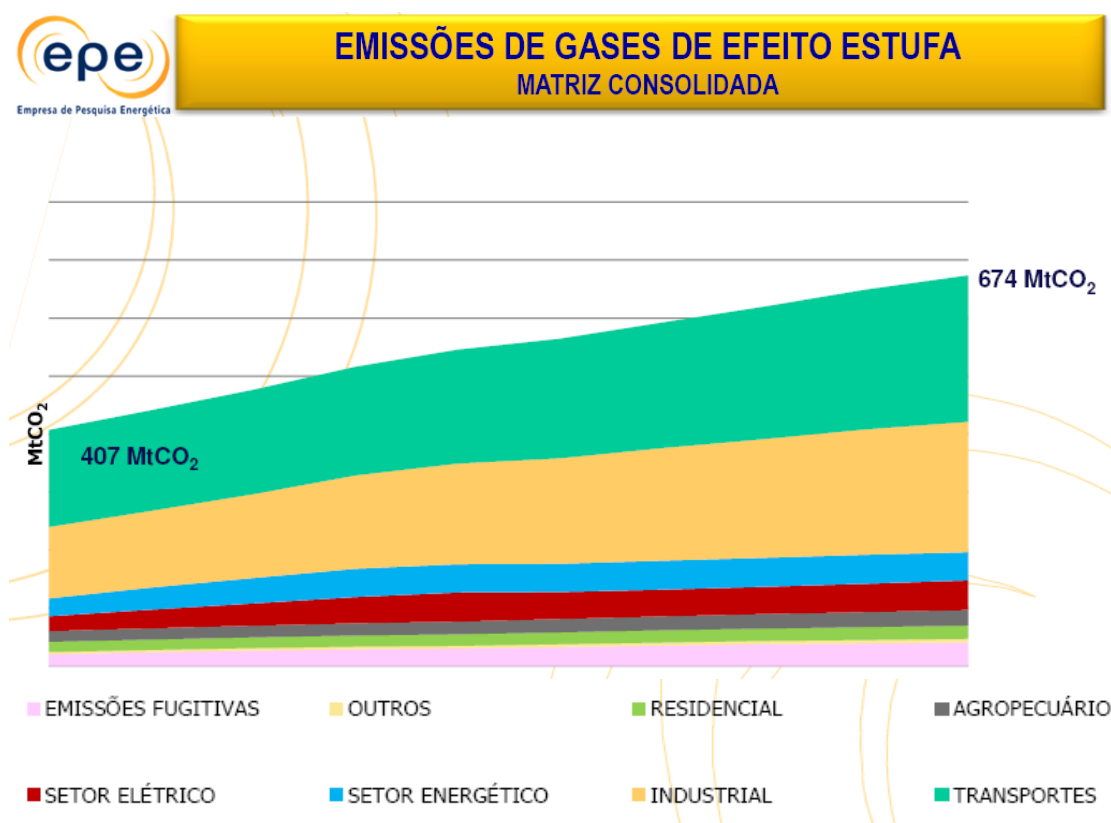


Figura 8. Matriz de emissão de gases estufa em megatoneladas de CO₂ por setor no período de 2010 a 2019. [35]

Como um país em desenvolvimento, é natural que o Brasil produza e consuma mais energia nos próximos anos, visto que, em determinadas regiões do país, muitas pessoas ainda estão privadas de luz elétrica. Devemos nos questionar, entretanto, se é realmente necessária a utilização de fontes fósseis na expansão energética brasileira e se esse aumento no consumo de energia previsto no PDE está realmente voltado para as classes mais pobres ou se permanecerá privilegiando aqueles que já consomem muita energia e querem consumir ainda mais. O aumento na emissão de gases estufa por parte do setor

de transportes sugere que parte da expansão energética prevista para o Brasil será utilizada pelas classes média e alta.

2.2. Poluição Atmosférica

A composição atual da atmosfera é resultado de mais de um bilhão de anos de trocas gasosas com os seres vivos que habitavam e habitam o planeta Terra. Os processos de respiração, fermentação, fotossíntese e decomposição, entre outros, característicos da vida que foi surgindo no planeta, possibilitaram uma composição atmosférica ideal para a manutenção da própria vida tal qual a conhecemos. Compreendemos, portanto, que a atmosfera possui uma relação intensamente dinâmica com a vida.

Os principais componentes da atmosfera são o nitrogênio diatômico (N_2), que representa cerca de 78% da composição atmosférica, o gás oxigênio (O_2), cuja concentração é de aproximadamente 21% e o argônio (Ar), com concentração próxima de 1%. Outros gases compõem a atmosfera em menores concentrações. [5]

O nitrogênio, cuja concentração excede à dos demais gases, é um gás de grande relevância, sendo um constituinte indispensável de todos os organismos vivos. O oxigênio, por sua vez, é de importância ímpar por possibilitar a respiração dos seres aeróbicos, como o homem. Outros gases em concentrações pequenas, como o dióxido de carbono, o metano e o óxido nitroso são importantes para a manutenção do clima planetário.

Essa composição peculiar permite que a atmosfera terrestre seja mantida fora do equilíbrio termodinâmico, já que nela ocorrem ininterruptos processos físico-químicos, relacionados a atividades biológicas. Essa situação não é observada, por exemplo, em Marte e Vênus, onde, na ausência de vida, a composição atmosférica não sofre alterações ao longo dos anos. [36]

Embora a atmosfera terrestre seja propícia para a vida humana, o homem, após as revoluções agrícola e industrial, tem modificado intensivamente a sua

composição, através de práticas como o uso da terra, atividades industriais e, recentemente, o transporte.

Segundo a resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº. 003/90) [37], entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- inconveniente ao bem-estar público;
- danoso aos materiais, à fauna e flora;
- prejudicial à segurança ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

A poluição do atmosférica pode se originar de fontes naturais ou antrópicas. Dentre as fontes naturais, destacamos os vulcões, as queimadas espontâneas, a decomposição anaeróbica de matéria orgânica e os processos de nitrificação e desnitrificação realizado por bactérias. Dentre as fontes antrópicas, podemos identificar as indústrias, os meios de transporte, o desmatamento e as queimadas, a aplicação de agrotóxicos, a queima e fermentação de resíduos, entre outros.

Diferente de outros tipos de poluição, a poluição atmosférica não pode ser facilmente controlada, como acontece com resíduos sólidos ou líquidos. Os poluentes atmosféricos, ao serem liberados, se diluem rapidamente no ar e podem ser levados por correntes de ventos em movimento incontroláveis, podendo tornar-se um problema de escala local, regional e global.

A tabela 1 [4] refere-se a alguns dos principais poluentes atmosféricos, suas origens e possíveis conseqüências para o homem e para o ambiente. Podemos notar que o setor de transporte, fortemente dependente de combustíveis fósseis, é responsável pela emissão de grande parte dos poluentes mencionados, contribuindo de maneira significativa para a ocorrência de variados problemas ambientais e prejudicando a saúde da população. Trataremos especificamente dos problemas ambientais mais adiante.

Tabela 1 - Principais poluentes atmosféricos suas origens e conseqüências. [4]

Poluentes	Origens	Consequências
Monóxido de Carbono	Veículos automotores Combustão incompleta do carvão e do petróleo	Associação à hemoglobina, asfixia Danos ao aparelho respiratório Corrosão do ferro, aço e mármore
Dióxido de enxofre	Queima de combustíveis fósseis e carvão Processos industriais	Danos às plantas Chuva ácida
Óxidos de nitrogênio	Veículos automotores Processos industriais Queima de combustíveis fósseis	Tóxicos ao homem: Irritação na mucosa, carcinogênicos Danos às plantas Chuva ácida Reagem com hidrocarbonetos, produzindo oxidantes fotoquímicos
Hidrocarbonetos	Veículos automotores Processos industriais Queima de combustíveis fósseis	Carcinogênicos Reagem com óxidos de nitrogênio, produzindo oxidantes fotoquímicos
Oxidantes fotoquímicos, principalmente o ozônio	Reação de óxidos de nitrogênio com hidrocarbonetos na presença da luz solar.	Irritação dos olhos e pulmões Danos às plantas Deteriorização da borracha e de produtos sintéticos
Material particulado	Veículos automotores Processos industriais Queima de combustíveis fósseis	Redução na visibilidade Sujeira de roupas, prédios, monumentos e paisagens Problemas respiratórios e cardiovasculares
Dióxido de carbono	Veículos automotores Queima de combustíveis fósseis Desmatamento e queima de biomassa	Efeito estufa
Gás sulfídrico	Decomposição anaeróbica Indústrias químicas	Odor desagradável
Clorofluorcarbonetos	Refrigeração Sprays	Destruição da camada de ozônio Câncer de pele e catarata

2.2.1. Aspectos históricos

As primeiras leis de qualidade do ar foram assinadas no século XIII, em 1273, pelo Rei Eduardo da Inglaterra, que proibia o uso do carvão em Londres durante as sessões do parlamento devido à fumaça e aos odores produzidos. Em 1300, o Rei Ricardo III fixou taxas para o uso do carvão. [4] Em 1661, o escritor inglês John Evelyn publicou um livro destacando os incômodos da fumaça do carvão, que atingia locais a quilômetros de distância da fonte de emissão. [38]

Nos séculos XVII e XVIII, surgiram os primeiros planos para transferir as indústrias de Londres. Os problemas continuaram crescendo até que em 1911, ano em que ocorreu o primeiro grande desastre decorrente de poluição atmosférica: mil cento e cinquenta mortes devido à fumaça produzida pelo carvão em Londres. [4]

O impacto dos combustíveis fósseis no clima foi reconhecido ainda no século XIX por Arrhenius em seu relato “On the influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature on the Ground”, onde ele identifica corretamente o dióxido de carbono e vapor de água como gases com efeito de estufa importantes nas alterações climáticas. [39]

Na década de sessenta, os cientistas mostraram que o enxofre emitido nas centrais elétricas a carvão estava causando acidificação do lagos escandinavos. Durante a década de 70, surgiram movimentos que passaram a se preocupar com questões ambientais como a poluição, a destruição de áreas naturais, o consumo de alimentos e energia, além da diversidade biótica. A década de 70 ficou conhecida como “década do ambiente” e o dia 22 de abril de 1970 como o primeiro “Dia da Terra”. [40]

Em 1972, ocorreu em Estocolmo a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, promovido pelas Organizações das Nações Unidas (ONU) com a participação de 114 países, trazendo os novos conceitos de desenvolvimento sustentável e de ecodesenvolvimento.

Nessa mesma década, constatou-se que a concentração de ozônio estratosférico, que nos protege da radiação ultravioleta, estava sendo reduzida de

maneira bastante significativa, em especial, na Antártida. Em 1974, os cientistas Paul Crutzen, F. Sherwood e Mario Molina alertaram para o fato de que o esgotamento do ozônio era provocado por produtos químicos, em especial, a emissão de gás clorofluorcarbono (CFC). Em 1987, foi assinado o Tratado de Montreal, no qual governantes de diferentes países concordavam em abandonar os produtos químicos nocivos à estratosfera. Esse protocolo tem um caráter especial, por ter sido o primeiro de abrangência mundial.

Em 1992, no Rio de Janeiro, 155 nações assinaram a Convenção das Nações Unidas para a Mudança Climática, que estabeleceu o ano 2000 como limite para os signatários reduzirem suas emissões no nível de 1990. Em 1997, os signatários chegaram a um novo entendimento sobre a redução das emissões, que ficou conhecido como Protocolo de Kyoto, que estabelecia limites para emissões de gases do efeito estufa para os países desenvolvidos e a possibilidade de comercialização dos chamados créditos de carbono. Somente em 2004, no entanto, um número suficiente de países, não incluindo Estados Unidos, assinaram o Protocolo, que pôde, enfim, entrar em vigor. [40]

Entre os anos de 2006 e 2007, dois documentos de grande importância ambiental foram publicados: o Relatório Stern [41] e o Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima [10]. Esses documentos fizeram parte da fase ascendente (2006-2007) de um mini-ciclo ambiental capitalista, que se estendeu de 2006 a 2009. Nessa fase ascendente, pela primeira vez na história, o sistema capitalista começa a internalizar os custos ambientais gerados pelo aquecimento global. [42,43]

No relatório apresentado pelo economista Nicolas Stern [41], a pedido do Governo Britânico, pode ser observada uma articulação profunda entre os conceitos de economia e ambiente. O relatório analisa vários cenários climáticos ocasionados pelo aquecimento global para diferentes níveis de emissão de gases estufa até o ano de 2050. Stern confronta os custos gerados pelos impactos ambientais e sociais num cenário em que as políticas de mitigação do aquecimento global sejam insuficientes com os custos gerados em um cenário de

investimentos planejados e financiados pelos países centrais para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e minimizar os impactos sociais e ambientais.

Para o primeiro cenário, Stern prevê que, até 2050, 20% do Produto Interno Bruto (PIB) mundial será utilizado para cobrir os custos gerados pelas mudanças climáticas. Por outro lado, no segundo cenário, os investimentos para redução da emissão de gases estufa contabilizarão apenas 1% do PIB mundial, o que evitaria uma grande recessão na economia mundial. [41]

No ano de 2007, os Relatórios divulgados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças do Clima alertaram para a gravidade dos problemas que iremos enfrentar se não reduzirmos de maneira drástica a emissão de gases estufa na atmosfera. [20] Os Relatórios não se referem apenas aos impactos ambientais gerados pelo Aquecimento Global, mas relaciona também os custos econômicos derivados da externalização dos custos ambientais.

Os Relatórios sugerem também algumas medidas que devem ser tomadas com objetivo de mitigar o fenômeno do aquecimento global. Dentre as medidas sugeridas, podemos citar a utilização de biocombustíveis no setor de transporte. Algumas medidas não tecnológicas, como mudanças no estilo de vida e no padrão de consumo, também são sugeridas. [10]

Após a crise econômica iniciada no final de 2007, o mini-ciclo ambiental capitalista entrou numa fase descendente (2008-2009). Nesse período, houve um grande retrocesso nas políticas de mitigação do aquecimento global. [41]

Em 2012, a Conferência de Mudanças Climáticas ocorrida em Doha prorrogou o Protocolo de Kyoto, com metas mais avançadas, mas com um número mais reduzido de participantes. A proposta é que haja uma redução de 18% da emissão de gases estufa entre 2013 e 2020 em relação aos níveis de 1990. No entanto, a ausência de países como os Estados Unidos impede que o Tratado seja mais bem sucedido na mitigação de gases estufa.

Limitar a emissão de gases estufa requer a regulamentação na emissão de uma série de setores industriais, incluindo o setor energético, as indústrias automobilística e aeronáutica, o setor de construção, a agricultura, entre outros. [3]

Não existe ainda nenhum sinal de retomada a curto prazo das políticas iniciadas na fase ascendente do mini-ciclo ambiental. [42,43]

2.2.2. Chuva ácida

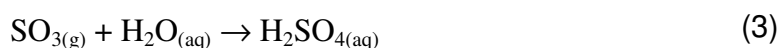
A acidez de um meio é determinada pelo equivalente da concentração de íons H^+ nesse meio, representada pelo pH (o logaritmo negativo na base 10 da concentração dos íons H^+). Quando o pH é menor que 7, dizemos que o meio é ácido, ou seja, com excesso de íons positivos. O pH igual a 7 é o indício de um meio neutro, enquanto o pH maior que 7 indica que o meio é básico, ou alcalino.

Normalmente, a chuva já é ligeiramente ácida (pH em torno de 5,6) devido à presença na atmosfera do dióxido de carbono que, ao reagir com a água, origina o ácido carbônico, conforme a seguinte reação:



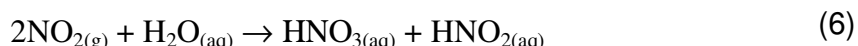
No entanto, do ponto de vista ambiental, a chuva só será considerada de fato ácida quando seu pH for inferior a 5. Isso ocorrerá quando estiverem presentes na atmosfera determinados gases que poderão acentuar a acidez produzida pelo ácido carbônico. [5]

Dentre esses gases, destacamos o dióxido de enxofre (SO_2) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), que, na presença da radiação solar, reagem com a água em suspensão, formando os ácidos sulfúrico (H_2SO_4), o ácido nítrico (HNO_3) e o ácido nitroso (HNO_2). O ácido sulfúrico é formado predominantemente a partir das reações:



A formação dos ácidos nitrogenados ocorre, na maior parte das vezes, a partir da interação inicial do nitrogênio com o oxigênio atmosférico, que forma o

óxido nítrico. Esse, por sua vez, pode reagir novamente com o oxigênio, gerando o dióxido de nitrogênio que, reagindo com a água, forma o ácido nítrico e o ácido nitroso. As reações descritas são mostradas abaixo.



Na Europa e no nordeste dos Estados Unidos foram registradas amostras de chuvas com valores de pH acentuadamente baixos, especialmente, nas áreas mais industrializadas. No Brasil, nas cidades de Niterói e do Rio de Janeiro foram encontrados valores de pH entre 4,3 e 5,3. No Rio Grande do Sul, na região metropolitana de Porto Alegre, os valores mínimos encontrados na água das chuvas ficaram em torno de 4,0. [44]

O dióxido de enxofre (SO_2) é emitido para a atmosfera principalmente pela queima de combustíveis fósseis para aquecimento e produção de energia, e por fontes industriais como fundição de minérios não-ferrosos, além de outros processos, tais como produção de ácido sulfúrico e de papel. Além disso, existem também fontes naturais, como erupções vulcânicas e oxidação de gases de enxofre produzidos por decomposição de plantas. [45]

Os óxidos de nitrogênio (NO_x) são emitido diretamente para a atmosfera por fontes antrópicas, tais como escapamentos de veículos, plantas geradoras de energia térmica, indústrias de fertilizantes, agricultura. Pode também ser gerado naturalmente, por relâmpagos, atividade vulcânica, queima de biomassa e atividade bacteriana. As emissões de NO_x no mundo são de 10 milhões de toneladas por ano, provenientes de fontes naturais e 40 milhões de toneladas por ano, de fontes antropogênicas oriundas principalmente dos processos de combustão, tais como as emissões automotivas. [46]

Como esses gases podem ser levados pelo vento a grandes distâncias, as chuvas ácidas poderão ocorrer em localidades distantes da fonte de emissão dos

gases. Tal característica faz com que a chuva ácida seja um problema regional de poluição, ultrapassando, muitas vezes, as fronteiras dos estados e nações.

Os gases NO_x e SO_2 podem acarretar danos e prejuízos ao ambiente e ao homem mediante dois mecanismos diferentes. No primeiro deles, denominado de deposição seca, os gases são depositados em sólidos ou líquidos antes mesmo de sofrerem oxidação no ar. Dessa forma, a oxidação e conversão para ácido ocorrem após a deposição. Esse mecanismo pode causar sérios danos à vegetação e a outras estruturas e monumentos arquitetônicos construídos pelo homem. [30]

A precipitação úmida, onde os gases sofrem reações em contato com a água da chuva antes mesmo da precipitação, é extremamente nociva ao solo que, se tornando muito ácido, reduz a capacidade de crescimento de algumas plantas de forma indireta, gerando a volatilização de compostos orgânicos nitrogenados, com prejuízos à vegetação e à agricultura. Além disso, a chuva ácida provoca a acidificação de lagos e rios, sendo extremamente nociva aos ecossistemas aquáticos.

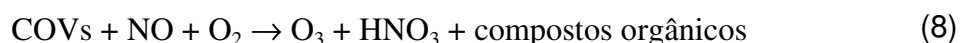
2.2.3. Smog fotoquímico

A palavra “smog” vem da combinação das palavras “smoke”, que significa fumaça e “fog”, cuja tradução é neblina. Sua ocorrência se deve a principalmente a uma concentração anômala do ozônio (O_3) na região atmosférica mais próxima da Terra, denominada de troposfera. Normalmente, o ozônio é encontrado na estratosfera, onde exerce importante papel ao filtrar a radiação ultravioleta. No entanto, a presença de diversos poluentes na atmosfera, tem induzido um grande número de reações químicas, que ocasionam a geração do ozônio em regiões inadequadas.

Os reagentes originais mais importantes nas ocorrências do smog fotoquímico são o óxido nítrico (NO) e os chamados Compostos Orgânicos Voláteis (COVs). O óxido nítrico é produzido a partir da combinação do nitrogênio diatômico e o oxigênio presentes no ar. Tal combinação ocorre quando estes

estiverem submetidos a elevadas temperaturas, o que ocorre, por exemplo, em reações de combustão. Os COVs são provenientes da queima incompleta nos motores de combustão interna e outras fontes. São substâncias que se vaporizam facilmente, como os hidrocarbonetos e seus derivados. Os COVs mais reativos no ar urbano são aqueles que têm uma ligação dupla entre dois carbonos, como é o caso do etileno (C₂H₄). [5]

Outro elemento indispensável na formação do ozônio troposférico é a luz solar, que propicia um aumento nas concentrações dos radicais livres, que participam das reações químicas que geram o smog. A reação da formação do ozônio na troposfera é a seguinte:



Nessa reação, destacamos o fato de que o NO e os COVs são emitidos diretamente no ar, sendo chamados de poluentes primários. O ozônio e o ácido nítrico (HNO₃), por sua vez, não são emitidos diretamente, mas são produtos da reação química, sendo chamados, portanto, de poluentes secundários.

A ocorrência de smog fotoquímico está bastante associada ao tráfego intenso de veículos comum nas grandes cidades, uma vez que a combustão veicular é a principal fonte de emissão dos compostos orgânicos voláteis, além de ocasionar a formação do óxido nítrico. Altas temperaturas e forte incidência de radiação solar também são fatores que facilitam a ocorrência das reações que promovem o smog fotoquímico. Lembramos ainda que, quando o movimento das massas de ar é relativamente pequeno, os poluentes não serão rapidamente espalhados e diluídos, o que também facilita a ocorrência do smog.

Algumas cidades, que apresentam muitos desses fatores, como Los Angeles, Denver, Tóquio, Atenas, São Paulo e Roma apresentam casos freqüentes de smog fotoquímico. [5]

O nível elevado de ozônio na troposfera durante a ocorrência do smog fotoquímico pode ocasionar graves conseqüências. Dentre elas, destacamos os danos causados à agricultura e a alguns materiais, como borracha e tecidos, além

dos sérios prejuízos acarretados à saúde humana. Diferentes estudos mostram que um aumento de apenas 10 ppbV na concentração de ozônio troposférico pode elevar as taxas de mortalidade humana em até 0,87%. [47] O ozônio também é um poderoso gás estufa. De acordo com o IPCC, o ozônio apresenta um forçamento radiativo de $0,35\text{W/m}^2$. [10]

Para reduzir a incidência do smog fotoquímico e a formação do ozônio na troposfera, torna-se necessário reduzir a concentração dos reagentes, como o NO e os compostos orgânicos voláteis.

2.2.4. Aquecimento Global

O fenômeno do aquecimento global tem recebido recentemente enorme destaque no cenário mundial devido aos significativos impactos que pode acarretar. Dentre esses, destacamos o aumento das temperaturas médias globais do ar e do oceano, a redução nas superfícies de gelo na Groenlândia e na Antártida, a ocorrência dos eventos climáticos extremos, como seca, precipitação forte, ondas de calor e ciclones tropicais mais intensos, extinção de espécies animais e vegetais. [10] Há previsões de que, o nível do mar seja elevado de maneira significativa devido ao derretimento das calotas polares [48]

Artigos recentes alertam que algumas dessas conseqüências são inevitáveis, dada a irreversibilidade do fenômeno e o elevado tempo de residência dos gases estufa na atmosfera. [49,50]

Além dos impactos ao meio ambiente, o aquecimento global poderá gerar sérios danos à saúde humana, ao alterar os padrões das doenças conhecidas, possibilitar a multiplicação dos vetores de certas doenças em muitas regiões, além de contribuir com a escassez de água e alimentos, o que, de maneira indireta, contribui com o aumento de doenças.

O Grupo de Trabalho I do Quarto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC, 2007), órgão vinculado à Organização das Nações Unidas (ONU), analisa os fatores naturais e humanos causadores da mudança do clima [10]. Segundo o Sumário para os Formuladores

de Políticas: a Base das Ciências Físicas, o aquecimento do sistema climático é inequívoco e é *muito provável* que a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais se deva ao aumento observado nas concentrações antrópicas de gases estufa. É necessário, portanto, compreender os mecanismos físicos envolvidos nesse processo.

Sobre o planeta Terra incide radiação solar, que aquece a sua atmosfera, geosfera e hidrosfera, sendo, dessa forma, responsável pelo ciclo hidrológico e pela manutenção da vida existente (biosfera). A quantidade máxima de radiação solar incidente sobre a Terra se situa numa faixa de comprimento de onda entre $0,15\ \mu\text{m}$ a $3\ \mu\text{m}$. Essa faixa compreende a radiação ultravioleta ($0,15\ \mu\text{m}$ a $0,4\ \mu\text{m}$), a radiação visível ($0,4\ \mu\text{m}$ a $0,7\ \mu\text{m}$) e a radiação Infravermelha ($0,7\ \mu\text{m}$ a $3\ \mu\text{m}$). Da luz incidente total, 20% é absorvida por gases estratosféricos, 30% refletida de volta para o espaço e apenas 50% alcança a superfície da Terra, grande parte formada pela luz visível. A Terra absorve a maior parte da radiação solar que incide sobre sua superfície e, a seguir, reemite a energia absorvida na faixa de comprimentos de onda do infravermelho ($4\ \mu\text{m}$ a $50\ \mu\text{m}$). [5]

Todas as moléculas possuem uma energia associada a seu movimento interno de vibração e rotação. Quando a frequência da radiação incidente coincide com o frequência natural do movimento dessas moléculas, elas irão absorver tal radiação, amplificando seu movimento e liberando, posteriormente, a energia absorvida. Os chamados gases estufa são constituídos de moléculas, cujo espectro de absorção se encontra inserido na faixa da radiação infravermelha emitida pela Terra. Dessa forma, tais moléculas irão absorver a radiação proveniente da Terra e, em seguida, reemiti-la em todas as direções, fazendo com que parte da radiação que escaparia de volta para o espaço fique retida na Terra. Isso resultará num aquecimento adicional da atmosfera e da superfície terrestre.

Os principais gases indutores do efeito estufa são a água, o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). O CO_2 absorve radiação com comprimento de onda em torno de $15\ \mu\text{m}$, enquanto o metano absorve na faixa de $7,7\ \mu\text{m}$ e o óxido nitroso, na faixa de $8,6\ \mu\text{m}$, todos na região do infravermelho emitida pela Terra. [5]

O efeito estufa natural é de extrema importância, pois mantém a temperatura média do planeta em torno dos 14,5°C. Não fosse a presença dos gases estufa, a Terra apresentaria uma temperatura em torno de 30°C menor, o que inviabilizaria a vida no planeta. [51] O homem, no entanto, principalmente após a Revolução Industrial, devido ao uso incontrolável de combustíveis fósseis, tem acrescentado na atmosfera toneladas e mais toneladas de gases geradores do efeito estufa, alterando, dessa forma, a estabilidade da constituição atmosférica e retendo mais calor no planeta. (Figura 9)

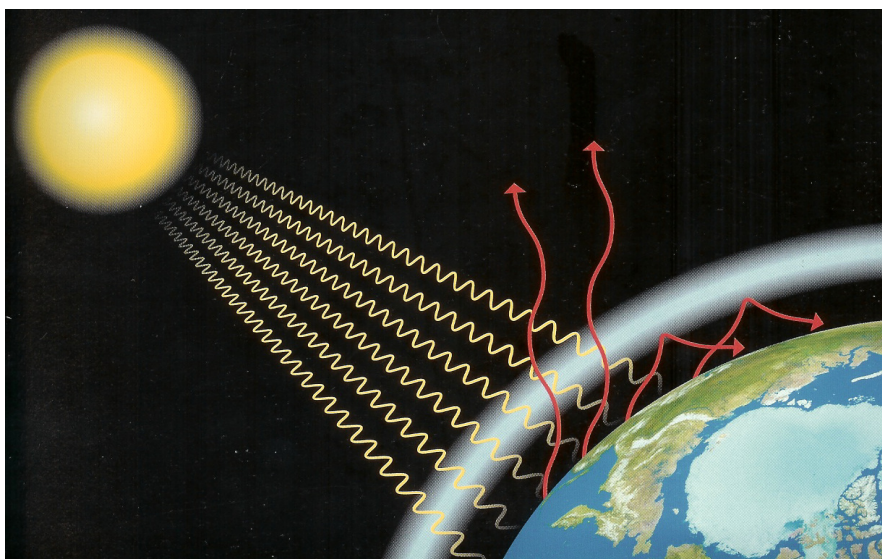


Figura 9. Efeito Estufa: uma camada de gases que se comporta como um cobertor para nosso planeta. [52]

A primeira parte do Quarto Relatório de Avaliação do IPCC divulgado em fevereiro de 2007 apresenta a concentração de gases estufa (CO_2 , metano e óxido nítrico) ao longo dos últimos 10.000 anos (Figura 10). As medidas foram feitas a partir da análise das bolhas de ar aprisionadas nos mantos de gelo de Antártida e da Groenlândia. Torna-se evidente que nos dois últimos séculos (especialmente no século XX), o aumento na concentração desses gases se deu de forma significativa.

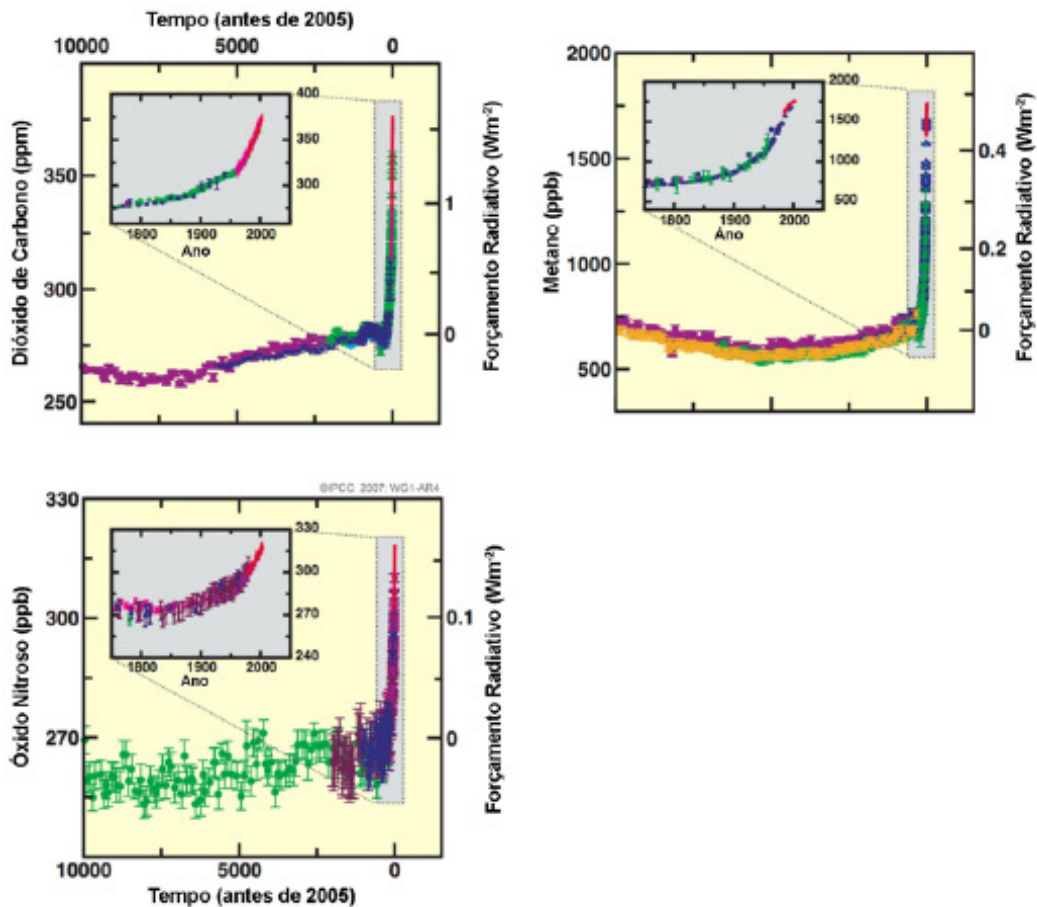


Figura 10. Concentrações atmosféricas de dióxido de carbono, metano e óxido nítrico ao longo dos últimos 10.000 anos (painéis grandes) e desde 1750 (painéis inseridos), obtidas a partir de testemunhos de gelo (símbolos com diferentes cores para os diferentes estudos) e amostras atmosféricas (linhas vermelhas). [10]

A figura 11 apresenta o registro das mudanças na temperatura média da Terra, do nível do mar e na cobertura de neve do Hemisfério Norte entre os anos de 1850 e 2007, tomando como referência o ano de 1961. Podemos observar um aumento na temperatura média global e no nível do mar, paralelamente a uma redução na cobertura do gelo. Isso se deu no mesmo período em que houve o aumento da concentração dos gases estufa, o indica uma forte relação entre esses fatores.

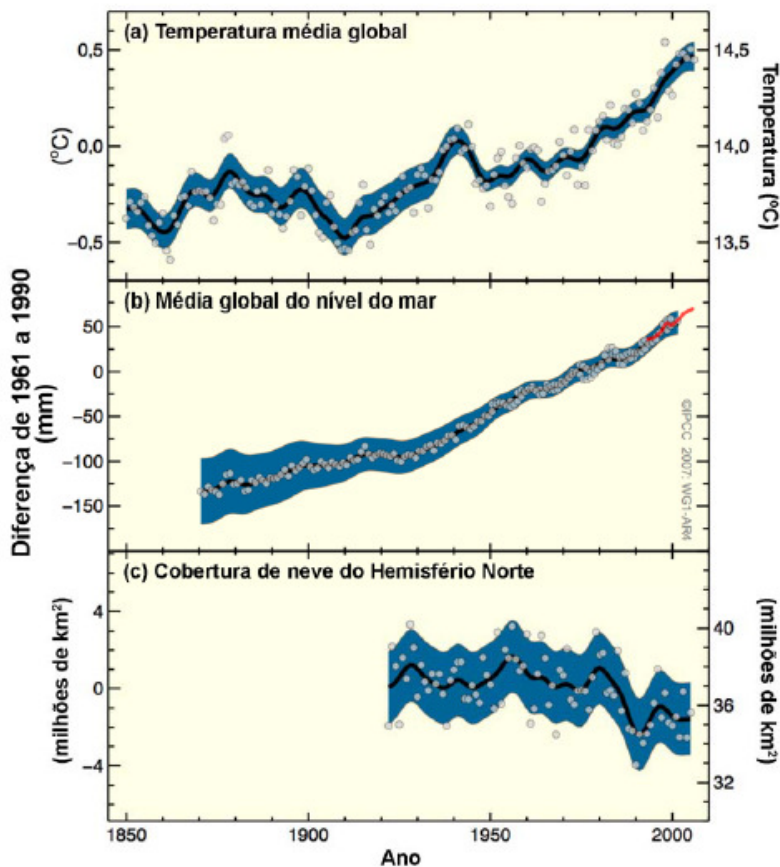


Figura 11. Mudanças observadas na (a) temperatura média global da superfície; (b) média global da elevação do nível do mar a partir de dados de marégrafo (azul) e satélite (vermelho) e (c) cobertura de neve do Hemisfério Norte para março-abril. [10]

O Relatório também apresenta um quadro com os principais componentes que produzem um forçamento radioativo, definido como a perturbação do balanço de energia do sistema Terra-atmosfera medido em watts por metro quadrado. O forçamento radiativo positivo produz um efeito de aquecimento, enquanto o forçamento negativo produz um efeito de resfriamento. Observamos na Figura 12 que, ao somar os forçamentos radioativos positivos e negativos, obtemos um saldo positivo de $1,6\text{W/m}^2$, o que nos indica que a Terra está de fato aquecendo, devido a um acréscimo de $1,6\text{J}$ de energia por segundo em cada metro quadrado de sua superfície. Nota-se que os principais gases indutores do efeito estufa são o gás carbônico (CO_2), o metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o ozônio troposférico (O_3).

