



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Escola Politécnica & Escola de Química
Programa de Engenharia Ambiental

Marcelo Cruz dos Santos

Utilização de Dinâmica de Sistemas para
Avaliação de Emissões Atmosféricas de
Gases de Efeito Estufa na Indústria de
Exploração e Produção de Petróleo e Gás

Rio de Janeiro
2013



UFRJ

Marcelo Cruz dos Santos

Utilização de Dinâmica de Sistemas para
Avaliação de Emissões Atmosféricas de
Gases de Efeito Estufa na Indústria de
Exploração e Produção de Petróleo e Gás

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de
Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de
Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D. Sc.

Rio de Janeiro

2013

SANTOS, MARCELO CRUZ DOS.

Título: Utilização de Dinâmica de Sistemas para Avaliação de Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo e Gás / Marcelo Cruz dos Santos. – 2013.

xxvi, 318 p.: il.; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica e Escola de Química, Programa de Engenharia Ambiental, Rio de Janeiro, 2013.

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D. Sc.

1. Dinâmica de Sistemas. 2. Pensamento Sistêmico. 3. Aquecimento Global. 4. Efeito estufa. 5. Petróleo e Gás. I. Fernandes, Amarildo da Cruz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica & Escola de Química. III. Título.



UFRJ

Utilização de Dinâmica de Sistemas para Avaliação de Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo e Gás

Marcelo Cruz dos Santos

Orientador: Amarildo da Cruz Fernandes, D. Sc.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada pela Banca:

Presidente, Prof. nome, titulação, instituição

Prof. nome, titulação, instituição

Prof. nome, titulação, instituição

Prof. nome, titulação, instituição

Rio de Janeiro

2013

DEDICATÓRIA

“In memoriam” a meu avô Paschoal, que em nome da vida e da liberdade, há mais de um século atravessou todo um oceano até chegar o dia em que ensinou a um pequeno menino a enxergar o Universo dentro de uma caixinha de fósforos...

AGRADECIMENTOS

A Deus pai, todo poderoso, Alfa e Ômega a quem me submeto à sua vontade, toda a honra e toda a glória.

Foi uma longa jornada, desde março de 2010, entremeada com momentos incertos e dificuldades que muitas vezes furtaram minhas forças, de forma que minha fraqueza humana muitas vezes me fez pensar em desistir. Muitas vezes meu olhar não encontrava os caminhos ou as palavras, de forma que em cada um daqueles momentos eu não sabia para onde seguir. Mas hoje, mais que nunca, eu percebo que jamais estive sozinho, pois eu sempre tive a meu lado um anjo a quem um dia decidi dedicar a minha vida com amor e honra, e a quem no dia a dia renovo meu amor e dedicação. Minha esposa Cléa é minha força, minha razão e grande responsável pela conclusão deste trabalho. Foi ela que me ergueu nos momentos de fraqueza, que me alegrou nos momentos de tristeza e em especial, foi ela quem me deu a maior alegria de nossa vida, nossa pequena e amada Athena.

A ti, filha amada, também dedico este trabalho. Seu pai a ama como jamais poderia imaginar que é possível amar. Perdô-me pelos incontáveis momentos em que você me chamou para brincar e eu não pude, pois tinha que estudar. Você não faz idéia de como eu sofria com isso, mas agora isso acabou. Que no futuro, quando você estiver lendo este trabalho, que ele sirva para que você entenda como é importante o desafio de avançar rumo ao desconhecido. Sair da zona de conforto, daquele pequeno pedaço da vida e do conhecimento em que nos sentimos confortáveis, pois alí está o nosso pequeno Universo. Mas é fora dali que a aventura começa. “A verdade está lá fora”, então quando chegar a sua hora, avance, cresça, arrisque-se e perceba que cada um de nós nasceu para ser grande, para realizar, para descobrir o novo. Olhe para si mesma, filha, e você verá a águia que existe em você. Abra suas asas e vôle sem medo, eu e sua mãe estaremos sempre com você. Agora, vamos brincar!!!

A meus pais Celeste e Elmir, a quem devo a vida e a quem devo a educação que me foi proporcionada. Em um país em que a educação é tratada como artigo de quinta categoria, ter tido a oportunidade de estudar em boas escolas e agora

concluir esta pós-graduação só me faz agradecer ainda mais por todo o seu esforço comigo.

A meu orientador Professor Dr. Amarildo da Cruz Fernandes, meu primeiro agradecimento fica por conta de ter aceito minha proposta de dissertação. Foi uma prova de confiança que muitas vezes as pessoas nessa situação não percebem existir. Meu segundo agradecimento é por sua infindável paciência comigo, por conta da demora na conclusão deste trabalho. Em sua forma serena de agir comigo, você sempre mostrou confiança em meu trabalho. Por isso, lhe sou muito grato.

Ao meu caro Edmilson Comparini Maturana, na época em que comecei o Mestrado Coordenador Geral de Petróleo e Gás, responsável por minha liberação para o Mestrado.

Aos colegas da CGPEG/IBAMA, que muitas vezes em conversas ainda que informais me deram boas idéias para o presente trabalho. Tenho orgulho de trabalhar com vocês.

A Deus pai, todo poderoso, Alfa e Ômega a quem me submeto à sua vontade, toda a honra e toda a glória.

“

- NÃO CONSIGO FAZER ISSO, SAM...

- EU SEI. ISSO NÃO É JUSTO. NA VERDADE, NEM DEVÍAMOS ESTAR AQUI... MAS ESTAMOS.

É COMO NAS GRANDES HISTÓRIAS, SENHOR FRODO. AS QUE TINHAM MESMO IMPORTÂNCIA. ERAM REPLETAS DE ESCURIDÃO E PERIGO. E, ÀS VEZES, VOCÊ NÃO QUERIA SABER O FIM... PORQUE COMO PODIAM TER UM FINAL FELIZ? COMO PODIA O MUNDO VOLTAR A SER O QUE ERA... DEPOIS DE TANTO MAL?

MAS NO FIM, É SÓ UMA COISA PASSAGEIRA, ESSA SOMBRA. ATÉ A ESCURIDÃO TEM DE PASSAR. UM NOVO DIA VIRÁ. E, QUANDO O SOL BRILHAR, BRILHARÁ AINDA MAIS FORTE.

ERAM ESSAS AS HISTÓRIAS QUE FICAVAM NA LEMBRANÇA, QUE SIGNIFICAVAM ALGO.

MESMO QUE VOCÊ FOSSE PEQUENO DEMAIS PARA ENTENDER O POR QUÊ. MAS ACHO, SENHOR FRODO, QUE EU ENTENDO, SIM. AGORA EU SEI. AS PESSOAS DESSAS HISTÓRIAS TINHAM VÁRIAS OPORTUNIDADES DE VOLTAR ATRÁS, MAS NÃO VOLTAVAM. ELAS SEGUIAM EM FRENTE... PORQUE TINHAM NO QUE SE AGARRAR.

- E EM QUE NÓS NOS AGARRAMOS, SAM?

- NO BEM QUE EXISTE NESTE MUNDO, SENHOR FRODO... PELO QUAL VALE A PENA LUTAR.

”

DIÁLOGO ENTRE FRODO E SAM
O SENHOR DOS ANÉIS - AS DUAS TORRES

RESUMO

SANTOS, MARCELO CRUZ DOS. Utilização de Dinâmica de Sistemas para Avaliação de Emissões Atmosféricas de Gases de Efeito Estufa na Indústria de Exploração e Produção de Petróleo e Gás. Rio de Janeiro, 2013. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

A indústria petrolífera tem um papel relevante na geração de Gases de Efeito Estufa (GEE) em seus vários segmentos, dentre eles o de exploração e produção de petróleo e gás (E&P). Existem várias metodologias para inventários de GEE, cada qual com diferentes graus de incerteza, o que torna complexa a quantificação das emissões, face ao elevado número de variáveis a serem analisadas.

O presente trabalho apresenta uma modelagem baseada em Dinâmica de Sistemas (DS) para a elaboração de inventários de emissões de CO₂ e CH₄, principais GEE emitidos pela indústria petrolífera.

Modelos baseados em DS permitem a análise de Sistemas Complexos, nos quais alterações em suas variáveis atuam não apenas nas próprias variáveis, mas no sistema como um todo, gerando retroalimentação nas variáveis alteradas e relações de causa e efeito.

O modelo proposto permite a manipulação das variáveis envolvidas no segmento de E&P, gerando informações precisas sobre seus comportamentos individuais e o comportamento geral do próprio sistema, minimizando as incertezas dos inventários.

O modelo foi desenvolvido de forma a atender às exigências da “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA, a qual determina que instalações de E&P de petróleo e gás que emitam ao menos 25×10^3 t CO₂ eq / ano devem reportar suas estimativas das emissões anuais totais de GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq., as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte.

Palavras chave: Dinâmica de Sistemas; Pensamento Sistêmico; Aquecimento Global; Efeito estufa; Óleo e Gás.

ABSTRACT

SANTOS, MARCELO CRUZ DOS. Use of Dynamic Systems for Evaluation of Atmospheric Emissions of Greenhouse Gases in Exploration and Production of Oil and Gas Industry. Rio de Janeiro, 2013. Thesis (Master) - Program of Environmental Engineering, Polytechnic School and School of Chemistry, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

The oil industry has an important role in the generation of greenhouse gases (GHGs) in its various segments, including the exploration and production of oil and gas (E&P). There are several methodologies for GHG inventories, each with varying degrees of uncertainty, which complicates the quantification of emissions, considering the high number of variables to be analyzed.

This paper presents a model based on System Dynamics (SD) for the preparation of inventories of emissions of CO₂, CH₄ and N₂O, the main GHG emitted by the oil industry.

DS-based models allow the analysis of complex systems, in which changes in its variables act not only on the variables themselves, but the system as a whole, generating feedback and change in variables of cause and effect.

The proposed model allows the manipulation of variables involved in E&P segment, generating accurate information about their individual behavior and general behavior of the system itself, minimizing the uncertainties of inventories.

The proposed model allows the manipulation of the variables involved in the E&P segment, generating accurate information about their individual behaviors and overall behavior of the system itself, minimizing the uncertainties of inventories.

The model meets the requirements of "Subpart W" Regulation CFR Part 98 USEPA, which determines which facilities E&P oil and gas that emit at least 25×10^3 t CO₂ eq./year must report their estimates of total annual emissions of GHG expressed in metric tons of CO₂ eq., annual emissions of each individual GHG expressed in metric

tons of CO₂ eq. individualized and annual emissions of each GHG expressed in metric tons of CO₂ eq. and broken down by type of source.

Keywords: System Dynamics; Systems Thinking; Global Warming; Greenhouse Effect; Oil and Gas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variabilidade da temperatura do ar na Antártida ao longo dos últimos 800 mil anos em relação à temperatura média dos últimos mil anos. Fonte: Jouzel et al. (2007).	18
Figura 2: Séries temporais da variabilidade da temperatura da superfície do mar ao longo dos últimos 14,5 milhões de anos. Fonte: Sachs et al. (2001), Stott et al. (2004), Medina-Elizalde e Lea (2005), Saraswat et al. (2005) e Thornalley et al. (2009).	18
Figura 3: Distribuição geográfica das séries temporais da variabilidade da temperatura da superfície do mar	19
Figura 4: Evolução das temperaturas médias globais no período 1880-2011. Fonte: EPI (2012).....	22
Figura 5: Evolução das temperaturas médias globais no período 2001-2011. Fonte: EPI (2012).....	22
Figura 6: Temperaturas médias nos períodos 1961-1990 e 2001-2010. Fonte: EPI (2012).	23
Figura 7: Aristóteles.....	23
Figura 8: Hipócrates.....	23
Figura 9: Curva de crescimento da concentração atmosférica do dióxido de carbono 1978/2011. Fonte: adaptado de NOAA (2012).	32
Figura 10: Curva de crescimento da concentração atmosférica do metano 1983/2011. Fonte: adaptado de NOAA (2010) apud USEPA (2012), Etheridge et al. (2002) apud USEPA (2012a) e Spahni (2005) apud USEPA (2012b).	34
Figura 11: Curva de crescimento da concentração atmosférica do óxido nitroso 1977/2012. Fonte: adaptado de NOAA/ESRL (2012).	35
Figura 12: Concentração atmosférica de trifluoreto de nitrogênio (ppt).	38
Figura 13: Produção anual global de trifluoreto de nitrogênio no período 1995 – 2008, em toneladas métricas.....	39
Figura 14: Variação do forçamento radiativo médio dos principais GEE no período 1980/2010. Fonte: baseado em NOAA (2012).....	48
Figura 15: Variação percentual nos forçamentos radiativos ($W.m^{-2}$) dos principais GEE ao longo do período 1980/2010.	49

Figura 16: Participação percentual dos GEE no forçamento radiativo ($W.m^{-2}$) total em 2010. Fonte: (NOAA, 2012).....	50
Figura 17: Representação das variações dos forçamentos radiativos ($W.m^{-2}$) do dióxido de carbono e do metano frente às variações dos demais GEE.	51
Figura 18: Variação da participação do forçamento radiativo do metano em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.....	52
Figura 19: Variação da participação do forçamento radiativo do dióxido de carbono em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.....	52
Figura 20: Variação da participação do forçamento radiativo conjunto do dióxido de carbono e do metano em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.	52
Figura 21: Estimativas do forçamento radiativo ($W.m^{-2}$) para os GEE de vida longa, outros agentes antrópicos importantes e radiação solar avaliados para o ano de 2005. Fonte: adaptado de IPCC (2007).	54
Figura 22: Exemplos do efeito do tempo de residência atmosférica na variação entre os valores obtidos pelas métricas do PAG e PTG.....	65
Figura 23: Georgius Agricola.....	69
Figura 24: Dmitri Mendeleev.	72
Figura 25: Pierre Marcelin Berthelot.....	76
Figura 26: Vladimir Ivanovich Vernadsky.	78
Figura 27: Thomas Gold.....	79
Figura 28: Diagrama de fases do gás natural.....	81
Figura 29: Fórmula estrutural do etano	84
Figura 30: Fórmula estrutural do iso-butano.....	84
Figura 31: Fórmula estrutural do ciclohexano.	84
Figura 32: Fórmula estrutural do benzeno.	84
Figura 33: Fórmula estrutural do eteno (etileno).	84
Figura 34: Fórmula estrutural do etino (acetileno).....	84
Figura 35: Diagrama triangular da composição normal dos óleos crus. Fonte: API (2001).....	85
Figura 36: Diagrama esquemático das emissões de GEE da indústria do petróleo e do gás natural. Fonte: API (2009).	97
Figura 37: Participação setorial nas emissões de GEE antropogênicos em 2004 em CO_2 eq. Fonte: IPCC (2007).....	98

Figura 38: Emissões globais de GEE em 2005. Fonte: Herzog (2009).	100
Figura 39: Evolução das emissões de GEE da Exxon Mobil no período 2008 – 2011. Fonte: Exxon Mobil (2012).	101
Figura 40: Emissões de CO ₂ eq. no período 2010 a 2012, oriundas das atividades de Exploração e Produção (“ <i>upstream</i> ”) da SHELL. Fontes: SHELL (2010), SHELL (2011) e SHELL (2012).	102
Figura 41: Evolução das emissões de GEE da Chevron no período 2006 – 2011. Fonte: Chevron (2012).	103
Figura 42: Evolução das emissões de GEE da BP no período 2001 – 2010. Fonte: BP (2010a).	104
Figura 43: Evolução das emissões de GEE da PETROBRAS no triênio 2008 – 2010. Fonte: adaptado de GHG Protocol (2008), GHG Protocol (2009) e GHG Protocol (2010).	105
Figura 44 : Emissões de CO ₂ eq. por atividade em 2004. Fonte: PETROBRAS (2005).	105
Figura 45: Evolução das emissões de CO ₂ eq. no período 2002 – 2004, referentes às atividades de Exploração e Produção da PETROBRAS. Fonte: PETROBRAS (s.d.).	106
Figura 46: Emissões de GEE em CO ₂ eq. da PETROBRAS e da SHELL no triênio 2008 a 2010. Fontes: GHG Protocol (2008), GHG Protocol (2009), GHG Protocol (2010) e SHELL (2012).	108
Figura 47: “ <i>Cluster</i> ” do pré-sal na Bacia de Santos.	109
Figura 48: Retroalimentação (“ <i>feedback</i> ”) entre eventos e padrões de comportamento gerados pelo evento.	113
Figura 49: Sistema complexo.	114
Figura 50: interação mútua entre as partes de um sistema.	117
Figura 51: Relacionamento entre sistemas e sub-sistemas.	118
Figura 52: Jay Wright Forrester.	122
Figura 53: Modelo esquemático de sistemas abertos.	124
Figura 54: Modelo esquemático de sistema fechado.	125
Figura 55: Diagrama de enlace causal.	126
Figura 56: Comportamento de sistema com “ <i>feedback</i> ” positivo.	127
Figura 57: Comportamento de sistema com “ <i>feedback</i> ” negativo.	128

Figura 58: Comportamento oscilatório de um sistema – tendência ao equilíbrio (“goal seeking”).....	128
Figura 59: Comportamento oscilatório de um sistema – tendência ao retorno.....	129
Figura 60: Exemplo de Diagrama de Enlace Causal. Fonte: Fernandes (2003).	130
Figura 61: Detalhe de um “feedback” de Reforço (R), do exemplo da Figura 60.	131
Figura 62: Detalhe de um “feedback” de Equilíbrio (E), do exemplo da Figura 60.	132
Figura 63: Exemplo de sistema, apresentando seus limites, Fluxos, Estoques e “feedbacks”, formadores dos blocos que dão origem ao sistema de acordo com Forrester. Fonte: o autor.	134
Figura 64: Laços de realimentação (“feedbacks”) com seus respectivos blocos (Estoques e “Feedbacks”) formadores do sistema representado pela Figura 63, segundo o conceito de Forrester.....	135
Figura 65: Comparação conceitual entre acurácia e precisão. Fonte: adaptado de IPCC (2006).	141
Figura 66: Processo de modelagem aplicada na abordagem dinâmica de sistemas. Fonte: Richardson e Pugh (1989), apud Hong (2008).....	151
Figura 67: Distribuição percentual das emissões de GEE de acordo com as categorias de fontes, segundo USEPA (2013).	161
Figura 68: Emissões de metano no segmento offshore, discriminadas por grupos de fontes. Fonte: USEPA (2013a).	162
Figura 69: Emissões da PETROBRAS no triênio 2008 – 2010, desagregadas por tipo de fonte. Fonte: GHG Protocol, 2008, 2009 e 2010.	163
Figura 70: Tipos de abordagem para estimativas de emissões de GEE segundo API (2009).	167
Figura 71: Produção conjunta dos Módulos 3 e 4 de gás produzido e gás queimado. Fonte: PETROBRAS (2009).....	170
Figura 72: Modelo desenvolvido para cálculo das emissões atmosféricas de GEE.	173
Figura 73: Inserção no modelo iThink dos valores anuais de produção de gás ao longo do período de duração da simulação.	174
Figura 74: Inserção no modelo iThink dos valores anuais de queima de gás ao longo do período de duração da simulação.	175
Figura 75: Painel de Controle do modelo.	176
Figura 76: Controle deslizante.....	177

Figura 77: “Switches”.....	177
Figura 78: Gráficos gerados em uma mesma simulação pelo software iThink.	178
Figura 79: Tabela gerada pelo software iThink.....	178
Figura 80: Botões de comando.....	179
Figura 81: Janela apresentada pelo acionamento do botão “Convenções Emissões de CH ₄ ”.....	179
Figura 82: Janela apresentada pelo acionamento do botão “Convenções Emissões de CO ₂ ”.....	180
Figura 83: Setor 1: emissões de CH ₄ oriundas das fontes de ventilação.	183
Figura 84: Setor 2: emissões de CH ₄ oriundas das fontes de combustão.	184
Figura 85: Setor 3: emissões de CO ₂ oriundas das fontes de ventilação.	185
Figura 86: Setor 4: emissões de CO ₂ oriundas das fontes de combustão.....	186
Figura 87: Emissões totais de CO ₂ e CH ₄ em CO ₂ eq., emissões totais oriundas da ventilação e da combustão em CO ₂ eq. e emissões totais em CO ₂ eq. conforme solicitado pela “subpart W” do Regulamento 40 CFR Part 98 da USEPA.	187
Figura 88: Emissões de GEE segundo “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA, ao longo dos 14 anos representados pela simulação.....	188
Figura 89: Valores gerados pelo modelo referentes às emissões anuais de GEE .	188
Figura 90: Curvas comparativas das emissões totais de CO ₂ eq.	189
Figura 91: Perfis de emissão de fontes específicas.....	189
Figura 92: Perfis de emissões de grupos de fontes.....	190
Figura 93: Joseph Fourier.....	233
Figura 94: John Tyndall.	234
Figura 95: Svante Arrhenius.	235
Figura 96: Guy Stewart Callendar.....	236
Figura 97: Charles David Keeling.	238
Figura 98: J. Murray Mitchel.	239
Figura 99: Ranking dos 20 países mais emissores de CO ₂ a partir da queima de combustíveis fósseis, da produção de cimento e da queima de gás.	266

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variação das concentrações de CO ₂ , CH ₄ e N ₂ O desde o período pré-industrial até 2010.	21
Tabela 2: Emissões de GEE's da PETROBRÁS em 2009.	30
Tabela 3: Potencial de Aquecimento Global dos gases de efeito estufa segundo IPCC-FAR (1990), IPCC-SAR (1995), IPCC-TAR (2001) e IPCC-AR4 (2007).....	43
Tabela 4: Expressões simplificadas do forçamento radiativo, F _Δ (W.m ⁻²).	46
Tabela 5: Variação dos Forçamentos Radiativos (W.m ⁻²) dos principais GEE de origem antrópica no período 1980/2010.....	47
Tabela 6: Resumo da variação % nos forçamentos radiativos (W.m ⁻²) ao longo do período 1980/2010.	49
Tabela 7: Variação no percentual de participação do forçamento radiativo total dos principais GEE de origem antrópica no período 1980/2010.	49
Tabela 8: Concentrações atmosféricas e forçamentos radiativos dos principais gases de efeito estufa.....	53
Tabela 9: Emissões brasileiras de GEE em 2005 (Gg CO ₂ eq.), calculadas pelas métricas do PAG e PTG.....	64
Tabela 10: Efeito do tempo de residência atmosférica dos principais GEE na variação entre os valores obtidos pelas métricas do PAG e PTG no cálculo das emissões brasileiras de GEE em 2005.	65
Tabela 11: Composição típica de um gás natural.	82
Tabela 12: Análise elementar do óleo cru típico (% em peso).	83
Tabela 13: Classificação dos hidrocarbonetos segundo o tipo de cadeia e ligações carbônicas.....	86
Tabela 14: Classificação proposta por Tissot e Welte para óleos crus.	86
Tabela 15: Classificação dos hidrocarbonetos baseada no conteúdo químico primário.	87
Tabela 16: Emissões de N ₂ O da PETROBRAS e da SHEL no triênio 2008 a 2010.	110
Tabela 17: Abordagens para estimativas de emissões – Considerações gerais.....	153
Tabela 18: Fatores de Atividade (FA) e Fatores de Emissão (FE) do CO ₂	164
Tabela 19: Fatores de Atividade (FA) e Fatores de Emissão (FE) do CH ₄	165