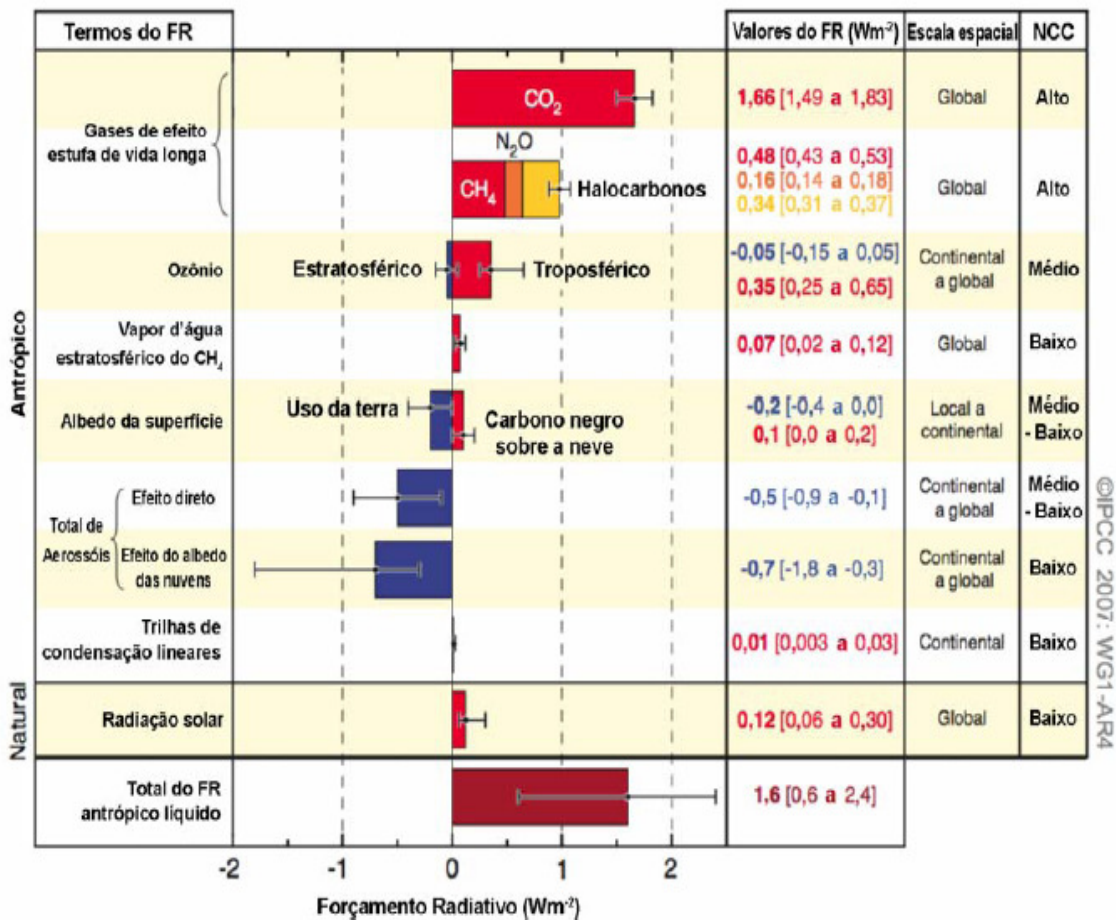


Figura 12. Estimativas da média global do forçamento radiativo (FR) e faixas em 2005 para o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) antrópicos e outros agentes e mecanismos importantes, juntamente com a extensão geográfica típica do forçamento e o nível de compreensão científica (NCC) avaliado. [10]

Entre os gases geradores do efeito estufa, o dióxido de carbono (CO₂) é o mais abundante. A maior contribuição antrópica na emissão de gás carbônico é proveniente da queima de combustíveis fósseis (como o carvão, o petróleo e o gás natural para a geração de energia elétrica e automotiva). Uma vez que os combustíveis fósseis foram formados a partir da decomposição e compactação de matéria orgânica ao longo de milhões de anos, sua queima resulta num acréscimo de carbono há muito tempo enterrado e ausente do ciclo do carbono.

A concentração atmosférica global de dióxido de carbono aumentou de um valor pré-industrial de cerca de 280 ppmV para 379 ppmV em 2005, como nos mostra a figura 10 (desde o início das medições diretas contínuas). A taxa de

aumento da concentração anual de dióxido de carbono foi mais elevada durante os últimos 10 anos (média de 1960 a 2005: 1,4 ppmV por ano). [10].

Em maio deste ano, o NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) mediu a concentração de CO₂ nas proximidades do vulcão Mauna Loa, no Havá e encontrou valores de emissão iguais a 400 ppmV. [53]

Como a molécula de CO₂ não se decompõe química ou fotoquimicamente, não é fácil determinar seu tempo de vida na atmosfera. Em média, após alguns anos de sua emissão no ar, uma molécula de CO₂ se dissolverá na superfície da água ou será absorvida, tornando-se parte de uma planta em crescimento. O problema é que esse sumidouro de carbono é apenas temporário, já que, alguns anos mais tarde, parte dessas moléculas são liberadas de volta ao ar. O sumidouro permanente para a deposição do dióxido de carbono são as águas profundas do oceano ou a sua precipitação na forma de carbonato de cálcio insolúvel. [5]

O metano (CH₄) é 21 vezes mais efetivo que o CO₂ em causar aquecimento global. Pela Figura 3, podemos notar que o metano também sofreu um aumento expressivo desde a época pré-industrial, já que sua concentração de 715 ppbV aumentou para 1732 ppbV. Segundo o relatório do IPCC, é *muito provável* que esse aumento se deva às atividades antrópicas, como a agricultura e o uso de combustíveis fósseis. [10]

O metano é produzido durante a decomposição anaeróbia de matéria orgânica, o que ocorre em larga escala em pântanos, brejos e terrenos úmidos de cultivo de arroz. Esse tipo de decomposição também é bastante comum nos aterros sanitários, que constituem importante fonte de emissão desse gás. Alguns animais, ao digerirem a celulose de seus alimentos, produzem grandes quantidades de metano como subproduto. O metano também é liberado no ar durante a mineração, processamento e distribuição de combustíveis fósseis. Em relação ao CO₂, possui um tempo de vida curto na atmosfera, entre 10 e 15 anos.

Outro importante gás estufa é o ozônio (O₃), gás incolor que se encontra em duas camadas distintas da atmosfera. Na estratosfera, o ozônio é formado pela fotólise do O₂ e tem a função de proteger a vida sobre a terra através da

absorção da radiação ultravioleta do sol. Na troposfera, o ozônio é formado antropicamente através de uma série complexa de reações envolvendo compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio, em presença de luz solar. [54] O ozônio na estratosfera apresenta forçamento radiativo negativo, enquanto o ozônio troposférico apresenta forçamento radiativo positivo, contribuindo, desta forma, para o fenômeno do aquecimento global. [10]

Por fim, destacamos o gás estufa óxido nitroso (N_2O), gás oriundo de processos de desnitrificação biológica em ambientes ricos em oxigênio e de nitrificação biológica em ambientes anaeróbios. O seu estudo é de incontestável relevância, para o entendimento do ciclo do nitrogênio. [55]

O óxido nitroso, também conhecido como gás hilariante, causa um efeito de aquecimento 310 vezes maior que o dióxido de carbono. Segundo o IPCC, sua concentração sofreu um aumento de um valor pré-industrial de 270 ppbV para 319 ppbV em 2005, o que simboliza um aumento superior a 18%. O aumento de sua concentração a partir da era pré-industrial contribui para um forçamento radioativo de $0,16 \pm 0,02$ W. [10]

Estima-se que as atividades antropogênicas sejam responsáveis por um total de 40% da emissão total de N_2O . Dentre essas atividades, destaca-se o manejo de solos para a agricultura, com a utilização freqüente de fertilizantes a base de amônia e nitrato, a pecuária, devido à nitrificação e destrinificação do nitrogênio presente nos resíduos de origem animal (estrume e urina), queima de combustíveis fósseis em fontes estacionárias e móveis, produção industrial dos ácidos adípico e nítrico, além das emissões provenientes de processos de tratamento de água residual. A agricultura é a principal atividade humana que contribui para a emissão de N_2O , sendo responsável por um total de 84% das emissões de óxido nitroso dentre as fontes antrópicas. [56]

Crutzen et al. [57] adverte que a produção de biocombustíveis para mitigar a emissão de CO_2 , pode, em contrapartida, acarretar um aumento na emissão de N_2O , podendo gerar, em determinadas situações, um efeito contrário ao esperado. Dessa forma, coloca-se em cheque algumas das vantagens ambientais relacionadas aos biocombustíveis.

Estudos destacam que outros gases podem contribuir indiretamente para o aquecimento global, como o CO, que interfere na produção do gases estufa metano [58] e ozônio troposférico [59].

2.2.5. Poluição e Saúde

A maioria das doenças associadas à poluição atmosférica são respiratórias e cardiovasculares. Alguns estudos na cidade de São Paulo demonstraram uma associação entre os problemas respiratórios e a presença de poluentes, como material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono e ozônio. Outros problemas cardiovasculares, como esquemias e acidentes vasculares cerebrais também estão associados à poluição do ar. [60]

O ozônio (O₃) tem recebido uma grande atenção nos meios científicos, por prejudicar gravemente as funções respiratórias. O ozônio troposférico pode irritar os pulmões e causar inflamações nas mucosas. Outros sintomas incluem tosse, respiração dolorosa e dificuldades da prática de exercício ao ar livre. Exposições repetidas ao ozônio por vários meses podem causar lesões pulmonares permanentes. Mesmo em baixas concentrações, este poluente pode causar agravamento de asma, redução da função respiratória e aumento da susceptibilidade a doenças respiratórias, tal como a pneumonia e bronquite. [61]

O dióxido de enxofre (SO₂) é um gás irritante, fortemente hidrofílico, muito solúvel na mucosa nasal e no trato respiratório superior. Os principais efeitos sobre a saúde, associados com a exposição a altas concentrações deste gás, incluem doenças respiratórias, alterações nas defesas pulmonares causando bronquite, enfisema, e o agravamento de doenças cardiovasculares. [62]

O dióxido de nitrogênio (NO₂) é um gás muito tóxico. A pessoa atingida sente imediatamente ardência nos olhos, no nariz e nas mucosas em geral. O NO₂ reage com todas as partes do corpo expostas ao ar, pele e mucosas provocando lesões celulares. Os epitélios (revestimentos celulares) que mais sofrem são aqueles das vias respiratórias, ocorrendo degenerações celulares e inflamações no sistema respiratório, desde o nariz até a profundidade dos alvéolos

pulmonares. [44] Além disso, pode ser transformado nos pulmões em nitrosaminas, conhecidas como potencialmente carcinogênicas. [63]

O monóxido de carbono (CO), gás incolor e inodoro, tem uma grande afinidade com a hemoglobina sangüínea. Dessa forma, quando se liga a ela, o CO impede o transporte do oxigênio, que é responsável por fornecer energia as nossas células. Se aproximadamente 2% da hemoglobina estiver ligada ao CO, a atividade normal da pessoa fica debilitada. Se esse percentual estiver entre 10 e 20% pode causar a morte do indivíduo. [64] Uma exposição prolongada ao CO, mesmo em baixas concentrações, pode ocasionar efeitos tóxicos cumulativos como insônia, cefaléia, fadiga, diminuição da capacidade física, tonturas, vertigens, náuseas, vômitos, distúrbios visuais, alterações auditivas, doenças respiratórias, anorexia, síndrome de Parkinson, isquemia cardíaca, cardiopatias e arteriosclerose. [65]

2.3. Etanol Combustível

O etanol, também conhecido como álcool etílico, é um composto orgânico, de fórmula estrutural $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$. O etanol pode ser produzido a partir de fontes fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral), sendo conhecido como etanol sintético ou a partir da fermentação de açúcares encontrados em produtos vegetais (cereais, beterraba, cana-de-açúcar), sendo conhecido como etanol agrícola. O etanol também pode ser produzido através da hidrólise de materiais lignocelulósicos presentes, por exemplo, no bagaço e na palha da cana-de-açúcar e na madeira. Neste trabalho, trataremos mais especificamente do etanol agrícola produzido a partir da fermentação da cana-de-açúcar.

O etanol é uma molécula simples, de fácil obtenção e baixo peso molecular. À temperatura ambiente, o etanol apresenta-se no estado líquido. É um composto incolor, inflamável, com odor característico e pH neutro. É um solvente fortemente polar devido ao radical hidroxila (HO^-) e por isso tem grande afinidade com a água, numerosas substâncias de estrutura polar, compostos orgânicos e inorgânicos,

dissolvendo também essências, hidrocarbonetos e graxas. Suas reações características são a desidratação, desidrogenação, oxidação e esterificação. [66]
Na tabela 2, estão descritas algumas propriedades físicas do álcool etílico.

Tabela 2. Propriedades físicas do álcool etílico. [65]

<i>Propriedade</i>	<i>Valor</i>
ponto de congelamento, °C	-114,1
ponto de ebulição, °C	78,3
temperatura crítica, °C	243,1
pressão crítica, Kpa	6383,5
calor de fusão, J/g	104,6
calor de vaporização no ponto de ebulição, J/g	839,3
calor de combustão a 25°C, J/g	29676,7
limite de inflamabilidade no ar:	
inferior, vol. %	4,3
superior, vol. %	19,0
temperatura de autoignição, °C	793
ponto de fulgor (vaso fechado), °C	14
calor específico do líquido a 20°C , J/g. °C	2,42
solubilidade em água	miscível
densidade a 20°C, g/cm ³	0,789
viscosidade do líquido a 20°C, cP	1,17
constante dielétrica a 20°C	25,7

O etanol não é muito tóxico, de tal forma que em um ambiente apropriadamente ventilado, a probabilidade de intoxicação por inalação é baixa. A quantidade mínima detectada pelo odor é referida como sendo de 350 ppm. Exposições a concentrações de 5000 a 10000 ppm resultam em irritação dos olhos e das membranas e mucosas do trato respiratório superior. O etanol não tem efeito cumulativo no corpo, já que é completamente oxidado, dando origem à CO₂ e água em um breve intervalo de tempo. [66]

Uma das aplicações do etanol é servir de matéria-prima para a produção de diversos produtos químicos, como o eteno (matéria-prima para resinas), o acetato, o cloreto de etila, o éter dietílico, o ácido acético, o butanol, a acetona, o polibutadieno e o 2-etil-hexanol. Além disso, o etanol pode atuar como solvente na produção de produtos farmacêuticos e perfumes, na fabricação de bebidas, dentre outras inúmeras aplicações. [67]

O etanol também pode ser utilizado como agente transesterificante no processo de produção de biodiesel, combustível renovável com potencial de

substituir o diesel (combustível fóssil) nos veículos pesados. Na reação de transesterificação, um triglicerídeo reage com um álcool na presença de um catalisador para formar uma mistura de ésteres de ácidos graxos e glicerol. Para uma transesterificação estequiometricamente completa, uma proporção molar 3:1 de álcool por triglicerídeo é necessária. O processo reacional ocorre preferencialmente com álcoois de baixa massa molecular, como o metanol e o etanol. O metanol é mais usado, devido ao seu baixo custo na maioria dos países e às suas vantagens físicas e químicas (polaridade, cadeia). Contudo, o etanol está se tornando mais popular, pois ele é renovável e muito menos tóxico que o metanol. [67]

De todas as aplicações do etanol na atualidade, a que tem recebido maior destaque é a sua aplicação como combustível líquido para veículos de passeio, substituindo por completo a gasolina (etanol hidratado) ou sendo adicionado a ela (etanol anidro). Desde a década de 1980, a maior parte da produção mundial de etanol tem se direcionado para etanol combustível. [67]

O etanol hidratado é uma mistura hidroalcoólica (álcool e água), com massa específica entre 799,8 e 802,7 kg/m³ e teor alcoólico entre 97,1 a 97,8 % em volume. [68] O etanol hidratado pode ser utilizado isoladamente nos veículos movidos a álcool ou em diferentes porcentagens com a gasolina nos veículos flex (flexible fuels).

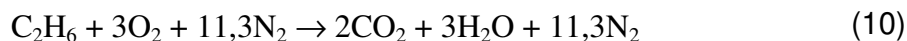
O etanol anidro possui teor alcoólico acima de 99,0% em volume. Ele pode ser utilizado como insumo na fabricação de aditivo à gasolina. No Brasil, é obrigatória a adição de de 22% de etanol anidro à gasolina, de acordo com a Lei Federal nº 10.203, de 2001. Recentemente, uma nova Resolução aprovou uma redução nesse percentual obrigatório para 20% de adição de etanol anidro combustível à gasolina. [69]

Existem inúmeros motivos por trás do apoio à crescente utilização do etanol no setor de transporte. Em primeiro lugar, destacamos as preocupações sobre o abastecimento de energia no futuro, em virtude da disponibilidade finita de petróleo, os sucessivos aumentos no preço deste combustível e a dependência do fornecimento de poucos países. Em segundo lugar, as preocupações ambientais e

a urgente necessidade de descarbonização da matriz energética mundial. Por fim, o etanol promete o desenvolvimento de novos mercados para produtos agrícolas, gerando cenários promissores para a agroindústria. [70]

O etanol combustível possui diversas características vantajosas em relação à tradicional gasolina utilizada nos veículos de passeio. Entre suas vantagens, destaca-se o fato de ser um combustível renovável e de reduzir de maneira considerável a emissão de CO₂. Essa redução se deve ao fato de que, durante o crescimento da matéria-prima do etanol (por exemplo, a cana-de-açúcar), o CO₂ que será emitido no processo de combustão do motor, é sequestrado do ar, através do processo de fotossíntese. Isso propicia ao etanol grande vantagem em relação à gasolina. Segundo Macedo [71], as emissões evitadas com o uso de etanol como combustível correspondem a: 2,82 kg CO₂/litro de etanol anidro e 1,97 kg CO₂/litro de etanol hidratado.

A combustão completa do etanol, desconsiderando a fração de água presente no álcool hidratado, pode ser representada pela relação:



O etanol apresenta excelentes qualidades como combustível. Em relação à octanagem, por exemplo, o número de octanos do etanol é 98, enquanto o número de octanos da gasolina é apenas 80. O etanol também possui menor pressão de vapor que a gasolina, o que deve resultar em menores emissões evaporativas. A inflamabilidade do etanol no ar também é menor do que a gasolina, o que reduz o risco de incêndios de veículos. Além disso, por ter 11% de oxigênio em sua massa atômica, propicia uma redução na emissão de gases como o monóxido de carbono (CO), o metano (CH₄) e hidrocarbonetos (HC). Segundo Santos [72], a utilização do etanol em substituição à gasolina, pode reduzir também a emissão de outros gases, como o óxido nitroso (N₂O) e os compostos orgânicos voláteis (COVs), precursores na formação do ozônio troposférico (gás estufa).

Uma desvantagem do etanol é que ele é menos energético que a gasolina. Um litro de etanol fornece apenas 67% da energia fornecida pelo mesmo volume

de gasolina. Por outro lado, a elevada octanagem do etanol permite que ele seja utilizado em motores com maior taxa de compressão, o que pode resultar em um aumento de eficiência do motor. Motores a etanol podem alcançar uma eficiência 15% mais alta do que os motores a gasolina, compensando em certa medida, o menor teor de energia por de volume. [66,73] Outra desvantagem na utilização do etanol em substituição à gasolina é que, a presença de oxigênio em sua composição química, leva a um aumento na emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e aldeídos (RCHO). A combinação desses poluentes, por sua vez, leva a um aumento na incidência do smog fotoquímico, produzindo poluentes secundários tóxicos, como o nitrato peroxacetílico (PAN) e o ozônio troposférico (O₃). [74-76]

Segundo um estudo realizado pela Agência de Proteção Ambiental da Califórnia [77], adicionando-se 10% de etanol anidro à gasolina, há uma redução significativa na emissão de monóxido de carbono (13%), compostos orgânicos voláteis (6%) e benzeno (11%). No entanto, há um aumento na emissão de óxidos de nitrogênio (5%), acetaldéido (159%) e emissões evaporativas.

2.3.1. Aspectos históricos da utilização do Etanol

A cana-de-açúcar é uma planta do gênero das *Saccharum officinarum*, nativa do Sudeste Asiático. Na idade média, o açúcar era uma especiaria muito valiosa, produzida no oriente e comercializada na Europa. Os primeiros colmos introduzidos na América do Sul foram trazidos por Cristovão Colombo para onde hoje se situa a República Dominicana. No Brasil, os primeiros núcleos de produção de açúcar foram implantados em meados do século XVI, com mudas de cana-de-açúcar provenientes da Ilha da Madeira. Na metade do século XVI, iniciou-se a construção de engenhos no nordeste do Brasil que, em pouco tempo, se tornou um grande produtor da especiaria. [78]

Nos dois primeiros séculos da colonização o açúcar foi o produto básico da economia brasileira, considerando-se que o consumo na Europa era grande dada a sua qualidade e porque era quase exclusivo naquela praça, uma vez que as

produções da Sicília e da ilha da Madeira estavam em decadência e as Antilhas ainda não faziam concorrência ao Nordeste brasileiro, que alcançou, no ano de 1600, a maior produção mundial. Por todo o período colonial brasileiro a produção do açúcar modificou-se algumas vezes, mantendo, porém, intactos seus três traços característicos: cultivada em latifúndios, essencialmente monocultora e uso de força de trabalho compulsório para o seu desenvolvimento. O clima favorável foi um fator determinante para o êxito da plantação de cana. [78]

O primeiro veículo a álcool de que se tem notícia no Brasil foi um veículo produzido pela Peugeot e trazido pela família de Alberto Santos Dumont. Essa idéia fascinou o então presidente do Brasil, Rodrigues Alves. Em 1919, por decreto do governo de Pernambuco, o etanol foi oficializado como “combustível nacional”. [79]

Por volta de 1930 um jovem engenheiro da Politécnica de São Paulo, Eduardo Sabino de Queiroz, publicou alguns artigos sobre o uso de álcool como combustível em veículos. O então presidente Getúlio Vargas se interessou por tais artigos e, em fevereiro de 1930, foi promulgado o decreto nº 19.117, que determinava a adição de 5% de álcool em cada litro de gasolina importado no Brasil. Outro decreto, do dia 1º de setembro de 1931, tinha o objetivo de sustentar pesquisas sobre o motor a álcool, cobrando um imposto de dois réis por litro de gasolina importado, a fim de financiar essas pesquisas. [79]

Apesar das pesquisas e incentivos dados ao etanol na década de 30, as pressões externas e o descaso dos governos posteriores, fizeram com que o etanol pouco a pouco perdesse a sua importância estratégica na matriz energética brasileira. O petróleo passou a predominar no cenário nacional em detrimento ao álcool.

Após o primeiro choque do petróleo, ocorrido em 1973, a súbita elevação no preço do barril do petróleo gerou uma grande crise no Brasil e nos países onde a matriz energética era baseada em combustíveis fósseis. Para reduzir a importação de petróleo (na época, 90% da gasolina consumida era importada) e oferecer um mercado alternativo ao açúcar, o etanol figurou novamente como uma

boa opção. Foi criado então, por meio do Decreto 76.593/75 o Programa Nacional do Álcool (Proálcool). [80]

Numa primeira fase do Programa, o governo brasileiro adotou medidas como o estabelecimento da mistura obrigatória de 22% de etanol anidro à gasolina, empréstimos com juros baixos e garantias para construção de novas unidades para produção de etanol, fixação do preço da gasolina de modo a conferir vantagem competitiva ao etanol, investimentos para distribuição de etanol pelo país, além da propaganda oficial para estimular o uso do álcool. Essas medidas propiciaram um aumento em mais de 500% da produção de etanol entre 1975 e 1979. [81]

A segunda fase do Programa se deu após o segundo choque do petróleo. Já em 1979, foi introduzido o primeiro veículo partir de então, o governo brasileiro passou a incentivar a fabricação de veículos movidos exclusivamente a etanol hidratado. Para estimular a compra de tais veículos, foram oferecidos diversos incentivos, como fixação do preço do etanol em nível inferior ao da gasolina (65% em 1980 e 59% em 1982), redução de impostos sobre a venda de carros a álcool e aumento dos impostos sobre os carros movidos a gasolina, além da redução no valor do IPVA. Em 1984, os carros a álcool respondiam por 94,5% da produção das montadoras. A indústria do álcool substituiu, desde 1976, mais de 1,44 bilhão de barris de petróleo e a economia de divisas com a substituição do petróleo foi de cerca de US\$ 120 bilhões, entre 1979 e 2004. [81] O Brasil foi o primeiro país a utilizar o etanol em larga escala diretamente como combustível ou através da adição compulsória de álcool anidro à gasolina. O programa brasileiro foi economicamente e tecnologicamente muito bem sucedido, contando com profissionais de excelente qualificação e sendo mundialmente reconhecido. [70]

Até 1990, cabia ao governo a responsabilidade pelo planejamento e a gestão dos mercados de açúcar e álcool, mas a partir da década de 1990 essas tarefas foram repassadas integralmente ao setor privado. Hoje, prevalece o regime de livre mercado, em que os preços são definidos de acordo com as oscilações de oferta e demanda. Nessa época, com a queda do preço da gasolina, o preço do etanol combustível, inicialmente fixado a 64,5% do preço da gasolina, chegou a

alcançar um percentual de 80% no início dos anos 90, perdendo algumas de suas vantagens competitivas. Além disso, nesse mesmo período, o governo brasileiro passou a dar incentivos fiscais aos chamados "carros populares", movidos a gasolina, que, por serem mais baratos, passaram a exercer forte concorrência aos carros movidos a álcool. Paralelamente a isso, houve um aumento na cotação internacional do açúcar e maior rentabilidade do mercado de exportação, o que resultou na queda da produção do etanol, gerando uma desconfiança no suprimento regular desse combustível. Em 1990, o país foi obrigado a importar etanol e utilizar metanol na mistura com a gasolina. [81] Outro fator a ser considerado é que, como a tributação para a gasolina pura é de 52%, a tributação do etanol hidratado é de 58% e o etanol anidro não é tributado, a gasolina com adição de etanol anidro acaba sendo beneficiada por uma tributação mais baixa do que a do álcool hidratado.

Todos esses fatores fizeram com que, em meados da década de 90, a venda de carros movidos a álcool no Brasil ficasse próxima de zero, desmantelando o principal programa de biomassa combustível existente no mundo. Apenas táxis e veículos para locação continuaram fabricados com motor a álcool, embora a obrigatoriedade da mistura à gasolina tenha sido mantida. [71,81]

Com o advento dos veículos flex, esse quadro começa a se modificar, uma vez que a possibilidade de abastecer o veículo com álcool ou gasolina elimina as incertezas a respeito da irregularidade no abastecimento. Inicialmente desenvolvida nos Estados Unidos e na Europa, essa tecnologia foi introduzida no Brasil somente em 2003. O primeiro veículo flex do Brasil foi o Gol 1.6 "total flex", lançado pela Volkswagen. Em seguida, a tecnologia dos veículos flex foi rapidamente difundida por quase todas as montadoras. Atualmente, já existem no mercado brasileiro mais de sessenta modelos de veículos flex produzidos por dez montadoras. O número total de veículos flex produzidos em 2011 chegou a 2.550.875. [82]

No caso brasileiro, o veículo flex possui um módulo de injeção eletrônica capaz de gerenciar o funcionamento do veículo para 100% de gasohol (gasolina

com etanol anidro misturado em 20 a 25%), para até 100% de álcool hidratado e para qualquer valor de mistura desses combustíveis. [83]

Diante dessa nova realidade trazida pelos veículos flex, o consumo de etanol voltou a aumentar de maneira significativa no Brasil. A figura 13 mostra o perfil da frota por combustível para veículos leves. Podemos notar que os veículos movidos unicamente a gasolina e a etanol estão sendo substituídos gradualmente pelos veículos flex, que deverão corresponder a 77,9% dos veículos do ciclo Otto em 2019, segundo as projeções.



Figura 13. Perfil da frota por combustível para veículos leves de 2009 a 2019. [35]

O aumento na utilização de veículos flex levará a um aumento expressivo na demanda de etanol, como podemos notar na figura 14.

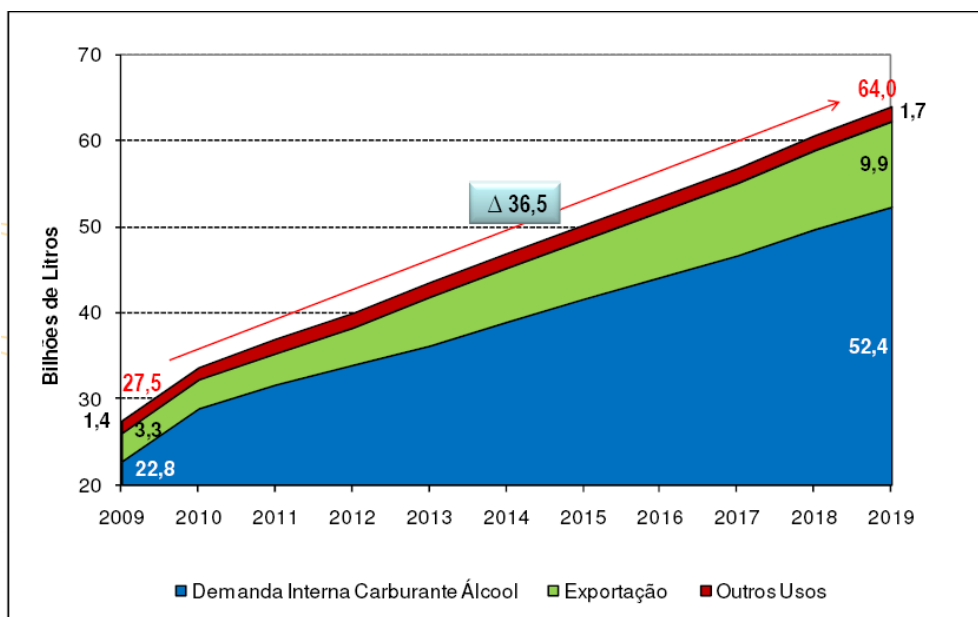


Figura 14. Projeção da demanda de etanol no Brasil de 2009 a 2019. [35]

Em 2005, o Centro Brasileiro de Referência em Biomassa (CENBIO), desenvolveu, em parceria com o governo municipal de Estocolmo (Suécia), o projeto BEST (BioEthanol for Sustainable Transport ou BioEtanol para um Transporte Sustentável). O projeto tinha o objetivo de encorajar o estudo e a utilização do etanol, em substituição ao diesel no transporte público urbano. O projeto foi realizado em São Paulo e em cidades localizadas na Europa (Estocolmo, Madrid e País Basco) e na Ásia (Rotterdam, La Spezia, Somerset, Nanyang e Dublin). O motor diesel, adaptado para funcionar com etanol, foi desenvolvido pela Empresa sueca Scania. Na Suécia, cerca de 600 ônibus movidos por etanol brasileiro circulam, sendo que cerca de 380 desses estão em Estocolmo. [84]

Em 2007, com o lançamento da primeira motocicleta de combustível flex, fabricada pela *Delphi Automotive Systems*, o etanol amplia o seu mercado de atuação. O modelo era uma Yamaha YBR125. No Brasil, a primeira motocicleta flex foi desenvolvida pelos engenheiros da Honda, sendo considerada projeto de destaque pelo Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Honda no Japão. [82]

Em Botucatu (SP), a Indústria Aeronáutica Neiva, fabricante de aviões agrícolas e componentes para os jatos regionais Embraer das famílias 145 e 170,

iniciou, no dia 19 de outubro de 2004, a produção do Ipanema, aeronave com a certificação do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e 100% movido a álcool hidratado. O Ipanema é o primeiro avião de série no mundo a sair de fábrica certificado para voar com esse tipo de combustível. [85]

2.3.2. A indústria brasileira de cana-de-açúcar

O Relatório da Organização de Alimentação e Agricultura da ONU [86], estima que, em 2010, foram cultivados 23,8 milhões de hectares de cana-de-açúcar em mais de 90 países em todo o mundo, resultando em uma produção mundial de 1,69 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar. Segundo o mesmo relatório, Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, seguido pela Índia, China, Tailândia, Paquistão e México. O Brasil também tem o menor custo de produção entre os principais competidores do mercado internacional, além de liderar o conhecimento da biotecnologia da cana, junto com a Austrália e a África do Sul.