Tabela 20: Produção estimada diária conjunta para os Módulos 3(P-55) e 4 (P-62) em 10^6 m ³ /dia.	169
Tabela 21: Perfil completo de emissões.	191
Tabela 22: Fontes potenciais de emissões de GEE no segmento exploração e produção de petróleo e gás.	271

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Cálculo do Potencial de Depleção de Ozônio. Fonte: Allen e Shonnard (2001).....	40
Equação 2: Índice de cálculo do Potencial de Aquecimento Global (PAG) conforme proposto por Lashof e Ahuja (1990) e adotado por IPCC (1990).	42
Equação 3: Conversão da emissão do GEEi para CO ₂ eq. (Fonte: o autor).....	55
Equação 4: Emissão total de GEE em CO ₂ eq. (Fonte: o autor).....	55
Equação 5: Potencial de Temperatura Global Absoluto para pulsos de emissões de dióxido de carbono, segundo Shine et al. (2005).	61
Equação 6: Potencial de Temperatura Global Absoluto para pulsos de emissões do GEE _x , segundo Shine et al. (2005).....	61
Equação 7: Potencial de Temperatura Global relativo para pulsos de emissões do GEE _x , segundo Shine et al. (2005).	61
Equação 8: Potencial de Temperatura Global Absoluto para emissões contínuas do GEE _x , segundo Shine et al. (2005).....	61
Equação 9: Potencial de Temperatura Global Absoluto para emissões contínuas de dióxido de carbono, segundo Shine et al. (2005).	61
Equação 10: Potencial de Temperatura Global relativo para emissões contínuas do GEE _x , segundo Shine et al. (2005).....	62
Equação 11: Índice de Forçamento Equivalente (IFE), segundo Wigley (1998).	66
Equação 12: Cálculo de emissões segundo INGAA (2005).	155
Equação 13: Inventário de emissões segundo IPCC (1997) e API (2009).....	156

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	3
1.1 Objetivos.....	5
1.2 Relevância.....	7
1.3 Alcance e limites.....	7
CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA	11
2.1 Planejamento conceitual.....	11
2.2 Construção do marco teórico da pesquisa	12
2.3 Pesquisa exploratória e descritiva	12
2.4 Revisão bibliográfica e documental	13
CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL.....	17
3.1 Mudanças climáticas e aquecimento global	17
3.2 Evolução histórica dos pensamentos, estudos e conferências sobre mudanças climáticas e aquecimento global.....	23
3.3 Forçantes climáticas	24
CAPÍTULO 4 – GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E SUA EQUALIZAÇÃO AO FORÇAMENTO RADIATIVO DO CO ₂	29
4.1 GEE segundo o Anexo "A" do Protocolo de Quioto.....	30
4.1.1 Dióxido de carbono – CO ₂	31
4.1.2 Metano – CH ₄	32
4.1.3 Óxido nitroso – N ₂ O.....	34
4.1.4 Hidrofluorcarbonos – HFCs	35
4.1.5 Perfluorcarbonos – PFCs	36
4.1.6 Hexafluoreto de enxofre – SF ₆	36
4.1.7 Trifluoreto de Nitrogênio – NF ₃	36
4.2 Outros Gases de Efeito Estufa	39
4.3 Potencial de Aquecimento Global (PAG) e Forçamento Radiativo dos Gases de Efeito Estufa (GEE).....	40
4.4 Equalização dos demais GEE ao forçamento radiativo do CO ₂	54

4.5	Novas propostas metodológicas alternativas ao uso do PAG.....	55
4.5.1	Potencial de Temperatura Global (PTG).....	59
4.5.2	TEMPerature Proxy Index (TEMP).....	65
CAPÍTULO 5 – FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PETRÓLEO BRUTO E DO GÁS NATURAL.....		69
5.1	Teorias de formação do petróleo.....	71
5.1.1	Biogenia.....	74
5.1.2	Abiogenia.....	76
5.2	Hidrocarbonetos.....	83
5.3	Contaminantes.....	87
5.3.1	Enxofre.....	88
5.3.2	Nitrogênio.....	88
5.3.3	Oxigênio.....	89
5.3.4	Metais.....	90
CAPÍTULO 6 – A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E DO GÁS NATURAL.....		95
6.1	Descrição da Indústria do petróleo e do gás natural.....	95
6.2	A indústria de petróleo e gás natural e as emissões globais de GEE.....	98
6.3	Gases de Efeito Estufa relevantes no setor de E&P da indústria do petróleo e do gás natural.....	106
6.3.1	CO ₂ - Dióxido de Carbono.....	108
6.3.2	CH ₄ – Metano.....	109
6.3.3	N ₂ O - Óxido Nitroso.....	109
CAPÍTULO 7 – PENSAMENTO SISTÊMICO E DINÂMICA DE SISTEMAS.....		113
7.1	Teoria geral dos sistemas.....	115
7.2	Sistemas.....	116
7.3	Sistemas complexos.....	118
7.4	Fundamentos da dinâmica de sistemas.....	121
7.4.1	Jay Wright Forrester.....	122
7.4.2	Ciclos de feedback: reforço e equilíbrio.....	124
7.4.3	Modelagem “soft”.....	129
7.4.4	Modelagem “hard”.....	133

7.4.5	A Linguagem de fluxos e estoques.....	133
7.4.5.1	Estoques.....	135
7.4.5.2	Fluxos.....	136
7.4.5.3	Elementos auxiliares.....	136
7.4.5.4	Conversores	137
7.4.5.5	Conectores	137
7.4.5.6	“Delays”	137
CAPÍTULO 8 – A INCERTEZA NOS CÁLCULOS DAS EMISSÕES DE GEE.....		141
8.1	Tipos de incertezas associadas aos inventários de GEE	142
8.1.1	Incerteza científica.....	142
8.1.2	Incerteza estimativa.....	142
8.1.3	Incerteza matemática	142
8.1.4	Incerteza paramétrica	142
8.1.5	Incerteza estatística.....	142
8.1.6	Incerteza sistemática.....	143
CAPÍTULO 9 – MODELO PROPOSTO		147
9.1	Modelos e simulação.....	147
9.2	O Compendium API e suas metodologias e procedimentos para estimativa de emissões de GEE	151
9.3	Características de um inventário robusto de GEE	158
9.3.1	Aplicabilidade.....	158
9.3.2	Integridade.....	158
9.3.3	Consistência	159
9.3.4	Transparência.....	159
9.3.5	Exatidão.....	159
9.4	Etapas da abordagem para elaboração do modelo.....	159
9.5	Seleção dos GEE a serem incluídos no modelo.....	166
9.6	Seleção da metodologia de inventário de GEE	166
9.7	Construção do modelo.....	168
9.8	Softwares disponíveis para modelagem dinâmica.....	171
9.9	Apresentação do modelo desenvolvido no software iThink	172
9.10	Descrição da montagem do modelo	180

CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	197
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	205
ANEXO A – EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL	233
A.1 Joseph Fourier, ☆ 1768 / † 1830.....	233
A.2 John Tyndall, ☆ 1820 / † 1893	234
A.3 Svante Arrhenius, ☆ 1859 / † 1927	235
A.4 Guy Stewart Callendar, ☆1898 / † 1964	236
A.5 Charles David Keeling, ☆ 1928 / † 2005	237
A.6 J. Murray Mitchel, ☆1928 / † 1990	239
A.7 Conferência Mundial sobre o Ambiente Humano, 1972	241
A.8 National Academy of Sciences, 1977	241
A.9 I Conferência Climática Mundial, 1979.....	243
A.10 I Conferência de Villach, 1980	244
A.11 II Conferência de Villach, 1985	245
A.12 Protocolo de Montreal, 1987	246
A.13 Conferência de Toronto, 1988.....	247
A.14 IPCC,1988.....	248
A.15 IPCC FAR (First Assessment Report), 1990	250
A.16 II Conferência Climática Mundial, 1990.....	251
A.17 RIO 92, 1992.....	251
A.18 IPCC SAR (Second Assessment Report), 1995.....	252
A.19 COP 1/1995 – Berlim, Alemanha	253
A.20 COP 2/1996 – Genebra, Suíça	253
A.21 COP 3/1997 – Quioto, Japão	254
A.22 COP 4/1998 – Buenos Aires, Argentina	254
A.23 COP 5/1999 – Bonn, Alemanha	254
A.24 COP 6 Parte I/2000 – Haia, Holanda	255
A.25 COP 6 Parte II/2001 – Bonn, Alemanha.....	255
A.26 IPCC TAR (Third Assessment Report), 2001	255
A.27 COP 7/2001 – Marrakesh, Marrocos.....	256
A.28 RIO + 10, 2002.....	257

A.29	COP 8/2002 – Nova Delhi, Índia.....	257
A.30	COP 9/2003 – Milão, Itália.....	257
A.31	COP 10/2004 – Buenos Aires, Argentina	257
A.32	COP 11/MOP 1/2005 – Montreal, Canadá	258
A.33	COP 12/MOP 2/2006 - Nairóbi, Quênia.....	258
A.34	IPCC AR4 (Fourth Assessment Report), 2007	259
A.35	COP 13/MOP 3/2007 – Bali, Indonésia	260
A.36	RIO + 15, 2007	261
A.37	COP 14/MOP 4/2008 – Poznan, Polônia.....	261
A.38	COP 15/MOP 5/2009 – Copenhagem, Dinamarca	262
A.39	COP 16/MOP 6/2010 – Cancún, México	262
A.40	COP 17/MOP 7/2011 – Durban, África do Sul.....	263
A.41	RIO + 20, 2012	263
A.42	COP 18/MOP 8/2012 – Doha, Qatar	265
A.43	IPCC AR5, 2013/2014	267

ANEXO B – DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E DO GÁS NATURAL CONFORME O COMPENDIUM API.....

B.1	Exploração e produção (E&P)	271
B.2	Elevação de areias betuminosas e óleos pesados	273
B.3	Produção de metano em minas de carvão	273
B.4	Processamento de gás	274
B.5	Captura e armazenamento geológico de carbono	274
B.6	Armazenamento de gás natural e gás natural liquefeito (LNG)	275
B.7	Transporte e distribuição	275
B.8	Refino	276
B.9	Petroquímica.....	277
B.10	Minérios e mineração	278
B.11	Varejo e marketing.....	278
B.12	Geração de energia	279

ÍNDICE REMISSIVO.....

NOTAS DE FIM

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

“

A LEI DA COLHEITA É OBTER-SE MAIS DO QUE SE PLANTOU. PLANTE UM ATO, E COLHERÁ UM HÁBITO. PLANTE UM HÁBITO E VOCÊ COLHERÁ UM CARÁTER. PLANTE UM CARÁTER E VOCÊ COLHERÁ UM DESTINO.

”

JAMES ALFRED VAN ALLEN —
FÍSICO NORTE-AMERICANO —
☆ 1914 / † 2006

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

O aquecimento da atmosfera terrestre é um fenômeno natural e necessário para a manutenção da vida no planeta, sendo provocado pelo balanço entre a radiação eletromagnética recebida pela Terra a partir do Sol, e a radiação infravermelha emitida pela Terra de volta para o espaço.

De acordo com o Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 1996), a radiação emitida pela Terra na forma de radiação infravermelha oscila em torno de 390 W/m^2 , dos quais cerca de 240 W/m^2 conseguem escapar pelas camadas mais altas da atmosfera e retornam para o espaço exterior. Os demais 150 W/m^2 ficam retidos na atmosfera por conta da ação de diversos gases, formando o fenômeno que se convencionou chamar de “efeito estufa”.

Segundo UNFCCC (2008), os chamados Gases de Efeito Estufa (GEE), conforme definido pelo Protocolo de Quioto, englobam um conjunto de mais de 70 compostos de origem natural e antrópica, dos quais os mais relevantes são o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O). Tal relevância fica evidente se levarmos em consideração que somente estes três gases são responsáveis por quase 90% de todo o forçamento radiativo¹ responsável pelo aquecimento global (NOAA, 2011).

No ano de 2007, o IPCC divulgou seu Quarto Relatório de Avaliações de Mudanças Climáticas do planeta, cujos resultados apontavam para a tendência de um aumento médio global das temperaturas entre $1,8^\circ \text{C}$ e $4,0^\circ \text{C}$ até o ano de 2100.

Segundo o relatório, caso os crescimentos da economia e da população mantivessem o mesmo ritmo, a perspectiva de aumento poderia ser ainda maior, podendo chegar a $6,4^\circ \text{C}$ podendo limitar-se a 3°C caso a concentração de CO_2 se estabilize em 45% acima da concentração atual (AVILA, 2007).

¹ Medida da influência que um fator exerce sobre o balanço de entrada e saída de energia no sistema Terra-atmosfera. É um índice de importância do fator como mecanismo potencial de mudança climática, expresso em Watts/m_2 (Wm^{-2}).

Desde meados do século XVIII, com o advento da Revolução Industrial e o consequente aumento da queima de combustíveis fósseis, das mudanças de uso da terra e a agricultura, as concentrações de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) têm aumentado de forma significativa. Até o ano de 2010, as concentrações desses três gases apresentaram crescimentos respectivamente da ordem de 39%, 158% e 20% (WMO 2009, 2010 e 2011). Tais incrementos nas concentrações desses gases vêm alterando o equilíbrio radiativo da Terra, intensificando o efeito estufa natural, o qual durante milhões de anos tem sido o suporte essencial para a vida do planeta.

Embora as emissões de GEE oriundas da indústria do petróleo e do gás natural representem menos da metade das emissões oriundas da agricultura (HERZOG, 2009, Figura 38) correspondem a um relevante papel face às emissões globais de gases de efeito estufa, e conseqüentemente no aumento de suas concentrações atmosféricas.

No ano de 2005, dentre todos os setores industriais, o Setor Energia contribuiu com cerca de 66,5% das emissões globais de GEE, as quais totalizaram $44,153 \times 10^9$ t CO₂ eq. Desse montante, cerca de $2,826 \times 10^9$ t CO₂ eq. correspondem às emissões referentes às atividades de extração, refino e processamento de óleo e gás, dentro das quais incluem-se as emissões oriundas das atividades de Exploração e Produção (E&P) (HERZOG, 2009).

Não há dados globais consolidados referentes às emissões específicas das atividades de E&P, mas a relevância da avaliação de tais emissões fica bastante clara quando observamos como exemplo as emissões da Petrobras em suas atividades de E&P no triênio 2002 a 2004, as quais evoluíram de $10,872 \times 10^6$ t CO₂ eq. para $16,512 \times 10^6$ t CO₂ eq. (PETROBRAS, s.d.).

Tal ausência de informações representa uma lacuna que impede a materialização de uma clara visão da efetiva contribuição das atividades de “upstream” frente ao conjunto de emissões da indústria de E&P de petróleo e gás.

O modelo ora apresentado pretende facilitar a realização de inventários das emissões de GEE oriundas das atividades de E&P, e determinar a relevância de cada variável ou conjunto de variáveis (Fatores de Atividade e Emissão, fontes de emissões isoladas ou grupos de fontes, origem das emissões, tipos de gases), bem como o efeito que mudanças em cada uma delas venham a gerar sobre o sistema como um todo, fazendo com que as informações obtidas a respeito de mudanças no projeto possibilitem a tomada de decisões de melhor qualidade.

1.1 Objetivos

A percepção da lacuna existente por conta da ausência de informações consolidadas sobre as emissões de GEE oriundas das operações de E&P, associada à ausência de uma ferramenta que permitisse uma visão de longo prazo do perfil de emissões foram os elementos responsáveis pelo planejamento conceitual deste trabalho. Inventários de emissões são diretamente associados a diversas variáveis, tais como tipo e quantidade de combustíveis consumidos, e em especial às curvas de produção de campos de óleo e gás, mas em geral limitam-se a quantificar as emissões em um específico e restrito período de tempo. Em suma, não são capazes de prever o perfil de emissões ao longo do tempo de vida útil de um campo produtor, por exemplo.

A modelagem das emissões de GEE por meio da Dinâmica de Sistemas (DS) permite ir além da simples quantificação das emissões, apresentando o comportamento presente e futuro do perfil de emissões em função da manipulação das variáveis envolvidas. Essa característica da DS permite a determinação do comportamento futuro do objeto da modelagem, sua compreensão e determinação dos efeitos sobre o sistema e cada uma de suas partes a partir das alterações efetuadas.

A proposta ora apresentada tem a pretensão de não se limitar à mera quantificação dos volumes de emissões de GEE. A proposta tem a intenção de transformar-se em uma ferramenta de diagnóstico e planejamento, ao conjugar simultaneamente a capacidade de quantificar as emissões com seu comportamento ao longo de períodos de tempo definidos pelo modelador.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de um modelo matemático baseado na linguagem da Dinâmica de Sistemas (DS), por meio do qual seja possível não apenas a quantificação das emissões, como também a forma como elas ocorrem em cada uma das fontes de emissões em instalações de Exploração e Produção de petróleo e gás. Esse tipo de modelagem permite a determinação do papel exato de cada variável, seja ela uma fonte de emissões ou a estequiometria dos hidrocarbonetos, e o comportamento do sistema a cada alteração efetuada em suas variáveis. Tal característica permite a adoção de políticas adequadas ao alcance dos objetivos pré-definidos pelo modelador, ainda que tais objetivos só devam ser alcançados em horizontes de tempo mais amplos.

O modelo desenvolvido tem como objetivos específicos a apresentação de informações detalhadas sobre o perfil de emissões, conforme é definido pela “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA, que embora tenha validade junto às empresas que atuam na área de E&P de petróleo e gás nas bacias petrolíferas norte-americanas, apresenta cuidados plenamente aplicáveis para as operadoras em atividade no Brasil.

Tal regulamento determina que instalações de E&P de petróleo e gás que emitam ao menos 25×10^3 t CO₂ eq. / ano devem reportar as seguintes estimativas:

- emissões anuais totais de GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq.;
- emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq.;
- emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte.

O modelo não apenas permite tais estimativas, mas vai além, permitindo a estimativa individualizada das emissões oriundas de cada específica fonte ou grupo de fontes de emissões, o que permite uma visão absolutamente detalhada do perfil de emissões de GEE da instalação modelada.

1.2 Relevância

Os inventários de emissões costumam ser ferramentas estáticas, na medida em que limitam-se a avaliar o comportamento das emissões atmosféricas em um período limitado e determinado de tempo. Ainda que tais períodos sejam ampliados, as informações obtidas não permitem uma visão dinâmica, uma vez que em geral referem-se a períodos já realizados, o que dificulta a avaliação das projeções futuras a partir das emissões atuais já conhecidas. Por sua característica estática, os inventários necessitariam de ajustes constantes nas curvas de tendência das emissões, a fim de estabelecer seus prognósticos de emissões. Para tal, cada variável do sistema em estudo necessitaria ser ajustada com base em novas estimativas, o que sem uma ferramenta adequada, pode se tornar inviável.

A modelagem dinâmica corresponde a essa ferramenta, uma vez que permite não apenas a própria estimativa das emissões ao longo de um perfil de tempo previamente determinado, como também permite alterações rápidas e práticas em cada variável modelada, alterando os resultados futuros com base nas alterações no presente.

Assim sendo, modelos dinâmicos de emissões de GEE são uma importante ferramenta de diagnóstico, prognóstico e planejamento de intervenções em sistemas de exploração e produção de petróleo e gás e seus cenários de emissões.

1.3 Alcance e limites

O modelo ora apresentado permite a estimativa de diversos níveis e categorias de emissões de GEE:

- Emissões específicas de cada fonte de emissões (Ex.: flares, geradores com motores de combustão interna, caldeiras e geradores de vapor, etc.);
- Emissões de grupos de fontes (Ex.: equipamentos estacionários, fontes móveis, ventilação de processo, etc.);
- Emissões por tipo de fonte (combustão, ventilação, fugitivas, indiretas);
- Emissões por tipo de gás (emissões totais de CH₄ e CO₂)²;

² O modelo ora apresentado não inclui as emissões de N₂O em função da baixa relevância de suas emissões dentre as emissões de GEE no setor de Exploração e Produção. No entanto, sua inclusão

- Emissões totais em CO₂ eq.

Os limites do modelo ora apresentado restringem-se às instalações de exploração e produção de petróleo e gás, cujas fontes de emissão de GEE são descritas na Tabela 2-1 do Compendium API (API, 2009). No entanto, o modelo pode ser facilmente adequado a quaisquer outras categorias, não apenas no setor de E&P da indústria do petróleo e gás, mas também em atividades e instalações de outras áreas de atividade.

CAPÍTULO 2

METODOLOGIA

“

NASCESTES NO LAR QUE PRECISAVAS, VESTISTES O CORPO FÍSICO QUE MERECIAS, MORAS ONDE MELHOR DEUS TE PROPORCIONOU, DE ACORDO COM TEU ADIANTAMENTO. POSSUIS OS RECURSOS FINANCEIROS COERENTES COM AS TUAS NECESSIDADES, NEM MAIS, NEM MENOS, MAS O JUSTO PARA AS TUAS LUTAS TERRENAS. TEU AMBIENTE DE TRABALHO É O QUE ELEGESTE ESPONTANEAMENTE PARA A TUA REALIZAÇÃO. TEUS PARENTES E AMIGOS SÃO AS ALMAS QUE ATRAÍSTE, COM TUA PRÓPRIA AFINIDADE. PORTANTO, TEU DESTINO ESTÁ CONSTANTEMENTE SOB TEU CONTROLE. TU ESCOLHES, RECOLHES, ELEGES, ATRAIS, BUSCAS, EXPULSAS, MODIFICAS TUDO AQUILO QUE TE RODEIA A EXISTÊNCIA. TEUS PENSAMENTOS E VONTADE SÃO A CHAVE DE TEUS ATOS E ATITUDES. SÃO AS FONTES DE ATRAÇÃO E REPULSÃO NA TUA JORNADA VIVÊNCIA. NÃO RECLAMES NEM TE FAÇAS DE VÍTIMA. ANTES DE TUDO, ANALISA E OBSERVA. A MUDANÇA ESTÁ EM TUAS MÃOS. REPROGRAMA TUA META, BUSCA O BEM E VIVERÁS MELHOR. EMBORA NINGUÉM POSSA VOLTAR ATRÁS E FAZER UM NOVO COMEÇO, QUALQUER UM PODE COMEÇAR AGORA E FAZER UM NOVO FIM.

”

CHICO XAVIER – MÉDIUM BRASILEIRO – ☆ 1910
/ † 2002

CAPÍTULO 2 – METODOLOGIA

2.1 Planejamento conceitual

A etapa de planejamento conceitual do trabalho teve início em uma série de leituras preliminares sobre os temas e subtemas abrangidos pela pesquisa. Nessa fase, foram lidos diversos artigos publicados em periódicos, manuais técnicos do IPCC³, do API⁴, da IPIECA⁵, da OGP⁶, da USEPA⁷, da CAPP⁸, WRI⁹, dentre outros, além de literatura específica sobre mudanças climáticas, química do petróleo, pensamento sistêmico, dinâmica de sistemas e outros temas correlatos, formadores do escopo da pesquisa. Desse complexo ecossistema de informações, buscou-se a linha mestra das inter e intraconexões que direcionassem seu foco no tema geral “emissões de GEE da indústria de E&P de petróleo e gás”.

Uma vez obtidas as informações básicas que permitiram uma concepção geral da extensão do trabalho e da complexidade que seria enfrentada, teve então início a definição dos tópicos de abrangência da pesquisa, limitados àqueles que de fato poderiam contribuir para uma visão global acerca do tema escolhido.