A indústria brasileira de cana-de-açúcar possui algumas peculiaridades que a diferenciam das demais indústrias de cana-de-açúcar ao redor do globo. Em primeiro lugar, podemos destacar que a maior parte das indústrias produz uma proporção bastante alta de cana-de-açúcar que processa. Somente um terço da matéria-prima processada é adquirida por terceiros. [87]

O segundo ponto relevante está na tradicional diversidade dos produtos comerciais que são fabricados a partir do caldo da cana-de-açúcar e dos resíduos sólidos e líquidos da moagem. Destacam-se nesta lista de produtos, além do açúcar e do álcool etílico, a cachaça e a rapadura, produtos extraídos do caldo e produzidos em pequenas fábricas especializadas nesta atividade e a cogeração de energia elétrica gerada com a queima do bagaço. A produção é bastante pulverizada, feita em usinas, usinas com destilarias anexas e destilarias autônomas. As usinas fabricam apenas açúcar, as destilarias autônomas, apenas álcool, enquanto as usinas com destilarias anexas fabricam os dois produtos. No que diz respeito ao açúcar e ao álcool etílico, a maior parte de sua produção é

oriunda de usinas com destilarias anexas, capazes de destinar parte do caldo da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e parte para a fabricação de álcool. No quadro abaixo (figura 15), é apresentada de maneira esquemática a distribuição da produção de etanol e cana-de-açúcar, bem como a destinação desses produtos para o mercado interno ou externo. [87]

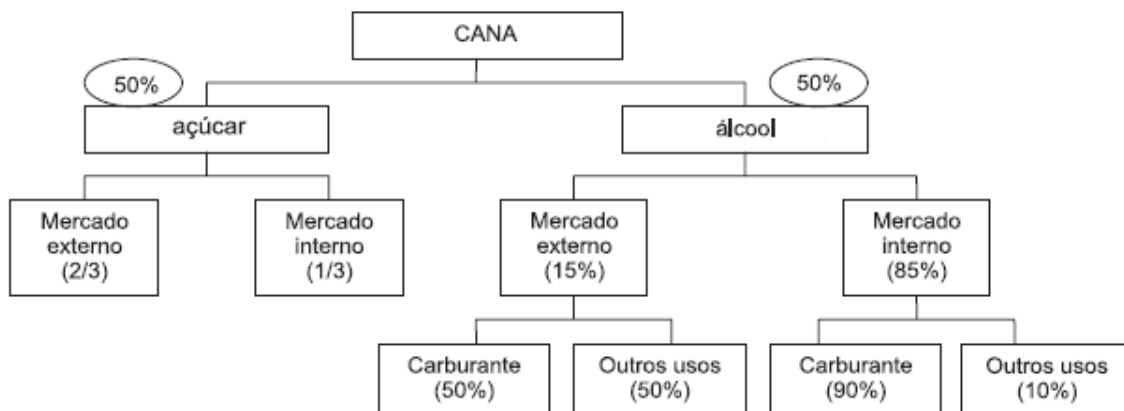


Figura 15. Cadeia Sucroalcooleira no Brasil. [81]

Essa possibilidade de destinar a mesma matéria-prima (o caldo da cana) para a fabricação de produtos alternativos traduz-se em evidentes benefícios empresariais na gestão desse negócio, pois torna viável dar preferência ao produto que tenha, no momento, a melhor relação custo/benefício. Assim, por exemplo, nas épocas chuvosas e de muita umidade, quando o rendimento em sacarose está com baixos níveis, é preferível atingir o limite máximo de produção de álcool etílico e reduzir ao mínimo necessário a produção de açúcar. Nos períodos secos, quanto o rendimento em sacarose está no auge, a decisão pode ser a inversa, privilegiando a produção de açúcar. Isto ocorre desde que esta vantagem técnica não seja contraposta por uma eventual relação de preços que favoreça o produto menos indicado. [87] No entanto, essa possibilidade de priorizar a produção da cana-de-açúcar ou do etanol gera, em um mercado desregulamentado, um risco de escassez de um dos dois produtos, como aconteceu na década de 90 com o etanol.

Um outro aspecto que devemos destacar é a distribuição das unidades de produção de cana-de-açúcar em todo o território nacional. A disposição de uma grande porção territorial no sentido Norte-Sul, concede ao país uma grande diversidade de microclimas que possibilitam a produção, em escala econômica, da maior parte das lavouras comerciais em uso no mundo. Como consequência dessa distribuição das unidades produtivas e a combinação estadual dos períodos de colheita da cana, o país mantém, com diferentes intensidades, a produção de açúcar e álcool por, praticamente, todos os meses do ano. [87]

Na tabela 3, apresentamos a produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol por estado, região e o total produzido no Brasil durante a safra de 2008/2009.

Tabela 3. Produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol referentes à safra 2008/2009. [87]

Estado / Região	Cana moída na safra 2008/2009 (ton)	Produção de açúcar (ton)	Produção de álcool etílico (m³)
São Paulo	352.277.735	20.195.366	16.904.039
Paraná	44.497.582	2.444.876	2.038.399
Minas Gerais	41.828.865	2.238.637	2.216.397
Mato Grosso do Sul	18.200.917	657.078	1.082.882
Goiás	29.806.046	957.561	1.722.555
Mato Grosso	14.153.762	399.496	898.521
Rio de Janeiro	3.403.248	239.196	126.452
Espírito Santo	4.373.248	85.272	274.677
Região Centro-Sul	508.531.567	27.207.482	25.263.922
Alagoas	27.309.285	2.200.862	845.363
Pernambuco	18.984.518	1.521.275	530.467
Paraíba	5.885.873	133.883	390.695
Rio Grande do Norte	3.186.766	197.914	114.909
Bahia	2.541.816	81.177	141.484
Maranhão	2.280.160	15.335	181.559
Piauí	900.181	38.796	44.553
Sergipe	1.831.714	82.099	89.832
Ceará	122.355	-	9.241
Amazonas	312.000	14.320	7.963
Tocantins	295.000	-	22.400
Pará	626.609	13.726	44.906
Região Norte-Nordeste	64.231.460	4.299.387	2.423.374
BRASIL	572.763.027	31.506.869	27.687.296

Podemos notar que a maior parte da produção de cana-de-açúcar, açúcar e etanol se concentra na região Centro-Sul. Essa região produz aproximadamente 89% da cana-de-açúcar, 86% do açúcar e 91% do etanol produzido em todo país. Nesta região, destaca-se o estado de São Paulo, que sozinho produz mais de 60% da cana-de-açúcar, 64% do açúcar e 61% do etanol produzido no Brasil.

O mapa abaixo (figura 16), produzido pela União da Indústria da cana-de-açúcar [88], segundo dados oficiais do IBGE, UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas – SP) e do CTC (Centro de Tecnologia Canavieira), mostra em vermelho as áreas onde se concentram as plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade.

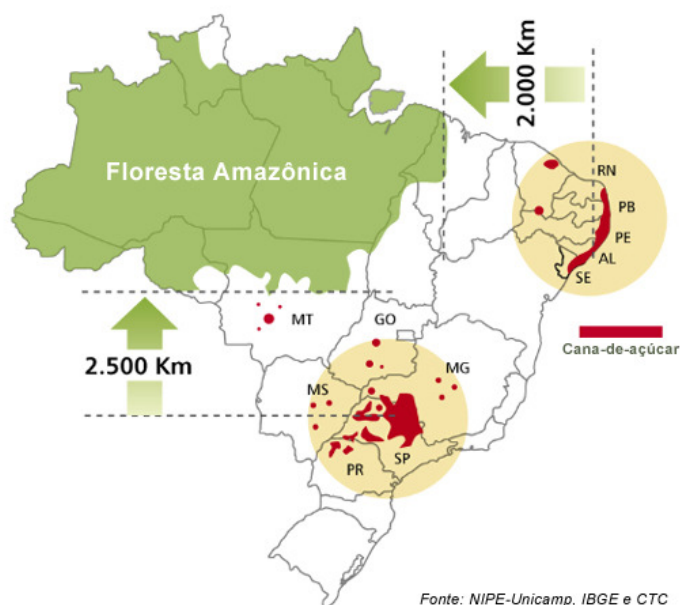


Figura 16. Distribuição espacial das plantações e usinas produtoras de açúcar, etanol e bioeletricidade. [88]

Temos que destacar também que a quantidade de cana-de-açúcar (em toneladas) necessária para a produção de 1kg de açúcar ou 1 litro de etanol anidro ou hidratado varia de acordo com as condições do solo, do clima, e, sobretudo, com o avanço tecnológico de cada estado ou região produtora de cana-de-açúcar. O quadro abaixo (tabela 4) exemplifica essa desigualdade na produtividade das regiões Centro-Sul e Norte-Nordeste. Notamos que na região

Centro-Sul necessita-se de menor quantidade de cana-de-açúcar para a produção de açúcar ou etanol.

Tabela 4. Quantidade de cana-de-açúcar (em toneladas) necessária para a produção de 1 kg de açúcar, 1 litro de etanol anidro e 1 litro de etanol hidratado por região. [87]

Produto	Região Centro-Sul	Região Norte-Nordeste
Açúcar- 1 kg	7,4 kg de cana	7,8 kg de cana
Álcool etílico anidro – 1 litro	12,5 kg de cana	13,0 kg de cana
Álcool etílico hidratado – 1 litro	12,0 kg de cana	12,5 kg de cana

A cultura da cana-de-açúcar é semiperene (após o plantio, a cana pode ser cortada várias vezes antes de replantada, em ciclo produtivo de cerca de cinco anos) e a produção é trabalho-intensiva, onde cerca de 80% da cana-de-açúcar ainda é cortada a mão (em São Paulo, a colheita é mecanizada em 30% da área plantada). [81]

Atualmente, aproximadamente 50% da sacarose de cana da cana de açúcar produzida no Brasil é usada para produzir o etanol. Contudo, essa repartição do uso da cana é variável, dependendo dos preços relativos e perspectivas dos dois mercados, cujas dinâmicas são bastante diferenciadas, uma vez que dois terços da produção brasileira de açúcar é exportada, enquanto a produção de álcool é quase inteiramente (85%) dirigida ao mercado interno, embora as exportações venham crescendo nos últimos anos. [81]

2.3.3. A indústria Norte Fluminense de cana-de-açúcar

A agroindústria açucareira é a mais antiga atividade econômica do Estado do Rio de Janeiro. As primeiras mudas de cana-de-açúcar foram plantadas no norte-fluminense em fins do ano de 1538, por Pero de Góis, em uma região primitivamente habitada por indígenas goitacás e puris, numa pequena povoação a que deu o nome de Vila da Rainha. [78] Essa primeira fase de produção de cana-de-açúcar no norte-fluminense durou pouco, devido à destruição da aldeia por parte de alguns índios, de modo que a produção ficou abandonada. [89]

O primeiro engenho de açúcar da região foi o engenho São Salvador, implementado somente em 1650. [90] No entanto, somente após a Revolta de Benta Pereira (1748), a cultura de cana-de-açúcar passa a sobrepujar a criação de gado na região de Campos. [78] A partir do incremento dado à lavoura açucareira, Campos passaria a prosperar, influenciando toda a estrutura orgânica da sociedade norte-fluminense. [91] Até 1769, havia cerca de 56 usinas de açúcar em Campos. Em 1820, havia no distrito 400 engenhos e cerca de 12 destilarias. [92]

No século XIX, a produção açucareira campista atingiria o auge com a introdução de novas técnicas na fabricação do açúcar, além da entrada vultosa de capitais para o aprimoramento dos primitivos engenhos que se transformavam em engenhos centrais e em usinas. [78,92]

A partir de 1850, com a ascensão da máquina a vapor no processo de fabricação do açúcar em Campos, pequenos proprietários, não podendo competir com os grandes latifundiários, desfaziam-se de suas engenhocas e submetiam-se à condição dos grandes fornecedores de cana-de-açúcar e os senhores de engenho adquiriam cada vez mais poder sobre terras e escravos. Assim é que na década de 1870 os engenhos de açúcar, através da fusão de recursos públicos e privados, concretizaram as expectativas para transformação nos primeiros engenhos centrais, com a efetiva divisão do trabalho na economia canavieira, através de tecnologia disponível e mercados em expansão. [78] Podemos destacar que a primeira usina de cana-de-açúcar instalada no Brasil foi a Usina do Limão, em Campos, que entrou em funcionamento em julho de 1879.

Durante o século XX, foram realizados diversos investimentos para a estruturação do parque industrial sucroalcooleiro, que resultaria na constituição de inúmeras usinas de açúcar no Norte Fluminense. A expansão da lavoura da cana-de-açúcar, em latifúndios monocultores, reduziria drasticamente a produção das culturas tradicionais como milho, arroz, mandioca, feijão e frutas da região. [92]

A indústria açucareira, na região em estudo, historicamente, foi marcada pelo conservadorismo de uma elite agrária, que nunca aproveitou adequadamente as potencialidades dessa cadeia produtiva, colocando-se sempre na dependência das oscilações de preços e da evolução da demanda. Em virtude disso, já na

década de 70, as usinas do norte fluminense começaram a perder de espaço no mercado sucro-alcooleiro para usinas mais produtivas do estado de São Paulo.

O crescente declínio na oferta de matéria-prima, o aumento superdimensionado do parque agroindustrial em virtude do Proalcool e a forte retração econômica ocorrida na década de 80 fizeram com que o setor entrasse em forte decadência. Soma-se a isso, o fim do subvencionismo estatal com a liberação de preços da cana-de-açúcar e do álcool, no início da década de 1990. Esses fatores acabaram por promover um acirramento da concorrência, levando ao fechamento de diversas usinas e, conseqüentemente, ao aumento do desemprego, agravando, assim, o processo de exclusão social. O Norte Fluminense, em que pese o fato de ter recebido altos investimentos públicos e privados nos setores sucro-alcooleiro e petrolífero, tem se reproduzido nos últimos anos como uma região de consideráveis índices de indigência e pobreza. [93].

O declínio do setor sucroalcooleiro na região norte do estado do Rio de Janeiro pode ser claramente observado na tabela 5, que apresenta uma relação das usinas de cana-de-açúcar existentes, em funcionamento, no período de 1970 a 2005. Apesar desse declínio, a cana-de-açúcar ainda é a cultura de maior importância econômica no Estado do Rio de Janeiro, apresentando a maior área colhida e valor de produção dentre os diversos produtos agrícolas cultivados no estado. [94]

Recentemente, o setor voltou a receber investimentos públicos e privados. Em decreto assinado pelo governador Sérgio Cabral, a produção de etanol no estado teve reduzida a alíquota do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que passou de 24% para 2% com objetivo de promover uma retomada da indústria canavieira. No setor privado, podemos citar o Grupo Canabrava que construiu, em 2007, uma usina no município de Campos dos Goytacazes e iniciou um projeto de construção de uma usina no município de Quissamã, que deverá iniciar a operação na safra 2014/2015.

Tabela 5. Relação das indústrias sucroalcooleiras em atividade no Estado do Rio de Janeiro de 1970 a 2005. [94]

Unidade Industrial	Localização (Município)	Anos										
		1970 a	1973 a	1980	1981 a	1985 a	1991 a	1993 a	1995	1996 a	2002	2003 a
		1972	1979		1984	1990	1992	1994		2001		2005
Mineiros	Campos dos Goytacazes											
Poço Gordo	Campos dos Goytacazes											
Santo Antônio	Campos dos Goytacazes											
Jacques Richer (Dest.)	Campos dos Goytacazes											
São Pedro (Destilaria)	Itaperuna											
Novo Horizonte	Campos dos Goytacazes											
Grumarim (Destilaria)	São Fidélis											
Santa Maria	Bom Jesus do Itabapoana											
Outeiro	Cardoso Moreira											
Queimado	Campos dos Goytacazes											
Santo Amaro	Campos dos Goytacazes											
Victor Sence	Conceição de Macabu											
Cambaíba	Campos dos Goytacazes											
São João	Campos dos Goytacazes											
Carapebus	Carapebus											
Quissamã	Quissamã											
Barcelos	São João da Barra											
Cupim	Campos dos Goytacazes											
Paraiso	Campos dos Goytacazes											
Pureza	São Fidélis											
Santa Cruz	Campos dos Goytacazes											
São José/Coagro	Campos dos Goytacazes											
Sapucaia	Campos dos Goytacazes											
Agriisa (Destilaria)	Cabo Frio											
Número de Unidades em atividade		24	21	20	19	18	16	15	12	10	9	8

Apesar dos investimentos, o setor sucroalcooleiro do norte fluminense, extremamente retrógrado, ainda precisa passar por muitas transformações. As denúncias de trabalho escravo em plantações e usinas de cana-de-açúcar são muito frequentes na região. Essa trágica situação fez com que a Comissão de Direitos Humanos da Assembléia Legislativa do Rio de Janeiro (ALERJ) realizasse, em 2010, uma Audiência Pública em Campos dos Goytacazes, em parceria com o comitê para Erradicação do Trabalho Escravo, Movimento dos Trabalhadores Sem Terra (MST) e Comissão Pastoral da Terra (CPT). Nessa audiência, foi discutido o trabalho escravo e a superexploração do trabalho pelas usinas de Campos. [95]

Além da questão trabalhista, o setor ainda se utiliza da prática das queimadas para a colheita da cana-de-açúcar, apesar de a prática ser proibida desde dezembro de 1992, quando foi aprovada pela ALERJ a Lei 2.049, que

previa o fim das queimadas em até cinco anos. A questão se agrava com aprovação do projeto de lei 569/2011 que adia para o ano 2024 o fim da prática da queimada em canaviais. Esse fato, além de interferir na lei anterior que não foi acatada, prolonga os malefícios causados à população e ao meio ambiente com a prática da queimada. [96]

2.3.4. Balanço energético

Alguns biocombustíveis, embora famosos por reduzir a emissão de gases estufa em relação aos combustíveis fósseis, podem gerar efeitos adversos, contribuindo para a intensificação do aquecimento global. A emissão de gases estufa na utilização de biocombustíveis ocorre em diversas fases da cadeia produtiva dos biocombustíveis, desde a fase agrícola até a produção industrial do biocombustível e o consumo do mesmo.

Para prever as vantagens ambientais do biocombustível, é necessário considerar todas as etapas de sua cadeia produtiva. Segundo Crutzen [97], se considerarmos, por exemplo, a emissão de óxido nitroso (N_2O) durante o cultivo da espécie agrícola que será utilizada para produção do biocombustível, o efeito de redução de emissões de CO_2 pode ser contrabalanceado pela maior emissão do óxido nitroso, cujo efeito de aquecimento é cerca de 310 vezes maior do que o do CO_2 .

O balanço global de óxido nitroso proveniente dos biocombustíveis é bastante incerto, no que se refere à prática agrícola. Como nem todo fertilizante adicionado ao solo é completamente aproveitado pela planta, podem ocorrer grandes perdas de nitrogênio em forma de N_2O para a atmosfera. As taxas de emissão deste gás podem variar dependendo do fertilizante usado, do tipo e preparo do solo e de fatores meteorológicos e ambientais. [98-100]

Deve-se levar em conta também os custos das emissões de CO_2 e de energia por parte dos fertilizantes, pesticidas e maquinários a base de óleo diesel utilizados na fase agrícola da produção de biocombustíveis, bem como as emissões decorrentes das etapas de processamento, refinamento, transporte e

infraestrutura para distribuição. É possível que algumas das vantagens ambientais dos biocombustíveis sejam reduzidas depois de analisados todos os passos desse processo. [101]

Os estudos do balanço energético estabelecem a relação entre o total de energia contida no biocombustível e o total de energia fóssil investida em todo o processo da produção do biocombustível, incluindo-se o processo agrícola e industrial. Somente culturas de alta produção de biomassa e com baixa adubação nitrogenada, como a cana-de-açúcar e dendê, têm apresentado balanços energéticos altamente positivos. [102]

No caso brasileiro, os primeiros trabalhos sobre o balanço energético da produção de etanol da cana-de-açúcar foram publicados no exterior nos anos 70, e os resultados sempre foram muito baixos ou negativos devido ao alto consumo de energia fóssil no processamento e destilação do etanol na usina. Entretanto, poucos anos após o começo do Proálcool, as usinas conseguiram substituir a energia fóssil pela energia gerada na queima do bagaço da própria cana. [103] Atualmente, algumas usinas estão sendo capazes de gerar uma quantidade excedente de eletricidade, que pode ser vendida para a rede, gerando lucro para a usina e diminuindo a necessidade de implantação de novas usinas termoelétricas, por exemplo. [104]

O desenvolvimento acelerado da produção de cana no Brasil, as restrições à prática de queimada, a utilização crescente da mecanização da colheita e novos desenvolvimentos tecnológicos estão modificando importantes parâmetros na avaliação do ciclo de vida do etanol da cana-de-açúcar.

Para avaliar o balanço energético do etanol da cana-de-açúcar, Macedo [105] utilizou os dados fornecidos pelo Centro de Tecnologia Canavieira Copersucar (CTC) e pela União dos Produtores de Cana de Açúcar (ÚNICA) a respeito dos parâmetros de desempenho agrícola e industrial de suas unidades associadas. [106] Em primeiro lugar, Macedo realizou um estudo sobre a energia fóssil requerida para a produção de etanol em todas as etapas de sua cadeia produtiva, construindo a tabela 7. Macedo faz uma comparação entre os valores encontrados para o ano de 2002 [105], os valores de 2005/2006 e faz uma

projeção conservadora para o ano de 2020, considerando a utilização de tecnologias atualmente disponíveis no mercado e algumas tendências claramente identificáveis. O aumento previsto da demanda de energia fóssil está associado à crescente mecanização da colheita.

Tabela 6. Consumo de energia fóssil (MJ) por tonelada de cana-de-açúcar. [105]

	2002 ^a	2005/2006	Cenário 2020
Operações agrícolas	16,4	13,3	14,8
Colheita	21,7	33,3	46,9
Transporte da cana	39,0	36,8	44,8
Transporte de insumos	4,0	10,9	13,5
Outras atividades		38,5	44,8
Fertilizantes	66,5	52,7	40,0
Pesticidas e calcário	19,2	12,1	11,1
Sementes	5,9	5,9	6,6
Maquinário	29,2	6,8	15,5
Produtos químicos e lubrificantes	6,4	19,2	19,7
Construções	12,0	0,5	0,5
Equipamentos	31,1	3,9	3,9
Total	251,3	233,8	262,0

^a [71]

^b A energia para as sementes corresponde a 2,9% do total para a cana.

A seguir, Macedo faz uma comparação entre o total de energia renovável produzida no ciclo de vida do etanol (resultado da soma da energia do etanol e do excedente de bagaço e de eletricidade) e a demanda de energia fóssil utilizada para a produção do etanol (tabela 8). Percebemos que, embora o consumo de energia fóssil por tonelada de cana-de-açúcar cresça devido à mecanização, o balanço energético obtido através da razão entre o total de energia renovável produzida pelo total de energia fóssil consumida deve aumentar progressivamente. Esse aumento pode ocorrer em virtude de um melhor aproveitamento da eletricidade excedente (processo de cogeração), bem como

devido à utilização progressiva do balaço e da palha da cana para geração de energia (etanol de segunda geração).

Tabela 7. Energia Fóssil Consumida (MJ tc^{-1}), Energia Renovável Produzida (MJ tc^{-1}) e Balanço Energético do Etanol. [105]

	2002 ^a	2005/2006	Cenário 2020
Consumo total de energia fóssil	251,3	233,8	262,0
Energia do Etanol	1921,3	1926,4	2060,3
Balaço	168,7	176,0	0,0
Eletricidade excedente ^b	0,0	82,8	972,0
Total de Energia renovável produzida	2090,0	2185,2	3032,3
Energia renovável produzida / Energia Fóssil consumida	8,3	9,3	11,6

^a [71]

^b Os valores excedentes de eletricidade são 9,2 e 135 kWh tc^{-1} for 2005/2006 e 2020, respectivamente.

Alguns estudos apresentam resultados discrepantes para o balanço energético da cana-de-açúcar. Segundo Andreoli e Souza [107], o etanol da cana-de-açúcar seria capaz de gerar apenas 3,24 unidades de energia renovável produzidas a partir de uma unidade de energia fóssil. Patzec e Pimentel [108] afirmam que, caso o bagaço e a palha da cana não sejam utilizados como fonte de energia na produção do etanol, o balanço energético da produção da cana-de-açúcar pode alcançar valores negativos.

Utilizando os dados obtidos por Macedo, é possível avaliar também o balanço de emissão de gases do efeito estufa (GEE). A tabela 9 mostra as emissões evitadas de GEE em $\text{kgCO}_{2\text{eq}} \text{ m}^{-3}$ para o etanol hidratado (HDE), utilizado em veículos movidos a etanol, o etanol anidro (E25), utilizado em uma mistura de 25% com a gasolina, e o etanol utilizado em veículos FLEX (FFV). Observando a tabela, podemos prever reduções significativas na emissão de gases do efeito estufa para os próximos anos, se houver uma redução significativa na prática de queimadas e na aplicação de fertilizantes minerais. [105]

Tabela 8. Emissões evitadas ($\text{kgCO}_{2\text{eq}}\text{m}^{-3}$) para cada litro de etanol hidratado e anidro. [105]

	2002 ^a		2005/2006 ^b		Cenário 2020		
	HDE	E25	HDE	E25	HDE	FFV	E25
Etanol ^c							
Excedente de bagaço ^d	141	145	143	150	0	0	0
Excedente de eletricidade ^e	0,00	0,00	59	62	784	784	819
Uso do Etanol ^f	2049	2256	1979	2111	1979	1805	2111
Emissões evitadas	2190	2401	2181	2323	2763	2589	2930

^aA equivalência do etanol hidratado (HDE) foi considerada 1L etanol = 0,75 L gasolina. Para o etanol anidro utilizado junto com a gasolina (E25), foi considerada uma equivalência de 1 L etanol anidro = 0,8 L gasolina.

^bOs valores de aquecimento da gasolina para o ano de 2005 são do Balanço Energético Nacional (BEN 2006).

^cHDE: hydrous dedicated engine (motores que utilizam o etanol hidratado); E25: mistura de gasolina e etanol (25% de etanol); FFV: flex fuel vehicles (veículos Flex)

^dConsiderando a substituição de boilers movidos a biomassa (eficiência = 79%) por boilers movidos a petróleo.

^eConsiderando fatores de emissão de 579 e 560 $\text{tCO}_{2\text{eq}} \text{Gwh}_e^{-1}$ para 2005 e 2020, respectivamente.

^fBaseado em EUCAR, 2006 e IPCC 2006

Se compararmos o balanço energético do etanol brasileiro [105], gerado a partir da cana-de-açúcar, com o etanol gerado a partir de outras matérias-primas, poderemos notar que o etanol de cana-de-açúcar apresenta valores de balanço energético e emissões evitadas de GEE bem mais elevados. A Copersucar e a Única elaboraram um gráfico, que apresenta o balanço energético das principais matérias-primas utilizadas para a produção de etanol (figura 17). Nota-se com clareza que o etanol brasileiro, produzido a partir da cana-de-açúcar, apresenta um balanço energético bastante superior ao etanol gerado a partir de qualquer outra matéria-prima no mundo. O milho americano, por exemplo, requer uma unidade de energia proveniente de combustíveis fósseis para produzir apenas 1,4 unidades de energia renovável, enquanto a cana brasileira é capaz de produzir 9,3 unidades de energia para cada unidade de combustível fóssil. [109]

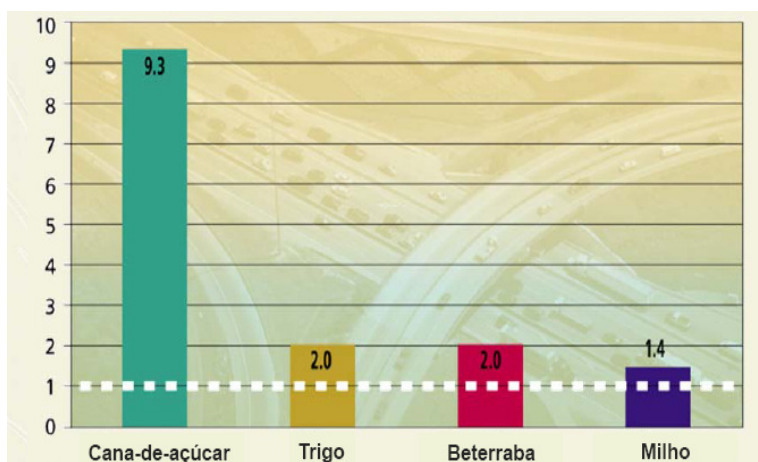


Figura 17. Balço energético das principais matérias-primas utilizadas na produção de etanol. [53]

Ainda que seja indiscutível a consagração do etanol combustível e sejam grandes as vantagens comparativas de custo do etanol da cana-de-açúcar, a produção brasileira já foi alcançada pela norte-americana, em 2005, e há riscos adicionais de perda de posição relativa quando os países desenvolvidos tiverem sucesso na utilização da gama completa de material celulósico na produção de etanol. A meta da política norte-americana é tornar o etanol celulósico custo-competitivo já em 2012. [81]

Uma grande crítica que pode ser feita aos estudos do ciclo de vida dos biocombustíveis, em especial, do etanol, é que eles não incluem alguns efeitos indiretos da sua produção. Não tem sido levada em consideração, por exemplo, a enorme liberação de carbono do solo orgânico provocada pela cultura intensiva de cana-de-açúcar, que substitui florestas e terras de pastagem que, se fossem regeneradas, poupariam mais sete toneladas de dióxido de carbono por hectare a cada ano do que o bioetanol poupa. [21,110]

Além disso, a maioria dos estudos leva apenas em conta apenas a contribuição das emissões de CO₂, N₂O e CH₄, que contribuem diretamente para o aquecimento global. Segundo Larson [111], o impacto de outros gases que contribuem indiretamente para o efeito estufa (por exemplo, NO_x) podem ocasionar ou aumento de 3-5% em relação à contabilidade somente de GEE diretos.

Devemos ressaltar que os dados apresentados a respeito do balanço energético e das emissões de GEE foram calculados a partir de dados teóricos. A tecnologia de medidas experimentais da emissão de gases estufa na cadeia produtiva de cana-de-açúcar ainda está em desenvolvimento e existem poucos trabalhos atuando neste sentido. Além disso, os fatores que influenciam no balanço energético e na emissão de GEE estão intimamente atrelados à realidade local de produção do etanol. No estado de São Paulo, por exemplo, o processo de mecanização da colheita está mais avançado do que na região norte-fluminense, onde a queimada ainda é predominante. A diversidade das condições climáticas, econômicas e tecnológicas nas diferentes regiões do Brasil torna necessária uma avaliação local, com medições e cálculos condizentes com as condições específicas de cada região.

Alguns estudos começaram a ser desenvolvidos na região norte-fluminense para a avaliação da emissão de poluentes no ciclo produtivo da cana-de-açúcar. Como exemplo, podemos citar uma Dissertação de Mestrado [112], desenvolvida em nosso grupo de pesquisa, que avaliou a emissão de N_2O para uso de fertilizantes diferentes em solos agrícolas utilizados para produção de cana-de-açúcar na região norte fluminense. O estudo foi desenvolvido no Campus Experimental Dr. Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, situado no município de Campos dos Goytacazes. Foram utilizadas cúpulas para armazenar o gás proveniente das emissões do solo e recipientes metálicos evacuados (*canisters*) para coletar o gás. (figura 18)



Figura 18. Foto do acoplamento entre a cúpula e o canister nas áreas experimentais. [112]

A tabela 9 apresenta os dados de emissão de N_2O em 4 dias de experimento para amostras testemunha (sem utilização de fertilizante) e amostras que utilizam como fertilizante sulfato e ureia. Com os resultados das concentrações de N_2O obtidos nos quatro dias de experimento foi possível perceber que as regiões adubadas apresentaram uma maior emissão desse gás, e uma conseqüente diminuição no decorrer dos dias, devido à diminuição das atividades bacterianas presentes nos solos. Dessa forma, este estudo mostra que a utilização de adubo foi um fator que contribui para a emissão do gás estufa N_2O no Norte-fluminense.

Tabela 9. Concentração de N₂O dos quatro dias de experimento. [112]

Amostras	1º DIA		2º DIA	
	Manha	Tarde	Manha	Tarde
Sulfato	612 – 580 (sem adubo)	1031 -1250	402 – 443	970 – 952
Testemunha	455 – 479	482 – 390	425 – 434	467 – 461
Uréia	482 – 488 (sem adubo)	1064 – 1085	479 – 443	843 – 867
Amostras	3º DIA		4º DIA	
	Manha	Tarde	Manha	Tarde
Sulfato	449 – 443	658 – 694	485 – 464	518 – 524
Testemunha	464 – 464	494 – 467	449 – 470	397 – 395
Uréia	470 – 452	579 – 634	473 – 473	488 – 512

É necessário que outros estudos sejam desenvolvidos de modo a avaliar as emissões de gases estufa gerados a partir da utilização de maquinários e fertilizantes agrícolas, transporte da cana-de-açúcar e do etanol (não há alcooduto) através de caminhões antigos e descalibrados. Além disso, há que se considerar a emissão de gases estufa nas dornas de fermentação. A figura 19 apresenta o processo de fermentação para produção de etanol em uma usina do norte fluminense. A presença de bolhas CO₂ revela a emissão gasosa nas dornas de fermentação. [113]



Figura 19. Fotos das dornas de fermentação alcoólica em operação.

Alguns outros fatores indiretos também devem ser levados em consideração em um estudo detalhado das emissões do ciclo de vida da cana-de-açúcar, como, por exemplo, as emissões associadas ao meio de transporte utilizado pelos trabalhadores da usina (em geral, ônibus movidos a diesel).

Neste trabalho, fizemos uma análise das emissões de poluentes na exaustão de automóveis e motocicletas movidas a etanol, de acordo com a metodologia utilizada por nosso grupo de pesquisa. No entanto, deixamos como sugestão para trabalhos futuros a avaliação da emissão de poluentes nas demais etapas produtivas da cana-de-açúcar no norte fluminense.

2.3.5. Segurança alimentar e biodiversidade

Segundo o Relatório da Global Hunger Index [1], em todo o mundo, em torno de 925 milhões de pessoas passam fome em todo o mundo. O número é equivalente às populações somadas dos Estados Unidos (300 milhões), do Brasil (190 milhões), do Japão (130 milhões), da Alemanha (82 milhões), da França (63 milhões), do Reino Unido (60 milhões), da Itália (58 milhões) e da Espanha (40 milhões). Dos 122 países incluídos no estudo, 25 têm níveis considerados "alarmantes" de fome, e quatro nações da África registram números "extremamente alarmantes".

Para a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura [70], a produção mundial de alimentos precisa aumentar 70% para alimentar a população que o mundo terá em 2050, estimada em 9 bilhões de pessoas. Os governos devem investir mais no setor agrícola, expandir redes de segurança e programas de assistência social, reforçar atividades que geram renda para as áreas rurais e urbanas mais pobres e criar mecanismos adequados para lidar com situações de crise e proteger as populações mais vulneráveis.

Neste contexto, a expansão na produção de biocombustíveis pode constituir mais uma ameaça à frágil segurança alimentar do globo. Atualmente, a maior parte dos biocombustíveis são monoculturas plantadas em solos férteis que poderiam ser disponibilizados para produção de alimentos. A quantidade de grãos que se exige para encher o reservatório de uma caminhonete com etanol é suficiente para alimentar uma pessoa durante um ano. [114,115]

Além disso, o mercado de biocombustíveis oferece riscos à biodiversidade, quando terras de vegetação nativa passam a ser utilizadas para a produção de biocombustíveis. [114]

A maioria das matérias-primas usadas na produção de biocombustíveis atualmente também podem ser utilizadas para produção de alimentos, como o milho nos Estados Unidos, a cana-de-açúcar no Brasil e a canola na Alemanha. Assim, ao competir com a produção de alimentos, os biocombustíveis também podem contribuir para a elevação de seus preços. O aumento da demanda do milho norte-americano para a produção do etanol, por exemplo, já está provocando um aumento em seu preço de mercado. Considerando que o milho é o principal componente da ração de porcos, gados e frangos, o preço da carne, do queijo e do leite também está sujeito a aumentos. Na Europa, os vilões da agflação (inflação dos preços de bens agrícolas) são a canola e a soja, utilizados na fabricação do biodiesel.