Tendo em vista as limitações de tempo características de um Mestrado Profissional, optou-se por evitar a obtenção de dados primários, o que demandaria um dispêndio de tempo não exequível. Dessa forma, a obtenção das informações restringiu-se à pesquisa bibliográfica e documental, entremeada com algumas pesquisas de campo, por meio de entrevistas informais com empresas e profissionais envolvidos na área de E&P de petróleo e gás.

³ Intergovernmental Panel on Climate Change.

⁴ American Petroleum Institute.

⁵ International Petroleum Industry Environmental Conservation Association.

⁶ International Oil and Gas Producers Association.

⁷ United States Environmental Protection Agency.

⁸ Canadian Association of Petroleum Producers.

⁹ World Resources Institute.

2.2 Construção do marco teórico da pesquisa

O marco teórico do presente trabalho foi desenvolvido a partir das leituras preliminares, as quais permitiram a definição dos limites de abrangência do estudo e da compreensão da complexidade do tema.

Dessa forma, foi possível apresentar um longo panorama das questões relacionadas ao conhecimento histórico sobre mudanças climáticas e o aquecimento global, passando por detalhadas informações sobre os gases de efeito estufa, seus índices de medição, concentração e participação, os principais pensadores e cientistas envolvidos, conceitos técnicos, metodologias de estimativa, o petróleo e suas características físico-químicas além de suas teorias de formação, uma visão geral da indústria do petróleo e do gás natural, chegando ao Pensamento Sistêmico e à Dinâmica de Sistemas e enfim à exposição das características do Compendium API, suas metodologias e das características necessária para o bom desenvolvimento de um inventário de emissões.

Esse amplo e detalhado quadro preliminar teve como objetivo fundamentar não apenas o próprio trabalho, como também servir como plataforma de pesquisa para quaisquer outros trabalhos em áreas correlatas, sejam eles do autor sejam eles de futuros leitores do presente trabalho.

2.3 Pesquisa exploratória e descritiva

A extensa variedade de informações necessárias para a boa condução do trabalho, as quais oscilaram entre temas tão distintos quanto mudanças climáticas, estequiometria de hidrocarbonetos, pensamento sistêmico e Dinâmica de Sistemas, metodologias de inventários, dentre outras, definiu por si a necessidade de que a pesquisa fosse conduzida de forma exploratória com a finalidade de permitir uma maior familiaridade com cada um desses temas e a interconexão entre cada um deles.

Por conta da flexibilidade característica desse tipo de pesquisa e da forma como o conhecimento sobre o tema geral foi se consolidando, a pesquisa começou a assumir um perfil mais descritivo, à medida em as informações obtidas começaram a fazer parte de um “sistema” de informações.

2.4 Revisão bibliográfica e documental

A revisão bibliográfica e documental efetivamente para a escrita do trabalho teve início ainda na fase de planejamento conceitual, à medida que as informações que iam sendo obtidas começavam a criar um “mapa mental” do escopo do trabalho. No entanto, na prática podemos afirmar que essa fase teve início já nos primeiros dias do Mestrado, uma vez que a linha mestra da dissertação a ser desenvolvida já existia. Face à essa característica, o volume de informações obtido foi extremamente grande, o que gerou uma elevada necessidade de catalogação das informações, a fim de tê-las disponíveis nos momentos adequados.

Ao longo de mais de três anos foram pesquisados em diversas bases de dados milhares de artigos e documentos, sejam eles “peer-review”, sejam eles relatórios de sustentabilidade de empresas, sejam eles “papers” apresentados em congressos e simpósios, dentre diversos outros tipos de documentos, como imagens ou vídeos, manuais técnicos, teses e dissertações.

CAPÍTULO 3

FUNDAMENTOS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL

“

O GRANDE RIO TEM SEU TRAJETO, ANTES DO MAR IMENSO. COPIANDO-LHE A EXPRESSÃO, A ALMA PERCORRE IGUALMENTE CAMINHOS VARIADOS E ETAPAS DIVERSAS, TAMBÉM RECEBE AFLUENTES DE CONHECIMENTOS, AQUI E ALI, AVOLUMA-SE EM EXPRESSÃO E PURIFICA-SE EM QUALIDADE, ANTES DE ENCONTRAR O OCEANO ETERNO DA SABEDORIA.

”

ESPÍRITO DE ANDRÉ LUIZ,
PSICOGRAFADO POR CHICO XAVIER
– LIVRO: “NOSSO LAR”

CAPÍTULO 3 – FUNDAMENTOS SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL

3.1 Mudanças climáticas e aquecimento global

O clima do planeta Terra tem se alterado naturalmente ao longo de seus 4,5 bilhões de anos em processo lento e progressivo, possibilitando a adaptação e evolução das espécies. Pittock (2009) cita diversas causas naturais das mudanças climáticas ocorridas no passado, tais como:

- a deriva continental;
- variações da órbita terrestre ao redor do sol;
- mudanças na irradiação solar;
- emissões vulcânicas;
- colisões cósmicas e emissão de material particulado (aerossóis) na atmosfera;
- gases de efeito estufa naturais.

Segundo Massambani e Ambrizzi (2008), as mudanças no clima da Terra ao longo dos últimos 400 mil anos tem sido muito significativas, oscilando rapidamente entre períodos muito quentes e glaciações. Essas significativas variações sugerem que o clima na Terra seria muito sensível às forçantes internas¹⁰ e externas¹¹. As Figuras Figura 1, Figura 2 e Figura 3 apresentam as variações de temperatura do ar e da superfície do mar ao longo de períodos que variam entre 14 mil e 14 milhões de anos. As linhas tracejadas na Figura 3 representam a tendência de variação das temperaturas ao longo dos períodos analisados.

¹⁰ Processos relacionados ao sistema terra-atmosfera-oceanos, submetidos a mecanismos de realimentação do sistema (“feedbacks”), os quais podem ser negativos, quando tendem a manter o estado de equilíbrio, ou positivos, quando tendem a intensificar a perturbação climática.

¹¹ Processos físico-químicos independentes dos processos terra-atmosfera-oceanos, os quais afetam o fluxo de radiação solar que atinge o planeta Terra.

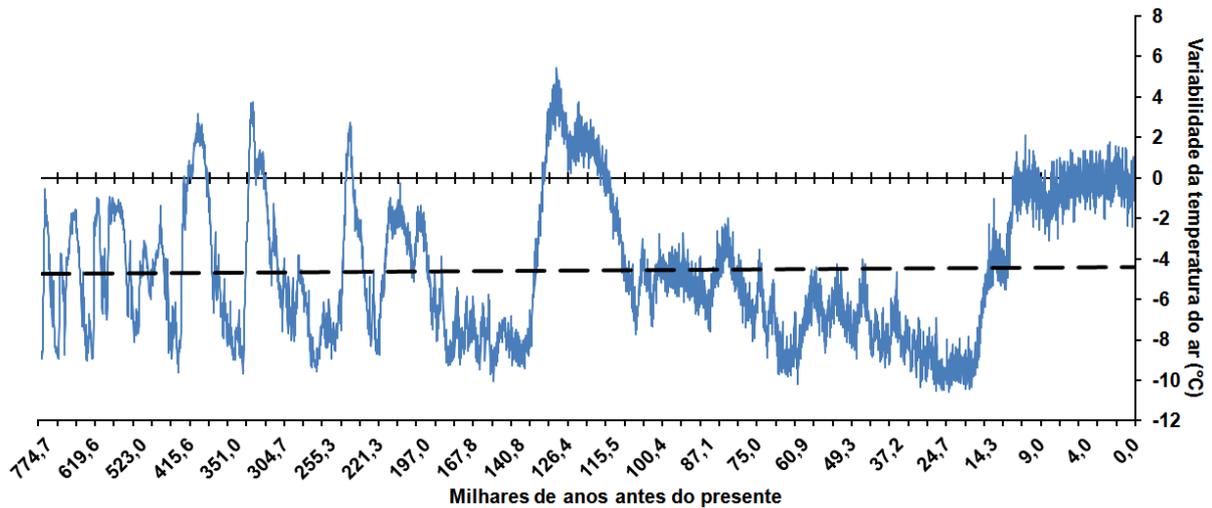


Figura 1: Variabilidade da temperatura do ar na Antártida ao longo dos últimos 800 mil anos em relação à temperatura média dos últimos mil anos. Fonte: Jouzel et al. (2007).

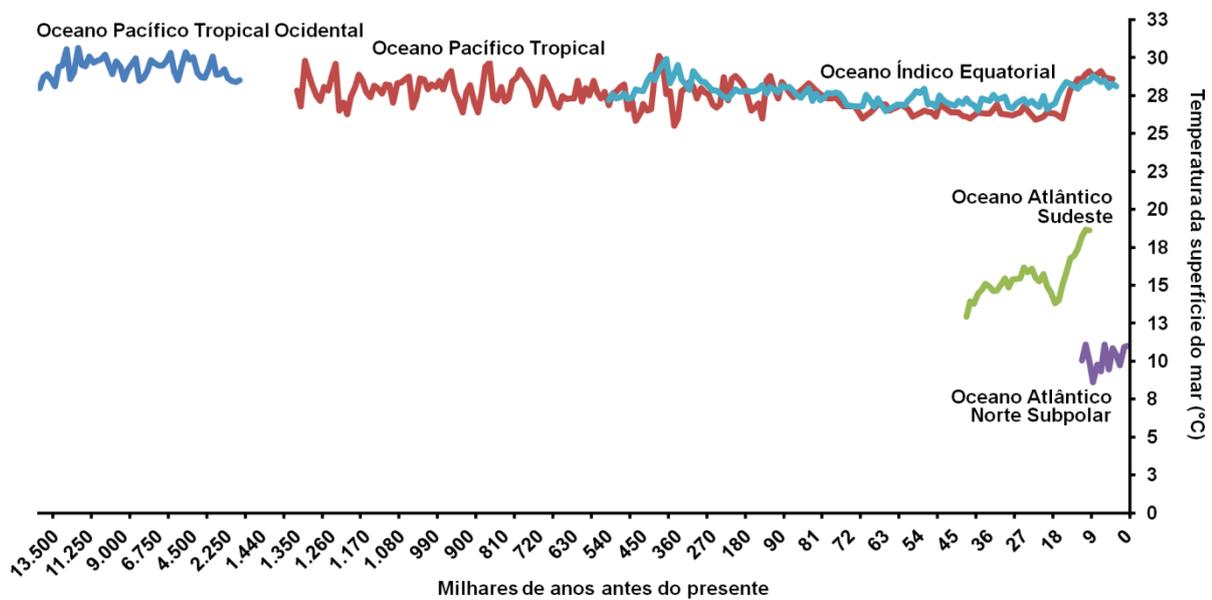


Figura 2: Séries temporais da variabilidade da temperatura da superfície do mar ao longo dos últimos 14,5 milhões de anos. Fonte: Sachs et al. (2001), Stott et al. (2004), Medina-Elizalde e Lea (2005), Saraswat et al. (2005) e Thornalley et al. (2009).

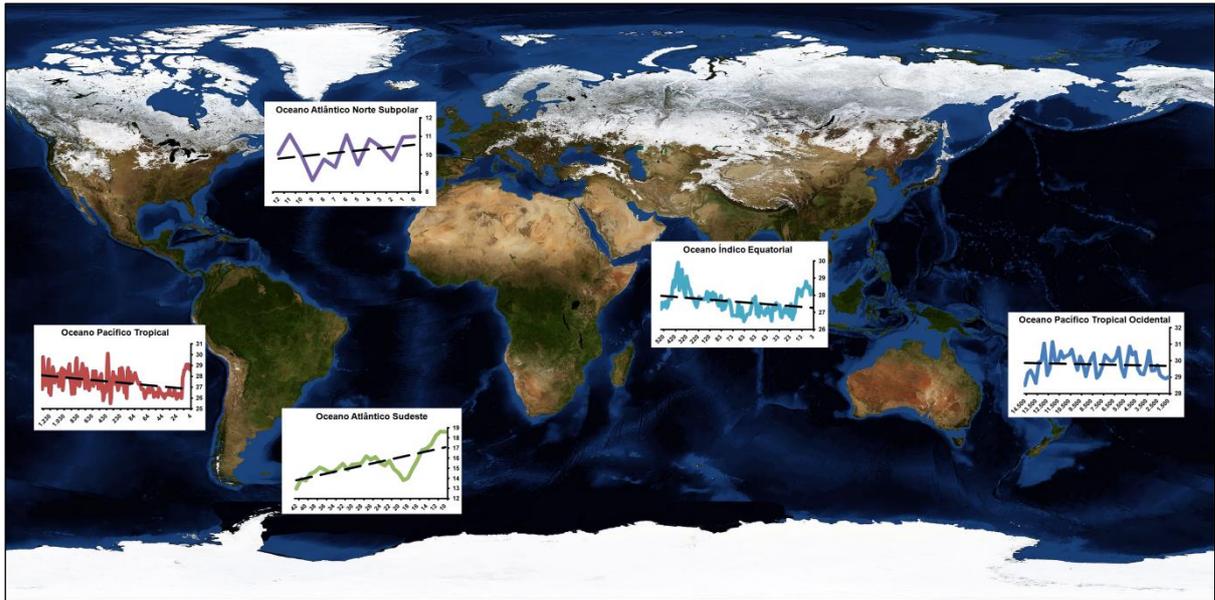


Figura 3: Distribuição geográfica das séries temporais da variabilidade da temperatura da superfície do mar

Há cerca de 200 mil anos surgiu a espécie que viria a determinar as mais profundas e dramáticas transformações no planeta: o *Homo sapiens* (em latim, “homem sábio”). No princípio, a nova espécie limitou-se a adaptar-se às condições ambientais vigentes, mas com o passar do tempo e a criação das mais rudimentares tecnologias, esse princípio foi invertido. Progressivamente, o homem primitivo passou a modificar o ambiente a seu redor em função de ações simples como o domínio do fogo, a criação da agricultura e do pastoreio de animais, e pela substituição das cavernas por pequenas aldeias. Todas essas pequenas alterações no ambiente não representavam quaisquer implicações além da escala geográfica local, de forma que dezenas de milhares de anos se passaram sem que a presença humana viesse a causar qualquer perturbação significativa ao ambiente do planeta.

No entanto, Ruddiman (2003) considera a hipótese de que a influência antrópica sobre o clima tenha sido significativa desde bem antes da Revolução Industrial, em função do cultivo de arroz e desmatamento de florestas para ampliação de áreas irrigadas para o cultivo de arroz, na Ásia. Ruddiman afirma que mudanças orbitais da Terra deveriam ter conduzido a um declínio na concentração de dióxido de carbono e metano na atmosfera de 8000 anos atrás. Ao contrário, verificou-se um aumento de 100 partes por bilhão em concentrações de metano, e de 20 a 25 ppm de dióxido de carbono até o início da era industrial. Segundo seus cálculos, esse

acrécimo teria elevado a temperatura da Terra em cerca de 0,8° C, contrariando o resfriamento que seria previsível em função das variações orbitais.

A tese de Ruddiman é corroborada por Tanimoto et al. (2008), com base na análise de registros paleoclimáticos que indicam aumentos em proporções inéditas nas concentrações de metano e dióxido de carbono nos últimos 5 mil anos. Tal comportamento não poderia ser explicado apenas por causas naturais, de forma que contribuições humanas desde os primórdios da agricultura seriam uma hipótese a ser considerada:

A visão moderna atribui papel significativo às emissões humanas a partir da revolução industrial, época que remonta a apenas 200 anos. Apesar das emissões antrópicas em períodos pré-industriais serem muito menores que as atuais, o seu efeito cumulativo desde o início da prática da agricultura traz evidências para corroborar a hipótese. Estima-se que entre 8 mil anos e o início do século XIX, as emissões antrópicas fossem de cerca de 0,04 GtC/ano, as quais ao longo de 7.800 anos representariam 320 GtC jogados na atmosfera. Esse valor coincide com o valor necessário para o acréscimo de 40 ppm de CO₂ na atmosfera observado na figura 4. Já as emissões dos últimos duzentos anos (média de 0,8 GtC/ano) somam juntas 160 GtC acrescidos ao estoque atmosférico.

O crescimento dos níveis de CO₂ coincide com o surgimento e expansão da agricultura na Eurásia a 10 mil anos atrás. Índícios paleobotânicos apontam para atividades agrícolas na região mesopotâmia datando dessa época. Rapidamente a agricultura se espalhou pelo sul da Europa e Mediterrâneo. Aproximadamente na mesma época os Chineses dominavam o plantio do arroz e usavam extensas áreas alagadas para o cultivo. Em questão de séculos era uma atividade difundida por todo velho mundo. A partir de 4 mil a.c., o desflorestamento ganhou força com a introdução do arado de bronze e outras ferramentas; projetos de irrigação desviavam rios e criavam novas áreas alagadas. O homem foi aprimorando seu modo de manipular o ambiente assim como suas emissões de gases estufa.

A concentração de CO₂ já havia atingido 80% do seu valor atual no primeiro século depois de Cristo. Até essa data, as atividades humanas já tinham se diversificado bastante. Uma população crescente na China, Índia e Europa, demandavam muito alimento, além de madeira e carvão para a calefação e cozimento. A introdução do ferro e arados puxados por animais foi um dos divisores de águas tecnológicos da agricultura. Rapidamente as grandes

nações consumiram suas florestas. A domesticação de animais também demandou espaço e a prática de queimadas para abrir pastagens era muito utilizada. Evidências arqueológicas mostram intenso fluxo de sedimentos para os lagos e estuários europeus a partir de 3 mil a. c., indicando erosão acentuada das margens dos rios devido ao deflorestamento (TANIMOTO ET AL, 2008).

Com a chegada do século XVIII, teve início na Grã-Bretanha a Revolução Industrial, que rapidamente espalhou-se para os Estados Unidos e logo para o resto do mundo. Desde então, as pressões sobre os recursos energéticos e matérias primas aumentaram de forma significativa. A queima de combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás) ampliou as emissões de gases de efeito estufa como o dióxido de carbono, metano e óxido nitroso. Às emissões originárias na queima de combustíveis fósseis, agregaram-se as emissões oriundas da queima de florestas, da agricultura e da pecuária, em quantidades muito maiores do que aquelas até então emitidas pelos processos naturais.

Passados pouco mais um século e meio desde o início da Revolução Industrial, verifica-se um forte incremento nas concentrações de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso como apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Variação das concentrações de CO₂, CH₄ e N₂O desde o período pré-industrial até 2010.

PERÍODO	CONCENTRAÇÕES		
	CO ₂ (ppm)	CH ₄ (ppb)	N ₂ O (ppb)
Pré-industrial	280,0	700,0	270
2008	385,2	1.797,0	321,8
2009	386,8	1.803,0	322,5
2010	389,0	1.808,0	323,2

Fonte: adaptado de WMO 2009, WMO 2010 e WMO 2011a.

Dados recentes divulgados pela Organização Marítima Internacional (WMO 2011), indicam que a temperatura média global foi estimada como sendo 0,53° C ± 0,09° C acima da média anual de 14° C referente ao período 1961-1990. Isso faz com que 2010 seja considerado como o ano mais quente já registrado desde 1880 (Figura 4).

A década 2001-2010 foi também a mais quente já registrada, com temperaturas médias $0,48^{\circ}\text{C}$ acima das médias do período 1961-1990 (Figuras 4, 5 e 6).

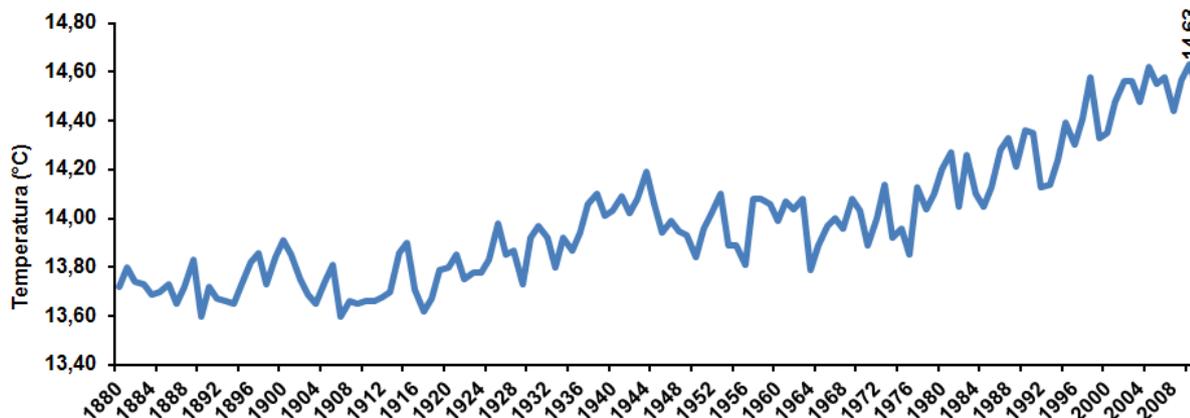


Figura 4: Evolução das temperaturas médias globais no período 1880-2011. Fonte: EPI (2012).

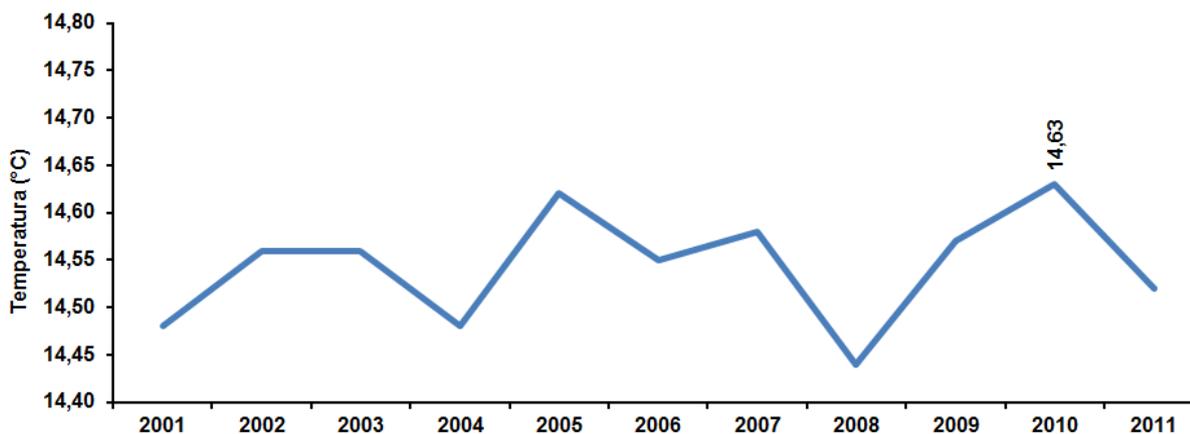


Figura 5: Evolução das temperaturas médias globais no período 2001-2011. Fonte: EPI (2012).

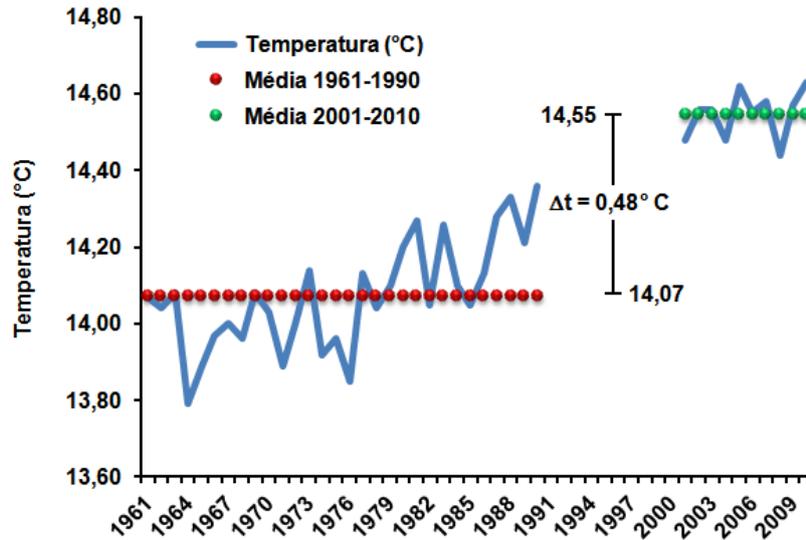


Figura 6: Temperaturas médias nos períodos 1961-1990 e 2001-2010. Fonte: EPI (2012).

3.2 Evolução histórica dos pensamentos, estudos e conferências sobre mudanças climáticas e aquecimento global

A precisa determinação da origem histórica dos debates e da própria percepção a



Figura 8: Aristóteles (384 – 322 a.C.)

respeito do clima e das mudanças climáticas é tarefa bastante extensa, considerando sua longevidade. De fato, apesar de os debates e a percepção da seriedade do tema mudanças climáticas e aquecimento global serem bastante frequentes na atualidade e por consequência parecerem ser assuntos eminentemente atuais, na prática o conhecimento empírico e teórico que é conhecido sobre as observações referentes às

variações do clima remontam há quase dois mil e quinhentos anos, chegando aos antigos filósofos gregos, em especial a Hipócrates (460 – 370 a. C.) e Aristóteles (384 – 322 a. C.).

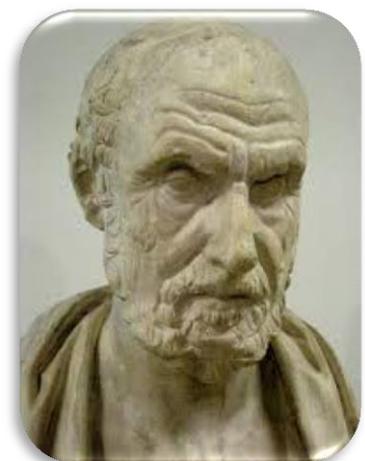


Figura 7: Hipócrates (460 – 370 a. C.)

A palavra “clima” cuja origem no termo grego “κλίμα” (lê-se “klima”), tinha o significado de “tendência” ou “inclinação”, referia-se apenas à altura do sol em

relação ao horizonte, em função da latitude. Aristóteles amadureceu esse pensamento, relacionando a qualidade do ar aos “vapores” e “exalações” de um país. Por sua vez, Hipócrates acreditava na existência de relações entre a saúde da população e as características do clima nacional.

Passados cerca de dois mil anos desde então, diversos pensadores modernos observaram e descreveram as influências que as mudanças climáticas exercem sobre os indivíduos e a própria sociedade.

Segundo Fleming (1998), embora Charles-Louis de Secondat, o Barão de Montesquieu (1689 – 1755), seja considerado o melhor pensador iluminista no que se refere ao tema do determinismo climático, outros, nomeadamente Jean-Baptiste Du Bos (1670 – 1742), David Hume (1711 – 1776) e Thomas Jefferson (1743 – 1826), compartilharam da teoria de que a ação humana estava diretamente envolvida na mudança do clima.

Uma detalhada descrição sobre a evolução dos pensamentos, estudos e conferências sobre mudanças climáticas e aquecimento global desenvolvidos ao longo dos últimos 250 anos é apresentada no Anexo “A”.

3.3 Forçantes climáticas

A expressão “aquecimento global”, largamente utilizada não apenas pela mídia, mas também utilizada e aceita pela maior parte da comunidade científica, sob algumas circunstâncias deve ser substituída pela expressão “mudanças climáticas”. De fato, se limitarmos o horizonte das avaliações sobre o clima aos tempos idos da Revolução Industrial, aquela expressão se aplica perfeitamente. No entanto, a busca de um horizonte mais amplo, na casa dos milhares ou milhões de anos, permite observar que a história da Terra tem apresentado tanto ciclos de aquecimento como ciclos de resfriamento a nível global. Assim sendo, é importante perceber que o aquecimento global é parte de um longo processo cíclico de alterações no clima da Terra, cujas origens repousam sobre agentes internos e externos, de origem antrópica e natural. Tais agentes são conhecidos como “forçantes climáticas”.

Forçantes climáticas são agentes físico-químicos que atuam sobre o sistema terra-atmosfera-oceano, os quais determinam as condições e a complexa interação entre o tempo e o clima do planeta, sendo responsáveis pela variabilidade climática (FIGUEIREDO et al., 2010).

O termo “forçante climática” não deve ser confundido com o termo “forçante radiativo”, o qual, segundo Ramaswamy et al. (2001), apud Forster et al. (2007), é a medida da influência de um fator (uma forçante climática) na alteração do balanço de entrada e saída de energia no sistema Terra/atmosfera, sendo utilizado como um índice de importância do fator como um potencial mecanismo de mudança climática. Se por um lado as forçantes climáticas são agentes físico-químicos adimensionais, o forçante radiativo de um fator é medido em watts/m^{-2} .

Segundo Oliveira (2010), as mudanças climáticas podem ser consequência direta ou indireta das atividades humanas, cujos impactos alteram a composição da atmosfera. Da mesma forma, fatores naturais externos, tais como a variação orbital da Terra e a emissão da radiação solar, bem como fatores naturais internos, tais como processos típicos do sistema climático terrestre, podem contribuir para as alterações do clima.

Os forçantes radiativos podem ter efeitos tanto positivos quanto negativos sobre o sistema climático. Um forçante radiativo positivo, tal como o produzido por concentrações crescentes de gases de efeito estufa, tende a aquecer a superfície terrestre. Por outro lado, um forçante radiativo negativo, que pode surgir a partir do aumento de alguns tipos de aerossóis, tende a resfriar a superfície. Fatores naturais, tais como alterações na atividade solar ou aumento da atividade vulcânica, também podem causar forçamento radiativo (IPCC, 2001).

CAPÍTULO 4

GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E SUA EQUALIZAÇÃO AO FORÇAMENTO RADIATIVO DO CO₂

“

MELHORAR O MUNDO É MELHORAR OS SERES HUMANOS. A COMPAIXÃO É A COMPREENSÃO DA IGUALDADE DE TODOS OS SERES, É O QUE NOS DÁ FORÇA INTERIOR. SE SÓ PENSARMOS EM NÓS MESMOS, NOSSA MENTE FICA RESTRITA. PODEMOS NOS TORNAR MAIS FELIZES E, DA MESMA FORMA, COMUNIDADES, PAÍSES, UM MUNDO MELHOR. A MEDICINA JÁ CONSTATOU QUE QUEM É MAIS FELIZ TEM MENOS PROBLEMAS DE SAÚDE. QUANDO CULTIVAMOS A COMPAIXÃO, TEMOS MAIS SAÚDE.

”

DALAI LAMA (TENZIN GYATSO) —
MONGE E LAMA TIBETANO —

☆ 1935

CAPÍTULO 4 – GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) E SUA EQUALIZAÇÃO AO FORÇAMENTO RADIATIVO DO CO₂

Os Gases de Efeito Estufa (GEE) são componentes gasosos de origem natural ou antropogênica, que absorvem radiação em determinados comprimentos de onda do espectro de radiação infravermelha emitida pela superfície da Terra, pela atmosfera ou pelas nuvens. Tal propriedade é o fator determinante para a ocorrência do efeito estufa.

O Vapor d'água (H₂O), o Dióxido de Carbono (CO₂), o Óxido Nitroso (N₂O), o Metano (CH₄) e o Ozônio (O₃), são os gases de efeito estufa primários da atmosfera terrestre. A atmosfera contém além desses, certo número de gases de efeito estufa de origem totalmente antropogênica, como os Halocarbonos¹² ou outras substâncias que contém Cloro e Bromo, contemplados pelo Protocolo de Montreal¹³.

Além do CO₂, do N₂O, e do CH₄, o Protocolo de Quioto¹⁴ contempla os gases de efeito estufa Hexafluoreto de Enxofre (SF₆), os Hidrofluorcarbonetos (HFC's) e os Perfluorocarbonetos (PFC's).

¹² Muitos Halocarbonos possuem um Potencial de Aquecimento Global elevado. Os Halocarbonos que contém Cloro e Bromo também atuam no esgotamento da camada de Ozônio.

¹³ O Protocolo de Montreal sobre substâncias que empobrecem a camada de Ozônio é um tratado internacional em que os países signatários se comprometem a substituir as substâncias que se demonstrou estarem reagindo com o ozônio (O₃) na parte superior da estratosfera (conhecida como ozonoesfera). O tratado esteve aberto para adesões a partir de 16 de Setembro de 1987 e entrou em vigor em 1 de Janeiro de 1989. Ele teve adesão de 150 países e foi revisado em 1990, 1992, 1995, 1997 e 1999.

¹⁴ O Protocolo de Quioto é um acordo internacional ligado às Nações Unidas sobre Mudança do Clima. A principal característica do Protocolo de Quioto é o estabelecimento de metas obrigatórias para 37 países industrializados e a Comunidade Europeia para reduzir a emissão de gases de efeito estufa (GEE's). Estas reduções equivalem a uma média de 5% face aos níveis de 1990 durante o período de 2008 a 2012.

Reconhecendo que os países desenvolvidos são os principais responsáveis para os atuais níveis elevados de emissões de GEE's na atmosfera como resultado de mais de 150 anos de atividade industrial, o protocolo impõe uma pesada carga sobre as nações desenvolvidas sob o princípio de "responsabilidades comuns mas diferenciadas".

O Protocolo de Quioto foi adotado em Quioto, no Japão, em 11 de Dezembro de 1997 e entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005. As regras para a implementação do Protocolo foram adotadas na COP 7 em Marrakesh, em 2001, e são chamadas "Acordos de Marrakesh".

De acordo com API (2009) e IPIECA (2003), no que se refere às emissões atmosféricas de GEE's na indústria de petróleo e gás, o CO₂ e o CH₄ são os gases que apresentam volumes de emissões relevantes para o segmento de exploração e produção. Apesar de seu grande Potencial de Aquecimento Global (PAG), o N₂O não é uma emissão significativa nas atividades de E&P de petróleo e gás.

Como exemplo dos volumes de emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, segundo o Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa (PETROBRAS, 2009), os volumes de emissões e seus respectivos percentuais são os apresentados na

Tabela 2, a seguir:

Tabela 2: Emissões de GEE's da PETROBRÁS em 2009.

GEE	VOLUME EM TONELADAS MÉTRICAS DE CO₂ EQ.	PERCENTUAL
CO₂	46.819.715	83,57%
CH₄	8.858.794	15,81%
N₂O	348.526	0,62%
TOTAL	56.027.035	100,00%

Fonte: PETROBRAS (2009).

Observa-se o baixo volume de emissões de N₂O, o que confirma as informações apresentadas por API (2009) e IPIECA (2003).

4.1 GEE segundo o Anexo "A" do Protocolo de Quioto

As crescentes preocupações internacionais sobre as mudanças climáticas fizeram com que durante a COP 6 (Conference of Parties), realizada em 1997 em Quioto, no Japão, fosse assinado o chamado Protocolo de Quioto, por meio do qual foram estabelecidas metas de redução de GEE para os principais países emissores, chamados países do Anexo I.

Em seu Anexo "A", o Protocolo de Quioto definiu como GEE os gases dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF₆). Passados 15 anos desde então, a COP 18 realizada em 2012 em Doha, no Qatar, dentre diversas decisões, estabeleceu um segundo período de vigência para o Protocolo de Quioto e a

aprovação de uma série de emendas a seu texto original, dentre as quais a inclusão do trifluoreto de nitrogênio (NF₃) em seu Anexo “A”.

4.1.1 Dióxido de carbono – CO₂

Segundo IPCC (2007), o dióxido de carbono é um gás de ocorrência natural, mas também é produzido pela queima de combustíveis fósseis como o petróleo, gás natural e carvão, além da queima de biomassa e diversos outros processos industriais. É o principal GEE de origem antropogênica que afeta o balanço radiativo da Terra, e serve de referência para a avaliação do PAG dos outros GEE.

Na indústria de petróleo e gás natural, a principal fonte de emissão do dióxido de carbono é a combustão, mas também são importantes fontes de emissão a produção de gás, processamento, refino e operações de captura e armazenamento de carbono, por meio de ventilação e emissões fugitivas. Isto ocorre em especial em operações realizadas com correntes ricas em CO₂. Além da concentração de CO₂, outros fatores associados às fontes de emissão, tais como o projeto dos poços e práticas operacionais nas instalações petrolíferas também podem contribuir com suas emissões (API, 2009).

As concentrações do CO₂ no gás natural são em geral inferiores a 2%, de tal forma que as emissões não associadas à combustão em geral são bastante reduzidas. No caso da província brasileira do pré-sal, elevados teores podem ser encontrados, como em Tupi, com 8% a 12% de concentração (NAKANO et al., 2009), podendo chegar a 79% no Campo de Júpiter - Bloco BM-S-24 (GCA, 2010).

O dióxido de carbono contribui com cerca de 64% do forçamento radiativo provocado pelos GEE de longa duração e elevou esse forçamento em 81% entre 2007 e 2011. Durante os 10 mil anos anteriores à Revolução Industrial, a concentração de CO₂ atmosférico manteve-se de forma constante em torno de 280 ppm, representando um estado de equilíbrio entre a atmosfera, a hidrosfera e a biosfera. A queima de combustíveis fósseis desde 1750 provocou o aumento de sua concentração em cerca de 39%, totalizando $8,4 \pm 0,5$ PgC em 2009 (WMO 2011a).

Solomon et al (2007), apud Knohl e Veldkamp (2011), citam que a concentração de dióxido de carbono, atualmente em torno de 390 ppm, pode atingir 600 a 800 ppm ao final do século XXI.

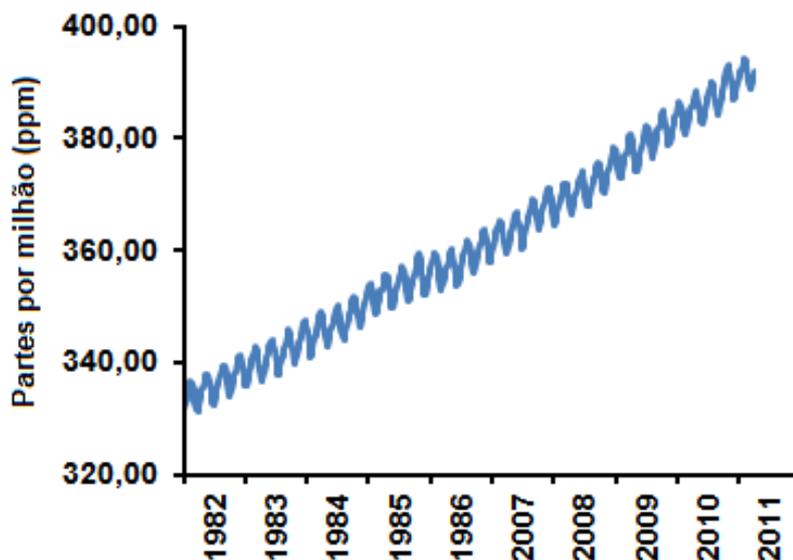


Figura 9: Curva de crescimento da concentração atmosférica do dióxido de carbono 1978/2011. Fonte: adaptado de NOAA (2012).

4.1.2 Metano – CH₄

O metano é o principal componente do gás natural associado com todos os hidrocarbonetos combustíveis, criação de animais e agricultura (IPCC, 2007).

Segundo Wuebbles e Hayhoe (2002), sua concentração mais que dobrou desde o início da era pré-industrial. Além disso, após o vapor d'água e o dióxido de carbono, o metano é o mais abundante GEE na troposfera.

Uma importante fonte de metano via de regra ignorada quando se fala em “energias limpas” é o metano oriundo da decomposição da vegetação da “zona de deplecionamento”¹⁵ de hidrelétricas, que fica estratificado no fundo do reservatório em função da termoclina¹⁶. As turbinas e vertedouros puxam a água rica em metano

¹⁵ Zona delimitada pela cota mínima do reservatório, permanentemente inundada.

¹⁶ Barreira de estratificação por temperatura que isola a água do fundo do reservatório da camada superficial que fica em contato com o ar (FERNSIDE, 2008).

que fica limitada pela termoclina, liberando grandes volumes desse gás para a atmosfera através das turbinas e vertedouros (FERN SIDE, 2008).

Na indústria de petróleo e gás natural, as emissões de metano podem originar-se da queima incompleta de combustíveis queimados em equipamentos estacionários como motores, incineradores, aquecedores, caldeiras, flares e de fontes móveis como embarcações e aeronaves. O metano também pode ser emitido por ventilação em operações rotineiras de manutenção, operações de emergência ou outras operações não rotineiras, como a reentrada em poços para manutenção. As emissões fugitivas também são uma fonte emissões, podendo ocorrer por vazamentos em superfícies seladas, juntas mecânicas, válvulas, pipelines, flanges, compressores, conexões ou PRVs¹⁷ (API, 2009).

O metano contribui com cerca de 18% do forçamento radiativo provocado pelos GEE de longa duração. Cerca de 40% do metano emitido para a atmosfera tem origem em fontes naturais, tais como zonas úmidas, e térmitas, ao passo que o restante das emissões tem origem antrópica, tais como a fermentação entérica de ruminantes, cultivo de arroz, combustão incompleta de combustíveis, aterros sanitários e combustão de biomassa. Antes da era industrial a concentração de metano na atmosfera oscilava em torno de 700 ppb, mas o aumento de fontes de emissão antrópicas provocou um aumento de 158%. Sua taxa de crescimento diminuiu de 13 ppb por ano no início dos anos oitenta para quase zero entre 1999 e 2006, mas voltou a aumentar a partir de 2007. O aumento de 19 ppb que ocorreu entre 2006 e 2009 foi seguido por um aumento de 5 ppb em 2010 (WMO 2011a).

As razões para a estabilização e posterior incremento da taxa de crescimento da concentração do metano não são inteiramente conhecidas. Segundo Kai et al. (2011), uma possibilidade para explicar tal comportamento poderia ser a redução de fontes microbianas no Hemisfério Norte ainda que sem uma correspondente redução de fontes no Hemisfério Sul. Tais mudanças seriam suficientes para eliminar a hipótese de que o comportamento seria consequência de uma redução das emissões de combustíveis fósseis. Ainda segundo os autores, cerca de metade da

¹⁷ Pressure Relief Valves (Válvulas de Alívio de Pressão).

redução das emissões de metano no Hemisfério Norte poderia ser explicada pela redução das emissões oriundas do cultivo de arroz na Ásia nas últimas três décadas, associada com o aumento do uso de fertilizantes e redução na utilização da água.

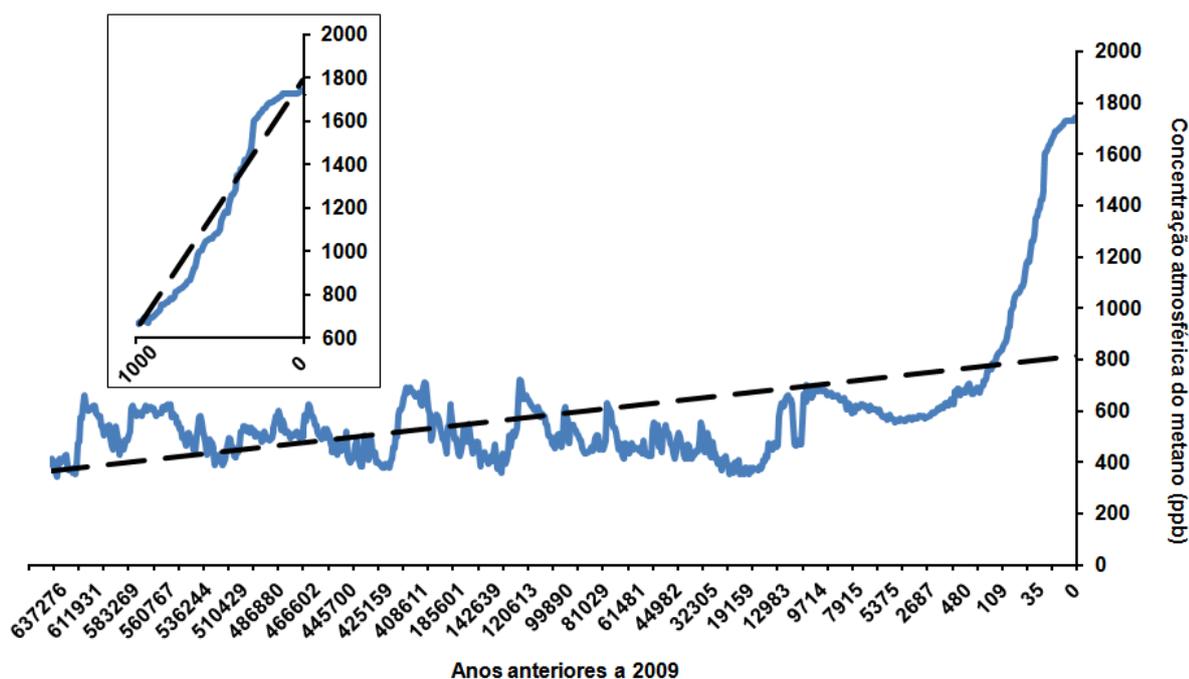


Figura 10: Curva de crescimento da concentração atmosférica do metano 1983/2011. Fonte: adaptado de NOAA (2010) apud USEPA (2012), Etheridge et al. (2002) apud USEPA (2012a) e Spahni (2005) apud USEPA (2012b).

4.1.3 Óxido nitroso – N₂O

A principal fonte antropogênica do óxido nitroso é a agricultura, através do manejo de solos e utilização de esterco animal, mas outras importantes fontes são o tratamento de esgotos, queima de combustíveis fósseis, e processos químico-industriais. Por outro lado, esse gás é naturalmente produzido por uma grande variedade de fontes biológicas no solo e na água, particularmente atividade microbiana em florestas tropicais úmidas (IPCC, 2007).

Em relação às operações da indústria de petróleo e gás natural, pequenas quantidades de óxido nitroso podem ser produzidas pela reação entre nitrogênio e oxigênio durante a combustão em fontes estacionárias ou móveis. A quantidade de

óxido nítrico produzido depende da composição do combustível, do equipamento onde ocorre a queima e das instalações de controle da poluição¹⁸. (API 2009).

Segundo IPCC (2007) e Kaiser et al. (1998), apud EMBRAPA (2009), o óxido nítrico é um dos três GEE mais importantes, apesar de sua baixa concentração na atmosfera. Segundo Robertson e Grace (2004), apud EMBRAPA (2009), isso se deve a seu elevado PAG, 310 vezes maior do que o PAG do CO₂. Do total de emissões de óxido nítrico, cerca de 40% tem origem antropogênica.

A contribuição do óxido nítrico ao forçamento radiativo da Terra é de aproximadamente 6% da contribuição total dos GEE de longa duração. Antes da era industrial sua concentração ficava em torno de 270 ppb. Em 2010, sua concentração média global foi de 323,2 ppb, e sua taxa de crescimento anual tem sido da ordem de 0,75 ppb / ano ao longo dos últimos 10 anos (WMO 2011a).