Por disputar matéria-prima e depender das cotações de preços do açúcar (no caso da cana) e demais alimentos (no caso do amido dos cereais), que ainda não foi possível o desenvolvimento de um mercado estável para o etanol. [69]

Segundo o relatório da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), o aumento na produção de biocombustíveis pode ocasionar a elevação de 10% a 20% no preço internacional de alimentos, com sérias conseqüências para os países subdesenvolvidos. [70]

No caso brasileiro, durante as décadas de 1970 e 1980, o etanol causou uma mudança nos padrões de uso do solo, substituindo tradicionais culturas alimentares pela cana-de-açúcar. O milho e o arroz foram as culturas mais prejudicadas, com uma diminuição de 35% de sua área plantada. [116].

Além disso, cabe lembrar que, historicamente, a cana tem sido produzida no Brasil em grandes latifúndios monocultores. Durante o Proálcool, houve um grande investimento no setor sucroalcooleiro, acompanhado pelo processo de expropriação, acumulação primitiva e concentração de terras. Esse fato representa um enorme problema, já que no Brasil existe enorme demanda por um programa sério de reforma agrária.

Atualmente, no entanto, a expansão da cana-de-açúcar não tem gerado grandes impactos em culturas alimentícias, já que tem ocorrido preferencialmente, em áreas degradadas e pastagens. [108,117]

Apesar das especulações em torno do assunto, não existe ainda nenhuma prova definitiva de que o etanol brasileiro produzido a partir da cana-de-açúcar esteja contribuindo com o aumento nos preços dos alimentos ou com a fome no mundo. Segundo o Anuário Estatístico da Agroenergia do Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento [118], no Brasil, 8,92 milhões de hectares de terra foram utilizados para o plantio de cana-de-açúcar no ano de 2008, o que corresponde a aproximadamente 1% das terras agricultáveis brasileiras. Segundo dados da Embrapa [119], existem 90 milhões de hectares disponíveis para a expansão da agricultura no Brasil.

Um aspecto a ser considerado é que a cana-de-açúcar não é uma cultura especialmente exigente em termos de solo, adaptando-se razoavelmente em solos de fertilidade média. Além disso, melhoramentos genéticos permitiram que a cultura se tornasse mais resistente, produtiva e melhor adaptada a diferentes

condições, o que permite um crescimento na produção de cana-de-açúcar sem uma expansão excessiva no uso da terra. [117] É importante ressaltar também que a densidade de animais nas pastagens brasileiras é muito baixa (100 cabeças/km²) quando comparada com a média dos países desenvolvidos. Dessa forma, a utilização de áreas de pastagem subutilizadas para a expansão da cana parece ser uma boa opção. [120]

Esse quadro ainda é bastante favorável. No entanto, se o Brasil se propuser a satisfazer não só o seu mercado interno, mas à crescente demanda do mercado mundial, é possível que esse quadro se torne insustentável ao longo do tempo. A expansão da produção de cana-de-açúcar poderá tomar espaço de outras culturas, como a soja, resultando num aumento do seu preço no mercado. Além disso, essa expansão pode gerar uma pressão em terras utilizadas atualmente para a agricultura e pecuária, que deverão ocupar outras áreas, colocando em risco a biodiversidade de biomas como a Amazônia e o Cerrado.

Uma alternativa interessante seria tentar aumentar a produtividade dos biocombustíveis, através de desenvolvimentos tecnológicos no setor industrial e agroindustrial, sem aumentar a área da cultura. Isso pode ser feito através do desenvolvimento do chamado etanol de segunda geração, produzido a partir de materiais lignocelulósicos, provenientes de sobras e resíduos de produtos naturais (como o sabugo e a palha do milho, o bagaço, as pontas e as palhas da cana-de-açúcar). A produção de etanol com base na biomassa lignocelulósica utiliza processos químicos (empregando ácidos) ou da biotecnologia moderna (empregando enzimas) para a quebra de moléculas de celulose e produção de açúcares, para então produzir o etanol por meio de processos fermentativos alcoólicos da biotecnologia convencional. Isso permitiria, a princípio, um aumento de 200% na produção de etanol com a mesma área plantada. [121]

Devemos considerar ainda a possibilidade de se conciliar a produção de cana-de-açúcar com a produção alimentos, utilizando-se o sistema de rotação para o plantio da cana. Neste sistema, durante cada temporada de colheita, 20% da safra de cana é removida e substituída por outras culturas como feijão, milho e amendoim. [117]

2.3.6. Outros impactos ambientais

Além das emissões de GEE, outros impactos ambientais podem surgir durante a produção, transformação e distribuição dos biocombustíveis. Em particular, os impactos sobre terra utilizada para a produção de matérias-primas, e os correspondentes efeitos sobre a água, qualidade do solo, e da biodiversidade podem ser substanciais. Estes impactos dependem de vários fatores, incluindo a matéria-prima, as práticas agrícolas empregadas, o manejo do solo, a localização e as rotas de processamento. No caso da depleção da camada de ozônio, muitos estudos atribuem resultados pejorativos para os biocombustíveis em relação aos combustíveis tradicionais. [108]

Uma outra questão relevante é o procedimento comum e prejudicial adotado em grande parte dos canaviais brasileiros: a queima anual que ocorre antes da colheita para remover o material das folhas mortas e alguma camada de cera. Essa queima libera gás carbônico, ozônio, óxidos de nitrogênio e de enxofre, além da fuligem da palha queimada. A queimada contribui ainda com a destruição da microbiota, diminuição da umidade e porosidade dos solos, aumentando a compactação e, conseqüentemente, a erosão. A lixiviação carrega grandes quantidades de nutrientes e a combustão, da mesma forma, contribui para essa perda; um canavial em chamas expõe de 30 a 60 kg de nitrogênio e de 15 a 25 kg de enxofre por hectare. [122,122]

Além disso, o uso do fogo na agricultura traz sérios problemas para o solo e a fauna local. O fogo altera as composições químicas, físicas e biológicas do solo, prejudicando assim a ciclagem dos nutrientes e, induzindo o uso de agrotóxicos para a fertilização do solo, destrói um número ainda incalculável de espécies da fauna nativa, desde insetos até mamíferos. [96]

Em São Paulo, através do “Protocolo Verde”, a indústria canavieira paulista promete acelerar a eliminação da queima da palha da cana-de-açúcar, que deverá ocorrer tardiamente, até o ano de 2017. No estado do Rio de Janeiro, a situação é ainda mais drástica, pois o prazo para o fim da prática de queimadas foi estendido até 2024. Para erradicar definitivamente as queimadas, é necessário maior rigor

na legislação, fiscalização e a punição dos responsáveis por essa prática tão atrasada e prejudicial à atmosfera.

Um outro impacto gerado na produção do etanol de cana-de-açúcar é o consumo de água. A conversão da cana para o etanol requer grande quantidade de água, em torno de 21 m³/ tonelada de cana. A água é utilizada na lavagem da cana, na evaporação, fermentação e resfriamento do condensador. No entanto, grande parte da água pode ser reciclada e a eficiência do tratamento de água é superior a 98%. [105]

2.3.7. Aspectos Sociais

Os biocombustíveis deverão ocupar um espaço cada vez mais relevante no cenário mundial nos próximos anos. No caso brasileiro, o etanol da cana-de-açúcar deve gerar grandes receitas para o Agronegócio. É necessário ponderar, contudo, se a renda obtida através da exportação do etanol da cana-de-açúcar contribuirá para o real desenvolvimento social do Brasil.

Historicamente, a cana-de-açúcar brasileira tem sido plantada em grandes latifúndios monoculturas, o que tem gerado uma elevada concentração de renda no setor. Além disso, o setor costuma se servir de mão-de-obra barata e até mesmo escrava. Existem inúmeras denúncias de que o setor sucro-alcooleiro emprega mão-de-obra infantil e femininas em tarefas penosas e insalubres, com jornadas longas, salários miseráveis e contratos que não lhes garantem nenhum direito.

Segundo Alves [124], diariamente, um trabalhador que corta cana caminha, em média, 8.800 metros, despende 36.6300 golpes de podão, faz 800 trajetos levando 15 kg nos braços por uma distância média de 1,5 a 3 metros, faz aproximadamente 36.630 flexões de perna para golpear a cana, perde, em média, 8 litros de água, estando exposto ao sol, sob efeitos da poeira, da fuligem, trajando uma indumentária que o protege da cana, mas aumenta a temperatura de seu corpo. São condições subumanas sem um mínimo de insalubridade.

A maior parte da mão-de-obra empregada na lavoura de cana vem da região Nordeste. Com o objetivo de gerar recursos para a subsistência de sua família, os trabalhadores se submetem a condições deploráveis, tolerando o descumprimento das leis trabalhistas e as injustiças e distorções do sistema de pagamento por produção. Suas condições de trabalho geram um enorme desgaste, favorece o surgimento das chamadas doenças do trabalho, como tendinites, bursites, problemas de coluna, além das freqüentes e dolorosas câimbras.

Se o etanol tende a ganhar bastante espaço no mercado brasileiro e mundial, podendo ser um dos prováveis substitutos dos combustíveis fósseis no setor de transporte, é preciso criar condições para que essa expansão seja feita de maneira adequada e justa. O governo deve fiscalizar e garantir aos cortadores de cana os devidos amparos trabalhistas, melhores salários, melhores condições e menor carga diária de trabalho. Se outras empresas da área energética oferecem diversos benefícios aos seus funcionários, como, por exemplo, a participação nos lucros, porque a indústria sucroalcooleira não pode também oferecer tais benefícios aos seus trabalhadores? Afinal, se o lucro gerado pelo etanol ficar concentrado nas mãos de poucos agronegociadores, não haverá de fato o almejado desenvolvimento econômico e social.

2.4. Fenômeno Fotoacústico

Um sensor de poluentes atmosféricos deve possuir alguns requisitos fundamentais. A alta seletividade é importante para distinguir espécies gasosas em uma mistura de diferentes gases. Uma alta sensibilidade torna-se necessária quando precisamos detectar espécies gasosas em baixas concentrações. Uma faixa dinâmica de detecção permite que possamos monitorar elevadas e baixas concentrações de determinado gás, utilizando o mesmo instrumento. Além disso, uma boa resolução temporal assegura a possibilidade de análise em tempo real, o que facilita bastante o monitoramento ambiental. A técnica fotoacústica preenche

todos esses requisitos. Desta forma, tem sido amplamente utilizada na detecção de várias espécies gasosas. [125-128]

2.4.1. Aspectos históricos

O efeito fotoacústico foi descoberto pelo cientista e inventor Alexander Graham Bell, em 1880, através do advento que ele denominou de fotofone. O dispositivo era constituído de um espelho plano acoplado ao diafragma de um tubo de fala e de um espelho parabólico receptor conectado a um circuito telefônico. Quando a luz do sol incidia no espelho plano, era modulada pelas vibrações produzidas pela voz da pessoa no diafragma. A luz modulada era refletida e incidia no espelho, convergindo para o foco desse espelho. No foco, havia um disco de selênio conectado ao circuito elétrico do telefone. Como a resistência do selênio varia de acordo com a intensidade da luz incidente, a luz modulada fazia variar a resistência do selênio e, conseqüentemente, a corrente elétrica no dispositivo eletrônico. Como a frequência de modulação da fala da pessoa é idêntica à modulação da corrente elétrica, a voz da pessoa pode ser reproduzida através do circuito eletrônico. [129]

A figura 20 representa, de maneira esquemática, o dispositivo desenvolvido por Bell. Durante a realização do seu experimento, Bell pôde constatar que era possível produzir som de forma direta a partir da modulação da luz, o que ficou conhecido como efeito fotoacústico. Ele percebeu ainda que o efeito observado também poderia ocorrer em materiais sólidos diversificados, líquidos e gases.

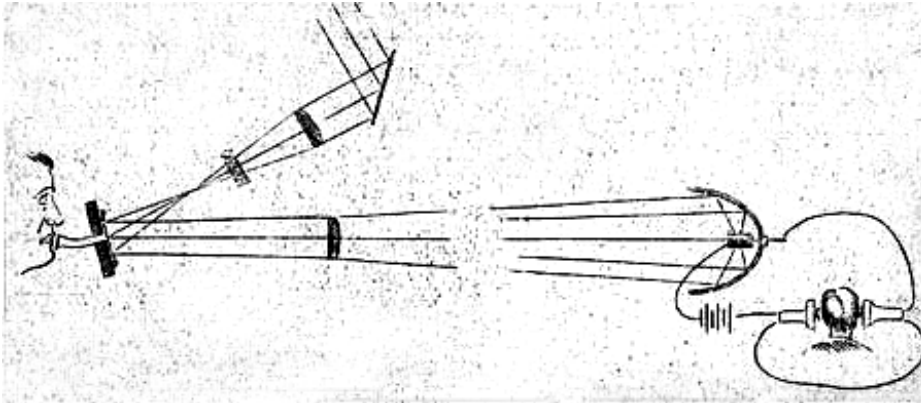


Figura 20. Representação do fotofone construído por A. G. Bell. [129]

Nesse mesmo experimento, foi descoberta a possibilidade de se utilizar uma cavidade como amplificador acústico, o que foi de extrema importância durante a demonstração do efeito. [130]

No entanto, devido à falta de instrumentação adequada, como fontes de radiação monocromáticas que tivessem potência elevada em determinadas faixas de absorção, microfones e outros dispositivos eletrônicos, o efeito ficou praticamente esquecido durante quase um século.

Em 1938, Viengerov introduz um novo sistema fotoacústico, utilizando um corpo negro como fonte de excitação e microfones para amplificar o sinal fotoacústico produzido. A radiação infravermelha produzida era utilizada para detectar moléculas de CO_2 diluídas em gás nitrogênio. [131]

Um importante avanço foi conquistado na década de 60, quando, pela primeira vez, o laser passou a ser utilizado como fonte de radiação para a detecção fotoacústica de gases. Comparado às tradicionais fontes de luz utilizadas, o laser proporcionou maior potência e qualidade de feixe. [132]

A análise de traços de gases foi feita primeiramente por Kreuzer [133]. Dewey et al. [134] e Kamm [135], que começaram a realizar a modulação do laser na frequência de ressonância da célula fotoacústica. Em seus experimentos, Kreuzer [133] consegue obter excelentes resultados, alcançando limites de detecção da ordem de ppbV (partes por bilhão por volume) em amostras de metano diluídos em nitrogênio.

Nas décadas de 1970 e 1980, a utilização da fotoacústico na detecção de gases cresceu de maneira significativa. Os laser de CO e CO₂ foram utilizados como fonte de radiação, em virtude de sua elevada potência e faixas de emissão com fortes transições vibracionais. [136-138] Apesar de serem relativamente grandes, os lasers de CO e CO₂ puderam ser empregados em sistemas móveis para realizarem detecções ambientais *in situ*. [139]

Com o progresso no desenvolvimento de diodo lasers, estes passaram a ser empregados em dispositivos fotoacústicos mais compactos. [140] O recente desenvolvimento de novas fontes de radiação, como osciladores ópticos paramétricos [141] e lasers de cascata quântica [142] estão permitindo grandes avanços na detecção fotoacústica de gases.

Na última década, a técnica fotoacústica possibilitou a detecção de diferentes gases, como o etileno [22,24,143,144] a amônia [128,146], dióxido de nitrogênio [23,147], dióxido de enxofre [23,147], dióxido de carbono [119,148-150], água [149], etanol [149], óxido nítrico [145,150], etanol [124,151], acetaldeído [151], metano [143], etano [152], heroína, morfina e nicotina [153], metanol [22], óxido nitroso [147], eteno [154], ozônio [155] com aplicações de interesses agrícolas, ambientais e biológicos.

2.4.2. Aspectos teóricos na geração do sinal fotoacústico

De maneira simplificada, o fenômeno fotoacústico consiste na geração de ondas acústicas a partir do aquecimento periódico de espécies gasosas excitadas por uma fonte de radiação. Quando a frequência da radiação incidente coincide com a frequência de absorção de determinadas moléculas presentes na amostra gasosa, estas irão absorver a radiação, saindo do estado fundamental para estados mais elevados.

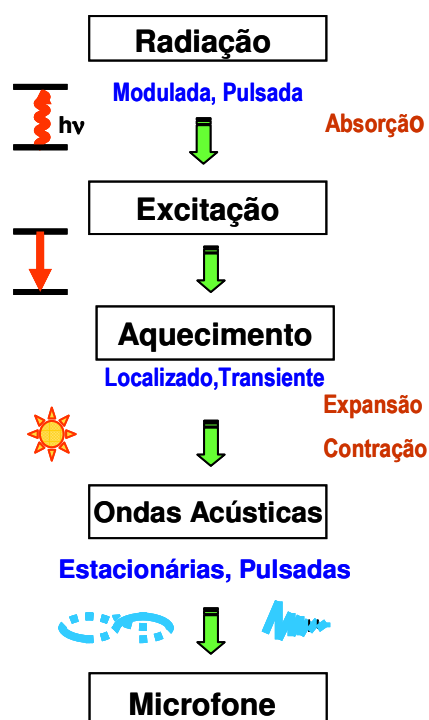


Figura 21. Geração do sinal fotoacústico em amostras gasosas.

A faixa de comprimento de onda escolhida para a realização dos estudos espectroscópicos em moléculas de gás se situa na região do infravermelho médio, entre 3 a 15 μm , onde as moléculas absorvem radiação e são excitadas em seus níveis roto-vibracionais. [22] As moléculas excitadas em seus níveis roto-vibracionais poderão sofrer dois tipos de decaimento: radiativo e não-radiativo. Como o tempo de decaimento não-radiativo (10^{-6} a 10^{-9} s) é bem inferior ao tempo de decaimento radiativo (10^{-1} a 10^{-3} s) na região do infravermelho, o primeiro acaba sendo predominante no processo de desexcitação das moléculas gasosas. O decaimento não-radiativo se dá através de colisões entre as moléculas de gás, gerando um aquecimento na amostra.

Um aspecto fundamental na análise do fenômeno fotoacústico é o fato de que a radiação incidente na amostra é sempre modulada. Em alguns casos, mecanicamente, utilizando-se um chopper; em outros casos, a modulação é elétrica. Em decorrência da modulação, o aquecimento gerado na amostra é periódico. Sendo realizado a volume constante, esse aquecimento periódico irá

gerar na amostra uma onda de pressão. Essa onda de pressão, ou onda acústica, será detectada por microfones presentes na célula fotoacústica, transformada em sinal elétrico e enviada a um amplificador *lock-in*.

A densidade de energia por unidade de volume gerado na amostra pode ser obtida por meio da relação:

$$H(r, t) = N\sigma I_0 e^{i\omega t} \quad (11)$$

onde N é a densidade total de moléculas, σ é a seção de choque de absorção das moléculas gasosas, I_0 é a intensidade da radiação e ω é a frequência angular de modulação da radiação incidente. [127]

A onda de pressão gerada pode ser relacionada ao aquecimento da amostra através da relação:

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} p(r, t) - v^2 \nabla^2 p(r, t) = (\gamma - 1) \frac{\partial}{\partial t} H(r, t) \quad (12)$$

onde v representa a velocidade do som, γ é o coeficiente adiabático do gás e H, a densidade de calor depositada no gás pela absorção da luz.

A onda de pressão, ou seja, a onda acústica é gerada nas localidades onde a luz é absorvida pelas espécies monitoradas. O sinal fotoacústico de uma amostra monocomponente pode ser calculado através de:

$$S(\lambda) = CP(\lambda)Nc\sigma(\lambda) \quad (13)$$

onde C é a constante da célula, P é a potência emitida pelo laser no comprimento de onda escolhido, N é a densidade total de moléculas, σ é a seção de choque de absorção das moléculas gasosas e c é a fração molar do gás absorvedor (concentração gás), que desejamos detectar. [127]

Utilizando a expressão supracitada, é possível determinar a fração molar mínima detectável do gás com o espectrômetro fotoacústico, através de:

$$c_{min} = \frac{S_{min}}{NCP\sigma} \quad (14)$$

onde S_{min} é o sinal mínimo para um gás não-absorvedor inerte (normalmente o sinal do ruído eletrônico).

Podemos observar que o sinal é obtido em função de um determinado comprimento de onda específico para a molécula que desejamos detectar. Observamos ainda que o sinal obtido é diretamente proporcional à concentração do gás. Dessa forma, é possível obter a concentração em função do sinal gerado.

Para uma amostra multicomponente, onde se deseja determinar a concentração de diferentes espécies gasosas, o sinal fotoacústico pode ser obtido em função de diferentes comprimentos de onda, correspondentes à absorção de cada componente a ser analisado. Nesse caso, o sinal pode ser obtido pela relação:

$$S(\lambda_i) = CP(\lambda_i)N \sum_{j=1}^n c_j \sigma_{ij} \quad (15)$$

com $i = 1, 2, \dots, m$ e $j = 1, 2, \dots, n$ e $m \geq n$.

Nessa situação, o índice i representa as linhas de emissão do laser para cada gás j da amostra. A solução dessa equação para a concentração de cada espécie gasosa é dada por:

$$c_j = \frac{1}{CN} \sum_{i=1}^m (\sigma_{ij})^{-1} \left(\frac{S_i}{P_i} \right), \quad (16)$$

onde $(\sigma_{ij})^{-1}$ é a matriz inversa da matriz (σ_{ij}) .

A constante C da célula depende da geometria da célula, das condições da medida, da frequência de modulação e das características do microfone. Para algumas medidas, em que as células são usadas como ressonadores acústicos, os modos longitudinal, radial e azimutal naturalmente melhoram o parâmetro C da

célula em determinadas frequências, onde o sinal se torna bem maior do que em operações não-ressonantes. [143] A constante da célula C pode ser expressa como:

$$C = \frac{(\gamma - 1)GLQ}{\omega_1 V} R_{mic} p(r_{mic}), \quad (17)$$

onde γ é o coeficiente adiabático do gás, L e V são respectivamente o comprimento e o volume da célula fotoacústica ressonante, G é a integral de acoplamento entre o feixe de excitação e os modos de ressonância acústicos da célula, $p(r_{mic})$ é a distribuição de pressão, R_{mic} é a sensibilidade do microfone (em milivolts por pascal) e Q é fator de qualidade da ressonância, que pode ser calculado por:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}, \quad (18)$$

onde f_0 é frequência de ressonância e Δf representa o perfil normalizado de ressonância a meia-largura.

2.5. Laser de Cascata Quântica

O princípio de funcionamento que originou os Lasers de Cascata Quântica foram concebidos durante a década de 70. [156,157]. No entanto, somente no ano de 1994, os Lasers de Cascata Quântica puderam ser utilizados pela primeira vez por Faist et al. [158]

Entre suas vantagens, destacamos que os Lasers de Cascata Quântica podem ser operados em temperatura próxima a temperatura ambiente, fornecendo alta seletividade e sensibilidade. Além disso, são dispositivos compactos e

robustos, com emissão contínua e alta resolução espectral, podendo ser utilizados em medidas em tempo real. [159-161]

Os Lasers de Cascata Quântica podem ser fabricados para operar em ampla faixa de comprimentos de onda, de 3 μm a 24 μm . Entre suas aplicações, destacamos o monitoramento ambiental, industrial e de controle de processos, além de aplicações químicas e biomédicas. [162]

O Laser de Cascata Quântica acoplado a um detector fotoacústico tem sido utilizado com sucesso para medir a concentração de diferentes gases que absorvem radiação na faixa do infravermelho médio, como o ozônio [155], a amônia [154], além dos gases NO_2 e N_2O . [161]

Esse tipo de laser faz parte da família dos lasers semicondutores, com a particularidade de usar transições quânticas dentro de uma mesma banda. Um Laser de Cascata Quântica compreende uma série de camadas finas de diferentes materiais. Tal configuração permite que sejam criados diferentes barreiras de potenciais elétricos em todo o dispositivo, de modo que os elétrons podem ficar aprisionados nessas regiões, chamadas de poços quânticos. Dessa maneira, são criadas dentro da banda de condução, uma série de subbandas com energias diferentes. (figura 22)

Quando estimulados, os elétrons sofrem transições e tunelam para uma subbanda de menor energia e, então, fótons são emitidos. Um mesmo elétron pode realizar várias transições, ou seja, emitir vários fótons. [160]

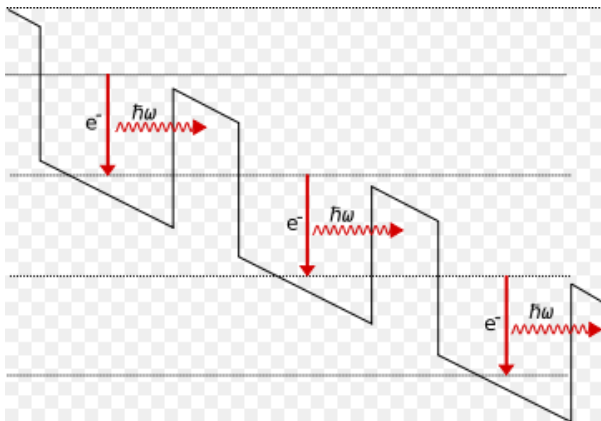


Figura 22. Tunelamento de elétrons através dos poços quânticos presentes na banda de condução de um laser de cascata quântica.

Uma outra característica muito importante dos Lasers de Cascata Quântica é que o comprimento de onda pode ser monitorado pela espessura das camadas dos materiais, ao invés de serem determinadas pela diferença de energia entre as bandas. A escolha de diferentes temperaturas faz variar a espessura do material pelo efeito de dilatação térmica, fazendo com que o tamanho dos poços também seja alterado. Alterando-se o tamanho dos poços, é possível fazer a variação do comprimento de onda emitido pelo Laser, de modo que esse parâmetro está associado à escolha da temperatura. [163]

O Laser de Cascata Quântica que utilizamos em nosso experimento (Alpes Laser) é do modelo #sb745 e emite radiação na faixa de comprimentos de onda entre 7687 nm até 7798 nm.

2.6. Analisadores eletroquímicos

As técnicas eletroquímicas constituem poderosas ferramentas na detecção de espécies gasosas, especialmente por causa de algumas características vantajosas como a elevada sensibilidade das determinações, portabilidade, facilidade de automação, possibilidade de miniaturização e baixo custo. [164]

Os sensores eletroquímicos foram inicialmente utilizados com o simples objetivo de monitorar níveis de oxigênio. Com o avanço das técnicas utilizadas na construção destes dispositivos, no entanto, eles ficaram menores, mais leves e mais seletivos, se tornando capazes de detectar outros gases. Atualmente, uma grande variedade de sensores eletroquímicos está sendo utilizada na detecção gasosa com inúmeras aplicações, dentre as quais, destacamos a aplicação ambiental. [165]

Um sensor eletroquímico é constituído por um eletrodo de detecção, um eletrodo reagente, um eletrodo auxiliar e um eletrólito inserido entre os eletrodos. Além disso, uma barreira permeável ao gás, também conhecida como membrana hidrofóbica deve recobrir o eletrodo de detecção do sensor a fim de evitar a entrada de água e gases indesejados, além de controlar a quantidade de

moléculas gasosas que alcançam a superfície do eletrodo, conforme ilustra a figura 23.

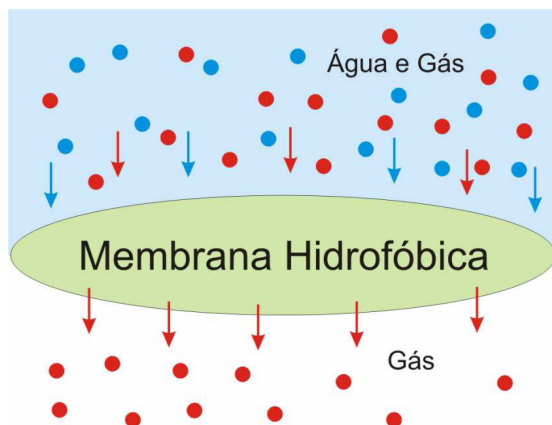


Figura 23. Membrana Hidrofóbica. [166]

Quando o gás penetra no sensor, irá reagir com o eletrodo reagente e, posteriormente, com o eletrodo auxiliar sofrendo processos de oxirredução. Como os eletrodos estão interconectados a um resistor, será gerada uma corrente elétrica entre o catodo e o anodo. A corrente gerada será proporcional à concentração de gás. [165,166]

Na figura 24, representamos o esquema de detecção de um sensor eletroquímico.

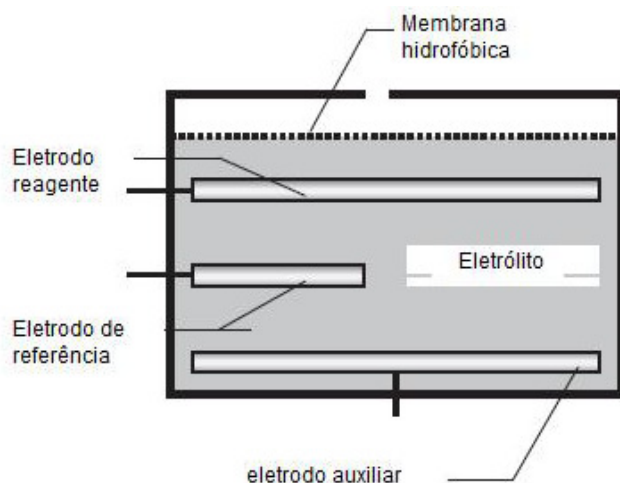
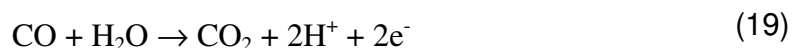


Figura 24. Esquema de um sensor eletroquímico típico. [165]

A escolha do material que constitui o eletrodo depende do tipo de gás a ser detectado. Normalmente são escolhidos os metais nobres, como ouro ou platina. A função do eletrólito é facilitar a reação e transportar a carga iônica eficazmente através dos eletrodos. Para melhor entendermos as reações que ocorrem nos eletrodos, daremos como exemplo o caso da detecção do monóxido de carbono (CO). No eletrodo reagente (anodo), a reação de oxidação do CO pode ser representada por:



Já no eletrodo auxiliar (catodo), com o auxílio de moléculas de oxigênio, observamos a reação de redução, representada por:



As reações de oxidação e redução que ocorrem nos eletrodos são responsáveis pela geração da corrente elétrica através do resistor, o que permite determinar a concentração do gás a ser analisado.

CAPÍTULO 3. MODELOS GEOMÉTRICOS: ENERGIA, ECOLOGIA E ECONOMIA

3.1. Modelo de Células Triangulares Sustentáveis

A proposta de substituir gradativamente a utilização de combustíveis fósseis por biocombustíveis, como o etanol, é interessante por possibilitar uma mitigação do fenômeno do aquecimento global. No entanto, notamos que, no ciclo produtivo do etanol, também são gerados vários impactos que afetam direta e indiretamente a economia e o ambiente.

Se analisarmos a geração de energia a partir de qualquer tipo de fonte, renovável ou não, “limpa” ou não, notaremos que impactos ambientais estarão sempre presentes em uma ou mais etapas da produção energética. Os impactos terão diferentes graduações para as diferentes fontes de energia, mas não é possível ainda anulá-los por completo. Notamos, portanto, que os conceitos de Energia e Ecologia estão intimamente conectados.

Além disso, a escolha de uma determinada fonte energética sempre passa pelo crivo da economia. Não basta que uma fonte seja ecologicamente viável, mas é preciso também que a fonte energética seja economicamente viável. Além disso, a elevada demanda energética, que tem afetado diretamente o ambiente, está associada ao sistema econômico vigente, onde é preciso produzir e consumir cada vez mais para manter o sistema em funcionamento. Dessa forma, notamos que o conceito de Economia também está conectado com os conceitos de Energia e Ecologia. Segundo o economista Jeremy Rifkin, na sociedade atual, as questões energética, ambiental e econômica estão interconectadas e não podem ser solucionadas separadamente, formando o que ele chama de tripla armadilha. [25,26]

A partir dessa constatação, Sthel e Tostes [27] desenvolveram o conceito de Células Triangulares Sustentáveis, onde utilizam uma figura geométrica simples, o triângulo, para representar a indissociabilidade desses três conceitos. Em cada vértice do triângulo, podemos colocar a letra E, que representa os conceitos de Energia, Ecologia e Economia. No centro geométrico de cada

triângulo é colocado um ponto, que representa um indivíduo qualquer da sociedade atual. O indivíduo ocupa o centro da célula triangular, por ser o principal causador do problemas ecológicos e ambientais, pois é um consumidor de recursos naturais, particularmente de energia, além de comandar os sistemas produtivos, isto é a economia. Por fim, a área do triângulo corresponde à “pegada ecológica” do indivíduo. As Células Triangulares Sustentáveis representam um sistema aberto, isto é, que troca energia e matéria com o meio, representando assim um complexo acoplamento humano com um sistemas naturais. [27]

No atual estágio da sociedade humana, a célula será representada como um triângulo escaleno, indicando a assimetria (conflitos) destes conceitos na atualidade. (figura 23) Há ainda três setas que partem do centro de cada uma das arestas do triângulo, convergindo em direção ao seu ponto central, o indivíduo. O sentido das setas representa um consumo de recursos naturais e de energia altamente individualizado, tal como sugere as cartilhas neoliberais (sociedade capitalista atual).

No modelo atual de sociedade, existe uma forte tendência de que a a área deste triângulo aumente de forma progressiva, através do aumento da pegada ecológica individual, e conseqüentemente, de toda a sociedade. Gera-se, assim, um afastamento dos vértices do triângulo (3E) e conseqüentemente um incremento da assimetria destes conceitos, levando-se desse modo a uma situação de insustentabilidade ambiental crescente. [27]

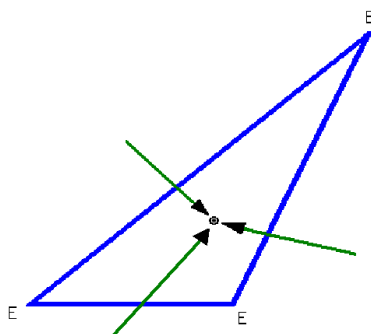


Figura 25. Representação de um indivíduo da sociedade contemporânea (triângulo escaleno) [27]

Entre os indivíduos da sociedade contemporânea, existe um consumo per capita de recursos naturais extremamente diferenciado, o que nos leva a uma situação de extrema complexidade social. [28,167] Dessa forma, o modelo de Células Triangulares Sustentáveis é um modelo complexo. A inexistência da inseparabilidade entre os três conceitos (energia, economia, ecologia) faz com que eles se realimentem entre si, formando assim, laços cíclicos, onde há intensa troca de matéria e energia com o ambiente, traço característico de um sistema aberto, complexo e dinâmico [168-170]. Para representarmos os indivíduos da sociedade atual, teremos uma infinidade de triângulos escalenos, devido a variabilidade de suas áreas, associadas às questões sociais, econômicas e culturais de qualquer indivíduo desta sociedade. Sendo assim, os padrões triangulares escalenos, células complexas, representam uma descrição caótica da valorização do individual na atualidade. [27]

Numa tentativa de tornar as relações sociedade-ambiente as mais harmoniosas e sustentáveis possíveis, um novo triângulo deve ser proposto, o triângulo equilátero. Neste triângulo, a relação de Energia, Ecologia e Economia seria simétrica. A efetivação desse processo depende de uma grande conscientização individual dos limites de exploração dos recursos do planeta, via o conceito sustentabilidade, o que implicaria numa possível redução da área deste triângulo, diminuição da pegada ecológica individual, em relação ao triângulo escaleno que o gerou (figura 26).

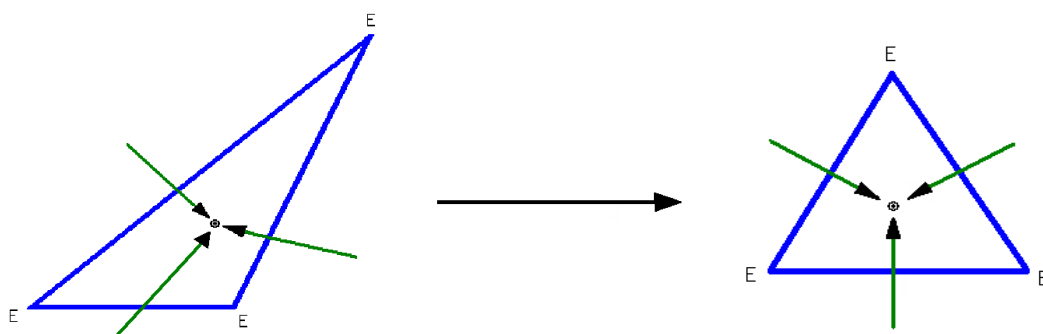


Figura 26. Transformação do triângulo escaleno em triângulo equilátero, através de ações de sustentabilidade propostas dentro da matriz econômica capitalista. [27]

Porém, mesmo com a simetria do triângulo através da aplicabilidade dos conceitos “sustentáveis”, a direção destas setas continuaria dirigida para o próprio indivíduo, indicando uma valorização do consumo individualizado de recursos naturais. Ainda que esse consumo se dê de forma mais consciente do que na situação atual, isso não é garantia de uma redução significativa da pegada ecológica individual. A medida que as demandas individuais se tornam maiores e mais complexas, é possível que haja um aumento na área do triângulo, apesar das ações de sustentabilidade.

Sendo assim, um grande desafio para a humanidade seria inverter o sentido destas setas (figura 27), através da criação de novos paradigmas culturais. Nesta nova representação, o indivíduo passaria a utilizar soluções coletivas (partilha de recursos naturais) para resolver as questões ambientais. Dessa forma, o indivíduo não estaria isolado, como na representação anterior (seta para dentro), mas conectado ao meio e a outros indivíduos. Ao compartilhar recursos naturais, o consumo total desses recursos seria reduzido. Desta forma, a área do triângulo equilátero seria reduzida (figura 27), em função da diminuição da pegada ecológica individual e de toda a comunidade. Como exemplo, podemos citar a utilização do transporte coletivo em substituição do transporte individual, que acarretaria uma redução significativa no consumo energético e na emissão de poluentes atmosféricos.

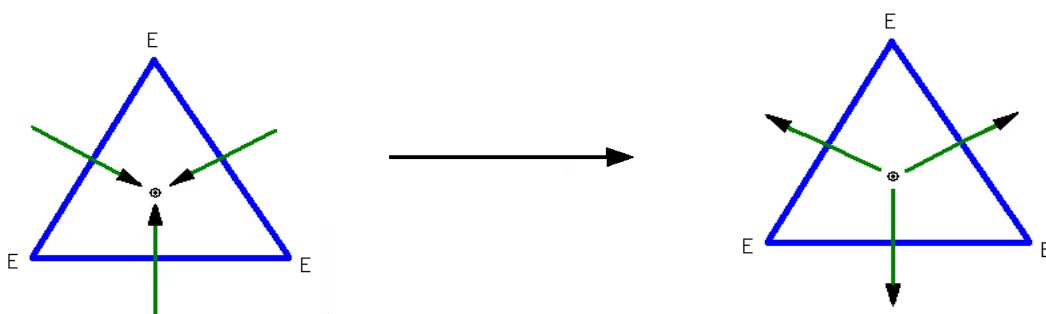


Figura 27. Inversão dos sentidos das setas no triângulo equilátero a partir da implementação de um novo paradigma de sustentabilidade. [27]

Quando invertemos as setas “para fora”, podemos ainda acoplar geometricamente triângulos equiláteros. Dessa forma, unindo-se seis triângulos

equiláteros (indivíduos), poderemos formar um padrão (de rede) do tipo hexágono regular (figura 28). Trata-se de um padrão, no qual as relações entre os membros da comunidade ecológica não são lineares, envolvendo múltiplos laços de realimentação. Fortalecer a comunidade significa fortalecer as relações entre os indivíduos (cooperação). Com o conceito de inversão das setas, é possível construir a estrutura hexagonal regular (figura 28), que pode ser acoplada a outras estruturas semelhantes a ela. Gera-se então um modelo de um sistema social sustentável que continua a trocar energia e matéria com o seu meio, ou seja, é estruturalmente aberto, mas possui um padrão de crescimento em rede, ou seja, fechado. Dessa forma, o sistema desenvolvido é um sistema auto-organizado. [170] Da estrutura caótica do modelo atual de triângulos assimétricos escalenos individualizados, pode-se gerar ordem, através de uma mudança não determinista no paradigma cultural, que leve a emergência de um novo sistema auto-organizado.

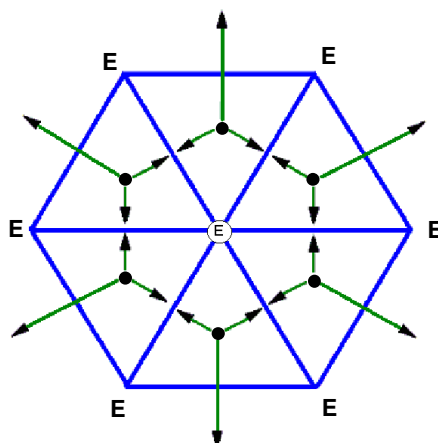


Figura 28. Estrutura hexagonal regular: compartilhando recursos naturais (cooperação). [27]

De fato, a representação das setas para fora indica a capacidade de mantermos a interdependência entre os indivíduos que compõem o conjunto de hexágonos regulares, formando assim uma estrutura em rede, que partilhe recursos e serviços ambientais de forma sustentável. Como exemplo da vida natural, temos a complexidade [164,165] de um grande cardume de peixes, que

se auto organiza, para se defender dos predadores. Neste modelo, utiliza-se também o conceito de inteligência coletiva. [171-172]

Consideramos neste modelo que o compartilhamento de recursos naturais nos leva a uma redução da pegada ecológica desta comunidade regular hexagonal; isto conseqüentemente nos leva numa redução da área total do hexágono, que será menor que a soma das áreas dos respectivos triângulos eqüiláteros individuais que o geraram. Isto ocorre porque a formação do hexágono é um fenômeno coletivo [173], onde, por uma possível mudança do paradigma cultural, poderíamos repactuar o uso de recursos naturais de forma racional (a ser decidida por cada comunidade). Como exemplo, podemos citar o uso de energias renováveis, o transporte coletivo, programas de eficiência energética, programas de reciclagem, eficiência na utilização de recursos hídricos, uso sustentável da terra e um rígido controle da poluição.

3.2. Proposta de mitigação das emissões individuais de CO₂ até o ano de 2030.

Em 2009, Chakravarty et al. [29] propôs um novo conceito de mitigação das emissões globais de CO₂, levando em conta as emissões diferenciadas das nações e dos indivíduos. O modelo propõe taxas de redução de emissão diferentes para as diferentes nações, ao contrário do que propõe o Tratado de Kyoto, por exemplo.

Esta nova proposta utiliza os dados da distribuição de renda nos países para estimar como as emissões de CO₂ estão distribuídas entre os seus cidadãos. Dessa forma, é possível compreender como se dá a distribuição global da emissão de CO₂. Neste modelo, todos os indivíduos considerados como os principais emissores de CO₂ do mundo são tratados de forma igual, independentemente de onde eles vivem. [29]

A partir de então, são traçadas metas para reduzir as emissões globais de CO₂ até o ano de 2030. Segundo as estimativas apresentadas no trabalho [29], em 2030, a taxa de emissão global de CO₂ deverá ser de 43 GtCO₂/ano se as atuais

políticas mitigatórias forem mantidas. O trabalho propõe que, em 2030, a taxa de emissão global de CO₂ seja reduzida para um valor aproximado de 30GtCO₂/ano, o que representa uma redução de aproximadamente 30% no valor previsto.

Chakravarty et al. classifica como maiores emissores os indivíduos que possuem taxa de emissão individual anual acima de 10,8 tCO₂/ano. Estes estão distribuídos em quatro regiões do globo: os Estados Unidos da América, os países que compõe a OCDE, excluindo os Estados Unidos, a China e os países que não compõe a OCDE, excluindo a China. Para alcançar as metas de mitigação nas emissões globais de CO₂, os maiores emissores deveriam reduzir a taxa de emissão individual para valores abaixo de 10,8 tCO₂/ano, não importando se eles vivem nos Estados Unidos, no Brasil ou na China. Conseqüentemente, as taxas de redução também seriam diferenciadas entre os países. Por exemplo, nos Estados Unidos, 285 milhões de pessoas emitem mais de 10,8 tCO₂/ano, enquanto no Brasil, esse número é reduzido para 13 milhões de pessoas. Isso significa que os Estados Unidos teriam que reduzir em torno de 60% de suas emissões de CO₂ e o Brasil deveria reduzir em torno de 4%. Globalmente, segundo as estimativas do trabalho, haveria 1,13 bilhões de indivíduos considerados como maiores emissores, que deveriam participar do esforço de reduzir suas emissões para valores abaixo de 10,8 tCO₂/ano.

Outra proposta inovadora do trabalho foi estabelecer um limite inferior de emissões individuais. A princípio, estabeleceu-se o valor 1 tCO₂/ano. Em 2030, estima-se que haja 2,7 bilhões de pessoas abaixo desse limite, o que corresponde a quase um terço da população mundial estimada. Em sua maioria, esses indivíduos morariam em países pobres com renda per capita baixíssima. O artigo defende que essa população tenha o direito de aumentar o consumo individual de CO₂ para valores a partir de 1 tCO₂/ano. Dessa forma, essa população não seria privada de aumentar minimamente o seu consumo de combustíveis fósseis, como por exemplo, a utilização de motores a diesel para garantir necessidades básicas, como iluminação, abastecimento de água, preparação de alimentos, etc.

O artigo propõe ainda um outro modelo de divisão entre os maiores e menores emissores. Nessa segunda proposta, o limite superior de emissão de

CO₂ seria reduzido para 9,6 tCO₂/ano. Com essa redução, 1,3 bilhões de pessoas seriam incluídas no grupo de maiores emissores, devendo participar do esforço de mitigar as emissões de CO₂ em seus países. Essa redução permitiria que os menores emissores pudessem emitir um pouco mais. O limite inferior de emissão de CO₂ subiria para 1,5 tCO₂/ano. Esse aumento promoveria uma melhoria na qualidade de vida desses indivíduos, que poderiam consumir um pouco mais de combustíveis fósseis.

Dessa forma, a nova metodologia propõe que alguns países reduzam as suas emissões de CO₂ de maneira diferenciada entre os seus indivíduos. Em contrapartida, alguns países da África, por exemplo, poderiam aumentar suas emissões nos limites estabelecidos, de forma que o desenvolvimento humano nesses países não seria cerceado.

3.3. Aplicação do Modelo de Células Triangulares Sustentáveis à proposta de Chakravarty et al.

No modelo de células triangulares sustentáveis [27], representamos a área do triângulo como a pegada ecológica de cada indivíduo. Como aproximadamente 50% dessa pegada ecológica se refere ao consumo de energia [174], existe uma proporcionalidade entre a pegada ecológica e a pegada energética do indivíduo. Dessa forma, é possível adotar o modelo de células triangulares sustentáveis, considerando a área do triângulo como a pegada energética individual, sem modificar a geometria proposta por Stiel e Tostes.

A partir dessas considerações, o conceito de células triangulares sustentáveis pode ser à proposta de Chakravarty et al. [29], uma vez que esta também é aplicada a um indivíduo, que é avaliado por sua renda (economia) e emissão de CO₂ (ecologia) a partir da utilização de combustíveis fósseis (energia).

Vimos que, a partir do modelo de células triangulares sustentáveis, é possível construir uma estrutura hexagonal regular através do acoplamento de triângulos equiláteros. Se essas estruturas hexagonais regulares forem acopladas

(figura 2.a), é possível construir uma pirâmide de base hexagonal regular (figura 2b). O ponto geratriz dessa pirâmide representa as sociedades como a pegada ecológica mínima, como as sociedades primitivas da África (Hazda) ou índios isolados na Amazônia. O aumento da pegada ecológica começa a partir deste ponto original, onde outros indivíduos são agrupados para completar a estratificação da pirâmide hexagonal e a pegada ecológica máxima seria representada no topo da pirâmide. Desta maneira, é possível imaginar uma distribuição dinâmica de toda a população nesta grande pirâmide hexagonal.

Estima-se que a população mundial seja de aproximadamente 7 bilhões de pessoas nos dias de hoje. É possível inserir toda essa população na estrutura da pirâmide hexagonal regular, usando como critério a pegada ecológica individual. (figura 29) Os indivíduos seriam, dessa forma, distribuídos desde a mínima pegada ecológica (ponto geratriz) até a máxima pegada ecológica (base superior da pirâmide).

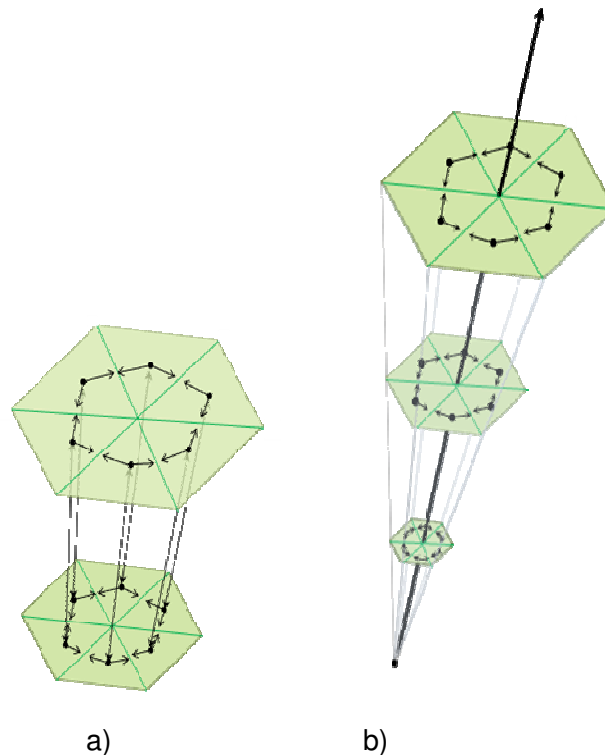


Figura 29.a) Acoplamento de hexágonos regulares, formando uma estrutura piramidal. b) Pirâmide hexagonal regular. [28]

Propomos aqui que, a partir da tridimensionalização do conceito de comunidades regulares hexagonais, seja construída uma pirâmide hexagonal regular (base hexagonal), que englobe cada indivíduo da sociedade moderna, afim de alcançar os padrões propostos por Chakravarty et al. [29] até o ano de 2030. [28] Dessa forma, o setor superior da pirâmide representaria os maiores emissores (emissão superior a 10,8 tCO₂/ano) e o setor inferior da pirâmide representaria os menores emissores (emissões inferior a 1,0 tCO₂/ano). De acordo com as estimativas, 1,13 bilhões de pessoas estariam ocupando o setor superior da pirâmide, 4,27 bilhões de pessoas ocupariam o setor intermediário e 2,7 bilhões de pessoas ocupariam o setor inferior da pirâmide (figura 30).

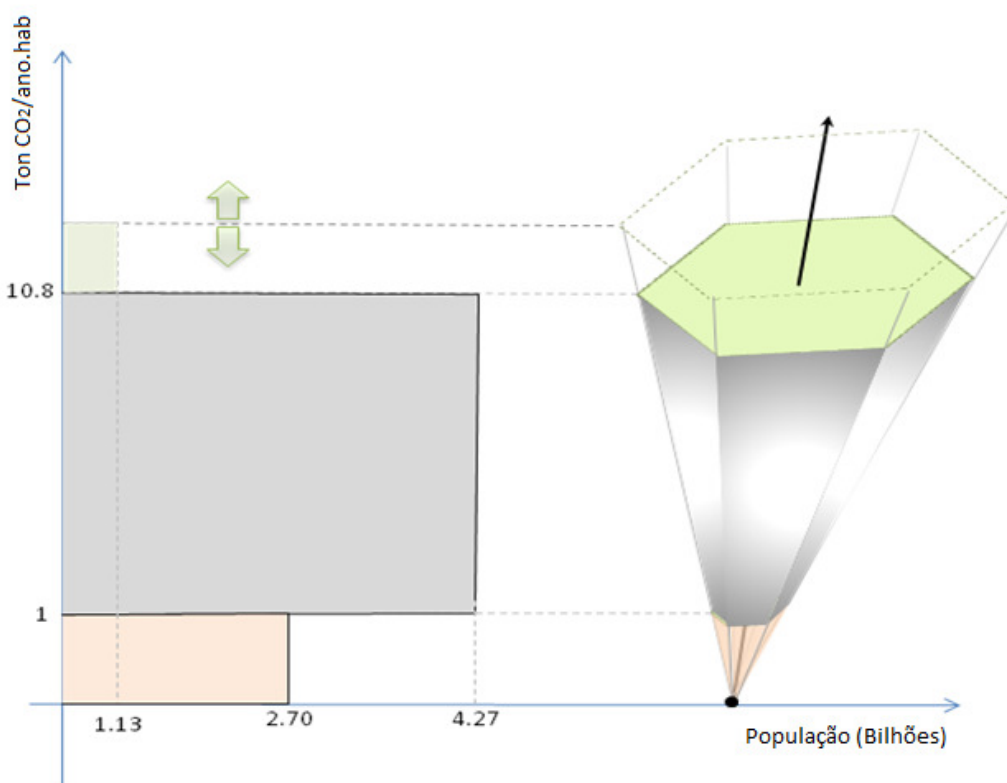


Figura 30. Pirâmide Regular Hexagonal representando a distribuição da população a partir da pegada ecológica dos indivíduos com limite superior de emissão de 10,8 tCO₂/ano e limite inferior de emissão de 1 tCO₂/ano para uma estimativa populacional de 8,1 bilhões de pessoas em 2030. [28]

Podemos utilizar o mesmo modelo, considerando-se a segunda proposta apresentada pelo mesmo artigo, na qual o limite superior de emissão de CO₂ seria reduzido para 9,6 tCO₂/ano e o limite inferior seria elevado para 1,5 tCO₂/ano (figura 31).

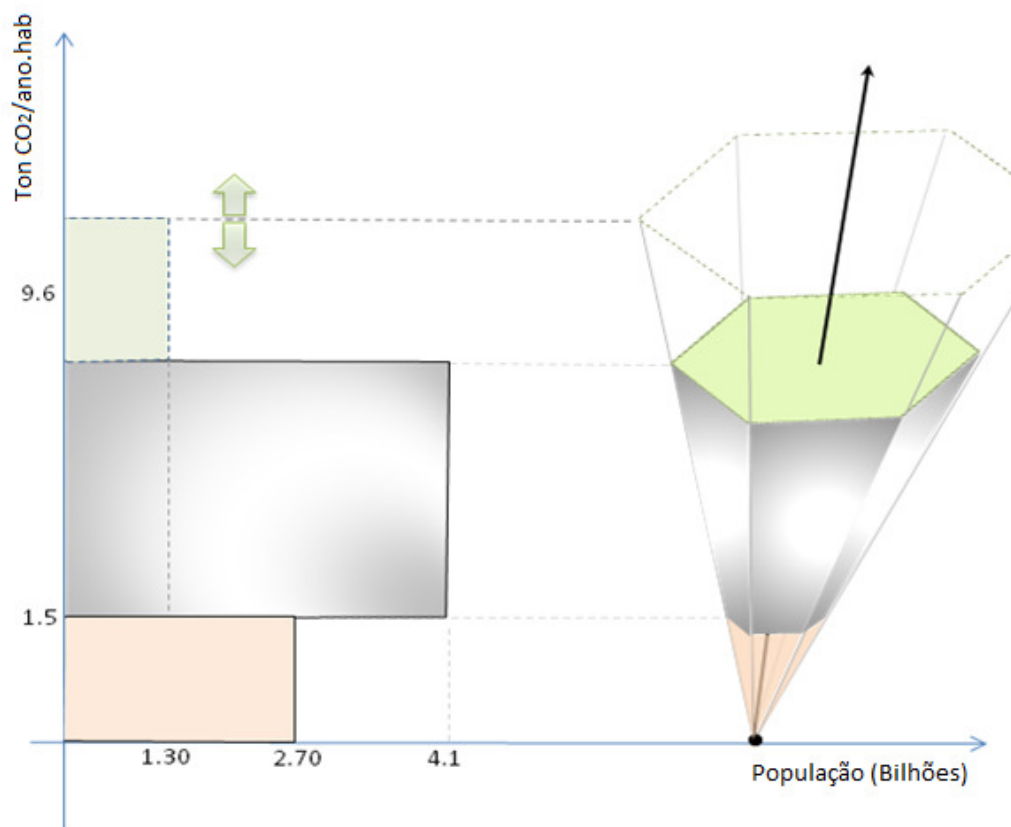


Figura 31. Pirâmide Regual Hexagonal representando a distribuição da população a partir da pegada ecológica dos indivíduos com limite superior de emissão de 9,6 tCO₂/ano e limite inferior de emissão de 1,5 tCO₂/ano para uma estimativa populacional de 8,1 bilhões de pessoas em 2030. [30]

Para garantir que a população mais pobre tenha direito a condições adequadas de moradia, abastecimento de energia elétrica, água, alimentação e transporte adequados, é necessário que haja um esforço de redução de emissões, em especial por parte dos principais emissores.

Para esse fim, soluções tecnológicas devem estar associadas a soluções não tecnológicas. Como soluções tecnológicas, podemos citar a busca de alternativas energéticas mais limpas e eficientes, a ampliação na utilização de combustíveis renováveis, energia hidráulica, eólica, solar e nuclear, além do

desenvolvimento dos veículos híbridos, reduzindo a dependências dos combustíveis fósseis. As soluções tecnológicas, no entanto, devem estar associadas a uma série de soluções não tecnológicas, como mudanças no estilo de vida, nos padrões de consumo, políticas públicas que estimulem a utilização do transporte coletivo, transporte não motorizado (bicicletas e caminhadas), entre outros. Essas soluções estão atreladas a uma mudança intensa no paradigma cultural da sociedade, visando a um melhor compartilhamento de recursos naturais, em uma organização social que se assemelha àquela representada pela pirâmide hexagonal regular. Portanto, as soluções baseadas no conceito de inteligência coletiva (cooperação humana) facilitariam a redução nas emissões de poluentes, tornando possível atingir a meta de emissões globais de CO₂ até 2030.

CAPÍTULO 4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao laser de CO₂

O arranjo experimental que será utilizado na medição do gás etileno (VOCs precursor do ozônio troposférico) é constituído basicamente de um laser de CO₂ como fonte de excitação, um *chopper*, uma célula fotoacústica ressonante com oito microfones, fluxômetros, um analisador de espectro, um medidor de potência, o amplificador *lock-in* e o computador, para aquisição de dados. A montagem pode ser observada na figura 30:

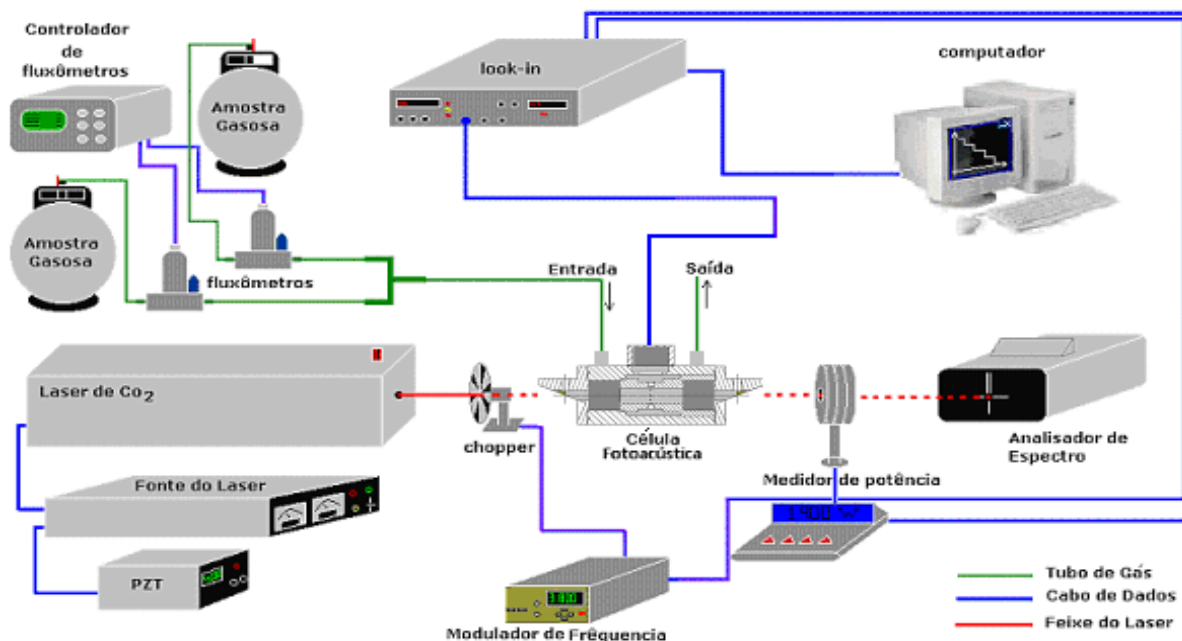


Figura 32. Esquema da montagem experimental do espectrômetro fotoacústico acoplado ao laser de CO₂.

A radiação emitida pelo laser é modulada mecanicamente através de um *chopper* (New Focus, 3605), cuja frequência pode ser variada entre 100Hz e 6kHz. Utilizamos uma célula fotoacústica ressonante, com oito microfones (Knowles EK – series) simetricamente dispostos ao longo do anel central do tubo ressonante. O tubo possui 67 mm de comprimento e 18 mm de diâmetro, localizado entre dois

tampões acústicos. A célula (figura 33) possui também aberturas para a entrada e a saída da amostra gasosa.

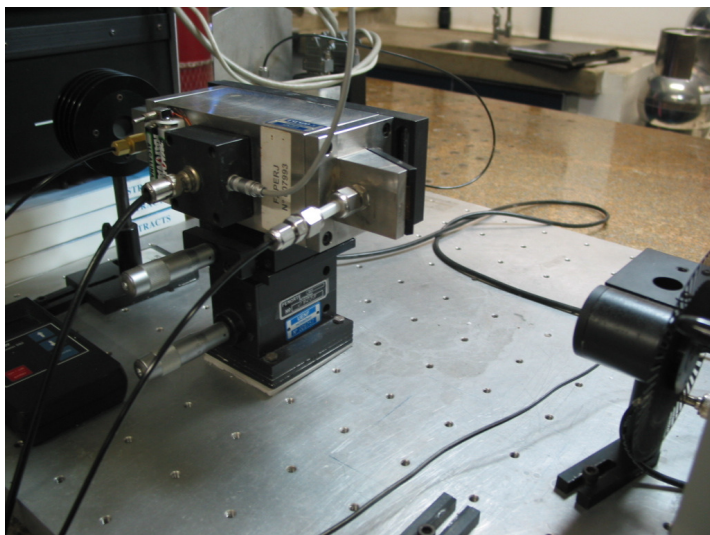


Figura 33. Foto da célula fotoacústica ressonante.

A amostra absorve a radiação modulada pelo laser, gerando um sinal acústico, que é captado e pré-amplificado pelos microfones, convertido em sinal elétrico, sendo, em seguida, enviado ao amplificador *lock-in* (Stanford Research Systems, SR 850). O sinal elétrico é detectado e filtrado no amplificador *lock-in*, onde também ocorre a amplificação e processamento do sinal em amplitude e fase.

O analisador de espectros (Macken Instruments, Inc. Modelo 16 A) tem o papel de verificar se a linha espectral emitida pelo laser coincide com o comprimento de onda desejado na medição. O medidor de potência (Orion TH, Ophir Optronics, Inc.) nos permite acompanhar a potência emitida pelo laser, além de possibilitar a normalização do sinal fotoacústico.

Os fluxômetros (Brooks) auxiliam no controle do fluxo da amostra gasosa através da célula, variando de 0L/h a 5L/h, com passos de 0,005L/h.

4.2. Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica

O arranjo experimental utilizado para a detecção do gás N_2O (figura 34) é constituído basicamente de uma fonte de corrente contínua, um gerador de pulsos, uma chave distribuidora, um Laser de Cascata Quântica (Alpes Laser - modelo #sb745) como fonte de excitação, uma célula fotoacústica diferencial, uma lente convergente, fluxômetros, um medidor de potência, o amplificador *lock-in* e o computador, para aquisição de dados.

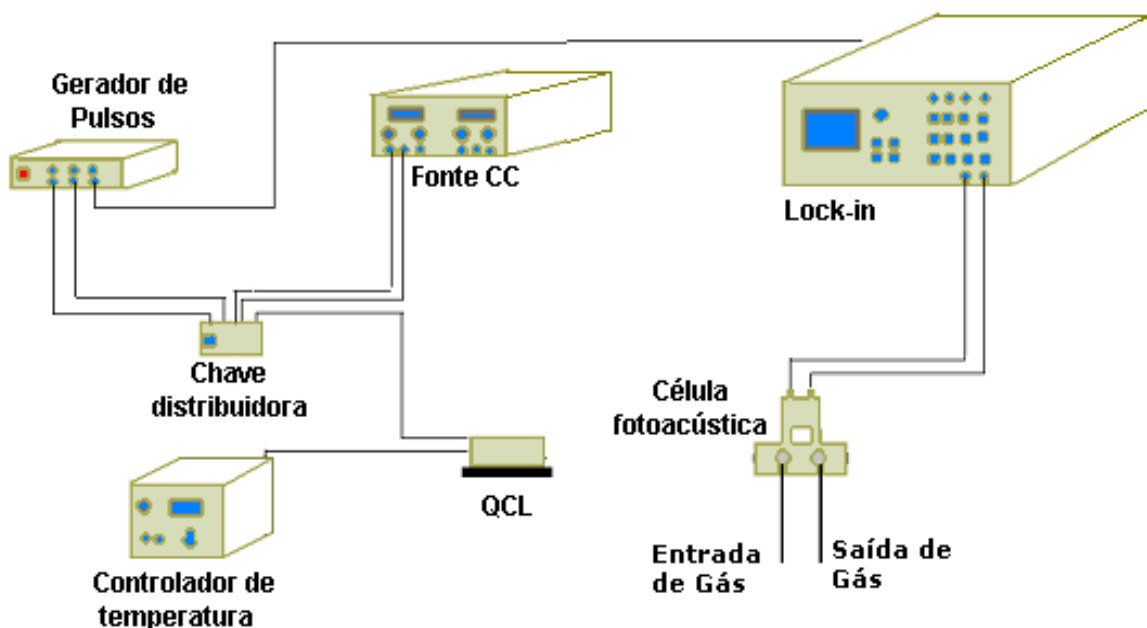


Figura 34. Esquema da montagem experimental do espectrômetro fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica.

A fonte de corrente contínua (Tektronics – modelo PS280 DC Power supply) é utilizada na alimentação e operação do diodo laser. Ela é conectada, através da chave distribuidora, com o gerador de pulsos. Através do Gerador de Pulsos (LPG 128-T), podemos determinar o tempo de duração do pulso do Laser e seu tempo de descanso. Alguns parâmetros podem ser monitorados através de um osciloscópio. Quando ligamos a fonte e o gerador de pulsos ao Laser de Cascata Quântica, uma radiação eletronicamente pulsada é gerada. Com o auxílio de

lentes convergentes, essa radiação é focalizada no interior da célula fotoacústica diferencial.

A célula fotoacústica diferencial (figura 35) foi projetada de modo a garantir alta sensibilidade e baixo nível de ruídos eletrônicos e acústicos. [127]. Tal célula possui dois tubos ressonantes cilíndricos com comprimento de 4 cm e diâmetro de 5,5 mm, dispostos paralelamente. Cada tubo possui um microfone sensível (Knowles 3029) com propriedade e resposta praticamente idêntica. Nessa célula, o fluxo da amostra gasosa passa pelos dois tubos ressonantes, mas o feixe de Laser passa apenas por um deles. Dessa forma, o ruído e o sinal de fundo são igualmente detectados nos dois microfones, enquanto o sinal fotoacústico é gerado apenas no microfone colocado no tubo ressonante pelo qual atravessa o Laser. Assim, fazendo-se a subtração dos sinais detectados pelos dois microfones, obtém-se uma significativa supressão dos ruídos e do sinal de fundo e, portanto, um aumento na sensibilidade.

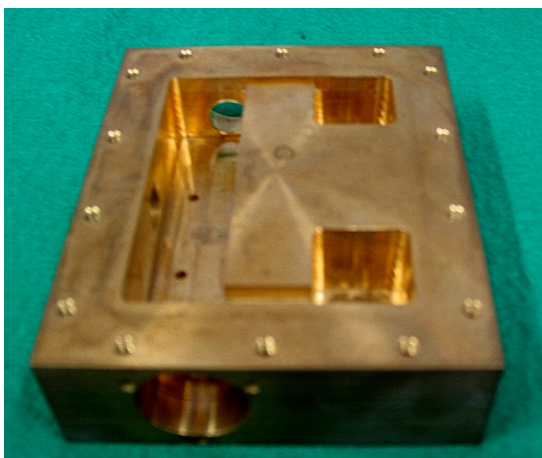


Figura 35. Foto da célula fotoacústica diferencial.