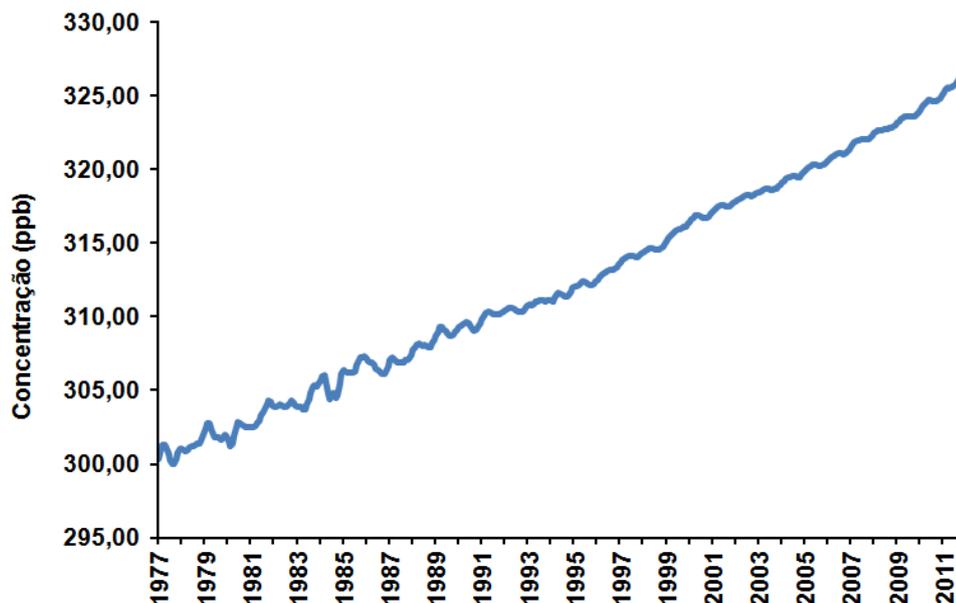


Figura 11: Curva de crescimento da concentração atmosférica do óxido nítrico 1977/2012. Fonte: adaptado de NOAA/ESRL (2012).

4.1.4 Hidrofluorcarbonos – HFCs

Os Hidrofluorcarbonos são gases produzidos comercialmente para utilização em substituição aos Clorofluorcarbonos (CFCs), controlados pelo Protocolo de Montreal. São utilizados largamente em refrigeração e fabricação de semicondutores.

¹⁸ Por exemplo, conversores catalíticos instalados para reduzir as emissões de motores veiculares podem aumentar as emissões de óxido nítrico (API, 2009).

Os HFCs fazem parte de um grupo maior denominado Halocarbonos¹⁹, termo que designa um grupo de espécies orgânicas parcialmente halogenados, dentre os quais citam-se os Clorofluorcarbonos (CFCs), os Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), os Hidrofluorcarbonos (HFCs), dentre outros (IPCC, 2007).

4.1.5 Perfluorcarbonos – PFCs

São subprodutos da fundição de alumínio e do enriquecimento de urânio. Também são usados em substituição aos CFCs na fabricação de semicondutores (IPCC 2007).

4.1.6 Hexafluoreto de enxofre – SF₆

É amplamente utilizado na indústria pesada para o isolamento de equipamentos de alta tensão e como auxiliar na fabricação de sistemas de arrefecimento e fios de semicondutores (IPCC 2007).

O SF₆ é produzido artificialmente e usado como isolante em equipamentos elétricos de distribuição de energia (WMO 2011a).

4.1.7 Trifluoreto de Nitrogênio – NF₃

Em 1997, quando foi criado o Protocolo de Quioto no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, seu Anexo A listou seis famílias de gases de efeito estufa apresentadas nos itens 2.2.1.1 a 2.2.1.6 acima, para os quais valeriam as regras globais de redução de emissões. Passados 15 anos, durante a COP 18 – MOP 8, realizada em novembro de 2012 em Doha, capital do Qatar, foi apresentada a primeira emenda a esse anexo, incluindo na cesta de gases o trifluoreto de nitrogênio – NF₃, como mais um dos gases responsáveis pelo aquecimento global cujas emissões devem ser reduzidas.

Apesar dessa inclusão tardia, o trifluoreto de nitrogênio já era citado no quarto Relatório de Avaliações do IPCC publicado em 2007, o qual indicava que o

¹⁹ Qualquer hidrocarboneto combinado com um dos elementos do grupo VII-A (Halogênios) da tabela periódica (Flúor, Cloro, Bromo, Iodo e Astató).

composto teria um tempo de residência de 740 anos e um PAG de 17200 para o horizonte de tempo de 100 anos (SOLOMON ET AL, 2007).

Em meados de 2008, os pesquisadores Michael J. Prather e Juno Hsu (PRATHER E HSU, 2008), do “Earth System Science Department” da Universidade da Califórnia foram os primeiros a alertar que o trifluoreto de nitrogênio apresentava características que o incluíam no rol dos mais importantes GEE: larga produção e utilização industrial, elevado tempo de residência atmosférica e elevado PAG.

Segundo os autores, a produção em 2008 de trifluoreto de nitrogênio equivaleria à 67 milhões de toneladas métricas de CO₂, representando um impacto potencial de efeito estufa maior do que as emissões de PFCs ou SF₆ das nações industrializadas.

Ao final do mesmo ano, um grupo de pesquisadores da “Scripps Institution of Oceanography”, também da Universidade da Califórnia (WEISS ET AL, 2008) afirmaram que pela primeira vez estavam sendo medidas as concentrações e tendências de crescimento das concentrações atmosféricas do trifluoreto de nitrogênio.

Tais medições revelaram que a concentração global média na troposfera aumentou quase que exponencialmente ao longo de 30 anos, variando de 0,015 ppt em agosto de 1978 a 0,478 ppt em março de 2008, o que representa uma taxa de crescimento de 0,053 ppt/ano ou cerca de 11% ao ano (Figura 12).

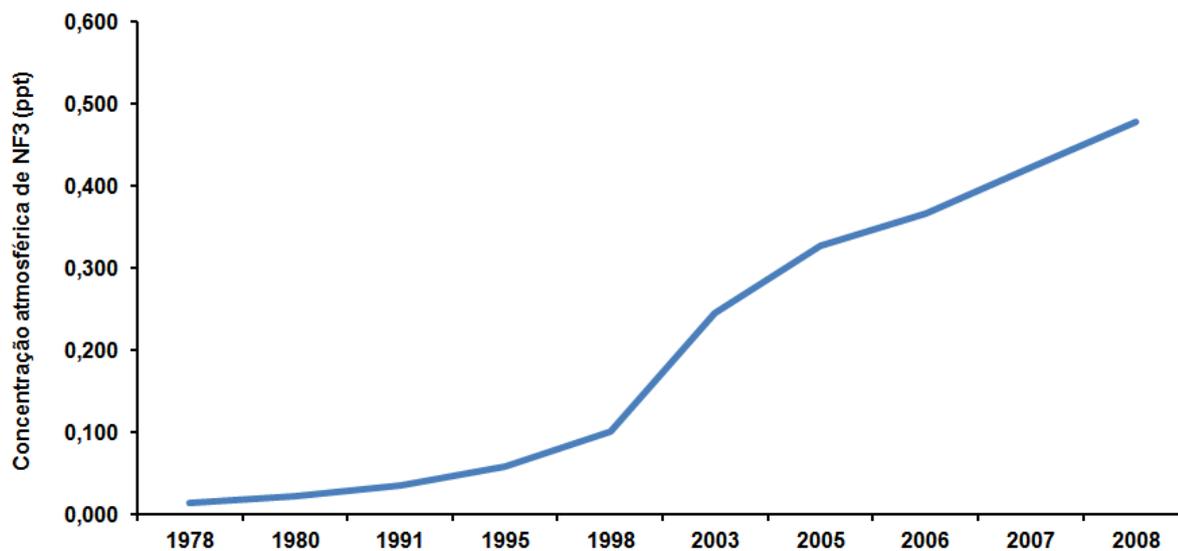


Figura 12: Concentração atmosférica de trifluoreto de nitrogênio (ppt).

Considerando o fato de que o trifluoreto de nitrogênio é largamente utilizado na indústria eletrônica de telas planas e microcircuitos além de células solares, é bastante preocupante o crescimento da produção e concentração desse GEE. De acordo com Fthenakis et al. (2010), a produção global de NF_3 vem crescendo desde 1995 a uma taxa média de 41% ao ano, chegando em 2008 a 7.200 toneladas, das quais mais de 3.000 toneladas foram produzidas pela empresa norte-americana Air Products (Figura 13).

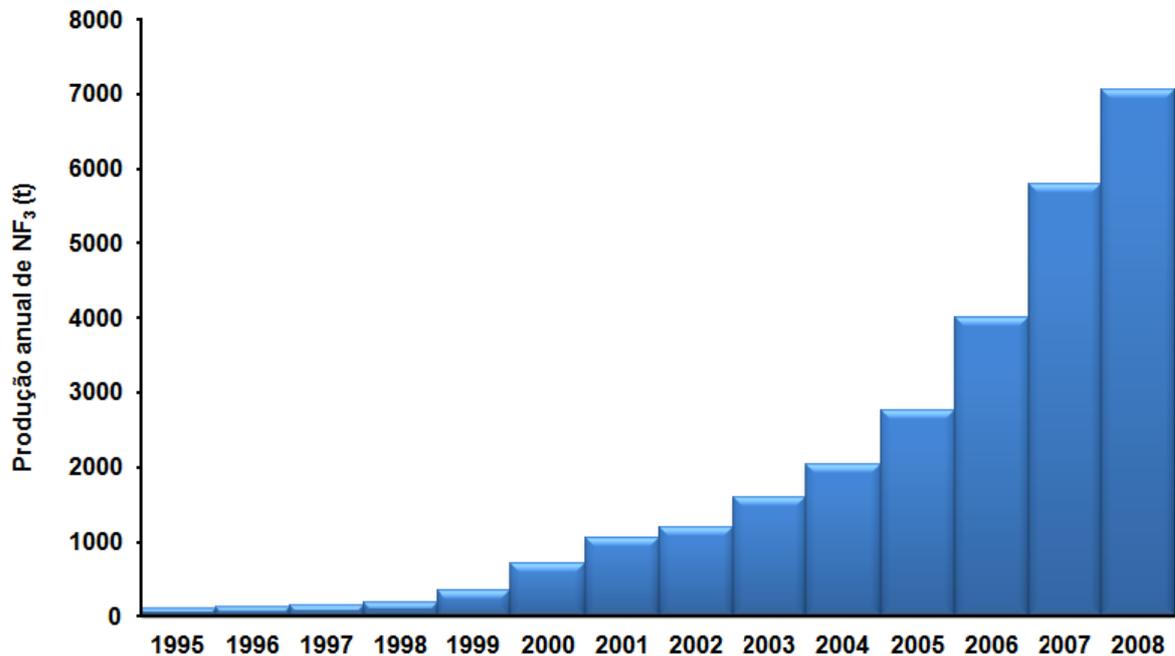


Figura 13: Produção anual global de trifluoreto de nitrogênio no período 1995 – 2008, em toneladas métricas.

4.2 Outros Gases de Efeito Estufa

Os Clorofluorcarbonos (CFCs) substâncias depletoras da camada de ozônio, e os 15 gases halogenados menores²⁰ contribuem com cerca de 12% do forçamento radiativo causado por GEE de longa duração. Embora a maioria dos CFCs e halogênios estejam em declínio, os Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e Hidrofluorcarbonos (HFCs), por sua vez potentes gases de efeito estufa, estão aumentando em um ritmo rápido, embora ainda pouco abundantes. Outros poluentes, como monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis, apesar de gases de efeito estufa de pouca relevância, influenciam indiretamente no forçamento radiativo devido ao seu impacto sobre a abundância do ozônio troposférico. Além disso, os aerossóis (partículas em suspensão) são substâncias de curta duração que influenciam o forçamento radiativo (WMO 2011a).

²⁰ CFC-113, CCl₄, CH₃CCl₃, HCFC 22, HCFC 141b, HCFC 142b, HFC 134a, HFC 152a, HFC 23, HFC 143a, HFC 125, SF₆, e halogênios 1211, 1301 e 2402 (Fonte: NOAA, 2012).

4.3 Potencial de Aquecimento Global (PAG) e Forçamento Radiativo dos Gases de Efeito Estufa (GEE)

De acordo com o Primeiro Relatório de Avaliação do Clima do IPCC - FAR (IPCC 1990), as opções de ações referentes aos GEE deveriam fazer uso de mecanismos simples que permitissem avaliar as capacidades de cada GEE em afetar o forçamento radiativo e por consequência, alterar o clima. Uma abordagem útil deveria expressar a relação entre o CO₂ (GEE primário), e os demais GEE, seguindo o conceito do “Potencial de Depleção do Ozônio”²¹ (PDO) (Ozone Depletion Potential - ODP, em sua sigla em inglês). Tal conceito, utilizado no âmbito do Protocolo de Montreal, relaciona a capacidade de determinada Substância “i” Depletora de Ozônio (SDO) (Ozone Depleting Substance - ODS, em sua sigla em inglês) de causar a depleção da camada de ozônio ($\delta[\text{O}_3]_i$) com a capacidade do O3]CFC–11), conforme apresentado na Equação 1.

Equação 1: Cálculo do Potencial de Depleção de Ozônio. Fonte: Allen e Shonnard (2001).

$$\text{PDO}_i = \frac{\delta[\text{O}_3]_i}{\delta[\text{O}_3]_{\text{CFC-11}}}$$

De acordo com Shine (2009), o PAG foi originalmente apresentado como uma metodologia análoga à metodologia de cálculo do PDO, com o objetivo de comparar o impacto no clima das emissões de CO₂ com gases de efeito estufa não-CO₂. Os conceitos de PAG e PDO são métricas comumente usadas para quantificar respectivamente os impactos relativos de determinadas substâncias no forçamento climático e na depleção da camada de ozônio.

²¹ Capacidade de degradação da camada de ozônio que determinada substância pode causar quando comparada com o ODP do triclorofluorometano (CFC-11), fixado como valor base = 1,0. O Protocolo de Montreal e suas emendas e ajustes conseguiram controlar a produção e consumo mundial de ODPs nas últimas duas décadas, estando as concentrações atmosféricas de quase todos os ODPs controlados em declínio. No entanto, o esgotamento do ozônio ainda vai continuar por muitas décadas por conta do tempo de permanência na atmosfera de vários ODPs, ainda que após o fim de suas emissões (WMO 2010a).

Segundo IPCC (1990), diversas tentativas de estabelecer um conceito de potencial de aquecimento global (Lashof e Ahuja 1990²², Rodhe 1990²³ e Derwent 1990²⁴), foram baseadas nas emissões instantâneas de gases para a atmosfera.

Lashof e Ahuja (1990), afirmaram que embora o metano, o óxido nitroso e os clorofluorcarbonos estivessem presentes na atmosfera em concentrações 10^{-3} e 10^{-6} menores²⁵ do que as concentrações de dióxido de carbono, são gases de grande importância pelo fato de absorverem radiação infravermelha de forma muito mais intensa do que o dióxido de carbono. Os autores afirmavam ser necessário a criação de um índice comparativo entre as diversas contribuições dos gases de efeito estufa ao aquecimento global, a fim de possibilitar o desenvolvimento de estratégias que considerassem o custo-benefício da limitação do aquecimento.

Os autores destacaram o fato de que as estimativas das contribuições relativas a cada gás não levava em consideração os diferentes tempos de residência na atmosfera. Além disso, a avaliação das opções para limitação do aquecimento global deveria levar em consideração o potencial de aquecimento de cada GEE, o que requeria a consideração do impacto radiativo das emissões ao longo do tempo. Dessa forma, os autores afirmavam ser desejável a existência de um índice para cada gás, que combinasse seu forçamento radiativo por molécula na atmosfera com o seu tempo de residência. Esforços anteriores à sua proposta para avaliar as emissões em uma base comparativa ao dióxido de carbono não levavam em consideração suas concentrações ao longo do tempo.

Tendo como base as considerações apresentadas, Lashof e Ahuja (1990), propuseram o índice de cálculo do PAG conforme a Equação 2, o qual foi adotado pelo IPCC desde seu Primeiro Relatório de Avaliação do Clima (IPCC 1990):

²² Lashof, D. A., Ahuja, D. R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature* 344, 529 - 531 (05 April 1990); doi:10.1038/344529a0.

²³ Rodhe, H. A comparison of the contribution of various gases to the greenhouse effect. *Science* 8 June 1990: Vol. 248 no. 4960 pp. 1217-1219.

²⁴ Derwent, R., 1990: Trace Gases and Their Relative Contribution to the Greenhouse Effect. Report AERE- R13716, Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Oxon, UK. 95 pp

²⁵ A concentração do CO₂ é medida em ppm ($1 \cdot 10^{-6}$), do CH₄ e do N₂O em ppb ($1 \cdot 10^{-9}$), e dos CFCs em ppt ($1 \cdot 10^{-12}$).

Equação 2: Índice de cálculo do Potencial de Aquecimento Global (PAG) conforme proposto por Lashof e Ahuja (1990) e adotado por IPCC (1990).

$$\text{PAG}_i = \frac{\int_0^n a_i c_i dt}{\int_0^n a_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2} dt}$$

O PAG representa a captura cumulativa de radiação infravermelha a partir da liberação de 1 kg de um determinado GEE em relação a igual massa de dióxido de carbono. No índice, “ a_i ” representa o forçamento radiativo causado pelo acréscimo de 1 kg do GEE “ i ” medido em $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, “ c_i ” é a concentração atmosférica desse mesmo gás (em ppm, ppb ou ppt), “ t ” é o tempo de residência desse GEE na atmosfera e “ n ” é o horizonte de tempo considerado para o cálculo (IPCC, 1990 e IPCC, 2007). As emissões de ambos os gases pressupõe sua emissão no momento $t = 0$, com seus efeitos sendo avaliados em períodos de 20, 100 e 500 anos (IPCC, 2007).

Segundo Rosa e Schaeffer (1995), apud Uria e Schaeffer (1997), o PAG de um determinado gás é definido como

...o quociente entre o forçamento radiativo instantâneo de um pulso de emissão desse gás e o forçamento radiativo também instantâneo decorrente de uma emissão igual e simultânea de um gás usado como referência (geralmente o CO_2), integrados até um certo horizonte de tempo (ROSA E SCHAEFFER, 1995 apud URIA E SCHAEFFER, 1997).

De forma semelhante, o IPCC, em seu Quarto Relatório de Avaliações do Clima (IPCC, 2007), define o PAG como

ⁱAn index, based upon radiative properties of well mixed greenhouse gases, measuring the radiative forcing of a unit mass of a given well mixed greenhouse gas in today's atmosphere integrated over a chosen time horizon, relative to that of carbon dioxide. The GWP represents the combined effect of the differing times these gases remain in the atmosphere and their relative effectiveness in absorbing outgoing thermal infrared radiation. The Kyoto Protocol is based on GWPs from pulse emissions over a 100-year time frame. (IPCC, 2007).

A Tabela 3 apresenta a relação dos principais GEE e seus respectivos PAGs, inclusive os CFCs, controlados pelo Protocolo de Montreal. Embora o CO₂, o CH₄ e o N₂O sejam os GEE de maior importância, observa-se que diversos dos demais GEE apresentam PAG centenas ou milhares de vezes superiores. No entanto, apesar de tais diferenças, a contribuição desses três GEE ao forçamento radiativo total é significativamente maior, como será visto mais adiante.

Tabela 3: Potencial de Aquecimento Global dos gases de efeito estufa segundo IPCC-FAR (1990), IPCC-SAR (1995), IPCC-TAR (2001) e IPCC-AR4 (2007).

GEE	PAG (HORIZONTE DE 100 ANOS)			
	FAR ^(a)	SAR ^(b)	TAR ^(c)	AR4 ^(d)
DIÓXIDO DE CARBONO	1	1	1	1
METANO	21	21	23	25
ÓXIDO NITROSO	290	310	296	298
CLOROFLUORCARBONOS				
CFC-11	ND	ND	4600	4750
CFC-12	ND	ND	10600	10900
CFC-13	ND	ND	14000	14400
CFC-113	ND	ND	6000	6130
CFC-114	ND	ND	9800	10000
CFC-115	ND	ND	7200	7370
HIDROCLOROFLUORCARBONOS				
HCFC-21	ND	ND	210	ND
HCFC-22	1500	ND	1700	1810
HCFC-123	ND	ND	120	77
HCFC-124	ND	ND	620	609
HCFC-141b	ND	ND	700	725
HCFC-142b	ND	ND	2400	2310
HCFC-225ca	ND	ND	180	122
HCFC-225cb	ND	ND	620	595
HIDROFLUORCARBONOS				
HFC-23	ND	11700	12000	14800
HFC-32	ND	650	550	675
HFC-41	ND	150	97	ND
HFC-125	ND	2800	3400	3500
HFC-134	ND	1000	1100	ND
HFC-134a	ND	1300	1300	1430
HFC-143	ND	300	330	ND
HFC-143a	ND	3800	4300	4470
HFC-152	ND	ND	43	ND
HFC-152a	ND	140	120	124

HFC-161	ND	ND	12	ND
HFC-227ea	ND	2900	3500	3220
HFC-236cb	ND	ND	1300	ND
HFC-236ea	ND	ND	1200	ND
HFC-236fa	ND	5100	9400	9810
HFC-245ca	ND	560	640	ND
HFC-245fa	ND	ND	950	1030
HFC-365mfc	ND	ND	890	794
HFC-43-10mee	ND	1300	1500	1640
CLOROCARBONOS				
CH ₃ CCl ₃	ND	ND	140	146
CCl ₄	ND	ND	1800	1400
CHCl ₃	ND	ND	30	ND
CH ₃ Cl	ND	ND	16	13
CH ₂ Cl ₂	ND	ND	10	8,7
BROMOCARBONOS				
CH ₃ Br	ND	ND	5	5
CH ₂ Br ₂	ND	ND	1	ND
CHBrF ₂	ND	ND	470	ND
Halon-1211 (CBrClF ₂)	ND	ND	1300	1890
Halon-1301 (CBrF ₃)	ND	ND	6900	7140
IODOCARBONOS				
CF ₃ I	ND	ND	1	ND
COMPOSTOS FLUORETADOS				
SF ₆	ND	23900	22200	22800
CF ₄	ND	6500	5700	7390
C ₂ F ₆	ND	9200	11900	12200
C ₃ F ₈	ND	7000	8600	8830
C ₄ F ₁₀	ND	7000	8600	8860
c-C ₄ F ₈	ND	8700	10000	10300
C ₅ F ₁₂	ND	7500	8900	9160
C ₆ F ₁₄	ND	7400	9000	9300
ÉTERES E ÉTERES HALOGENADOS				
CH ₃ OCH ₃	ND	ND	1	1
(CF ₃) ₂ CFOCH ₃	ND	ND	330	ND
(CF ₃)CH ₂ OH	ND	ND	57	ND
CF ₃ CF ₂ CH ₂ OH	ND	ND	40	ND
(CF ₃) ₂ CHOH	ND	ND	190	ND
HFE-125 (CF ₃ OCHF ₂)	ND	ND	14900	14900
HFE-134 (CHF ₂ OCHF ₂)	ND	ND	6100	6320
HFE-143a (CH ₃ OCF ₃)	ND	ND	750	756
HCFE-235da2 (CF ₃ CHClOCHF ₂)	ND	ND	340	350
HFE-245cb2 (CF ₃ CF ₂ OCH ₃)	ND	ND	580	708
HFE-245fa2 (CF ₃ CH ₂ OCHF ₂)	ND	ND	570	659

HFE-347mcc3 (CF₃CF₂CF₂OCH₃)	ND	ND	480	575
HFE-356pcf3 (CHF₂CF₂CH₂OCHF₂)	ND	ND	430	ND
HFE-374pc2 (CHF₂CF₂OCH₂CH₃)	ND	ND	540	ND
HFE-7100 (C₄F₉OCH₃)	ND	ND	390	297
HFE-7200 (C₄F₉OC₂H₅)	ND	ND	55	59
H-Galden 1040x (CHF₂OCF₂OC₂F₄OCHF₂)	ND	ND	1800	1870
HG-10 (CHF₂OCF₂OCHF₂)	ND	ND	2700	2800
HG-01 (CHF₂OCF₂CF₂OCHF₂)	ND	ND	1500	1500

Fontes: (a) IPCC (1990), (b) IPCC (1996), (c) Ramaswamy et al. (2001) e (d) Solomon et al. (2007).