A célula possui duas aberturas: para a entrada e para a saída do gás a ser analisado. O fluxo desse gás é devidamente controlado através de fluxômetros (Brooks Instruments). A foto do arranjo experimental é mostrada na figura 36.

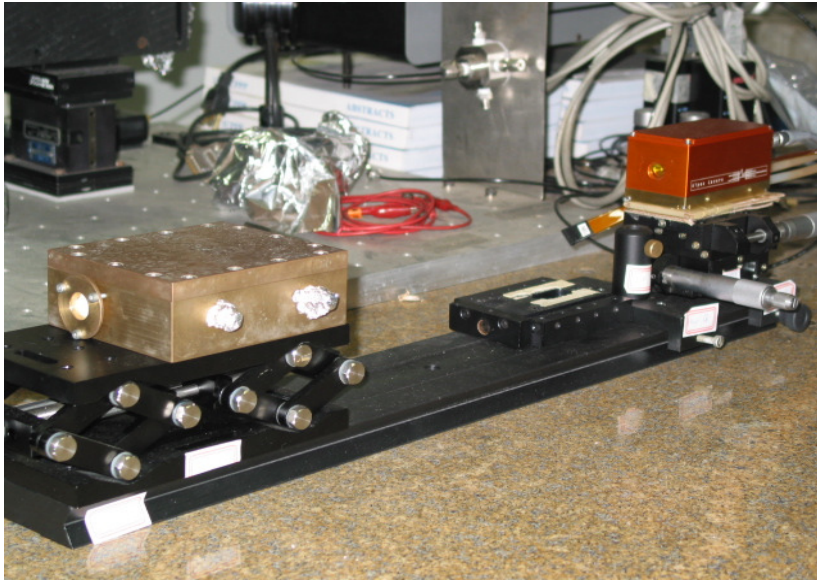


Figura 36. Foto da montagem experimental do Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica.

A amostra no interior da célula absorve a radiação emitida pelo Laser, gerando um sinal acústico, que é captado e pré-amplificado pelos microfones, convertido em sinal elétrico, sendo, em seguida, enviado ao amplificador *lock-in* (Stanford Research Systems, SR 850), onde o sinal é detectado, filtrado e processado em amplitude e fase.

Outro elemento de grande importância nessa montagem é o controlador de temperatura (TC-51) que, associado a um banho térmico, permite que o diodo opere em diferentes temperaturas. A escolha da temperatura está associada à escolha do comprimento de onda desejado.

4.3. Analisador Eletroquímico TEMPEST

O Analisador eletroquímico TEMPEST 100 (Telegan TP20729 Monitoramento de Gás) é composto de sensores eletroquímicos (Citycell Gold Class) capazes de medir simultaneamente, por meio de um sistema distribuidor, a concentração de óxidos de nitrogênio (0 a 1.000 ppmV), monóxido de carbono (0 a

10.000 ppmV) e dióxido de enxofre (0 a 2.000 ppmV). A calibração da TEMPEST 100 é realizada anualmente pela empresa Confor Instrumentos (São Paulo-SP), utilizando gases certificados (Gama Gases ou Air Products), obtendo uma incerteza de ± 5 ppmV. A sonda do Analisador TEMPEST 100 tem 2,5 metros e é capaz de suportar uma temperatura de até 700°C. Essa sonda permite a obtenção de medidas diretas em chaminés e escapamentos de veículos, por exemplo. Na figura 37, podemos observar uma foto do Analisador Eletroquímico TEMPEST e a sua sonda.



Figura 37. Analisador Eletroquímico TEMPEST 100.

4.4. Procedimento de Coleta

Para realizar as medidas com os Espectrômetros Fotoacústicos, é necessário realizar a coleta do gás a ser analisado. Para coletar os gases, utilizamos recipientes metálicos revestidos internamente de *teflon*, denominados *canisters*. Esses recipientes, mostrados na figura 38.a), são previamente evacuados e, por diferença de pressão, os gases são captados para o seu interior.

Para retirar os gases do *canister*, utilizamos uma bomba pneumática do coletor AVOCS (Ambient Volatile Organic Canister Sample ou Coletor Orgânico Volátil de Amostras Ambiente), que bombeia os gases coletados para os nossos sistemas de detecção. A bomba AVOCS é apresentada na figura 38.b).



Figura 38. a) Foto do canister

b) Foto da bomba coletora AVOCs

CAPÍTULO 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Avaliação da emissão de etileno em veículos movidos a etanol

Para realizar a detecção da concentração de etileno em veículos movidos a etanol, primeiramente foi realizada uma calibração do Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de CO₂. Essa calibração foi realizada utilizando-se uma mistura certificada de 1,1 ppmV de etileno em nitrogênio e nitrogênio. Realizou-se uma diluição do etileno em nitrogênio até que fosse alcançada a mínima concentração que pudemos detectar. A partir daí, foi possível traçar uma curva de calibração relacionando o sinal fotoacústico normalizado e a concentração do gás etileno. Pudemos observar uma dependência linear entre o sinal fotoacústico e a concentração do gás etileno, como era esperado. Pôde-se também alcançar um limite inferior de detecção de 16 ppbV. Tais medidas demonstraram um excelente desempenho da célula fotoacústica, com baixo ruído eletrônico (menos de 40µV) e uma grande estabilidade na sua frequência de ressonância (2400Hz). (MOTHÉ et al., 2010)

Após a calibração do Espectrômetro acoplado ao Laser de CO₂, pudemos medir a concentração de etileno na exaustão de oito veículos movidos a etanol na faixa de ppmV (figura 39). Essas medidas foram realizadas em dois modos de operação do motor: baixa rotação (rotação do motor em torno de 1000 rpm) e alta rotação (rotação do motor em torno de 3000 rpm). Esses veículos são identificados na tabela 10 (marca, ano de fabricação e potência do motor).

Tabela 10. Veículos movidos a etanol utilizados para detecção de etileno.

	Veículos
1	Corsa 2005 1.8
2	Fiat Idea 2006 1.4
3	Fiesta 2007 1.0
4	Siena 2007 1.8
5	Honda Fit 2008 1.4
6	Fiat Uno 2009 1.0
7	Celta 2010 1.0
8	Vectra 2010 2.0

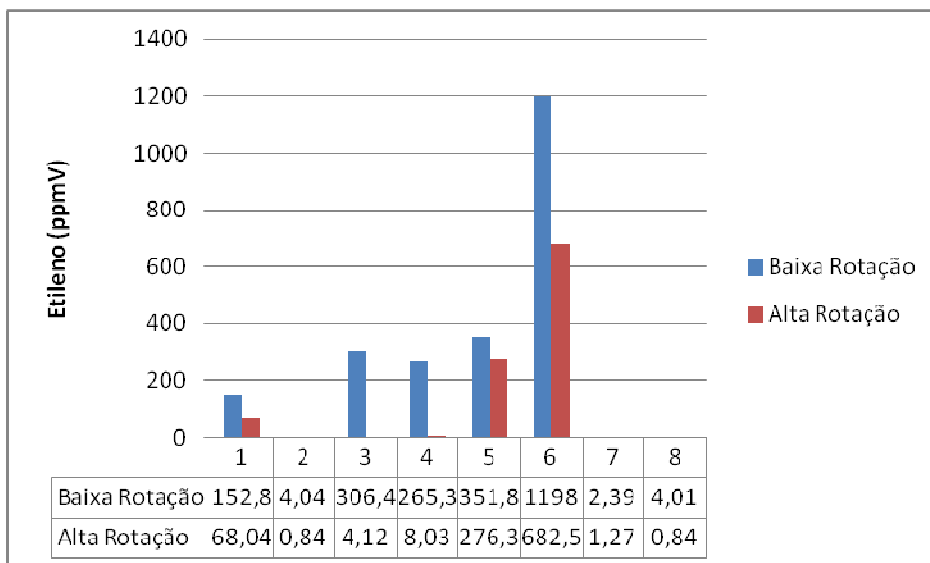


Figura 39. Concentração de etileno na exaustão de veículos movidos a etanol.

Pôde-se notar que, para todos os veículos, a emissão de etileno foi maior no modo de baixa rotação. Esse comportamento é justificado, uma vez que, nesse modo de operação, a temperatura da câmara de combustão é menor, de modo que há maior ocorrência de combustão incompleta. Podemos observar também que os veículos mais novos (7 e 8) têm a menor emissão de etileno, juntamente com o veículo 3, um pouco mais antigo.

Com objetivo de comprovar de maneira definitiva a presença de etileno em nossas amostras, utilizamos o Espectrômetro Fotoacústico acoplado ao Laser de Cascata Quântica. A principal vantagem da utilização do Laser de Cascata Quântica na determinação de determinado composto em nossa amostra é que esse Laser é capaz de emitir continuamente em uma faixa de comprimentos de onda, através da variação contínua da temperatura do diodo. Nesse caso, o Laser de Cascata Quântica utilizado permite uma varredura entre os números de onda compreendidos entre 940 e 952 cm^{-1} . Dessa forma, é possível determinar o espectro de absorção do gás etileno. Primeiramente, o espectro fotoacústico do etileno foi determinado utilizando-se uma mistura certificada de 5 ppmV de etileno diluído em nitrogênio. (Figura 40.a). O resultado obtido pode ser comparado ao

espectro teórico obtido na base de dados do HITRAN de um mol de etileno (Figura 40.b).

A seguir, realizamos a mesma medida em amostras de um veículo movido a etanol (Fiat Idea 2006) nos modos não acelerado (Figura 40.c) e acelerado (Figura 40.d). A concordância entre os espectros obtidos a partir de uma mistura certificada de etileno, a partir da base de dados e a partir de nossas amostras experimentais são fortes evidências que asseguram a presença do gás etileno na exaustão dos veículos movidos a etanol. Várias linhas de absorção podem ser reconhecidas no espectro fotoacústico. O resultado é importante pois, embora já tenha sido detectado em veículos movidos a gasolina e a diesel, é a primeira vez que o etileno é detectado em veículos movidos a etanol.

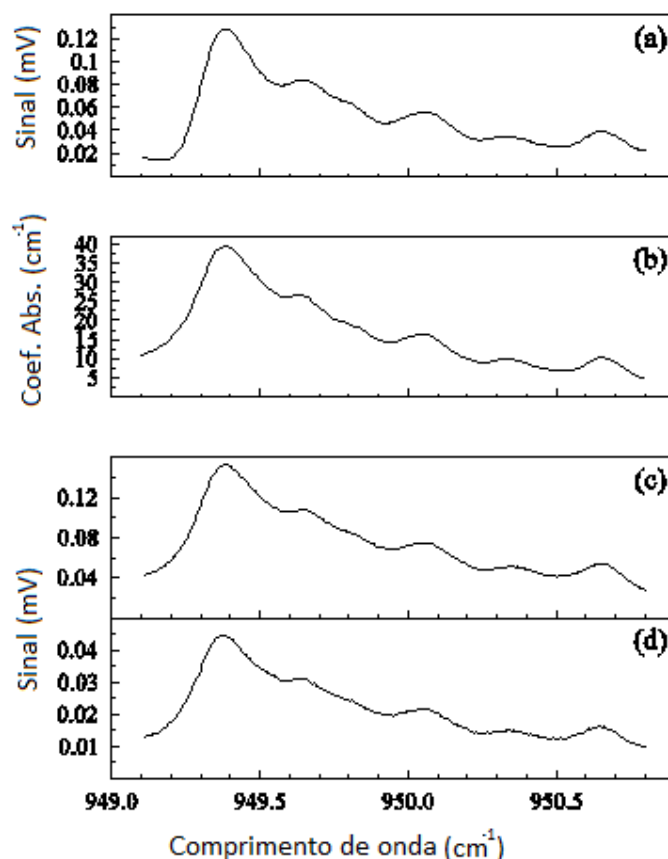


Figure 40.a) Espectro Fotoacústico de uma mistura certificada de 5 ppmV de etileno diluído em nitrogênio. b) Espectro obtido a partir da base de dados HITRAN de 1 mol de etileno a 25 °C e 1 atm. Espectro fotoacústico do etileno emitido em uma veículo movido a etanol nos modos: c) não acelerado e d) acelerado.

5.2. Avaliação da emissão de CO, NO_x e SO₂ em motocicletas flex

Para avaliar a emissão de poluentes em motocicletas flex, utilizamos o Analisador Tempest 100, que possibilitou a detecção de CO, NO_x e SO₂. O objetivo dessas medidas foi avaliar a emissão dos poluentes em motocicletas novas utilizando diferentes percentuais de etanol e gasohol em cada modelo de motocicleta. É importante destacar que a gasolina brasileira (gasohol) já possui em sua composição em torno de 20% de etanol.

Primeiramente, coletamos as amostras na exaustão de cinco motocicletas flex novas do modelo Honda Fan (150 cc). A tabela 11 apresenta os percentuais de gasolina e etanol nas motocicletas analisadas.

Tabela 11. Motocicletas flex do modelo Honda Fan.

	Marca	CC	Modelo	Ano de Fabricação	Gasohol	Etanol
1	HONDA	150	FAN	2012	100%	0
2	HONDA	150	FAN	2012	75%	25%
3	HONDA	150	FAN	2012	50%	50%
4	HONDA	150	FAN	2012	25%	75%
5	HONDA	150	FAN	2012	0	100%

A figura 41 apresenta a emissão de CO nas motocicletas listadas na tabela 11 nos modos de operação acelerado e não acelerado. Podemos observar que, para todas as motocicletas analisadas, a emissão de CO foi maior no modo não acelerado. Isso é justificado, uma vez que no modo não acelerado, a temperatura de combustão é menor, possibilitando que haja maior índice de combustão incompleta, que gera como subproduto o CO. Além disso, verificamos também que as motocicletas abastecidas com etanol e gasolina emitiram maior quantidade de CO do que as motocicletas abastecidas somente com gasohol (veículo 1) e somente com etanol (veículo 5).

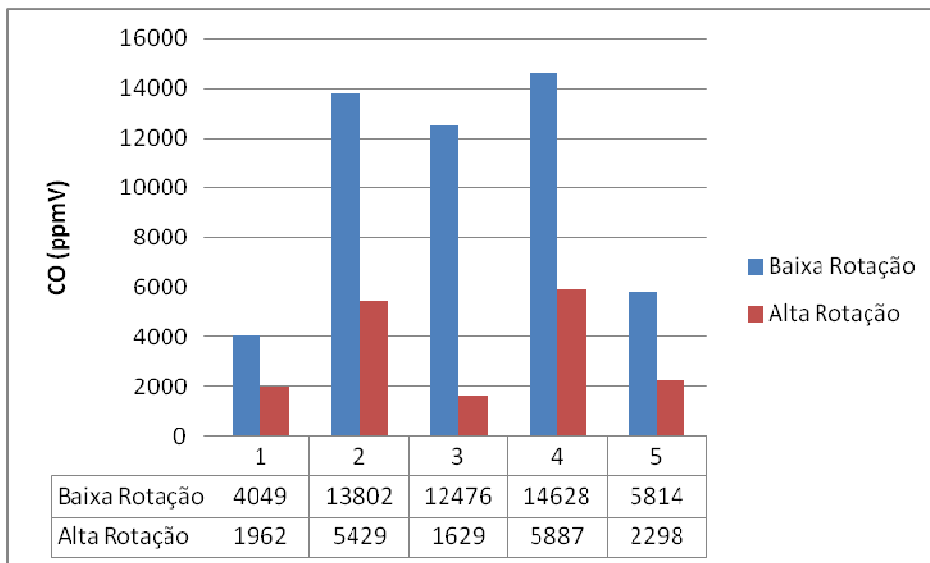


Figura 41. Emissão de CO nas motocicletas Honda Fan 150 CC.

A figura 42 apresenta a emissão de NO_x das motocicletas listadas na tabela 11 nos modos de operação acelerado e não acelerado. Podemos observar que a emissão de NO_x , na maior parte das motocicletas, foi maior para o modo de alta rotação. A emissão de NO_x pode estar relacionada com a oxidação do nitrogênio atmosférico a temperaturas elevadas. Dessa forma, como no modo de alta rotação, espera-se que a temperatura na câmara de combustão esteja maior, justificando a maior concentração do gás. Analisando a emissão desse gás, especificamente, as motocicletas com misturas de etanol e gasohol apresentaram menor valor de emissão que as abastecidas com combustível puro, ao contrário do que ocorreu com o CO.

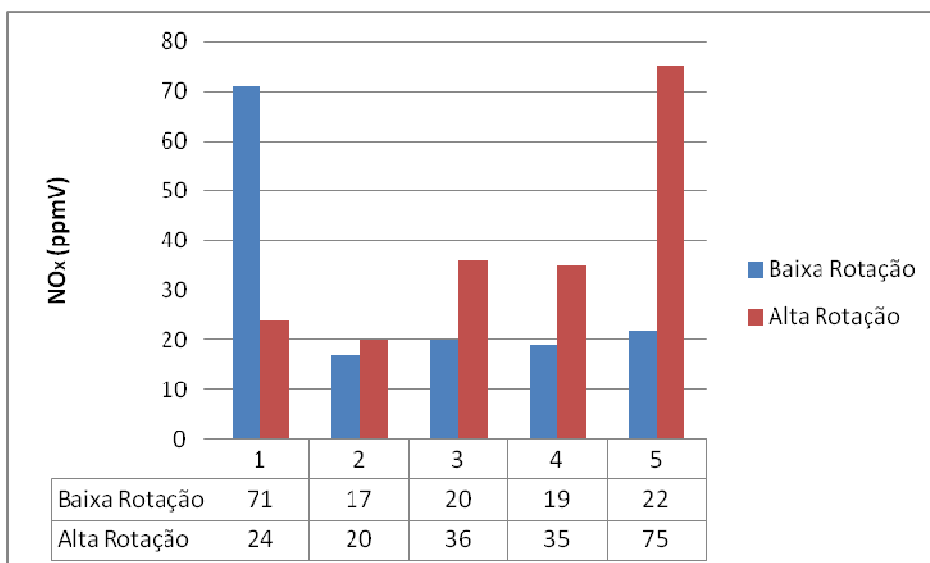


Figura 42. Emissão de NO_x nas motocicletas Honda Fan 150CC.

A figura 43 apresenta as emissões do gás SO₂ nas motocicletas listadas na tabela 11. Podemos notar que a emissão de SO₂, na maior parte das motocicletas, foi maior no modo de baixa rotação. Esperávamos encontrar maior emissão de SO₂ nas motocicletas com maiores percentuais de gasolina, já que em sua composição, podemos encontrar o enxofre. No entanto, o gás foi emitido em todas as motocicletas, inclusive na motocicleta 5, abastecida unicamente com etanol. Uma possível justificativa para a emissão de SO₂ na motocicleta abastecida com etanol, que não contém enxofre em sua composição, é a presença de óleo de lubrificação nas válvulas de admissão e escape. Esse óleo pode adentrar a câmara de combustão, sendo queimado juntamente com o combustível e provocando a emissão do gás.

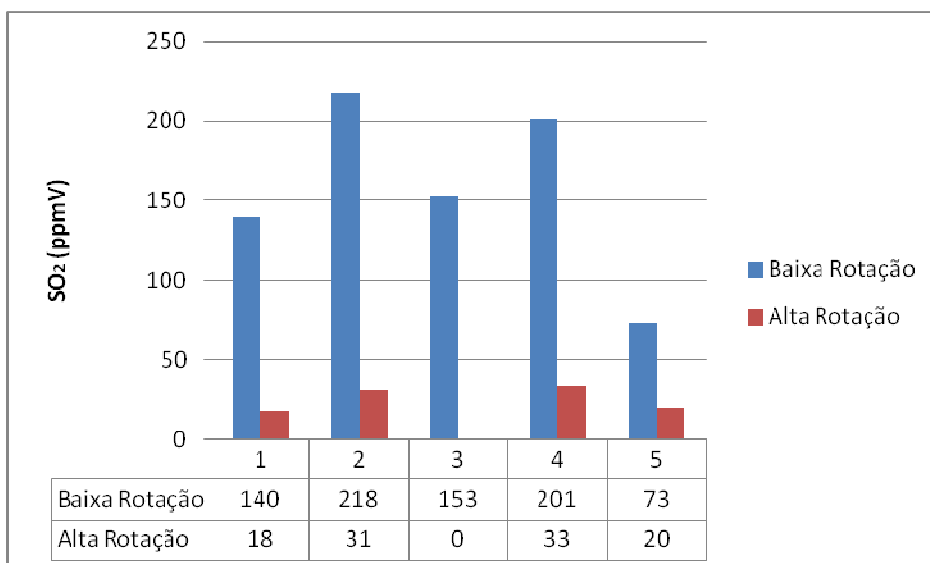


Figura 43. Emissão de SO₂ nas motocicletas Honda Fan 150CC.

Realizamos as mesmas medidas para um outro grupo de motocicletas novas, do modelo Honda Broz (150 CC), listadas na tabela 12.

Tabela 12. Motocicletas flex do modelo Honda Broz.

	Marca	CC	Modelo	Ano de Fabricação	Gasohol	Etanol
1	HONDA	150	BROZ	2012	100%	0
2	HONDA	150	BROZ	2012	75%	25%
3	HONDA	150	BROZ	2012	50%	50%
4	HONDA	150	BROZ	2012	25%	75%
5	HONDA	150	BROZ	2012	0	100%

Na figura 44, apresentamos a emissão de CO das motocicletas Honda Broz. Podemos notar que no modo de baixa rotação, a emissão de CO é mais elevada, conforme observamos na análise das motocicletas do modelo Honda Fan. Para esse grupo, podemos observar que as motocicletas 1 e 2, abastecidas com maior percentual de gasolina, têm emissão mais elevada que as motocicletas abastecidas com maior percentual de etanol. A motocicleta que apresentou menor

emissão, contudo, foi a motocicleta 3, que possui 50% de etanol e 50% de gasohol.

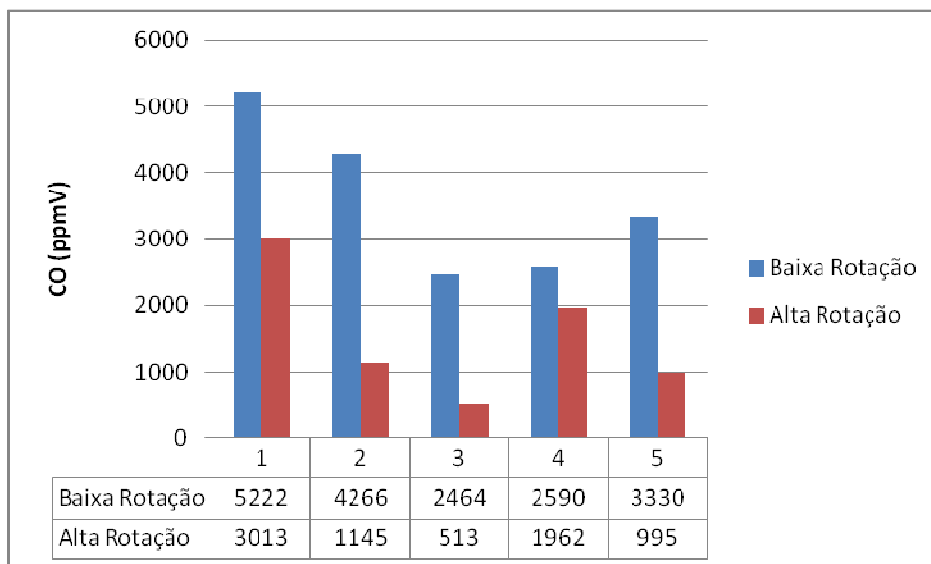


Figura 44. Emissão de CO nas motocicletas Honda Broz 150CC.

A figura 45 ilustra a concentração de NO_x nas motocicletas que listadas na tabela 12. O padrão de maior emissão no modo acelerado não foi apresentado nesse conjunto de motocicletas. Podemos notar também que as motocicletas 1 e 2, abastecidas com maior percentual de gasolina, emitiram mais NO_x que as demais. Não foi possível detectar a presença do NO_x nas motocicletas 3 e 5 e n modo do acelerado da motocicleta 4, embora o gás possa estar presente em concentrações na faixa de ppbV.

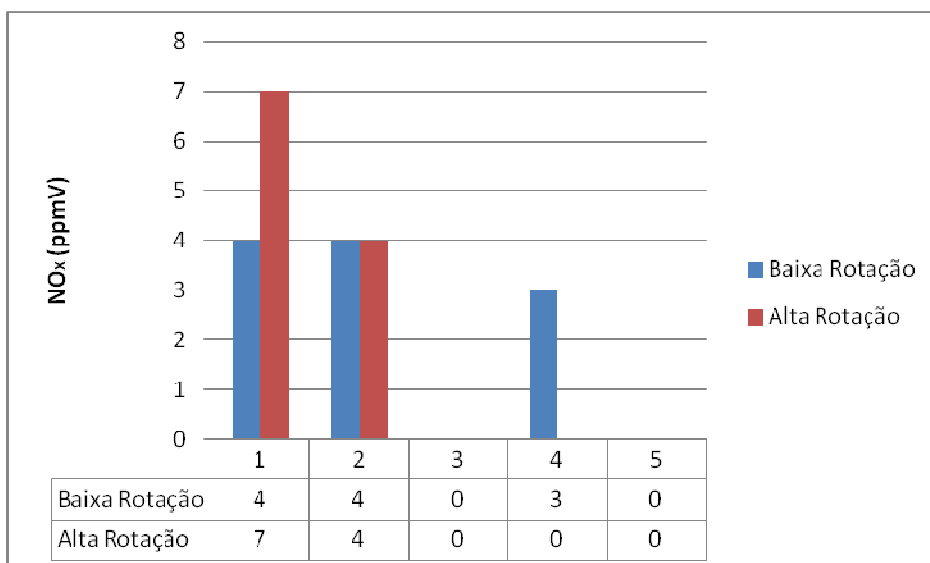


Figura 45. Emissão de NO_x nas motocicletas Honda Broz 150CC.

Na figura 46, podemos observar a concentração de SO₂ emitido pelas motocicletas Honda Broz. A emissão de SO₂ foi maior no modo de baixa rotação, como pudemos observar também na avaliação das motocicletas Honda Fan. As motos abastecidas com maior percentual de gasolina (1 e 2) apresentaram novamente emissão mais elevada que as demais. Novamente, a motocicleta 3, com mesmo percentual de gasolina e etanol, apresentou um resultado de emissão menor do que as demais motocicletas. Dessa forma, avaliando este modelo (Honda Broz), motocicletas abastecidas com uma mistura de 50% de etanol e 50% de gasolina demonstraram melhores resultados na emissão de poluentes (CO, NO_x e SO₂).

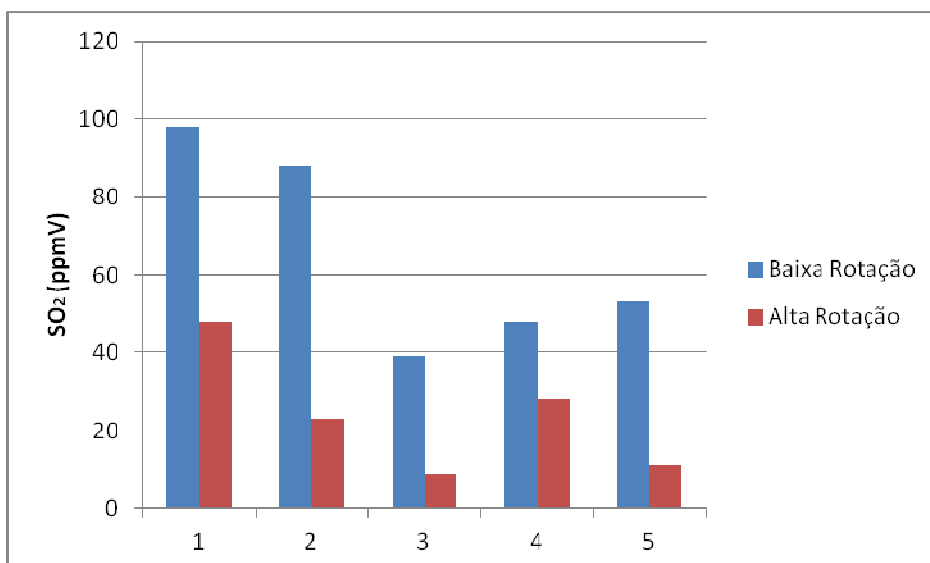


Figura 46. Emissão de SO₂ nas motocicletas Honda Broz 150CC.

A seguir, realizamos as mesmas medidas com outro grupo de motocicletas, do modelo Honda Biz (125 CC), presentes na tabela 13:

Tabela 13. Motocicletas flex do modelo Honda Biz.

	Marca	CC	Modelo	Ano de Fabricação	Gasohol	Etanol
1	HONDA	150	BIZ	2012	100%	0
2	HONDA	150	BIZ	2012	75%	25%
3	HONDA	150	BIZ	2012	50%	50%
4	HONDA	150	BIZ	2012	25%	75%
5	HONDA	150	BIZ	2012	0	100%

Observando a figura 47, podemos notar que a emissão de CO foi maior para as motocicletas em regime baixa rotação, com exceção da motocicleta 5, que apresentou comportamento anômalo relação às demais. É possível notar também uma tendência na redução de emissão de CO para as motocicletas abastecidas com maior quantidade de etanol, embora a partir da motocicleta 3, os valores de emissão no modo acelerado sejam crescentes.

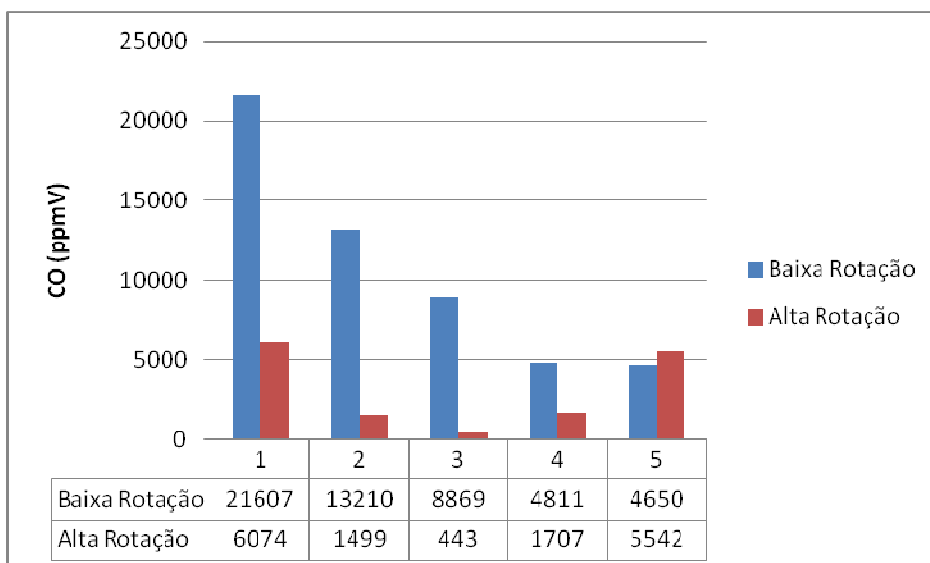


Figura 47. Emissão de CO nas motocicletas Honda Biz 120CC.

Observando a figura 48, podemos notar que a emissão de NO_x , em geral, foi maior no modo de baixa rotação, com exceção da motocicleta 1. Observa-se que as motocicletas Honda Biz abastecidas com maior quantidade de etanol apresentaram menor emissão de NO_x do que as motocicletas abastecidas com maior quantidade de gasolina (1 e 2). Este resultado é similar ao resultado de emissão nas motocicletas Honda Broz, onde a emissão de NO_x também foi inferior nas motocicletas abastecidas com maiores percentuais de etanol. Neste caso, no entanto, diferentemente do que pudemos observar com as motocicletas Honda Fan, a emissão do gás foi maior, para as motocicletas abastecidas com qualquer percentual de etanol no modo de operação não acelerado. Isso pode ter ocorrido porque para este modelo de motocicleta, as primeiras amostras foram coletadas no modo de operação não acelerado, onde a maior parte de oxigênio presente no etanol combustível pode ter sido consumida, formando NO_x . No modo acelerado, portanto, com menor disponibilidade de oxigênio, a emissão de NO_x foi menor.

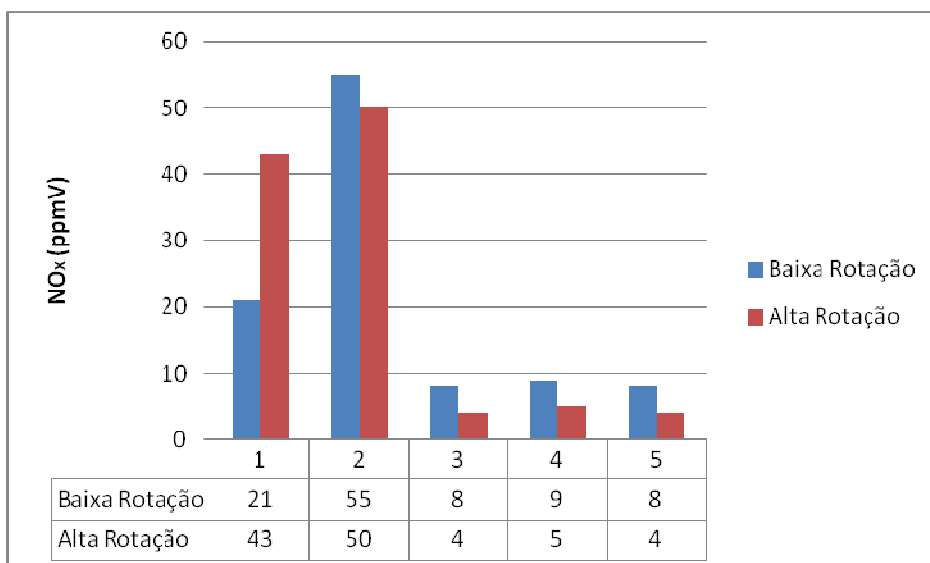


Figura 48. Emissão de NO_x nas motocicletas Honda Biz 125 CC.

Por fim, observando a figura 49, notamos que a emissão de SO₂ também foi maior, na maior parte das motocicletas, durante o modo de baixa rotação do motor, excetuando a motocicleta 5, resultado semelhante ao apresentado pelas motocicletas do modelo Fan e Broz. A motocicleta 1, movida exclusivamente a gasohol apresentou um valor elevado de emissão do gás no modo de baixa rotação.