A correta interpretação do conceito de PAG passa pela análise do conceito correlato chamado de “Potencial de Aquecimento Global Absoluto” (PAGA).

Na Equação 2, seu numerador e denominador são chamados respectivamente de PAGA do GEE “i” e PAGA do CO₂ (IPCC, 2007). Observa-se que a determinação dos PAGs de todos os GEE depende do PAGA do CO₂, ao mesmo tempo em que o PAGA do CO₂ depende de seu forçamento radiativo (IPCC, 2007). Assim sendo, fica claro o quão essencial é para a determinação dos PAGs, a determinação dos forçamentos radiativos de cada um dos GEE.

Observando-se as considerações de Lashof e Ahuja (1990), Rosa e Schaeffer (1995) e IPCC (2007), podemos confirmar que o valor do forçamento radiativo de cada GEE é um elemento de vital importância para o cálculo do PAG, tendo em vista considerar seu tempo de residência na atmosfera.

Segundo IPCC (2007), o forçamento radiativo é uma medida da influência que um fator²⁶ tem para alterar o equilíbrio da energia de entrada e saída no sistema Terra-atmosfera, e é um índice da importância do fator como um mecanismo de variação climática potencial, expresso em Watts por metro quadrado (W.m⁻²).

A determinação do forçamento radiativo dos GEE utiliza as expressões apresentadas por Myhre et al. (1998) e Ramaswamy et al. (2001), para avaliar as mudanças dos GEE tendo como base o forçamento radiativo referente ao ano de 1750. Para tal, são consideradas as concentrações dos GEE naquele ano, confrontadas com as concentrações atuais. As expressões empíricas apresentadas

²⁶ Um forçante climático.

por Ramaswamy et al. (2001) são derivadas de modelos atmosféricos de transferência radiativa e envolvem em geral incertezas em torno de 10% (NOAA, 2012).

Tabela 4: Expressões simplificadas do forçamento radiativo, $F\Delta$ ($W.m^{-2}$).

GÁS	EXPRESSÕES SIMPLIFICADAS DO FORÇAMENTO RADIATIVO, ΔF ($W.M^{-2}$)	CONSTANTES
CO₂	$\Delta F = \alpha \ln(C/C_0)$ $\Delta F = \alpha \ln(C/C_0) + \beta \ln(\sqrt{C} - \sqrt{C_0})$ $\Delta F = \alpha (g(C) - g(C_0))$	$\alpha^{27} = 5,35$ $\alpha^{28} = 4,841$ e $\beta = 0,0906$ $\alpha^{29} = 3,35$
CH₄	$\Delta F = \alpha (\sqrt{M} - \sqrt{M_0}) - (f(M, N_0) - f(M_0, N_0))$	$\alpha = 0,036$
N₂O	$\Delta F = \alpha (\sqrt{N} - \sqrt{N_0}) - (f(M_0, N) - f(M_0, N_0))$	$\alpha = 0,12$
CFC-11³⁰	$\Delta F = \alpha (X - X_0)$	$\alpha = 0,25$
CFC-12	$\Delta F = \alpha (X - X_0)$	$\alpha = 0,32$

Fonte: Ramaswamy et al. (2001), onde:

- $f(M, N) = 0,47 \ln[1 + 2,01 \times 10^{-5} (MN)^{0,75} + 5,31 \times 10^{-15} M(MN)^{1,52}$;
- $g(c) = \ln(1 + 1,2C + 0,005C^2 + 1,4 \times 10^{-6} C^3)$;
- C = CO₂ em ppm (atual);
- M = CH₄ em ppb (atual);
- N = N₂O em ppb (atual);
- X = CFC em ppb (atual);

O índice "0" denota concentração sem perturbação (concentração em 1750).

Os valores dos forçamentos radiativos dos principais GEE apresentados na Tabela 5 obedecem aos critérios estabelecidos pelas expressões simplificadas apresentadas na Tabela 4.

²⁷ Segundo Ramaswamy et al. (2001), mantém a expressão apresentada por IPCC (1990), e atualiza o valor da eficiência radiativa (α).

²⁸ Expressão mais completa e atualizada similar à apresentada por Shi (1992), apud Ramaswamy et al. (2001).

²⁹ Expressão proposta por WMO (1999), baseada em Hansen et al. (1988), apud Ramaswamy et al. (2001).

³⁰ Segundo Ramaswamy et al. (2001), a mesma expressão é usada para todos os CFCs e seus substitutos, variando apenas para o cálculo suas respectivas eficiências radiativas (α).

Tabela 5: Variação dos Forçamentos Radiativos ($W.m^{-2}$) dos principais GEE de origem antrópica no período 1980/2010.

Ano	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC12	CFC11	15- menores	Total	Variação relativa ao ano base 1990
1980	1,056	0,426	0,104	0,096	0,042	0,034	1,76	-19,27%
1981	1,075	0,433	0,107	0,102	0,044	0,036	1,80	-17,43%
1982	1,085	0,440	0,111	0,108	0,046	0,038	1,83	-16,06%
1983	1,111	0,443	0,113	0,113	0,048	0,041	1,87	-14,22%
1984	1,136	0,446	0,116	0,118	0,050	0,044	1,91	-12,39%
1985	1,159	0,451	0,118	0,124	0,053	0,047	1,95	-10,55%
1986	1,182	0,456	0,122	0,131	0,056	0,049	2,00	-8,26%
1987	1,208	0,460	0,121	0,137	0,059	0,053	2,04	-6,42%
1988	1,247	0,464	0,122	0,143	0,062	0,057	2,10	-3,67%
1989	1,271	0,468	0,126	0,149	0,064	0,061	2,14	-1,83%
1990	1,290	0,472	0,129	0,154	0,065	0,065	2,18	0,00%
1991	1,311	0,476	0,131	0,158	0,067	0,069	2,21	1,38%
1992	1,321	0,480	0,132	0,161	0,067	0,072	2,23	2,29%
1993	1,332	0,481	0,133	0,164	0,068	0,073	2,25	3,21%
1994	1,353	0,483	0,134	0,166	0,068	0,075	2,28	4,59%
1995	1,380	0,485	0,136	0,168	0,067	0,076	2,31	5,96%
1996	1,407	0,486	0,138	0,170	0,067	0,078	2,35	7,80%
1997	1,423	0,487	0,142	0,171	0,067	0,079	2,37	8,72%
1998	1,463	0,491	0,145	0,172	0,067	0,080	2,42	11,01%
1999	1,494	0,494	0,148	0,173	0,066	0,081	2,46	12,84%
2000	1,512	0,495	0,151	0,173	0,066	0,083	2,48	13,76%
2001	1,534	0,494	0,153	0,174	0,065	0,085	2,51	15,14%
2002	1,564	0,494	0,156	0,174	0,065	0,087	2,54	16,51%
2003	1,600	0,496	0,158	0,174	0,064	0,088	2,58	18,35%
2004	1,626	0,496	0,160	0,174	0,063	0,090	2,61	19,72%
2005	1,654	0,495	0,162	0,173	0,063	0,092	2,64	21,10%
2006	1,685	0,495	0,165	0,173	0,062	0,095	2,67	22,48%
2007	1,710	0,498	0,167	0,172	0,062	0,097	2,71	24,31%
2008	1,739	0,500	0,170	0,171	0,061	0,100	2,74	25,69%
2009	1,760	0,502	0,172	0,171	0,061	0,103	2,77	27,06%
2010	1,791	0,504	0,175	0,170	0,060	0,105	2,81	28,90%

Fonte: adaptado de NOAA (2012).

Os valores apresentados na Tabela 5 ilustram o significativo aumento nos valores do forçamento radiativo ao longo de 30 anos, tomando como ano-base 1990. A Figura 14, a seguir, apresenta as variações do forçamento radiativo total ao longo do período.

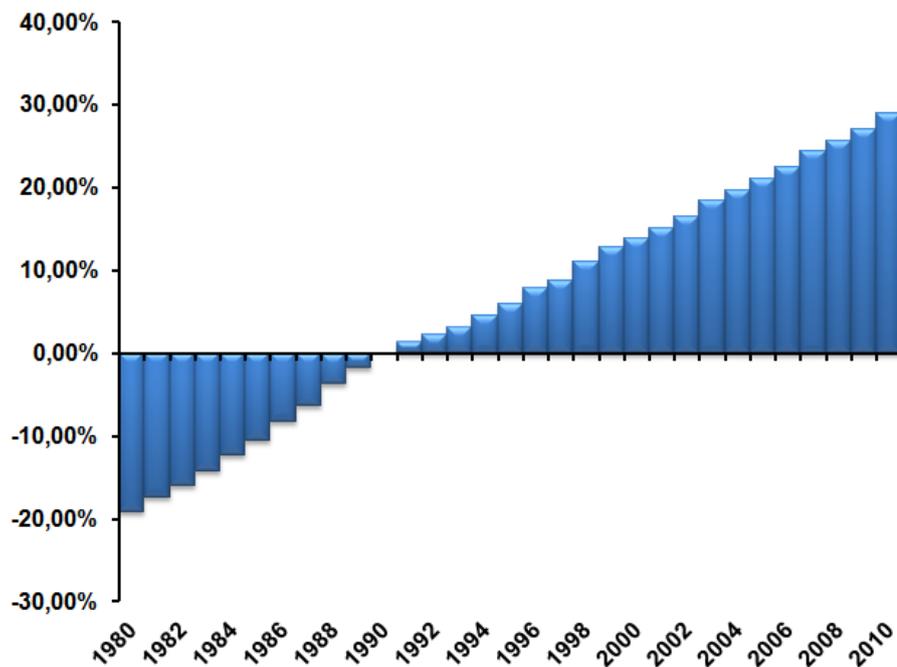


Figura 14: Variação do forçamento radiativo médio dos principais GEE no período 1980/2010. Fonte: baseado em NOAA (2012).

Ao longo dos 31 anos representados na Tabela 5, os valores e contribuições individuais dos forçamentos radiativos de cada GEE representados variaram de forma bastante desigual, conforme apresentado na Figura 15 e em resumo na Tabela 6.

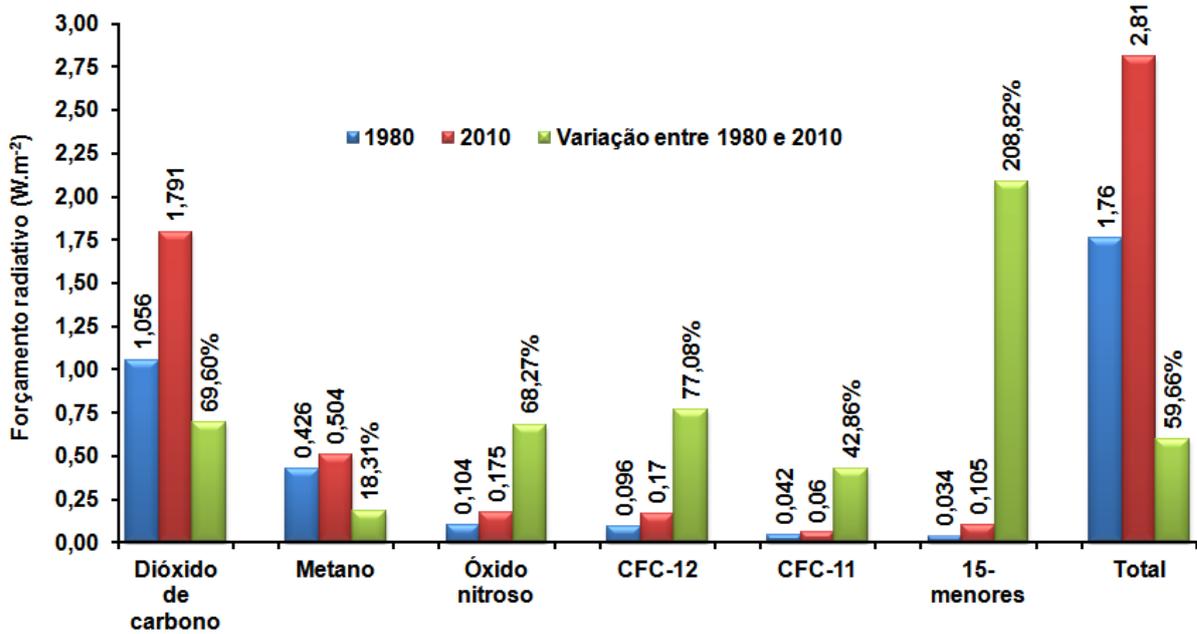


Figura 15: Variação percentual nos forçamentos radiativos (W.m-2) dos principais GEE ao longo do período 1980/2010.

Tabela 6: Resumo da variação percentual nos forçamentos radiativos (W.m-2) ao longo do período 1980/2010.

GEE	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-12	CFC-11	15-menores	Total
1980	1,056	0,426	0,104	0,096	0,042	0,034	1,76
2010	1,791	0,504	0,175	0,170	0,060	0,105	2,81
Variação	69,60%	18,31%	68,27%	77,08%	42,86%	208,82%	59,66%

Observa-se que os chamados “15-menores” (ver nota de rodapé 20) embora apresentem a maior variação em seu forçamento radiativo no período, representam um impacto no forçamento radiativo total significativamente menor do que o impacto provocado pelas variações do CO₂ e do CH₄, conforme apresenta a Tabela 7.

Tabela 7: Variação no percentual de participação do forçamento radiativo total dos principais GEE de origem antrópica no período 1980/2010.

GEE	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CFC-12	CFC-11	15-menores
1980	60,07%	24,23%	5,92%	5,46%	2,39%	1,93%
2010	63,85%	17,97%	6,24%	6,06%	2,14%	3,74%

Apesar do forte crescimento nos forçamentos radiativos do N_2O , do CFC-12, do CFC-11 e dos 15-menores, o forçamento radiativo conjunto do CO_2 e do CH_4 , os dois principais GEE de origem antrópica, em 2010 totalizou 81,82% do forçamento radiativo total, conforme apresentado na Figura 16.

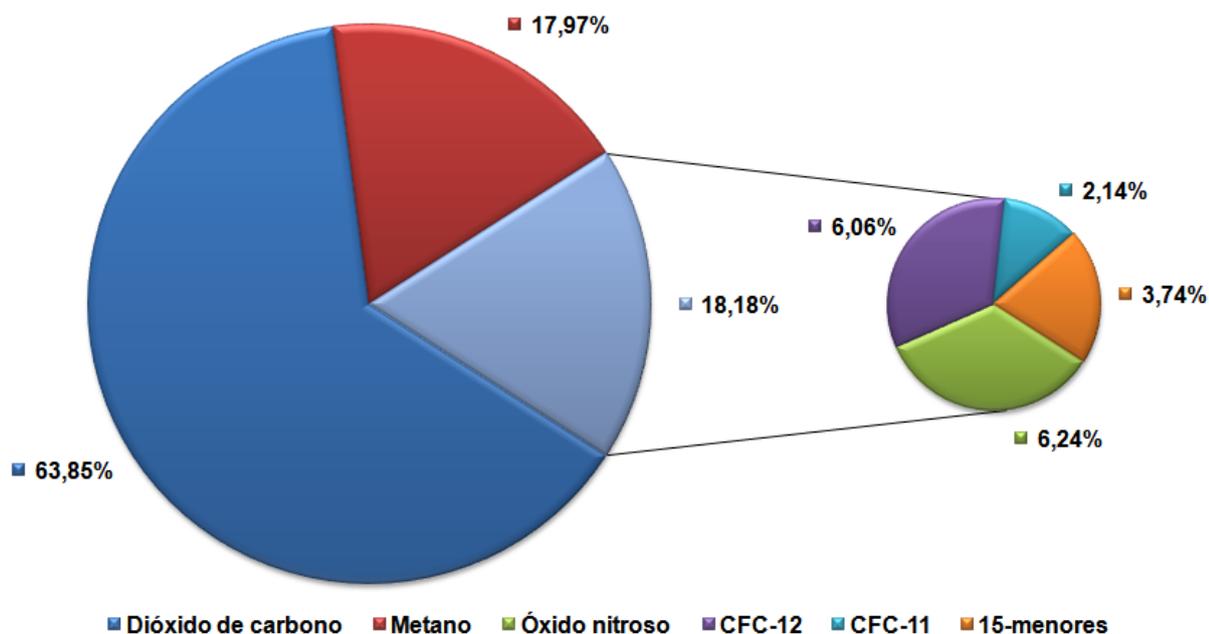


Figura 16: Participação percentual dos GEE no forçamento radiativo ($W.m^{-2}$) total em 2010. Fonte: (NOAA, 2012).

A Figura 17 demonstra que o forçamento radiativo do dióxido de carbono e do metano tem crescido consistentemente ao longo dos últimos 30 anos, variando respectivamente de $1,056 W.m^{-2}$ em 1980 para $1,791 W.m^{-2}$ em 2010 e $0,426 W.m^{-2}$ em 1980 para $0,504 W.m^{-2}$ em 2010, o que corresponde a aumentos de 69,60% e 18,31% no período.

Apesar do consistente aumento do forçamento radiativo do metano, a participação de seu forçamento radiativo sobre o forçamento radiativo total vem decrescendo progressivamente, conforme apresentado na Figura 18 Isso se deve ao crescimento mais acelerado do forçamento radiativo do N_2O , do CFC-12, do CFC-11, dos 15-menores e do próprio CO_2 , conforme pode ser observado na Tabela 6. Com relação ao dióxido de carbono, tanto seu forçamento radiativo, como também sua participação sobre o forçamento radiativo total (Figura 19) tem crescido de forma consistente, em especial desde o início da década de 90.

Cabe observar que a resultante das variações dos forçamentos radiativos do CO₂ e do CH₄, apesar da redução referente ao metano, tem mantido a participação dos forçamentos radiativos desses dois GEE com relação ao forçamento radiativo total em patamares bastante elevados, superiores a 80% do total, ao longo de todo o período analisado, conforme apresentado na Figura 20.

Considerando ser o dióxido de carbono o principal GEE de origem antrópica, e o forte incremento no valor de seu forçamento radiativo nos últimos 30 anos, o aumento das concentrações atmosféricas desse GEE é um aspecto a ser observado com especial atenção na formulação de políticas de controle às alterações climáticas.

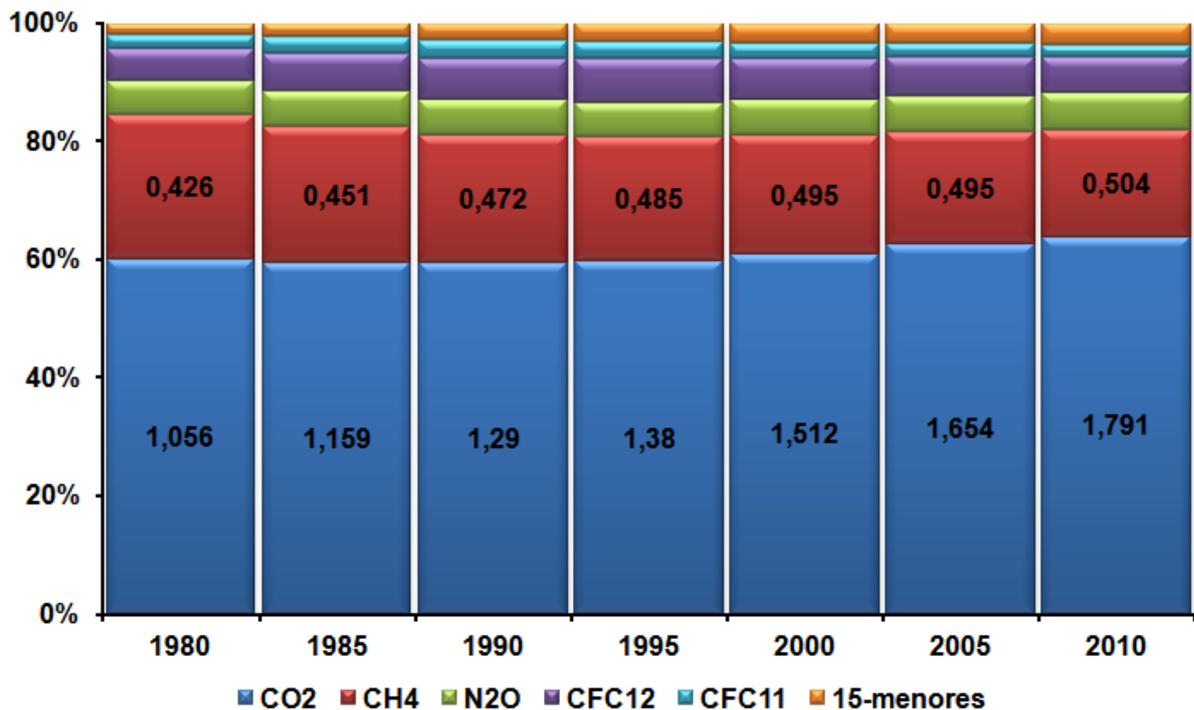


Figura 17: Representação das variações dos forçamentos radiativos ($W.m^{-2}$) do dióxido de carbono e do metano frente às variações dos demais GEE.

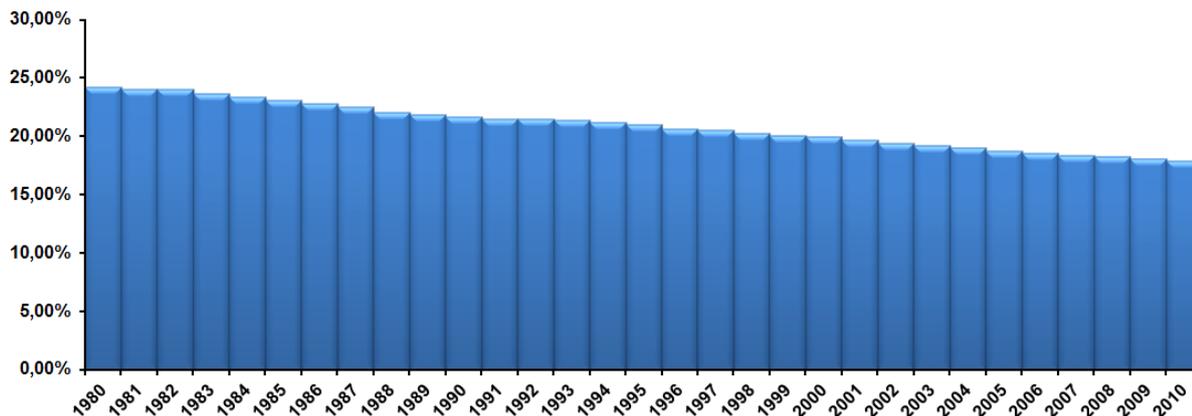


Figura 18: Variação da participação do forçamento radiativo do metano em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.

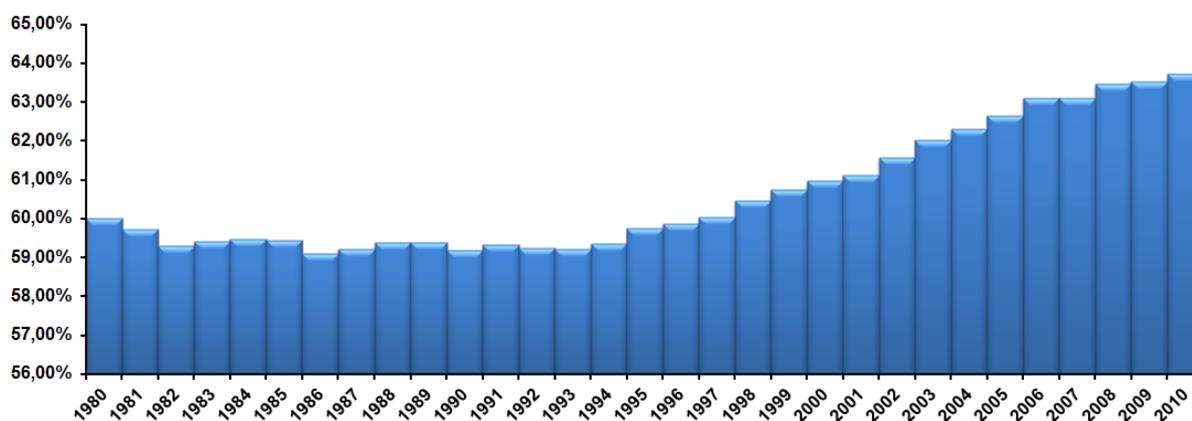


Figura 19: Variação da participação do forçamento radiativo do dióxido de carbono em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.

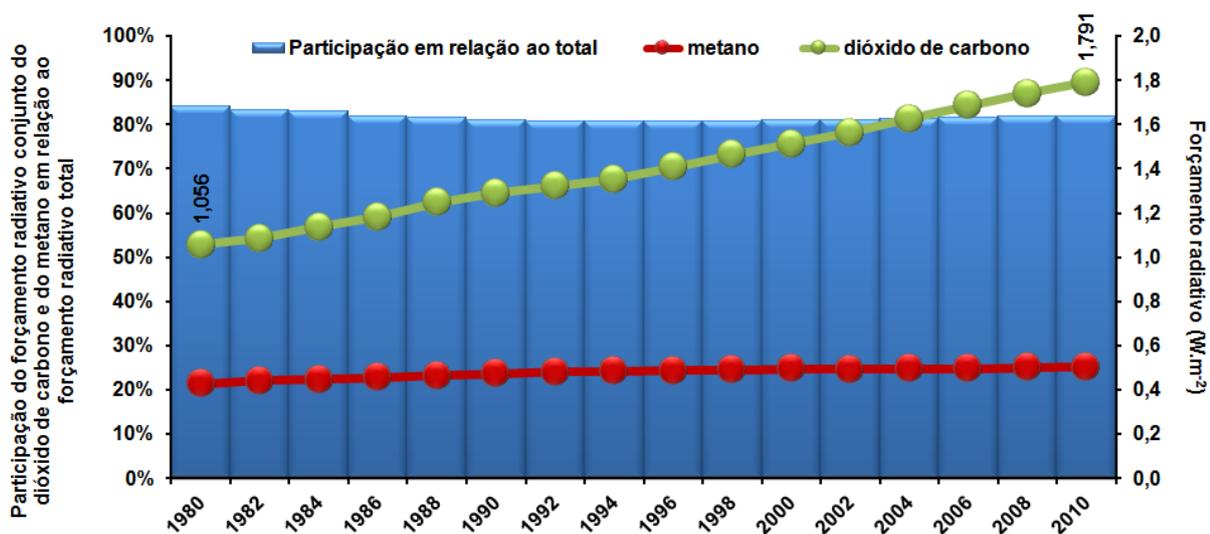


Figura 20: Variação da participação do forçamento radiativo conjunto do dióxido de carbono e do metano em relação ao forçamento radiativo total ao longo do período 1980/2010.

Segundo Forster et al. (2007), o forçamento radiativo tem a capacidade de realizar comparações quantitativas entre a força de diferentes agentes naturais e antrópicos nas mudanças climáticas. O forçamento radiativo antropogênico combinado é estimado situar-se entre em 0,6 e 2,4 $W.m^{-2}$, indicando que, desde 1750, é virtualmente certoⁱⁱ que os seres humanos tenham exercido uma influência substancial no aquecimento global. Ainda segundo Forster et al. (2007), é provável que essa estimativa seja pelo menos 5 vezes maior do que aquelas devidas a mudanças na irradiação solar.

Tabela 8: Concentrações atmosféricas e forçamentos radiativos dos principais gases de efeito estufa.

GEE	CONCENTRAÇÃO NA ERA PRÉ-INDUSTRIAL ^{(a), (b)}	CONCENTRAÇÃO EM 2005 ^(c)	FORÇAMENTO RADIATIVO ^{(c), (d)}
CO ₂	278 ppm ^(a) 280 a 356 ppm ^(b)	379 ± 0,65 ppm	1,66 ± 0,17 $W.m^{-2(c)}$ 1,654 $W.m^{-2(d)}$
CH ₄	700 ppb ^(a) 700 a 1700 ppb ^(b)	1.774 ± 1,80 ppb	0,48 ± 0,05 $W.m^{-2(c)}$ 0,495 $W.m^{-2(d)}$
N ₂ O	270 ppb ^(a) 275 a 310 ppb ^(b)	319 ± 0,12 ppb	0,16 ± 0,02 $W.m^{-2(c)}$ 0,162 $W.m^{-2(d)}$
CFC-11	0,00 ^(a)	251 ± 0,36 ppt	0,063 $W.m^{-2(c)}$ 0,063 $W.m^{-2(d)}$
CFC-12	0,00 ^(a)	538 ± 0,18 ppt	0,17 $W.m^{-2(c)}$ 0,173 $W.m^{-2(d)}$
HFCs	0,00 ^(a)	3,7 ± 0,10 a 35 ± 0,73 ppt	0,0101 $W.m^{-2}$ (total) ^(c)
HCFCs	0,00 ^(a)	15 ± 0,13 a 169 ± 1,00 ppt	0,039 $W.m^{-2}$ (total) ^(c)
SF ₆	0,00 ^(a)	5,6 ± 0,038 ppt	0,0029 $W.m^{-2(c)}$

Fontes: (a) Ramaswamy et al. (2001), (b) IPCC (1996), (c) Forster et al. (2007) e (d) NOAA (2012).

Segundo IPCC (2007), o aumento do forçamento radiativo devidos às emissões de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso atingiram desde o início da era industrial muito provavelmente valores sem precedentes nos últimos 10 mil anos. Entre 1995 e 2005, o aumento do forçamento radiativo por emissões de CO₂ chegou a 20%, o aumento mais acentuado dos últimos 200 anos. Por outro lado, as emissões antrópicas de aerossóis tiveram o efeito de produzir um resfriamento com um forçamento radiativo em torno de 1,45 $W.m^{-2}$.

Em 2007, o IPCC (IPCC, 2007) relatou que as médias globais do forçamento radiativo em 2005 para o dióxido de carbono, o metano, o óxido nitroso e outros agentes e mecanismos antrópicos importantes eram bastante superiores ao forçamento radiativo originado pela irradiação solar. A Figura 21 ilustra as variações no forçamento radiativo antrópico e natural ocorridas desde 1750. Nesse período, o único aumento relevante no forçamento radiativo natural foi o aumento da irradiação solar, inferior a 7% do aumento do forçamento radiativo de origem antrópica em igual período.

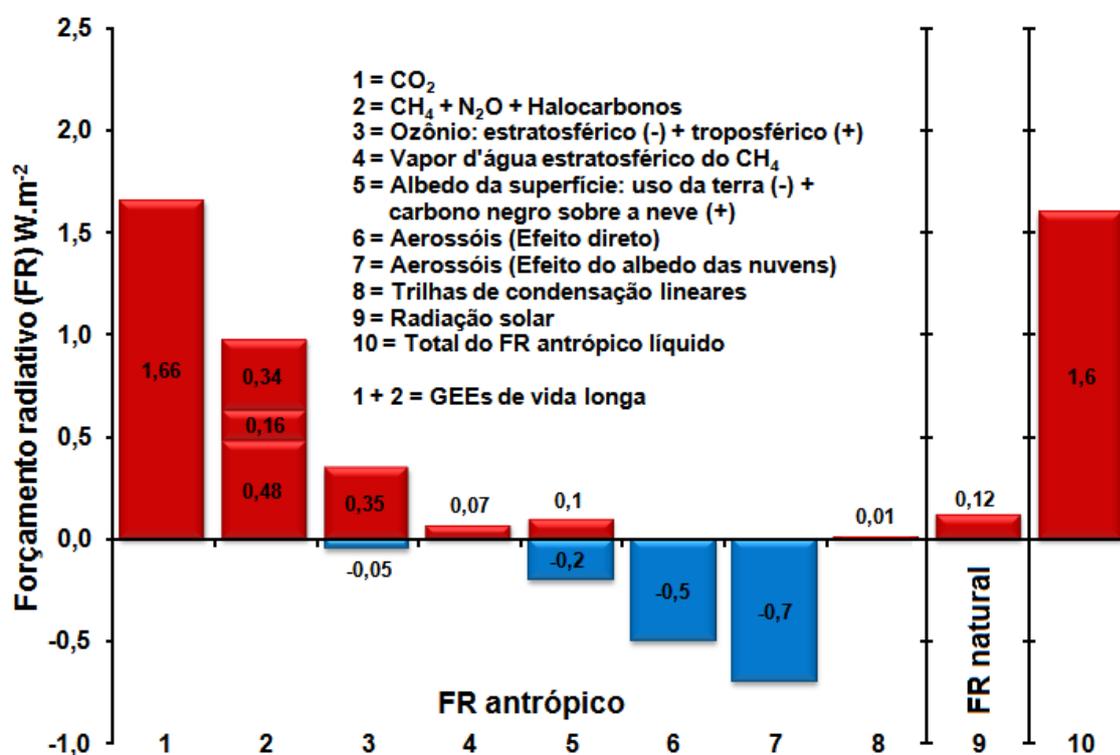


Figura 21: Estimativas do forçamento radiativo ($W.m^{-2}$) para os GEE de vida longa, outros agentes antrópicos importantes e radiação solar avaliados para o ano de 2005. Fonte: adaptado de IPCC (2007).

4.4 Equalização dos demais GEE ao forçamento radiativo do CO₂

As diferentes concentrações atmosféricas, diferentes tempos de residência e os diferentes forçamentos radiativos entre o CO₂ e demais GEE não-CO₂ exigem que seja feita uma equalização entre tais fatores, a fim de determinar as influências sobre o sistema climático global de cada GEE com base em um fator comum, o dióxido de carbono.

Para tal, é utilizado como base da métrica comum o PAG já apresentado na Equação 2. O PAG relativiza as concentrações atmosféricas, tempos de residência e forçamento radiativos de cada GEE com os mesmos parâmetros do CO₂, tornando possível a equalização do cálculo dos efeitos atmosféricos de cada GEE não-CO₂. Esse novo índice, chamado de dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq.), representa a massa de CO₂ que deveria ter sido emitida em vez do GEE não-CO₂ emitido, que provocaria os mesmos impactos sobre o sistema climático.

A emissão de CO₂ equivalente é obtida multiplicando-se a emissão do GEE pelo seu correspondente PAG, em determinado horizonte de tempo. Caso esteja sendo avaliada uma mistura de diversos GEE, a emissão total de CO₂ eq. será o somatório das emissões já convertidas para CO₂ eq. de cada GEE, conforme as Equações Equação 3 e Equação 4.

Equação 3: Conversão da emissão do GEE_i para CO₂ eq. (Fonte: o autor).

$$\text{GEE}_i (\text{CO}_2 \text{ eq.}) = \text{EmissãoGEE}_i \times \text{PAG}_i$$

Equação 4: Emissão total de GEE em CO₂ eq. (Fonte: o autor).

$$\sum \text{GEE} (\text{CO}_2 \text{ eq.}) = \sum_{i=1}^{\# \text{ de GEE}} \text{GEE}_i (\text{CO}_2 \text{ eq.})$$

4.5 Novas propostas metodológicas alternativas ao uso do PAG

Segundo Smith e Wigley (1999), o conceito de um índice numérico capaz de comparar as contribuições de diversos GEE ao aquecimento global deve ser creditado a Rogers e Stephens (1988)³¹ e a Fischer et al. (1990)³². No entanto, foi o trabalho de Lashof e Ahuja (1990) que foi endossado pelo IPCC em seu Primeiro

³¹ Rogers, J. D. and Stephens, R. D.: 1988, 'Absolute Infrared Intensities for F-113 and F-114 and an Assessment of their Greenhouse Warming Potential Relative to Other Clorofurocarbons', J. Geophys. Res. 93, 2423–2428.

³² Fisher, C. R., Hales, C., Wang, W. C., Ko, M., and Sze, N.: 1990, 'Model Calculations of the Relative Effects of CFCs and their Replacements on Global Warming', Nature 344, 513–516.

Relatório de Avaliação do Clima (IPCC 1990). Desde então, diversas metodologias alternativas foram propostas, mediante distintos critérios de avaliação, sem que qualquer uma delas fosse efetivamente adotada como substituta do PAG.

Apesar de sua larga utilização e aceitação desde sua adoção pelo IPCC em 1990, a comunidade científica tem apresentado dúvidas sobre a aplicabilidade do PAG, como é o caso de Skodvin e Fuglestvedt (1997), Smith e Wigley (2000), O'Neill (2000), Fuglestved et al (2003), Godal (2003), Shine et al (2004), Shine (2009) e Dorbian et al (2011), que dentre muitos outros autores, questionam a continuidade da utilização do PAG na comparação dos efeitos climáticos devidos às emissões de diferentes GEE.

Skodvin e Fuglestvedt (1997) consideram como aspectos positivos do PAG a sua simplicidade e compreensão em como transformar as emissões de vários gases em uma medida única, sua apresentação em tabelas de fácil aplicação pelos formuladores de políticas e a larga aceitação dentro da comunidade científica. Por outro lado, destacam que o conceito de PAG é de difícil aplicação para os gases que são mais desigualmente distribuídos na atmosfera, além de problemas de cálculos para gases cujo tempo de residência seja menor do que o tempo de residência da mistura de gases na troposfera³³. Sua conclusão é de que, apesar de apresentar sérias limitações e deficiências, o PAG pode servir como uma ferramenta preliminar para a elaboração de políticas para os GEE mais importantes até que melhores métodos sejam disponibilizados.

Smith e Wigley (2000) citam diversas propostas de metodologias alternativas ao PAG, (ROTMANS E DEN ELZEN, 1992; WIGLEY ET AL, 1990; HARVEY 1993; WIGLEY E REEVES, 1991; WIGLEY, 1998; ECKAUS, 1992; HAMMITT ET AL, 1996; KANDLIKAR, 1995; LASHOF E AHUJA, 1990; SCHMALENSEE, 1993), nenhuma das quais foi aceita de forma ampla. Os autores afirmam que o PAG tem diversos tipos de limitações, tais como problemas de *definição metodológica*

³³ Parte inferior da atmosfera, compreendida entre a superfície e cerca de 10 km de altitude nas latitudes médias (variando entre 9 km nas latitudes altas e 16 km nos trópicos), onde encontram-se as nuvens e são produzidos os fenômenos "meteorológicos". Na troposfera as temperaturas diminuem com a altitude (IPCC, 2007).

referentes à conveniência da aplicabilidade de um índice genérico para problemas específicos, à especificação do horizonte de tempo mais adequado, à seleção da base de comparação dentre dois GEE e problemas relativos à incertezas de quantificação. Em seguida, citam problemas de *incertezas de quantificação*, referentes ao tempo de residência atmosférica dos GEE, tempo de ajuste e sobreposição de pulsos de emissão. Por último, citam problemas *matemáticos* distintos das incertezas quantitativas.

O conceito do PAG teve origem no conceito de PDO³⁴, desenvolvido nos anos 80 para avaliar a capacidade de determinados gases em deplecionar a camada de ozônio (O'NEILL, 2000). Por esse motivo, o autor considera que a princípio, o PAG fora sido desenvolvido para avaliação de SDOs³⁵, e não para o CO₂ e o CH₄.

Fuglestved et al (2003), apesar de considerarem o PAG uma importante ferramenta na implementação do Protocolo de Quioto, destacam importantes aspectos que tem gerado amplos debates. Em primeiro lugar, os autores afirmam que os valores do PAG não são de fácil desenvolvimento para todas as substâncias que tem impacto sobre o clima. Esse fato se aplica especialmente a substâncias cujo tempo de vida é menor do que o tempo de vida da mistura homogênea na troposfera, conforme já havia sido observado por Skodvin e Fuglestvedt (1997). Em segundo lugar, a forma como o PAG expressa equivalência pode não ser bem compreendida pelos formuladores de políticas em sua aplicação. Nesse aspecto, observa-se nítida discordância entre o primeiro e o segundo trabalhos assinados por Fuglestved. Os autores consideram que o termo *aquecimento* pode dar a entender que o PAG expresse a equivalência de diferentes gases no aumento da temperatura, quando na verdade expressa a equivalência do forçamento radiativo integrado sobre um específico horizonte de tempo para um pulso de emissões de diferentes gases. Significa dizer que as emissões que são equivalentes quando ponderadas com os seus respectivos PAGs não são necessariamente equivalentes em termos de evolução temporal da mudança de temperatura.

³⁴ Potencial de Depleção do Ozônio.

³⁵ Substâncias Depletoras do Ozônio.

Segundo Godal (2003), apesar dos diversos debates e sugestões apresentadas como alternativa ao PAG, esse tema não tem sido levado adiante pelo IPCC por vários motivos. Segundo o autor, talvez a razão mais fundamental seja o tempo de residência dos diversos GEE na atmosfera. Enquanto o forçamento radiativo das emissões de metano tem a duração de uma década ou duas, o forçamento radiativo do dióxido de carbono dura séculos. Outras razões seriam devidas às complexas relações entre o forçamento radiativo e uma métrica mais relevante da mudança do clima, a mudança de temperatura.

A forma simplificada com que é apresentada a métrica do PAG faz com que, à exceção das variáveis forçamento radiativo, concentração e tempo de residência do GEE_i e do gás base (CO₂), além do horizonte de tempo escolhido para cálculo, todas as demais variáveis possíveis sejam assumidas como constantes. Tendo em vista as diferenças dos tempos de residência atmosféricos dos diversos GEE, qualquer índice para compará-los deveria explicitamente ou implicitamente considerar os efeitos em vários momentos no tempo e de uma maneira ou outra levar em conta a complexidade do sistema climático, o que não ocorre nos cálculos do PAG.

Shine et al. (2004) destacam que uma das críticas recorrentes ao PAG refere-se ao fato de que, apesar do nome, o potencial de aquecimento global não representa o impacto das emissões de gases na temperatura. Também alguns economistas criticam o conceito de PAG por não se basear em uma análise dos danos causados pelas emissões. Apesar de todas as críticas e a sugestão de muitas alternativas, apesar de passadas mais de duas décadas desde sua aceitação pelo IPCC o PAG mantém sua aceitação aparentemente por conta da simplicidade de sua definição, pelo pequeno número de variáveis de entrada necessárias e pela relativa facilidade de cálculo.

Shine (2009) participou ativamente do Primeiro Relatório de Avaliação do Clima do IPCC (FAR), em 1990. Como um dos responsáveis pelo Capítulo 2 (Radiative Forcing of Climate) do relatório, Shine é diretamente responsável pela aceitação e aplicação do PAG pelo IPCC. Em seu trabalho de 2009, o autor afirma que o PAG foi apresentado como um índice análogo ao PDO, sendo *provisoriamente* adotado pelo IPCC no intuito de avaliar seu uso para comparar o impacto no clima das

emissões de CO₂ com outros GEE não-CO₂. Do relatório do IPCC de 1990, o autor destaca uma passagem que deixa bastante clara a visão original do IPCC a respeito da aplicabilidade do PAG:

ⁱⁱⁱIt must be stressed that there is no universally accepted methodology for combining all the relevant factors into a single global warming potential for greenhouse gas emissions. In fact, there may be no single approach which will represent all the needs of policy makers. A simple approach has been adopted here to illustrate the difficulties inherent in the concept, to illustrate the importance of some of the current gaps in understanding and to demonstrate the current range of uncertainties. However, because of the importance of greenhouse warming potentials, a preliminary evaluation is made.

Apesar dessa explícita visão inicial, o IPCC manteve o índice como a métrica de sua escolha, consolidando-o por meio do Protocolo de Quioto.

4.5.1 Potencial de Temperatura Global (PTG)

Segundo O'Neill (2000) e Fuglestvedt et al. (2003), apud Forster et al. (2007), a adequação do conceito do PAG tem sido amplamente debatida desde a sua introdução. Diversos são os exemplos de artigos que discutem o conceito, tais como Rotmans e Den Elzen (1992), Skodvin e Fuglestvedt (1997), O'Neill (2000), Smith e Wigley (2000) e Fuglestvedt et al. (2003) apud Dorbian et al. (2011).

De fato, apesar de passados cerca de 30 anos desde a adoção pelo IPCC do conceito do PAG, persistem até hoje as dificuldades na comparação dos efeitos sobre o clima entre GEE de tempos de residência atmosférica curtos e longos. Boucher e Ready (2007) afirmam que o PAG se aplica a emissões de GEE de vida curta, o que pode ser um problema caso o foco seja nos efeitos climáticos de longo prazo desse GEE. Isso se deve ao fato de que o PAG não considera a elevada capacidade de resiliência do sistema climático quando uma forçante radiativa é aplicada por um curto período de tempo. Citam os autores a necessidade urgente de adoção de uma métrica que permita a comparação dos efeitos climáticos provocados por GEE de curta e longa duração.

As características da métrica do PAG fazem com que embora dois conjuntos de emissões possam ser idênticos no que se refere a seu PAG total, seus efeitos não necessariamente serão idênticos em termos da evolução temporal da resposta do clima (FUGLESTVEDT et al., 2000 e SMITH e WIGLEY, 2000) apud Forster et al. (2007).

Boucher e Reddy (2007) afirmam que apesar do PAG poder ser tecnicamente utilizado para estimativa dos efeitos climáticos de GEE de vida curta, seu uso não é bem estabelecido e há pouca literatura sobre o seu uso nesse caso.

Shine et al. (2005) introduziram o conceito de PTG (Global Temperature Change Potential – GTP, em sua sigla em inglês), em resposta aos questionamentos sobre a aplicabilidade do PAG na avaliação das mudanças climáticas de longo prazo. O PTG sugere uma abordagem alternativa que compara a mudança da temperatura média global ao final de um determinado horizonte de tempo, colocando menos ênfase nas flutuações provocadas pelos GEE de vida curta.

A proposta dos autores compõe-se na prática de duas métricas distintas, embora baseadas em um mesmo modelo climático analítico.