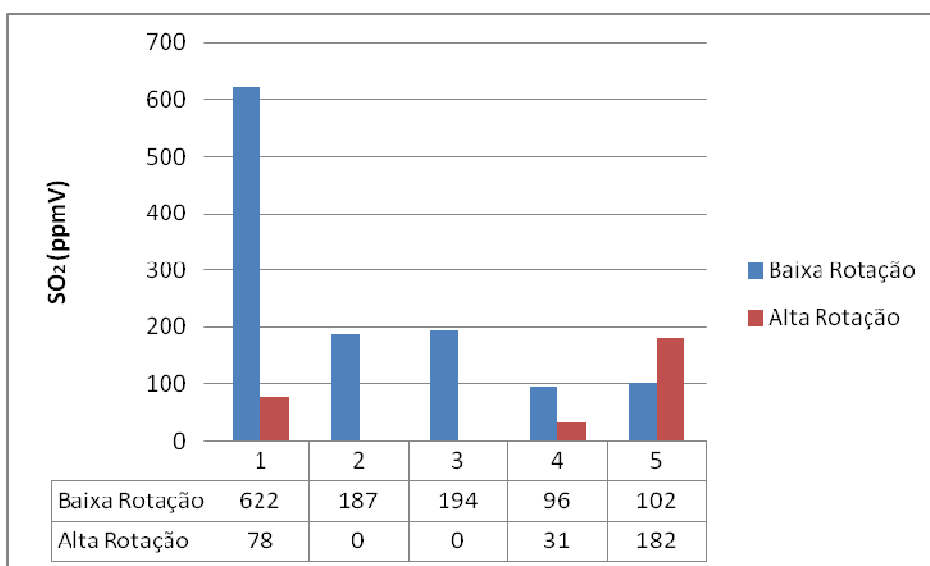


Figura 49. Emissão de SO₂ nas motocicletas Honda Biz 125 CC.

5.3. Avaliação da emissão de CO, NO_x e SO₂ em veículos de passeio flex

Para avaliar a emissão de poluentes em veículos de passeio flex, utilizamos o Analisador Tempest 100, que possibilitou a detecção de CO, NO_x e SO₂. As medidas foram realizadas em duas etapas. Na primeira etapa, os veículos haviam sido abastecidos exclusivamente com gasohol. Na segunda etapa, realizada 3 semanas depois, os mesmos veículos haviam sido abastecidos com etanol. Os veículos estão listados na tabela 14.

Tabela 14. Veículos de passeio flex.

	Marca	Modelo	Ano de Fabricação	Potência
1	FIAT	Pálio	2008	1.0
2	FIAT	Novo Uno	2012	1.0
3	VOLKSWAGEN	Space Fox	2009	1.6
4	HYUNDAI	HB 20	2013	1.0

A figura 50 apresenta a emissão de CO no veículo 1 (Fiat Pálio 2008) quando este estava abastecido exclusivamente com gasohol (etapa 1) e álcool (etapa 2). Podemos notar que, para este veículo, a emissão foi muito maior quando este estava abastecido com gasohol do que com etanol. Podemos notar também que, em ambas as situações, a emissão de CO foi maior no modo de baixa rotação, onde há maior ocorrência de combustão incompleta, conforme justificamos anteriormente.

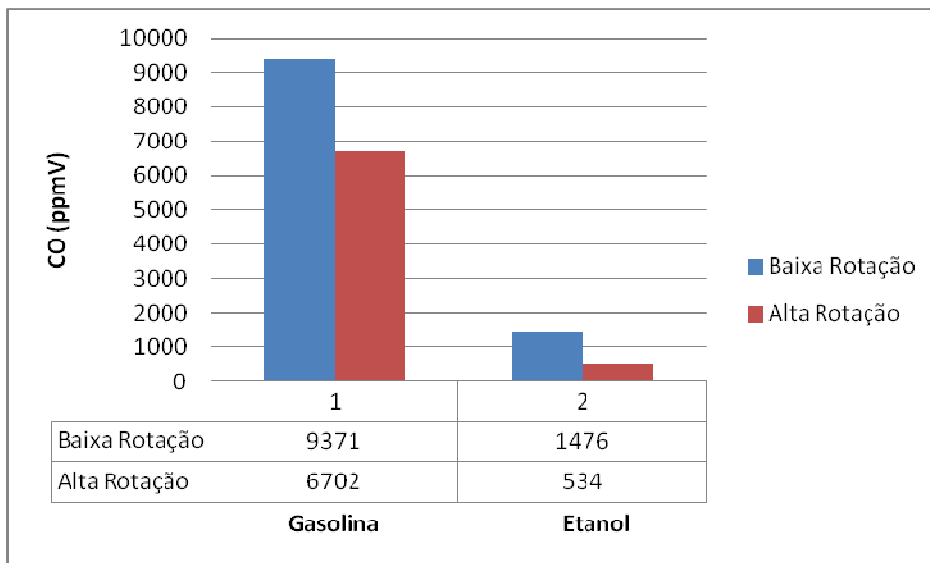


Figura 50. Emissão de CO no veículo flex Fiat Pálio 2008.

A figura 51 apresenta a emissão de NO_x no mesmo veículo. Notamos que, mais uma vez, a emissão foi superior na situação 1, em que o veículo foi abastecido com gasohol. As emissões foram superiores, em ambas as situações, no modo de alta rotação, em que as temperaturas de operação do motor são mais elevadas.

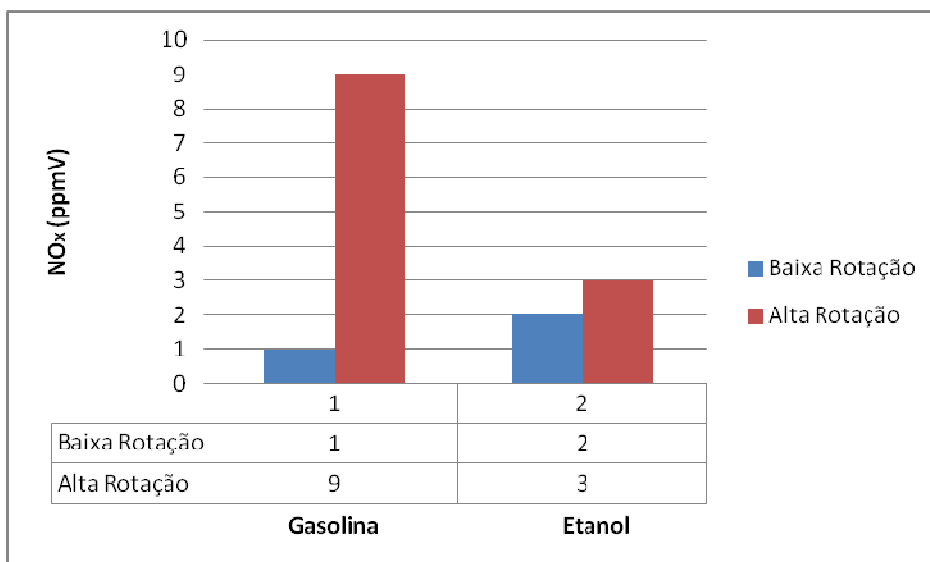


Figura 51. Emissão de NO_x no veículo flex Pálio 2008.

A figura 52 apresenta a emissão de SO₂ pelo mesmo veículo abastecido com gasolina e etanol. Este veículo emitiu menor quantidade de SO₂ quando abastecido com etanol, conforme ocorreu com os gases CO₂ e NO_x. Este resultado era esperado, uma vez que o enxofre está presente na composição da gasolina e não está presente na composição do etanol. Dessa forma notamos que, para este modelo, a emissão dos poluentes avaliados neste trabalho foi maior quando o veículo foi abastecido com gasolina.

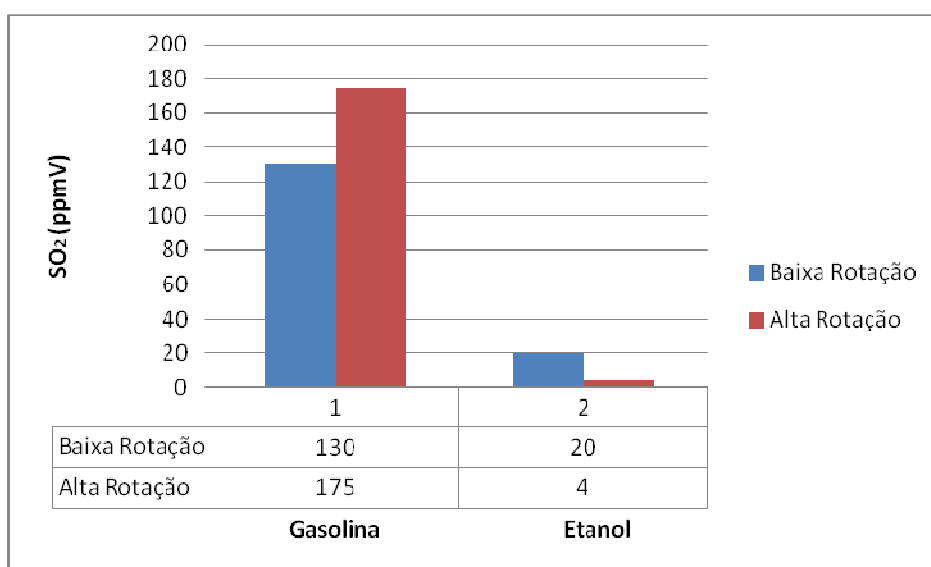


Figura 52. Emissão de SO₂ no veículo flex Fiat Pálio 2008.

Utilizando o Tempest, realizamos as mesmas medições no veículo 2 da tabela 15 (Novo Uno 2012). A figura 53 mostra a emissão de CO por parte deste veículo quando abastecido com gasolina e etanol. Diferentemente do que esperávamos, este veículo apresentou comportamento contrário ao do Pálio, apresentando maior emissão do gás quando abastecido com etanol. No entanto, mais uma vez, pudemos observar que no modo de baixa rotação a emissão de CO se manteve maior, em ambas as etapas.

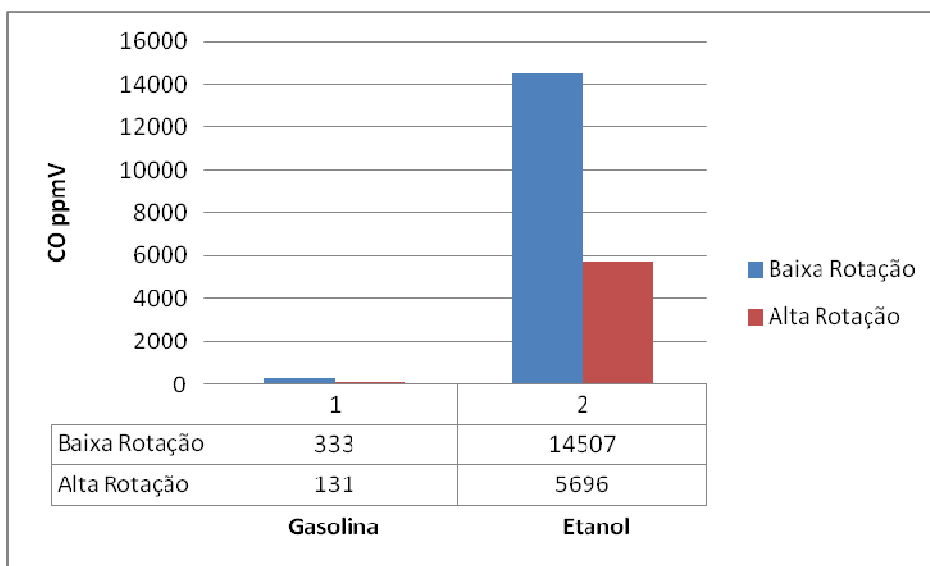


Figura 53. Emissão de CO no veículo flex Fiat Uno 2012.

A figura 54 apresenta os dados da emissão de NO_x pelo mesmo veículo. O veículo apresentou baixos valores de emissão deste gás tanto quando abastecido com gasohol quanto quando abastecido com etanol. No entanto, a emissão foi um pouco maior para o veículo abastecido com etanol. Em ambos os casos, a emissão foi maior no modo de alta rotação.

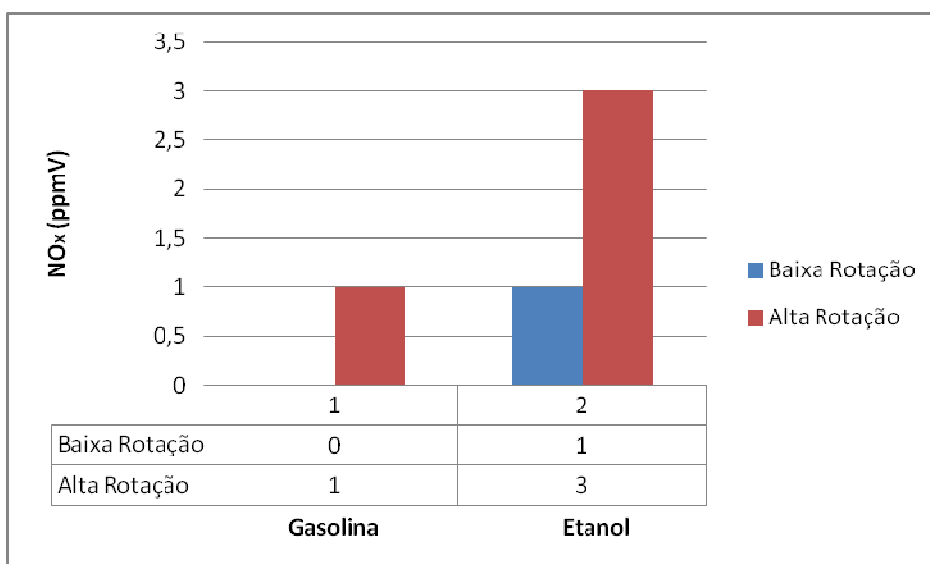


Figura 54. Emissão de NO_x no veículo flex Fiat Uno 2012.

A figura 55 apresenta a emissão de SO₂ no mesmo veículo abastecido com gasohol e com etanol. Diferentemente do que aconteceu com os gases NO_x e CO, o veículo apresentou maior emissão de SO₂ quando abastecido com gasohol. Este resultado está coerente com o resultado observado com o veículo Pálio.

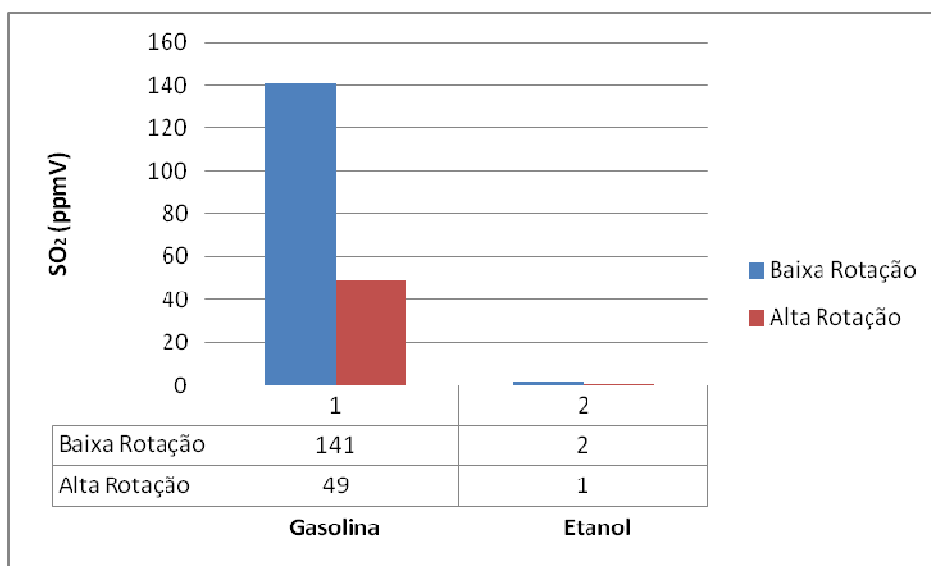


Figura 55. Emissão de SO₂ no veículo flex Fiat Uno 2012.

Em seguida, fizemos a avaliação da emissão dos poluentes supracitados no veículo 3 da tabela 15 (Space Fox 2008). Em relação à emissão de CO (figura 56), podemos observar que a emissão deste gás foi maior quando o veículo estava abastecido com gasolina, semelhantemente ao que ocorreu com o veículo 1. A emissão foi maior no modo de baixa rotação nos dois casos, demonstrando coerência com o padrão observado para a emissão de CO.

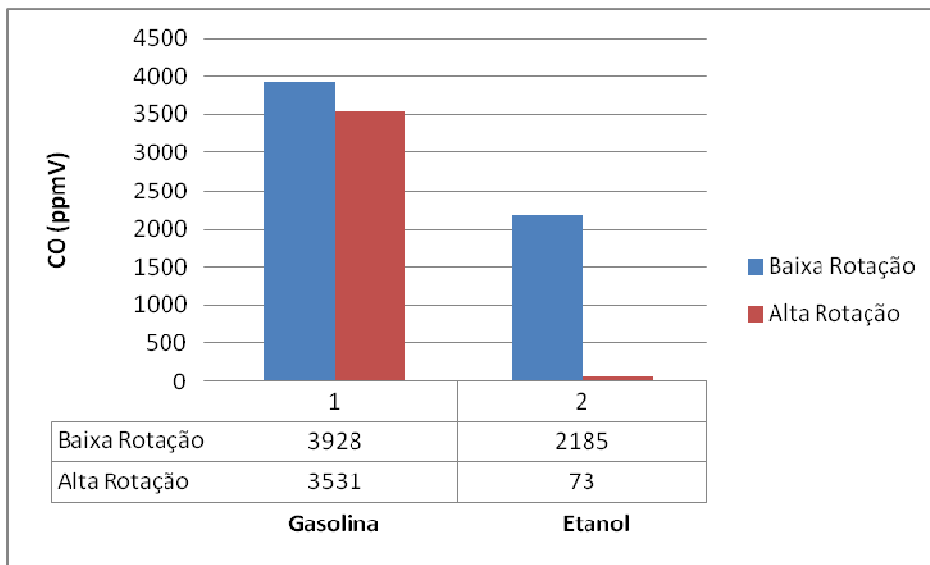


Figura 56. Emissão de CO no veículo Space Fox 2008.

A figura 57 apresenta os dados de emissão de NO_x para o mesmo veículo. Notamos que a emissão do gás foi superior quando este foi abastecido com gasolina, como ocorreu com o veículo 1. Em ambas as medições, a emissão do gás foi maior para o modo de alta rotação do motor.

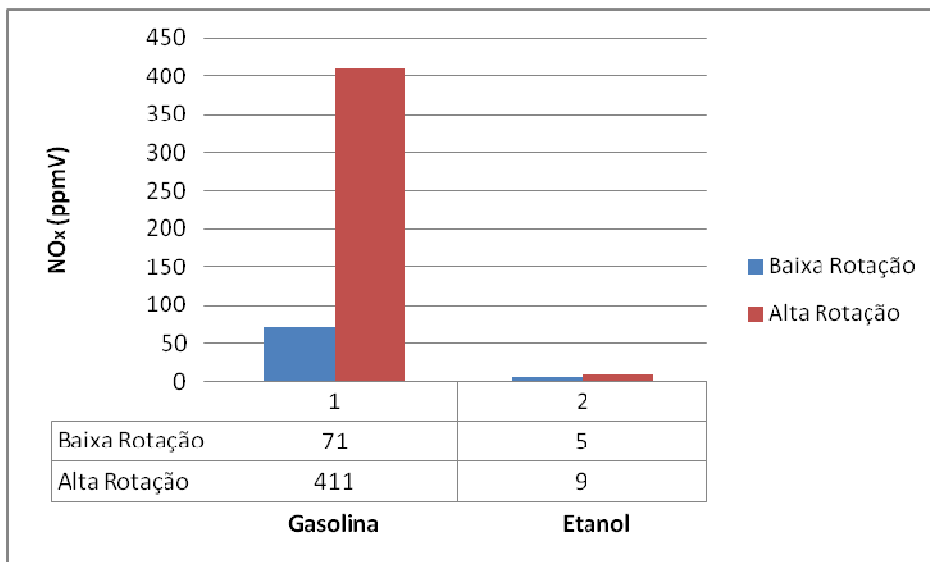


Figura 57. Emissão de NO_x no veículo Space Fox 2008.

A figura 58 apresenta a emissão de SO₂ no veículo Space Fox 2008. Podemos observar que a emissão do gás foi menor quando este veículo foi abastecido com etanol, semelhantemente ao que observamos para os veículos Fiat Pálio e Fiat Uno.

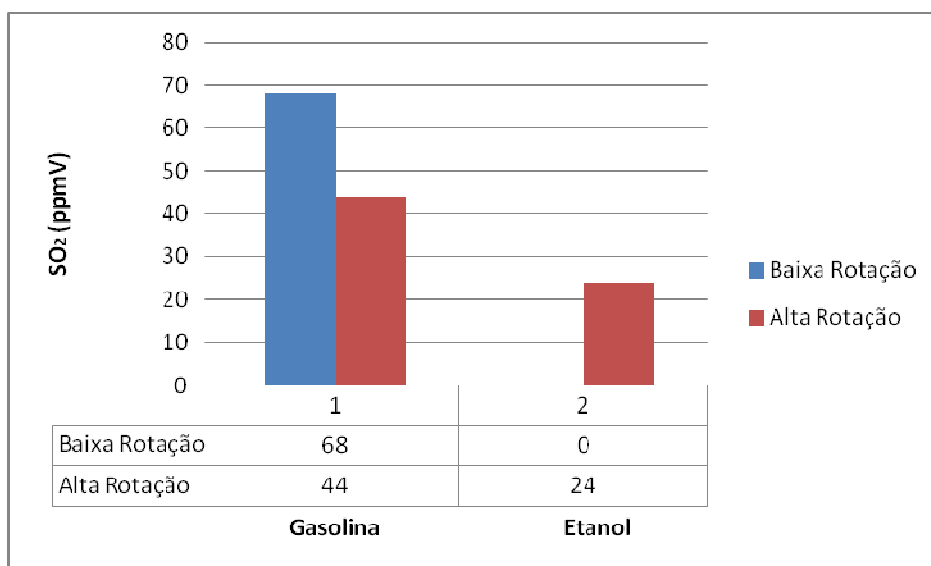


Figura 58. Emissão de SO₂ no veículo flex Space Fox 2008.

Por fim, fizemos a avaliação da emissão de poluentes no veículo da tabela 4 da tabela 15 (HB 20 2013). A figura 59 apresenta a emissão de CO nos modos acelerado e não acelerado para o veículo abastecido com gasolina e etanol. Podemos observar que no modo de baixa rotação, a emissão do gás foi maior. Notamos também que a emissão de CO foi bem similar quando o veículo estava abastecido com gasolina e etanol, sendo um pouco superior para o combustível etanol. Esse resultado foi um pouco diferenciado do padrão observado com os veículos anteriores, onde a emissão de CO apresentou resultados maiores quando o veículo estava abastecido com gasolina.

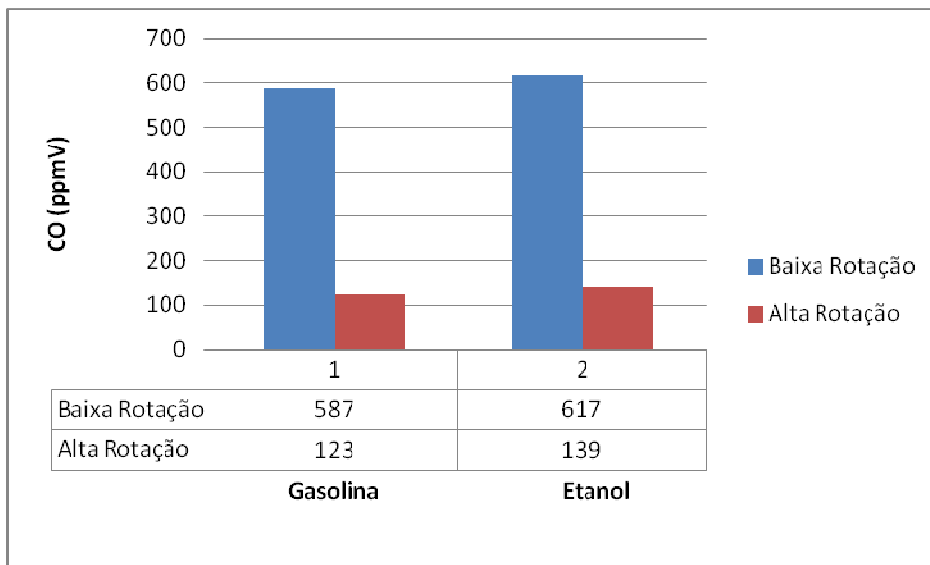


Figura 59. Emissão de CO no veículo flex HB 20 2013.

A figura 60 apresenta os resultados de emissão de NO_x para o veículo HB 20. Podemos notar que a emissão foi um pouco maior para o veículo abastecido com etanol, tal qual aconteceu com o veículo 2 (Fiat Uno). Observamos também que a emissão do gás foi maior no modo de alta rotação, conforme o padrão observado nos veículos anteriores.

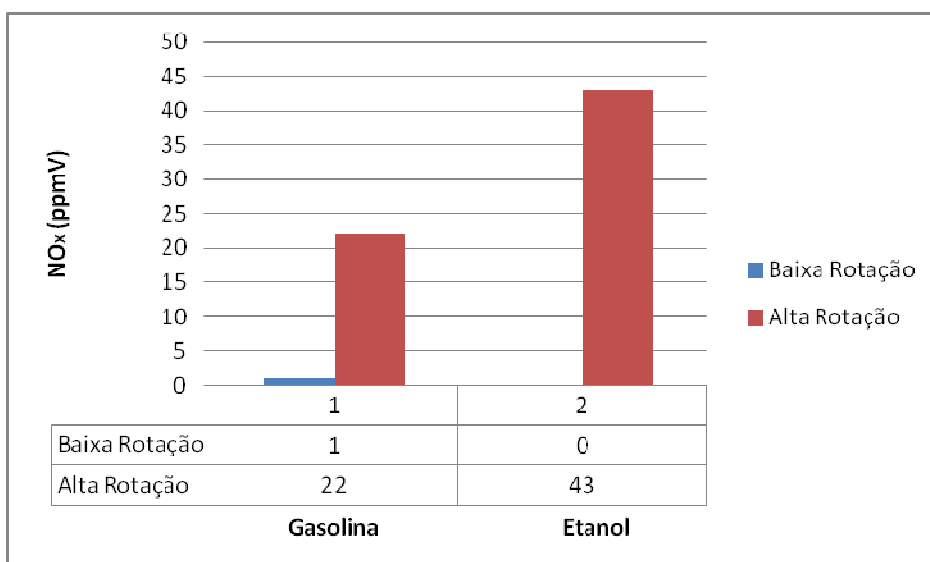


Figura 60. Emissão de NO_x no veículo HB 20 2013.

Por fim, a figura 61 apresenta os dados de emissão de SO₂ para o mesmo veículo. Ao contrário do que observamos para os outros veículos a emissão de SO₂ foi superior quando o veículo estava abastecido com etanol. Em ambos os casos, no entanto, observa-se valores bem baixos de emissão do gás, como era de se esperar para um veículo novo, onde os problemas de vazamento de óleo para o câmara de combustível são reduzidos, já que há menos desgaste nas válvulas.

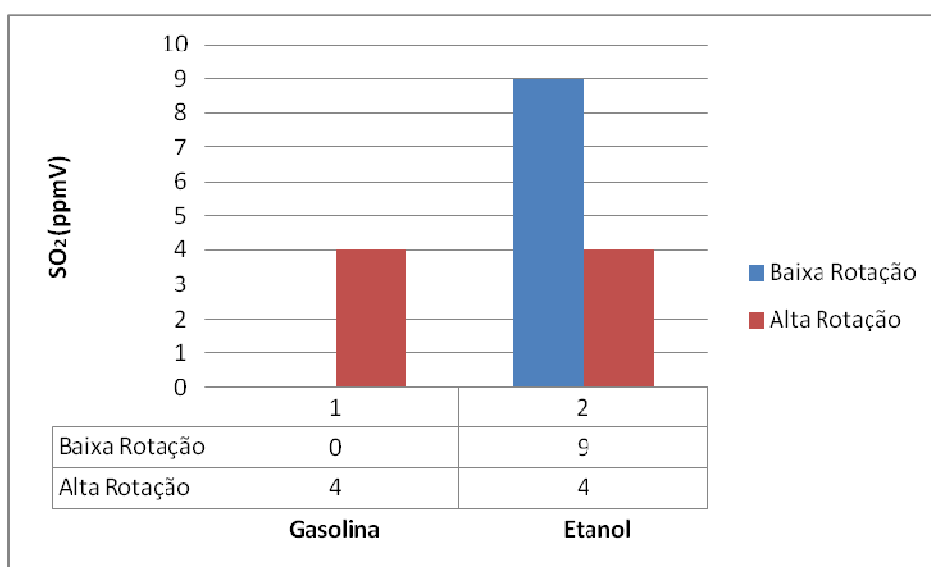


Figura 61. Emissão de SO₂ no veículo flex HB 20 2013.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÃO

Atualmente, a humanidade se depara com grandes desafios ambientais, cujas consequências podem ser nefastas para a sociedade moderna. No entanto, as questões ambientais não podem ser solucionadas isoladamente, uma vez que estão intimamente relacionadas com as questões energética e econômica. Nesse contexto, é preciso criar soluções tecnológicas e não tecnológicas que garantam um equilíbrio entre esses três elementos fundamentais: Energia, Economia e Ecologia. A relação entre essas três questões é bem expressa no modelo de células triangulares sustentáveis.

Do ponto de vista tecnológico, uma opção para substituir a gasolina no setor do transporte, visando uma redução na emissão de poluentes atmosféricos, seria a utilização de biocombustíveis, em especial, o etanol. O etanol é um combustível renovável e a sua utilização auxilia na mitigação do gás estufa CO₂. O perfil de sustentabilidade do etanol, contudo, tem sido recentemente questionado por muitos pesquisadores em relação aos impactos diretos ou indiretos do uso terra, a poluição e consumo de água, além dos conflitos econômicos e sociais derivados da competição energia / alimento. Dessa forma, neste trabalho, fizemos uma avaliação do ciclo produtivo do etanol, analisando os diferentes impactos gerados por este combustível do ponto de vista ambiental, social e econômico.

Realizamos também medidas experimentais da emissão de poluentes atmosféricos em veículos e motocicletas flex movidos a etanol. Utilizando espectrômetros fotoacústicos associados Lasers de CO₂ e de Cascata Quântica, pudemos comprovar e quantificar a presença do gás etileno em veículos movidos a etanol combustível. A presença do etileno, que é um composto orgânico volátil precursor na formação do ozônio troposférico, na exaustão de veículos movidos a etanol nunca havia antes sido relatada na literatura. Este gás, apesar de sua importância ambiental, não é relatado individualmente na legislação brasileira (CONAMA).

Além disso, avaliamos, com o auxílio do Analisador Eletroquímico TEMPEST, a presença de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de

enxofre em diferentes motocicletas flex novas, movidas com diferentes percentuais de gasolina e etanol. Em alguns modelos de motocicleta, foi possível avaliar uma pequena redução na emissão dos poluentes supracitados quando se utilizava maior percentual de etanol combustível. No entanto, esse comportamento não foi constante para todos os modelos de motocicleta. Em todo o caso, os poluentes foram detectados na faixa de ppmv na na exaustão de quase todas as motocicletas movidas a etanol, apesar de se tratarem de motocicletas novas.

Também avaliamos a presença dos mesmos gases em veículos flex movidos a gasolina e a etanol. A maior parte destes veículos apresentou menor emissão de CO e NO_x quando abastecidos com etanol, embora possamos observar comportamentos diferenciados para alguns veículos. No entanto, em relação à emissão de SO₂, todos os veículos apresentaram maior emissão do gás quando abastecidos com gasolina. O etanol, portanto, mostrou-se ambientalmente vantajoso em relação à gasolina, com relação aos gases analisados. Apesar disso, notamos que quase todos os veículos, abastecidos com gasohol ou etanol, emitiram os poluentes CO, NO_x e SO₂ na faixa de ppmV.

Dessa forma, através da análise dos dados obtidos e da avaliação da cadeia produtiva do etanol a partir de dados da literatura, pudemos concluir que o etanol combustível, a despeito de mitigar a emissão de CO₂ em relação à gasolina, gera muitos outros impactos ambientais e sociais, de forma que não pode ser considerado um combustível perfeitamente limpo. O mesmo acontece com qualquer outra opção energética viável na atualidade.

Assim, entendemos que não é possível solucionar todas as questões ambientais, modificando apenas a fonte energética. Neste modelo econômico, onde a sociedade é incentivada a consumir cada vez mais produtos e energia, a questão ambiental será fatalmente colocada em segundo plano. Dessa forma, entendemos que as soluções tecnológicas, como a utilização de novas fontes energéticas, devem estar associadas a soluções não tecnológicas (transporte coletivo, consumo consciente), buscando um novo modelo de sociedade, onde haja uma relação mais harmônica entre Energia, Economia e Ecologia e onde a colaboração prevaleça sobre a competição.

PUBLICAÇÕES

Artigos completos publicados em periódicos

1. M. S. Sthel, **J. R. Tavares**, J. G. Tostes. Current energy crisis and its economic and environmental consequences: Intense human cooperation. Natural Science (Online). , v.5, p.1 - 9, 2013.
2. M. S. Sthel, J. G. Tostes, **J. R. Tavares**. Sustainable Complex Triangular Cells for the Evaluation of CO₂ Emissions by Individuals instead of Nations in a Scenario for 2030. Sustainability (Basel). , v.5, p.1944 - 1959, 2013.
3. **J. R. Tavares**, M. S. Sthel, L. S. Campos, M. V. Rocha, G. R. Lima, M. G. da Silva, H. Vargas. Evaluation of Pollutant Gases Emitted by Ethanol and Gasoline Powered Vehicles. Procedia Environmental Sciences. , v.4, p.51 - 60, 2011.

Capítulos de livros publicados

1. M. S. Sthel, A. M. Rocha, **J. R. Tavares**, G. A. Mothé, F. Couto, M. P. P. de Castro, V. H. Perez, M. G. da Silva, H. Vargas. Evaluation of Gaseous Emission in the Use of Biofuels in Brazil. Rijeka, Croatia : InTech, v.1, p. 303-324, 2013.
2. M. S. Sthel, M. G. da Silva, G. R. Lima, M. V. ROCHA, **J. R. Tavares**, D. U. S. Schramm, M. P. Castro, A. Miklos, H. Vargas. Detection of Greenhouse Gases Using the Photoacoustic Spectroscopy In: Greenhouse Gases - Emission, Measurement and Management. Rijeka, Croatia : InTech, v.1, p. 215-234, 2012.

Artigos submetidos (sob revisão)

1. Detection of Greenhouse Gas Precursors from Ethanol Powered Vehicles in Brazil. **Juliana R. Tavares**, Marcelo S. Sthel , Mila V. da Rocha, Guilherme R.

Lima, Marcelo G. da Silva, Helion Vargas. Submetido em: Biomass and Bioenergy (2012).

2. Detection of Pollutant Gases Released by Ethanol and Gasoline Motorcycles. **Juliana R. Tavares**, Luiz Fernando M. Sangiorgio, Marcelo S. Sthel, Guilherme R. Lima, Geórgia A. Mothé, M. G. da Silva, Helion Vargas. Submetido em: Water, Air & Soil Pollution (2013).

3. Nitrous Oxide Released From Soils for Biofuel Production. F. M. Couto, M. S. Sthel*, M. P. P. Castro¹, M. G. da Silva, M. V. Rocha, **J. R. Tavares**, C. F. M. Veiga, H. Vargas. Submetido em: Applied Physics B (2013).

Trabalhos Apresentados em Congressos internacionais

1. Detection of Pollutant Gases Released by Motorcycles Using Electrochemical and Photoacoustic Sensors. **J.R. Tavares**, L. F. M. Sangiorgio, M. S. Sthel, G. R. Lima, G. A. Mothé, M. G da Silva, H. Vargas. Apresentado em: XVII International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena (ICPPP17) Suzhou, China, October (2013).

2. Greenhouse Gas Precursors Detection in Emissions from Ethanol Powered Vehicles in Brazil. **J. R. Tavares**, M. Sthel, M.V. Rocha. G.R. Lima, M. G. da Silva, H. Vargas. Apresentado em: Urban Environmental Pollution Conference, Amsterdam, The Netherlands, June (2012).

3. Evaluation of Pollutants Emission in the Exhaust of Gasoline Powered Vehicles and its Consequences for Health. **J. R. Tavares**, M. Sthel, M.V. Rocha. G.R. Lima, M. G. da Silva, H. Vargas. Apresentado em: Enviromental Health 2011, Salvador, Brazil, Fevereiro (2011).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] 2010 Global Hunger Index The challenge of hunger: Focus on the crisis of child undernutrition International Food Policy Research Institute (IFPRI). <http://www.ifpri.org/publication/2010-global-hunger-index-0>. Acesso: 21/01/2011.
- [2] World Energy Assessment: Energy and the challenge of Sustainability 2010. United Nations Development Programme: Overview 2010 update. <http://www.undp.org/energy/activities/wea/drafts-frame.html> Acesso: 22/01/2011.
- [3] F. Baier, T. Hamacher, U. Platt, P. Zanis. Energy and Environment: The Intimate Link. Environmental Physics Division. European Physical Society, 2009.
- [4] W. S. Rodrigues. Estudo de caso: Análises sazonais dos dados meteorológicos e de SO₂ de uma rede de monitoramento de qualidade de ar como ferramenta de apoio a gestão das emissões de SO₂ de uma refinaria de grande porte. Dissertação de Mestrado em Sistemas de Gestão da Universidade Federal Fluminense, 2006.
- [5] C. Baird, Environmental Chemistry, second ed., Brookman, 2002.
- [6] A. Maitre, V. Bonneterre, L. Huillard, P. Sabatier, R. Gaudemaris. Impact of urban atmospheric pollution on coronary disease. *Eur. Heart J.* 27, 2275-2284, 2006.
- [7] C. Townsend, R. Maynard Effects on health of prolonged exposure to low concentrations of carbon monoxide. *Occup. Environ. Med.* 59, 708-711, 2002.
- [8] R. Favory, S. Lancel, S. Tissier, D. Mathieu. Myocardial dysfunction and potential cardiac hypoxia in rats Induced by carbon monoxide inhalation. *Amer. J. Res. Crit. Car. Med.* 174, 320-325, 2006.
- [9] K. W. Lindell, O. H. Ramona, J. C. Karen, E. Gregory, P. Terry, F. James, O. Frank, H. Alan. Carbon monoxide poisoning. *New Eng. J. Med.* 360, 1217-1225, 2009.
- [10] J. J. Mccarthy, O. F. Canziani, N. A. Lerner, D. J. Dokken, K. S. White (Ed.). Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis of Climate Change. Cambridge University Press, 2007.
- [11] J. Rockstrom, W. Steffen, K. Noone, A. Persson, F. S. Chapin, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber. A Safe Operating Space for Humanity. *Nature* 2009, 461, 72-475, 2009.

- [12] K. Flynn, J. C. Blackford, M. E. Baird, J. A. Raven, D. R. Clark, J. Beardall, C. Brownlee, H. Fabian, G. L. Wheeler. Changes in pH at the exterior surface of plankton with ocean acidification. *Nat. Clim. Change* 2, 510–513, 2012.
- [13] P. Nathan, N. P. Gillett, D. A. Stone, P. A. Stott, T. Nozawa, A. Y. Karpechko, G. C. Heger, M. F. Wehner, F. D. Jones. Attribution of polar warming to human influence. *Nat. Geosci.* 1, 750–754, 2008.
- [14] M. Siddall, T. F. Stocker, P. U. Clark. Constrains on future sea-level from past sea-level change. *Nat. Geosci.* 2, 571–575, 2009.
- [15] A. B. Peza, I. Simmonds. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, how shear and climate change. *Geophys. Res. Lett.* 32, 5712–5717, 2005.
- [16] C. Rosenzweig, D. Karoly, M. Vicarelli, P. Neofotis, Q. Wu, G. Casassa, A. Menzel, T. L. Root, N. Estrella, B. Seguin. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature* 453, 353–357, 2008.
- [17] J. Lovelock. *A vingança de Gaia. Intrínseca*, 2006.
- [18] R. Doornbosch, R. Steenblik. *Biofuels: Is the cure worse than the disease? OECD Roundtable of Sustainable Development*. OECD Publishing, 2007
- [19] J. Fargione, J. Hill, D. Tilman, S. Polasky, P. Hawthorne. Land clearing and the biofuels carbon debt. *Science* 319: 1235-1238, 2008.
- [20] T. Searchinger, R. Heimlich, R. A. Houghton, F. X. Dong, A. Elobeid, J. Fabiosa, S. Tokgoz, D. Hayes, T. H. Yu. Use of US croplands for biofuels increases greenhouse gases through emissions from land use change. *Science* 319:1238-1240, 2008.
- [21] E. Menichetti and M. Otto. Energy balance and greenhouse gas emissions of biofuels from a life-cycle perspective. In: *Biofuels: Environmental Consequences and Interactions with Changing Land Use - Proceedings of the Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment*. Gummersbach, Germany. R. W. Howarth and S. Bringezu, editors, 2009.
- [22] M. W. Sigrist, A. B. T. Lerber, M. Nägele and Al. Romann. Environmental Applications of Laser-Based Photoacoustic Spectroscopy. *Analytical Sciences* Vol 17, 2001.
- [23] M. S. Sthel, D. U. Schramm, R. T. Faria Jr., M. P. P. Castro, L. O. Carneiro, W. S. Ribeiro, H. Vargas. Photoacoustic Spectroscopy-Based Analysis of Gas Samples in a Bus Station. *Journal of Physics IV*, 881–883, 2005.

- [24] C. G. Teodoro, D. U. Schramm, M. S. Sthel, G. R. Lima, M. V. Rocha, J. R. Tavares, H. Vargas. CO₂ laser photoacoustic detection of ethylene emitted by diesel engines used in urban public transports, *Infrared Phys. Technol*, 2009.
- [25] Rifkin, J. *The empathic civilization: the race to global consciousness in a world in crisis*. Penguin: New York, 2009.
- [26] Rifkin, J. *A terceira revolução industrial como o poder lateral esta transformando a energia e a economia e o mundo*. M. Book do Brasil Editora: São Paulo, 2012.
- [27] Sthel, S. M. Tostes, J. R. Sustainable Complex Triangular Cells: Case Study - Envira River Isolated Indians in Western Amazon', *Journal of Sustainable Development*; Vol. 5, No. 8, 2012.
- [28] M. S. Sthel, J. G. Tostes, J. R. Tavares. Current energy crisis and its economic and environmental consequences: Intense human cooperation. *Natural Science*. Vol. 5 No 2A. Scientific Research, 2013.
- [29] Chakravarty et al. Sharing global CO₂ emission reductions among one billion high emitters, *PNAS* 106, 11884 -11888, 2009.
- [30] J. Goldemberg. *Energia, meio ambiente e desenvolvimento*. Edusp, 1998.
- [31] J. Goldemberg. Biomassa e energia. *Química Nova*, Vol. 32, No. 3, 582-587, 2009.
- [32] F. Pachi. *O que você está disposto a mudar?* Scientific American Brasil. Edição Especial n.19. P. 41-45, São Paulo, 2007.
- [33] 2012 World Energy Statistics. International Energy Agency. <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/kwes.pdf>. Acesso: 31/01/2013.
- [34] M. I. Hoffert, K. Caldeira, G. Benford, D. R. Criswel, C. Green, H. Herzog, A. K. Jain, H. S. Kheshgi, K. S. Lackner, J. S. Lewis, H. D. Lightfoot, W. Manheimer, J. C. Mankins, M. E. Manuell, L. J. Perkins, M. E. Schlesinger, T. Volk, T. M. L. Wigley. Advanced Technology Paths to Global Climate Stability: Energy for a Greenhouse Planet. *Science* 298, 2002.
- [35] Plano Decenal de Energia – PDE 2019. Empresa de Pesquisa Energética. <http://www.epe.gov.br/PDEE/Forms/EPEEstudo.aspx>. Acesso: 06/11/2010
- [36] M. N. Santos. *Composição Química e Estrutura da Atmosfera terrestre*. Centro de Química-Física Molecular. Instituto Superior Técnico, 2006.

- [37] Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 003, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, Brasil, 28.06.1990. <http://www.mma.gov.br>. Acesso: 02/07/2011
- [38] J. Evelyn. Fumifugium, or the inconvenience of era and smoke of London, dissipated, together with some remedies humbly proposed. London, 1661
- [39] S. Arrhenius. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. Philosophical Magazine and Journal of Science Series 5, Volume 41, 1896.
- [40] E. P. Odum and G. W. Barret. Fundamentos da Ecologia. Thompson, 2007.
- [41] Stern, N. (2006) *Stern Review*. The Economics of Climate Change, UK.
- [42] United States Environmental Protection Agency - USEPA. Mandatory Reporting of Greenhouse Gases; Proposed Rule, 2009.
- [43] Marconde, D., Ribeiro, D. (2009) O fim de um pôster. *Carta Capital*, 567, 61-67.
- [44] N. Mirlean, A. Vanz, P. Baish. Níveis e origem da acidificação das chuvas na região do Rio Grande, RS. *Química Nova* 23, 2000.
- [45] C. F. Cullis, M. M. Hirschler, M.M. Atmospheric sulphur: natural and man-made sources. *Atmospheric Environment* 14, 1980.
- [46] J. M. Cónsul, D. Thiele, R. C. Veses, I. M. Baibich, R. M. Delago. Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio. *Química Nova* 27, 2004.
- [47] T. S. Nawrot, A. Nemmar and B. Nemery. Update in Environmental and Occupational Medicine 2006. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine* 175, 2007.
- [48] M. Sidall, T. F. Stocker, P. U. Clark. Constraints on future sea-level rise from past sea-level change. *Nature geosciences*, 2009.
- [49] S. Solomon, G. Plattner, R. Knutti, P. Friedlingstein. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions. *PNAS* vol. 106 nº 6, 2009.
- [50] J. Hansen, M. Sato, P. Kharecha, D. Beerling, R. Berner, V. Masson-Delmotte, M. Pagani, M. Raymo, D. L. Royer, J. C. Zachos. Target atmospheric CO₂: Where should humanity aim? *Open Atmos. Sci. J.* 2, 2008.
- [51] T. Flannery. Os senhores do Clima. Record, 2007.

- [52] A. Gore. Uma verdade inconveniente - O que devemos saber (e fazer) sobre o aquecimento Global. Manole, 2006.
- [53] R. Monasterky. Global carbon dioxide levels near worrisome milestone. *Nature* 497, 13–14, 2013.
- [54] G. R. Thompson, J. Turk. *Earth Science and the Environment*, Saunders College Publishing, 1999.
- [55] M. Ernfors, M. Karin, K. V. Arnold, J. Stendhal, E. M. Olsson, E. L. Klemedtsson. Nitrous oxide emissions from drained organic forest soils: an up-scaling based on C:N ratios. Springer Science, 2008.
- [56] Environmental Protection Agency. *Global Mitigation of Non-CO₂ Greenhouse Gases*. USEPA, 2006.
- [57] P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith, W. Winiwarter. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos Chem Phys Disc* 7, 2007.
- [58] C. Brühl and P. J. Crutzen. Reductions in the anthropogenic emissions of CO and their effect on CH₄. *Chemosphere: Global Change I*, 1999.
- [59] J. Gao, T. Wang, A. Ding, C. Liu. Observational study of ozone and carbon monoxide at the summit of mount Tai (1534m a.s.l.) in central-eastern China. *Atmospheric Environment* 39, 2005
- [60] S. G. Miraglia. An Evaluation of Air Pollution Health Impacts and Costs in São Paulo, Brazil. *Environmental Management* Vol. 35, 2005.
- [61] J. F. Mendes, L. T. Silva. Determinação do Índice de Qualidade do Ar numa Cidade de Média Dimensão. *Engenharia Civil UM*. Número 27, 2006.
- [62] V. P. Campos, L. P. S. Cruz; E. M. Alves, T. S. Santos, A. D. Silva; A. C. C. dos Santos, A. M. V. Lima, C. S. Paixão, D. C. M. B. Santos, D. S. Brandão, E. J. S. Andrade, J. I. Moreira Jr., K. C. S. Conceição, M. S. Ramos; M. C. G. Pontes, M. F. do Amaral, R. R. Mattos. Atmospheric passive monitoring of SO₂, NO₂ and O₃ in urban areas and in those under industrial influence as an environmental chemistry experiment for undergraduate students. *Quím. Nova* vol.29 n° 4, 2006.
- [63] World Health Organization – WHO. *Environmental Health Criteria 188. Nitrogen Oxides*, Geneva, 1997.
- [64] L. J. Folinsbee. *Human Health Effects of Air Pollution. Environmental Health Perspectives* Vol. 100, 1992.

- [65] A. Lacerda, T. Leroux, T. Morata. Efeitos tóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. *Pró-Fono Revista de Atualização Científica*, Barueri (SP), Vol. 17, nº 3, 2005.
- [66] P. A. P. Pereira e J. B. de Andrade. Fontes, Reatividade e Quantificação de Metanol e Etanol na Atmosfera. *Química Nova*, 21(6): 744-754, 1998.
- [67] B. C. S. de Castro. Otimização das Condições da Reação de Transesterificação e Caracterização dos Rejeitos dos Óleos de Fritura e de Peixe para Obtenção de Biodiesel. Dissertação de Mestrado em Ciências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [68] Agência Nacional do Petróleo, Regulamento Técnico ANP nº 3/2011. <http://www.diariodasleis.com.br/tabelas/216297.pdf>. Acesso: 15/05/2012.
- [69] Resolução CIMA 1/11 CONSELHO INTERMINISTERIAL DO AÇÚCAR E DO ALCOOL CIMA nº 1 de 31.08.2011. <http://www.fiscosoft.com.br/l/5hbf/resolucao-conselho-interministerial-do-acucar-e-do-alcool-cima-n-1-de-31082011>. Acesso: 16/05/2012.
- [70] Agricultural Outlook 2007-2016. Organisation for Economic Co-operation and Development Food and Agriculture Organization of United Nations - OCDE FAO, 2007.
- [71] I. C. Macedo, L. A. H. Nogueira. Biocombustíveis. Cadernos NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República nº 2. Secretaria de Comunicação do Governo e Gestão Estratégica, 2004.
- [72] A. C. Santos. The Blend Ethanol/Gasoline and Emission of Gases. Greenhouse Gases – Emission, Measurement and Management, 2012.
- [73] Moreira Jr, J. Goldemberg. The alcohol program. *Energy Policy* 27, 1999.
- [74] Gaffney, J. S.; Marley, N. A. The impacts of combustion emissions on air quality and climate - From coal to biofuels and beyond. *Atmos. Environ.* 2009, 43, 23–36.
- [75] Akutsu, Y.; Toyoda, F.; Tomita, K.-i.; Yoshizawa, F.; Tamura, M.; Yoshida, T. Effect of exhaust from alcohol fuel on ozone formation in the atmosphere. *Atmos. Environ., Part A* 1991, 25, 1383–1389.
- [76] Milt, A.; Milano, A.; Garivait, S.; Kamens, R. Effects of 10% biofuel substitution on ground level ozone formation in Bangkok, Thailand. *Atmos. Environ.* 2009, 43, 5962–5970.

- [77] California Environmental Protection Agency. Air Quality Impacts of the Use of Ethanol in California Reformulated Gasoline. AIR RESOURCES BOARD Planning and Technical Support Division. State of Califórnia Allen, Paul (Org.). Novembro 1999. <http://www.arb.ca.gov/cbg/regact/ethanol/ethfate.htm>. Acesso: 20/05/2012
- [78] P. Paranhos. O açúcar no norte-fluminense. *Histórica – Revista eletrônica*. http://www.historica.arquivoestado.sp.gov.br/materias/anteriores/edicao08/materia_02/. Acesso: 25/05/2012
- [79] J. N. Netto. *A saga do álcool: fatos e verdades sobre os 100 anos de história do álcool combustível em nosso país*. Novo Século, Osasco, São Paulo, 2007.
- [80] DECRETO Nº 76.593, DE 14.11.1975 - DOU 14.11.1975. <http://nxt.anp.gov.br/nxt/gateway.dll/leg/decretos/1975/dec%2076.593%20-%201975.xml>. Acesso: 26/05/2012
- [81] V. D. Bastos. Etanol, Alcoolquímica e Biorrefinarias. BNDES Setorial, *Rio de Janeiro, n. 25, p. 5-38*, 2007.
- [82] Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA). Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2012. <http://www.virapagina.com.br/anfavea2012>. Acesso: 05/07/2012
- [83] A. Bucci, A. Andrade, F. Damasceno. SFS - Software Flexfuel Sensor – O sistema para um novo carro a álcool. *XII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva – SIMEA*, 2003.
- [84] J. R. Moreira, S. M. A. dos Santos, S. T. Coelho, S. M. S. G. Velázquez, E. H. Melo, P. H. Elmadjian. Trabalho publicado no evento: Congresso 2008 SAE Brasil, 07 a 09 de outubro de 2008, São Paulo, SP, Brasil.
- [85] M. C. Gordinho. *Do álcool ao etanol: trajetória única*. Editora Terceiro Nome, 2010.
- [86] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Crop production. <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#ancorRetrieved2010-06-17>. Acesso: 22/05/2012
- [87] Perfil do Setor do Açúcar e do Alcool no Brasil. Edição para a safra 2008-2009. Diretoria de Política Agrícola e Informações. Superintendência de Informações do Agronegócio. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Organizadores: Ângelo Bressan Filho e Roberto Alves de Andrade. Companhia Nacional de Abastecimento (Conab), 2010.

- [88] União da Indústria de Cana-de-açúcar (ÚNICA). <http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={D6C39D36-69BA-458D-A95C-815C87E4404D}>. Acesso: 23/04/2012
- [89] J. R. P. Pinto. *O ciclo do açúcar em Campos*. Campos: Ed. do Autor, 1995.
- [90] A. R. Lamego. *O homem e o brejo*. 2.ed. Rio de Janeiro: Lidador, 1974.
- [91] J. Oscar. *Escravidão & engenhos*. Rio de Janeiro: Achiamé, 1985.
- [92] Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável do Norte Fluminense. Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA) e Secretaria do Desenvolvimento Territorial (SDT), Plural Consultoria, Pesquisas e serviços, 2006. Disponível em: http://sit.mda.gov.br/download/ptdrs/ptdrs_territorio065.pdf. Acesso: 04/03/2013.
- [93] P. B. C. Barbosa. A Constituição de uma periferia em face da modernização: a produção de açúcar e álcool no Brasil e as transformações na região Norte Fluminense. In: MARAFON, Gláucio José; RIBEIRO, Miguel Ângelo (Org.). *Revisitando o território fluminense*. Rio de Janeiro: NEGEF, 2003, p. 111-148.
- [94] C. F. M. Veiga. *Diagnóstico da cadeia produtiva da cana-de-açúcar do estado do rio de janeiro: relatório de pesquisa*. Rio de Janeiro, FAERJ, SEBRAE/RJ, 2006.
- [95] Câmara de Vereadores de Campos dos Goytacazes. Disponível em <http://www.camaracampos.rj.gov.br>. Acesso: 17/04/2010.
- [96] Lenitha Constantino Lima, Marilane Folres Tavares Soares, Elma Coelho Nunes Sizenando. As queimadas realizadas no setor sucroalcooleiro na região de Campos dos Goytacazes e os impactos no solo e na fauna local. 2011: II Seminário sobre Ecotoxicologia Aquática. Disponível em: <http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/SEAquatica/article/view/1485/694>. Acesso: 10/04/2013.
- [97] P. J. Crutzen, A. R. Mosier, K. A. Smith, W. Winiwarter. N₂O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. *Atmos Chem Phys Disc* 7, 2007.
- [98] C. E. A. Gonçalves. *Estudo da produção de óxido nitroso em cultivo de feijão (phaseolus vulgaris)* / São José dos Campos: INPE, 2002.
- [99] H. Clayton, J. R. M. Arah, K. A. Smith. Measurement of nitrous oxide emissions from fertilized grassland using closed chambers, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, 1994.

- [100] Bouwman, A. F. Soils and the greenhouse effect. Chichester: ed. Wiley, 1990.
- [101] R. W. Howarth et al., Rapid Assessment on Biofuels and the Environment: Overview and Key Findings. Proceedings of the Scientific Committee on Problems of Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment, 2009. <http://cip.cornell.edu/biofuels/>. Acesso: 23/07/2010.
- [102] S. Urquiaga, J. R. Alves, R. M. Boddey. Produção de biocombustíveis: A questão do balanço energético. Revista de Política Agrícola. Ano XIV Nº 1, 2005.
- [103] R. M. Boddey, S. Urquiaga, V. M. Reis and J. Dohobereiner. Biological nitrogen fixation associated with sugarcane. Plant Soil 137, 1991.
- [104] I. C. Machado. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil (1996). Biomass and Bioenergy, Vol. 14, nº 1, 1998.
- [105] I. C. Macedo, J. E. A. Seabra, J. E. Silva. Greenhouse gases emission in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. Biomass and Bioenergy 32, 2008.
- [106] CTC. Centro de Tecnologia Canavieira Copersucar. Informações Técnicas disponibilizadas por cientistas e engenheiros para I. Macedo and J. Seabra, 2006
- [107] C. Andreoli, S. P. Souza. Sugarcane: the Best Alternative for Converting Solar and Fossil/Energy into Ethanol. Economy and energy, 2007.
- [108] T. W. Patzek and D. Pimentel. Thermodynamics of Energy Production from Biomass. Critical Review in Plant Science, 2005.
- [109] M. B. Filho. A visão atualizada da questão etanol. Única e Copersucar. <http://www.fiesp.com.br/irs/cosema/pdf/>. Acesso: 13/10/2010.
- [110] R. W. Howarth et al., Rapid Assessment on Biofuels and the Environment: Overview and Key Findings. Proceedings of the Scientific Committee on Problems of Environment (SCOPE) International Biofuels Project Rapid Assessment, 2009. <http://cip.cornell.edu/biofuels/>. Acesso: 23/07/2010.
- [111] E. D. Larson. 2005. A review of LCA studies on liquid biofuels systems for the transport sector. Energy for Sustainable Development, Vol. 10 No. 2, 2006.
- [112] F. M. Couto. Avaliação das emissões de N₂O e CO₂ em solo cultivado com cana-de-açúcar por meio de técnicas fototérmicas. Dissertação de Mestrado em Ciências Naturais. Universidade Estadual do Norte Fluminense.

- [113] J. C. Garcia. Emissão de Gases de Efeito Estufa na Obtenção de Etanol de cana-de-açúcar: uma avaliação considerando diferentes cenários tecnológicos em Minas Gerais. Tese de Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais.
- [114] D. Tilman, J. Hill and C. Lehman. Carbon-Negative Biofuels from Low-Input High-Diversity Grassland Biomass. *Science* Vol. 314 , 2006.
- [115] J. Outlaw, K. Collins, J. Duttifield, Eds., *Agriculture as a Producer and Consumer of Energy*. CABI, Wallingford, UK, 2005.
- [116] ESMAP: Energy and Water Department. *Potential for Biofuels for Transport in Developing Countries*. World Bank. Washington DC, USA, 2005.
- [117] J. Goldemberg, S. T. Coelho, P. Guardabassi. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* 36, 2008.
- [118] Anuário Estatístico da Agroenergia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Produção e Agroenergia. Brasília/DF, 2009.
- [119] Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. www.embrapa.br. Acesso: 10/04/2010.
- [120] B. A. Lora, M. B. Monteiro, V. Assunção, R. Frigério. Levantamento Georreferenciado da Expansão da Cultura de Cana-de-Açúcar no Estado de São Paulo. São Paulo, 2006.
- [121] R. C. Leite. Etanol, o melhor dos biocombustíveis. *Revista Scientific American Brasil*. Edição Especial nº 19, 2007.
- [122] Y. Lechón, H. Cabal, C. de la Rúa, C. Lago, L. Izquierdo, R. Sáez. Life cycle environmental aspects of biofuel goals in Spain. *Scenarios 2010. 15th European Biomass Conference and Exhibition- From Research to Market Deployment*, 2007.
- [123] A. M. P. Camargo, D. V. Caser, F. P. Camargo, M. P. A. Olivette, R. C. C. Sachs, S. A. Torquato. Dinâmica e Tendência da expansão da cana-de-açúcar sobre as demais atividades agropecuárias. *Informações Econômicas*, SP, Vol.38, nº 3, 2008.
- [124] F. Alves, Porque morrem os cortadores de cana? *Revista Saúde e Sociedade* Nº 3, 2006.
- [125] F. Harren, J. Reuss (Eds.), *Photoacoustic Spectroscopy*, *Encyclopedia of Applied Physics*, vol. 19, VCH Publishers Inc., 1997.
- [126] M. Nagele, M.W. Sigrist, *Applied Physics B* 70, 2000.

- [127] A. Miklós, P. Hess. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology *Review of Scientific Instruments* 72, 2001.
- [128] M. B. Filho, M. G., M.S. Sthel, D. U. Schramm, H. Vargas, A. Miklos, P. Hess, *Applied Optics* 45, 2006.
- [129] A. G. Bell, On the production and reproduction of sound. *American Journal of Science* 20, 1880.
- [130] A. G. Bell, Upon the Production of Sound by Radiant Energy. *Philosophical Magazine Journal of Science* XI, 1881.
- [131] M. L. Viengerov. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 19, 1938.
- [132] E. L. Kerr, J. G. Atwood. The laser illuminated absorvity spectrospnone: A method for measurement of weak absorvity in gases at laser wavelenghts. *Applied Optics* 7, 1968.
- [133] L. B. Kreuzer. Ultralow gas concentration infrared absorption spectroscopy. *Journal of Applied Physics* 42, 1971.
- [134] C. F. Dewey, R. D. Kamm, C. E. Hackett, *Appl. Phys. Lett.* 23, 1973.
- [135] R. G. Kamm, *Journal of Applied Physics* 47, 1976.
- [136] F. J. M. Harren, J. Reuss, E. J. Woltering, D. D. Bicanic, *Applied Spectroscopy* 44, 1990.
- [137] P. L. Meyer and M. W. Sigrist, *Review of Scientific Instruments* 61, 1990.
- [138] S. Bernegger and M. W. Sigrist, *Infrared Physics* 30, 1990.
- [139] P. L. Meyer, S. Bernegger, and M. W. Sigrist, *Springer Series in Optical Science* 58, 1988.
- [140] A. Miklós and P. Hess, *Analytical Chemistry* 72, 2000.
- [141] C. S. Yu and A. H. Kung, *Journal of the Optical Society* 16, 1999.
- [142] B. A. Paldus, C. C. Harb, T. G. Spence, R. N. Zare, C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, J. N. Baillargeon, A. L. Hutchinson, and A. Y. Cho. Cavity ringdown spectroscopy using mid-infrared quantum-cascade lasers. *Optics Letters* 24, 1999.

- [143] A. Boschetti, D. Bassi, E. Iacob, S. Iannotta, I. Ricci, M. Scotoni. Resonant photoacoustic simultaneous detection of methane and ethylene by means of a 1.63- μm diode laser. *Applied Physics B* 74, 2002.
- [144] S. M. Cristescu, S. T. Persijn, S. I. Hekkert, F. J. M. Harren. Laser-based systems for trace gas detection in life sciences. *Applied Physics B* 92, 2008.
- [145] M. G. da Silva, J. A. P. Lima, M. S. Sthel, E. Marín, C. E. N. Gatts, S. L. Cardoso, E. Campostrini, M. G. Pereira, A. C. Campos, M. S. O. Massunaga and H. Vargas. Ethylene and CO₂ emission rates in tropical fruits investigated by infrared absorption techniques. *Sciences Special Issue Vol. 17*, 2001.
- [146] M. B. Pushkarsky, M. E. Webber, C. K. N. Patel Ultra-sensitive ambient ammonia detection using CO₂-laser-based photoacoustic Spectroscopy. *Applied Physics B* 77, 2003.
- [147] D.U. Schramm, M. S. Sthel, M. G. da Silva, L. O. Carneiro, A. J. S. Junior, A. P. Souza, H. Vargas. Application of laser photoacoustic spectroscopy for the analysis of gas samples emitted by diesel engines. *Infrared Physics & Technology* 44, 2003.
- [148] B. G. Ageev, Y. N. Ponomarev, V. A. Sapozhnikova. Laser photoacoustic spectroscopy of biosystems gas exchange with the Atmosphere. *Applied Physics B* 67, 1998.
- [149] H. Zuckermann, F. J. M. Harren, J. Reuss, D. H. Parker. Dynamics of Acetaldehyde Production during Anoxia and Post-Anoxia in Red Bell Pepper Studied by Photoacoustic Techniques. *Plant Physiol. Vol. 11*, 1997.
- [150] A. Roman, M. W. Sigrist. Photoacoustic gas sensing employing fundamental and frequency-doubled radiation of a continuously tunable high-pressure CO₂ laser. *Appl. Phys. B* 75, 2002.
- [151] J. Oomens, H. Zuckermann, S. Persijn, D. H. Parker, F. J. M. Harren. CO₂-laser-based photoacoustic trace-gas detection: applications in postharvest physiology. *Applied Physics B* 67, 1998.
- [152] M. M. J. W. van Herpen, S. Li, S. E. Bisson, F. J. M. Harren. Photoacoustic trace gas detection of ethane using a continuously tunable, continuous-wave optical parametric oscillator based on periodically poled lithium niobate. *Applied Physics Letters* 81, 2002.
- [153] R. L. Prasad, S. N. Thakur, G. C. Bhar. CO₂ laser photoacoustic spectra and vibrational modes of heroin, morphine and narcotine. *PRAMANA Journal of Physics Vol. 59, N° 3*, 2002.

- [154] F. J. M. Harren, R. Berkelmans, K. Kuiper, S. te Lintel Hekkert, P. Scheepers, R. Dekhuijzen, P. Hollander, and D. H. Parker, *Applied Physics Letters* 74, 1999.
- [155] M. G. da Silva, H. Vargas, A. Miklós, P. Hess. Photoacoustic detection of ozone using a quantum cascade laser *Applied Physics B*, 2004.
- [156] L. Esaki, R. Tsu. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors, *IBM Journal of Research and Development* Vol. 14, N° 1, 1970.
- [157] R. Kazarinov, R. Suris. Possibility of amplification of electromagnetic waves in a Semiconductor with a Superlattice. *Sov. Phys. Semicond.* 5, 1971.
- [158] J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, C. Sirtori, A. L. Hutchingson, A. Y. Cho. *Science* 264 - 553, 1994.
- [159] D. Weidmann, A. A. Kosterev, C. Roller, R. F. Curl, M. P. Fraser, F. K. Tittel. Monitoring of ethylene by a pulsed quantum cascade laser. *Applied Optics* Vol. 43, N° 16, 2004.
- [160] C. Gmachl, A. Straub, R. Colombelli, F. Capasso, D. L. Sivco, A. M. Sergent, A. Y. Cho, *IEEE J. Quantum Electron* 38, 2002.
- [161] J. P. Lima, H. Vargas, A. Miklós, M. Angelmahr, P. Hess Photoacoustic detection of NO₂ and N₂O using quantum cascade lasers. *Applied Physics B* 85, 2006.
- [162] M. Beck, D. Hofstetter, T. Aellen. Continuous Wave Operation of a Mid-Infrared Semiconductor Laser at Room Temperature. *Science* Vol. 295, 2002.
- [163] A. A. Kosterev, F. K. Tittel. Chemical sensors based on Quantum Cascade Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002.
- [164] A. Bard, L. R. Falkner. *Electrochemical methods: Fundamentals and Applications*, John Wiley & Sons, Inc.: New York, 2001.
- [165] R. R. Mello. Desenvolvimento de Sensores de Gases à base de Ferritas do Tipo MFe₂O₄ (M = Mn, Zn e Ni). Dissertação de Mestrado em Física. Universidade Estadual de Maringá, 2008.
- [166] A. L. L. Ponzoni. Desenvolvimento de um sistema para caracterização de sensores de gás. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá, 2007.
- [167] W. Brian Arthur, Complexity and the economy. *Science*, Vol 284, 2, 1998.
- [168] Harold M., Eric S. Energy flow and the organization of life *Complexity*, Vol. 13, 1, 51-59, 2007.

- [169] Kaufmann, S. A. *Origins of order* , Oxford University Press, 1993.
- [170] Holland, J. *Hidden Order: how adaptation builds complexity*. Basics Book,1996.
- [171] Nicholas W. Watkins, and Mervyn, *Natural Complexity* , Science Vol.30, 18, 2008.
- [172] Ashley j. W. Wards, David J. T. Sumpter. Paul J. b. Hart, and Jens Kause *Quorum decision- making facilitates information transfers in fish shoals* PNAS, Vol. 105. no. 19, may 13, 2008.
- [173] Brown, P. & Lauder, H. *Collective Intelligence*. In S. Baron, J. Field & T.Schuller (Eds.) *Social Capital: Critical Perspectives* New York: Oxford University Press, 2000.
- [174] WWF, *Living Planet Report*, 2006.