A primeira métrica representa a mudança de temperatura em um dado momento, em função de um pulso de emissão de determinado GEE (PTG_P). A segunda métrica baseia-se no mesmo conceito, mas expressa o efeito de uma emissão sustentada (contínua) de determinado GEE (PTG_S). Tanto o PTG_P quanto o PTG_S são referenciados à mudança de temperatura devida a emissão semelhante de um gás de referência, aqui considerado como sendo o dióxido de carbono. Segundo os autores, o GTP_S apresenta um bom desempenho em relação ao modelo de balanço energético para misturas de gases com uma grande variedade de tempos de residência atmosférica. Além disso, para horizontes de tempo de cerca 100 anos, o GTP_S e o PAG produziram resultados muito semelhantes, o que referencia seu uso alternativo ao PAG.

A larga aceitação da métrica do PAG deve-se em grande parte à sua simplificação e ao pequeno número de parâmetros de entrada, o que facilita a sua compreensão

pelos formuladores de políticas. Como pode ser observado pelas Equações Equação 5 a Equação 10, a métrica do PTG_P e do PTG_S envolve conceitos matemáticos mais elaborados, e um maior número de variáveis de entrada, o que pode vir a ser um sério obstáculo à sua aceitação e utilização mais ampla.

- PTG_P (para um pulso de emissões):

Equação 5: Potencial de Temperatura Global Absoluto para pulsos de emissões de dióxido de carbono, segundo Shine et al. (2005).

$$PTGA_P^C(t) = \frac{A^C}{C} \left\{ \tau a_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + \sum_i \frac{a_i}{(\tau^{-1} - \alpha_i^{-1})} \left[\exp\left(-\frac{t}{\alpha_i}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\}$$

Equação 6: Potencial de Temperatura Global Absoluto para pulsos de emissões do GEE_x , segundo Shine et al. (2005).

$$PTGA_P^X(t) = \frac{A_x}{C(\tau^{-1} - \alpha_x^{-1})} \left[\exp\left(-\frac{t}{\alpha_x}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$

Equação 7: Potencial de Temperatura Global relativo para pulsos de emissões do GEE_x , segundo Shine et al. (2005).

$$PTG_P^X(t) = \frac{PTGA_P^X(t)}{PTGA_P^C(t)}$$

- PTG_S (para emissões sustentadas):

Equação 8: Potencial de Temperatura Global Absoluto para emissões contínuas do GEE_x , segundo Shine et al. (2005).

$$PTGA_S^X(t) = \frac{\alpha_x A_x}{C} \left\{ \tau \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] - \frac{1}{(\tau^{-1} - \alpha_x^{-1})} \left[\exp\left(-\frac{t}{\alpha_x}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \right\}$$

Equação 9: Potencial de Temperatura Global Absoluto para emissões contínuas de dióxido de carbono, segundo Shine et al. (2005).

$$PTGA_S^C(t) = \frac{A_C}{C} \left\{ \begin{aligned} & a_0 t \tau - a_0 \tau^2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + \\ & + \sum_i \alpha_i a_i \left[\tau \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) - \frac{1}{\tau^{-1} - \alpha_i^{-1}} \left(\exp\left(-\frac{t}{\alpha_i}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) \right] \end{aligned} \right\}$$

Equação 10: Potencial de Temperatura Global relativo para emissões contínuas do GEE_x, segundo Shine et al. (2005).

$$PTG_S^x(t) = \frac{PTGA_S^x(t)}{PTGA_S^c(t)}$$

Além disso, pelo conceito do PTG_P , uma maior emissão de dióxido de carbono do que GEE de vida curta poderia ajudar no cumprimento de metas em um determinado momento, mas também poderia gerar dificuldades na manutenção da estabilização, em função do maior tempo de resposta do dióxido de carbono. Por outro lado, O GTP_P é bastante sensível a incertezas tanto quanto ao sistema climático quanto aos cenários de emissões futuras, de tal forma que os valores utilizados podem necessitar de revisão.

Segundo Shine et al. (2007), apesar de tais dificuldades, o uso do PTG_P teria claras vantagens sobre o PAG:

- por ser uma função do tempo e de política climática, poderia servir como ferramenta de formulação de políticas de custo-benefício;
- manteria a transparência já conhecida do PAG;
- poderia ser uma útil ferramenta de análise dos impactos não climáticos e dos benefícios advindos da redução das emissões;
- poderia fornecer valiosas informações sobre o desenvolvimento de novas estratégias e tecnologias aos formuladores de políticas.

Dorbian et al. (2011), destacam que as métricas do PAG e do PTG apresentam características em comum. Cada métrica poderia ser utilizada na descrição de diferentes cenários, com pulsos de emissões ou emissões sustentadas, além de apresentar as incertezas comuns a todas as métricas:

- incertezas estruturais;
- grau de aderência do modelo;
- sensibilidade às diferentes projeções de comportamentos futuros;
- grau de ponderação dos efeitos de curta e longa duração;
- incerteza científica;
- conhecimento dos processos físicos correlatos ao clima.

É relevante citar a posição do governo brasileiro, contrário à adoção do PAG como métrica de conversão dos GEE em CO₂ eq., pelo fato desta métrica superestimar a contribuição de gases de curto tempo de residência atmosférica como o metano, e subestimar a contribuição dos GEE de longo tempo de residência atmosférica como os PFCs. Face ao exposto, o governo brasileiro vem adotando como métrica de medição dos impactos climáticos dos GEE em seus inventários nacionais de emissões o PTG como alternativa ao uso do PAG (IPEA, 2011).

Tal posição fica claramente retratada no documento “Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (BRASIL, 2010).

O documento relata as emissões antrópicas nacionais de GEE não controlados pelo Protocolo de Montreal estimadas em unidades de massa individuais de cada GEE, calculadas sob a métrica do PTG. O governo brasileiro considera o PTG mais apropriado para indicar a importância relativa dos diferentes gases de efeito estufa no que se refere a suas contribuição para o aquecimento global. O documento esclarece os motivos de tal decisão:

O GTP compara as emissões dos gases de efeito estufa por meio de suas contribuições para a mudança na temperatura média na superfície terrestre em um dado horizonte de tempo futuro e reflete melhor a real contribuição dos diferentes gases de efeito estufa para a mudança do clima e o seu uso propiciaria políticas de mitigação mais apropriadas (BRASIL, 2010).

Com relação ao PAG, destaca o documento:

O GWP (sic) não representa de forma adequada a contribuição relativa dos diferentes gases de efeito estufa à mudança do clima. O uso do GWP (sic) enfatiza sobremaneira, e de modo errôneo, a importância dos gases de efeito estufa com curtos períodos de permanência na atmosfera, como o metano, conduzindo a estratégias equivocadas e inadequadas de mitigação no curto e longo prazos e a sua utilização vem erroneamente direcionando as prioridades de mitigação. Tem havido uma supervalorização da redução das emissões de metano e de alguns gases industriais de curto tempo de permanência na atmosfera, retirando o foco da necessidade de redução das emissões de CO₂ de origem fóssil e de controle de alguns gases industriais de longo tempo de permanência na atmosfera (BRASIL, 2010).

A fim de tornar clara a superestimação do metano ao se utilizar a métrica do PAG, o documento apresenta os resultados do inventário nacional tanto pela métrica do PAG como pelo PTG para a conversão dos GEE em CO₂ eq., conforme a Tabela 9, a seguir.

Tabela 9: Emissões brasileiras de GEE em 2005 (Gg CO₂ eq.), calculadas pelas métricas do PAG e PTG.

GÁS	PTG		PAG	
	2005	Participação 2005	2005	Participação 2005
	Gg	%	Gg	%
CO ₂	1.637.905	87,17%	1.637.905	74,70%
CH ₄	90.534	4,82%	380.241	17,34%
N ₂ O	147.419	7,85%	169.259	7,72%
SUB-TOTAL 1	1.875.858	99,83%	2.187.405	99,76%
HFC-125	139	0,01%	350	0,02%
HFC-134a	126	0,01%	2.966	0,14%
HFC-143a	398	0,02%	353	0,02%
HFC-152a	0,0175	0,00%	24	0,00%
CF ₄	1.245	0,07%	805	0,04%
C ₂ F ₆	233	0,01%	95	0,00%
SF ₆	1.031	0,05%	602	0,03%
SUB-TOTAL 2	3.172	0,17%	5.195	0,24%
TOTAL	1.879.030	100,00%	2.192.600	100,00%

Fonte: adaptado de BRASIL (2010).

A Tabela 10 e a Figura 22 permitem observar a relação inversa entre os tempos de residência atmosférica e as diferenças dos valores encontrados pelas métricas do PAG e do PTG, o que confirma, considerando que a métrica do PTG seja conceitualmente e matematicamente correta, que as emissões dos GEE de vida curta vêm sendo superestimadas.

Tabela 10: Efeito do tempo de residência atmosférica dos principais GEE na variação entre os valores obtidos pelas métricas do PAG e PTG no cálculo das emissões brasileiras de GEE em 2005.

GEE	TEMPO DE RESIDÊNCIA ATMOSFÉRICA ^(a)	VARIAÇÃO ENTRE PAG E PTG
CO ₂	Variável ^{(b)iv}	0%
CH ₄	12	320%
N ₂ O	114	15%
HFC-125	29	152%
HFC-134a	14	2.254%
HFC-143a	52	- 11%
HFC-152a	1,4	137.043%
CF ₄ (PFC-114)	50.000	- 35%
C ₂ F ₆ (PFC-116)	10.000	- 59%
SF ₆	3.200	- 42%

Fonte: (a) Forster et al. (2007).

(b) Ver Nota de fim iv.

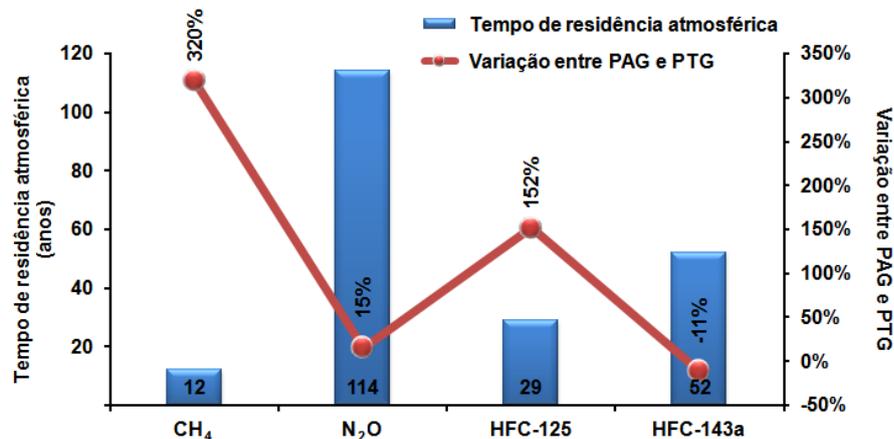


Figura 22: Exemplos do efeito do tempo de residência atmosférica na variação entre os valores obtidos pelas métricas do PAG e PTG.

4.5.2 TEMperature Proxy Index (TEMP)

Segundo Tanaka et al. (2009), embora o PAG seja um índice utilizado para converter emissões históricas de vários GEE para as emissões de CO₂ equivalentes, uma análise baseada no modelo climático “*Aggregated Carbon Cycle, Atmospheric Chemistry, and Climate Model - ACC2*” (TANAKA et al., 2007) revelaria que, para o

CH₄ e o N₂O, a utilização de um horizonte de tempo superior a 100 anos reproduziria melhor a evolução da temperatura histórica.

A fim de corrigir esse problema, os autores apresentam uma nova métrica, TEMperature Proxy Index (TEMP), a qual, segundo os autores, proporcionaria um melhor ajuste para as projeções de temperatura ao longo de um determinado período de tempo.

O índice TEMP está relacionado ao Índice de Forçamento Equivalente - IFE (Forcing Equivalence Index – FEI, em sua sigla em inglês), proposto por Wigley (1998), o qual corresponde à taxa entre as emissões de CO₂ (ΔE_{CO_2}) e as equivalentes variações das emissões do GEE_x (ΔE_x).

**Equação 11: Índice de Forçamento Equivalente
(IFE), segundo Wigley (1998).**

$$IFE_x(t) = \frac{\Delta E_{CO_2}(t)}{\Delta E_x(t)}$$

Conforme Wigley (1998), o IFE seria capaz de determinar os efeitos exatos sobre o forçamento radiativo em função das reduções de emissões de dois GEE, ao passo que o PAG possibilitaria apenas uma estimativa aproximada.

Ao comparar PAG e TEMP, Tanaka et al. (2009) afirmam que as deficiências do PAG em reproduzir o avanço histórico da temperatura é fruto de que sua metodologia de cálculo incluiria apenas um tratamento superficial e simplificado da dinâmica climática. Dessa forma, os autores afirmam que o PAG do CH₄ e do N₂O utilizados no Protocolo de Quioto, quando aplicado às emissões históricas, as subestimam.

CAPÍTULO 5

FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PETRÓLEO BRUTO E DO GÁS NATURAL

“

A INTELIGÊNCIA OPERA QUANDO A MENTE VÊ O TODO, O TODO SEM FIM - NÃO O MEU PAÍS, OS MEUS PROBLEMAS, MEUS PEQUENOS DEUSES, MINHAS MEDITAÇÕES. ELA VÊ A IMPLICAÇÃO DE TODA A VIDA. ESTA QUALIDADE DE INTELIGÊNCIA TEM SUA PRÓPRIA TREMENDA ENERGIA.

”

JIDDU KRISHNAMURTI – FILÓSOFO
E MÍSTICO INDIANO – ☆1895 /
‡1986

CAPÍTULO 5 – FORMAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DO PETRÓLEO BRUTO E DO GÁS NATURAL

Segundo Höök et al. (2010), foi Georgius Agricola em seu tratado “*De Natura Fossilium*”³⁶ de 1546, quem pela primeira vez fez uso do termo “petróleo”. Desde então, o petróleo foi utilizado em diversas partes do mundo, muito antes de ser



Figura 23: Georgius Agricola.

percebido seu uso industrial. Beydoun (1997) e Partington e Hall (1999), apud Höök et al. (2010), citam diversas formas primitivas de utilização do petróleo, tais como o uso de óleo e betume no antigo Oriente Médio e armas incendiárias utilizadas pelo Império Bizantino.

A palavra “*petroleum*” tem origem nas palavras de origem latina “*petra*” e “*oleum*”, cuja combinação resulta em algo que poderia ser descrito como “óleo de pedra” ou “pedra oleosa”. Refere-se a diversos tipos de hidrocarbonetos encontrados em rochas

sedimentares espalhadas por todo o globo terrestre, podendo ser observados desde sua forma gasosa até o estado sólido.

O petróleo e outros hidrocarbonetos têm sido descritos e utilizados desde os primórdios da civilização. Embora a indústria do petróleo tenha sido nascedoura em meados do século XX, seu uso e conhecimento são ainda mais antigos do que as citações de Georgius Agricola, sendo conhecidos desde tempos pré-cristãos (SPEIGHT, 2007). Os relatos mais antigos de uso do petróleo e o desenvolvimento de tecnologias a ele relacionadas são conhecidos desde os Sumérios 4 mil anos A.C., no Vale do Rio Eufrates, onde hoje situa-se o Iraque.

Um interessante relato histórico dos primórdios da indústria petrolífera é feito por Henry (1873), que descreve que em meados do século XIX havia no mundo inteiro uma busca por produtos de iluminação mais eficientes do que os óleos animais e

³⁶ Agricola, G. *De Natura Fossilium*. Dover Publications, Mineola, 256 pp. 1546.

vegetais então de uso comum. Foi então que nos primeiros anos da década de 1850 os advogados George Henry Bissel e Jonathan Greenleaf Eveleth migraram de Nova York para a região de Titusville, na Pensilvânia, onde o “óleo de rocha” já era utilizado como insumo para iluminação.

Em sua visão empreendedora, eles acreditavam que aquela substância mal-cheirosa poderia ser utilizada comercialmente, mas precisam de uma opinião técnica a respeito. Para tal, pensaram em um nome de respeito na comunidade acadêmica da época e convidaram o Professor Benjamin Silliman Jr., da Universidade de Yale. O Professor Silliman conseguiu por meio da destilação fracionada do óleo a comprovação da existência de diversos subprodutos dentre os quais o querosene e a graxa, que se formavam a diferentes temperaturas. Tal descoberta aumentou ainda mais o interesse de Bissel e Eveleth, e despertou o interesse de um grupo de banqueiros de Nova Jersey, que a ambos se associou.

Comprovado o valor econômico do produto, e suportados financeiramente pelos banqueiros de Nova Jersey, Bissel e Eveleth fundaram em 30 de dezembro de 1854 a “Pennsylvania Rock Oil Company”. O problema a ser superado então era a questão de descobrir um método mais eficiente de extrair o petróleo, além da mera coleta das exsudações superficiais.

Na época, já existia nos EUA uma rudimentar indústria de perfuração de poços artesianos, na qual atuava Edwin Laurentine Drake, que foi contratado por US\$ 1.000,00 anuais para conduzir as operações de perfuração de poços de petróleo da companhia. A fim de impor respeito aos trabalhadores, Drake passou a ser chamado de “Coronel”, e é dessa forma que é por muitos conhecido como o “pai” da indústria do petróleo, embora na prática o pioneirismo deva ser creditada a Bissel e Eveleth.

Após diversas tentativas infrutíferas, Drake conseguiu alcançar em 27 de agosto de 1859 um reservatório posicionado a apenas cerca de 20 metros de profundidade, do qual conseguiu extrair pouco mais de 10 barris por dia.

Apenas cinco anos depois, já havia em atividade nos EUA mais de 500 empresas envolvidas com a exploração de petróleo. Passados pouco mais de 150 anos desde

então, o petróleo caracteriza-se como talvez a mais importante substância utilizada de forma comercial, estendendo seu uso às mais variadas atividades, desde domésticas como fonte de aquecimento e calefação, como industriais, na geração de energia, plásticos, fertilizantes e toda uma imensa gama de produtos e subprodutos derivados da indústria petroquímica.

5.1 Teorias de formação do petróleo

As discussões a respeito das teorias sobre a formação do petróleo não são tão antigas quanto seu próprio uso e conhecimento, mas vem sendo desenvolvidas há mais de 2 mil anos.

Walters (2006), apud Höök et al. (2010), afirma que já na antiga Grécia filósofos da importância de Aristóteles (384 a. C. – 322 a. C.), dentre outros, discutiam teorias sobre a formação do petróleo. A teoria então vigente acreditava que toda matéria teria origem em quatro elementos: terra, fogo, ar e água. Baseado nisso, acreditava-se que uma vez que o petróleo escoava a partir da terra e era inflamável, ele deveria então ter origem na terra e no fogo.

Desde a segunda metade do século XIX, após o feito de Drake, duas correntes distintas começaram a tomar corpo nas discussões sobre a origem da formação do petróleo: as teorias sobre a origem biogênica ou abiogênica do petróleo.

Em 1877, o químico russo Dmitri Mendeleev (1834-1907) foi um dos primeiros teóricos a defender a teoria da origem abiogênica dos hidrocarbonetos. Em seu trabalho intitulado “*L’origine Du petrole*” (Mendeleev, 1877), o autor afirmara:

^Lorsqu'on aborde l'étude du pétrole, la première question qui se présente est celle de son origine. Où, quand et comment s'est produite cette utile substance, et quels matériaux ont concouru à sa formation? Ces diverses questions, qui se sont posées et qui ont été successivement résolues pour un grand nombre d'espèces minérales entrant dans la composition de l'écorce terrestre, n'ont pas reçu jusqu'ici de solution satisfaisante relativement au pétrole.

On admet généralement que le pétrole a une origine organique, qu'il est le résultat de la décomposition d'organismes primitifs, animaux et végétaux. Cette opinion est fondée sur ce que le pétrole se compose exclusivement de carbures d'hydrogène et d'une faible proportion de matières oxygénées et azotées. On sait, en effet, que ces divers composés peuvent prendre naissance là où des matières organiques se trouvent soumises à l'action de la chaleur, à l'abri de l'air. Mais on sait, en outre, que la chaleur n'est pas absolument nécessaire et que des composés analogues se forment à la longue sans son intervention. Exemple : la tourbe, les lignites, la houille.

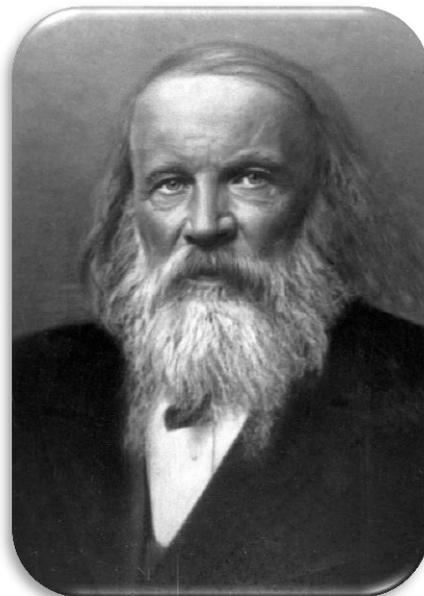


Figura 24: Dmitri Mendeleev.

On a aussi souvent constaté l'existence d'une certaine relation entre les sources de pétrole et le voisinage des volcans, et c'est même la principale raison pour laquelle on a attribué la formation des huiles minérales à l'action des forces volcaniques sur des restes de matières organisées. Mais, pour ne pas entrer dans de plus longs détails, je me bornerai à constater simplement ce fait, que les savants, comme je viens de le dire, ont, pour la plupart, assigné au pétrole une origine organique.

Cependant, si l'on considère l'ensemble des notions acquises sur la substance qui nous occupe, il me parait difficile d'admettre une pareille opinion. C'est ce que je me propose de démontrer, avant d'exposer mes vues personnelles sur ce sujet.

D'abord, on est obligé d'admettre que le pétrole ne s'est formé ni à la surface de la terre, ni au fond des eaux, car, dans le premier cas, il se serait évaporé en ne laissant qu'un résidu bitumeux, et, dans le second cas, en vertu de sa plus faible densité, il serait venu à la surface des eaux se mettre en contact avec l'atmosphère et par conséquent se serait encore évaporé.

D'ailleurs, les propriétés du pétrole indiquent suffisamment que sa formation n'a pas dû s'effectuer de la même manière que celle de la plupart des autres

substances minérales. Il s'est formé à peu de distance de ses gisements actuels. Mais on n'en peut pas dire autant d'une foule d'autres matières, telles que les calcaires, l'argile, le sel gemme, etc. On peut admettre au contraire que tous ces corps se sont formés à une grande distance des lieux où on les trouve. Leur transport a été effectué soit par l'eau des mers, soit par l'eau des fleuves, soit par les glaces flottantes de l'époque glaciaire dont le champ d'action a été très-étendu. Les blocs erratiques que l'on rencontre dans la Russie centrale y ont été apportés de la frontière nord-ouest de ce pays; Le sel de Wieliczka provient peut-être à la fois de toutes les mers du globe; le gypse du Volga a été déposé par les eaux de l'Océan.

Cependant si le pétrole avait bien une origine organique et s'il s'était réellement formé dans les gisements où on l'exploite aujourd'hui, on devrait rencontrer dans ces gisements une énorme quantité de débris organiques. Or, c'est précisément ce qui n'a pas lieu; personne n'a encore signalé dans les sables pétrolifères les débris en question, qui n'auraient pu pourtant disparaître, si l'huile minérale s'était formée non à la surface, mais dans les profondeurs du sol.

Selon moi, il est préférable de chercher le lieu de formation du pétrole dans des couches plus profondes que celles où on le rencontre. En voici d'ailleurs la raison.

Os primeiros anos do século XX marcam o desenvolvimento da moderna Geologia do Petróleo. Segundo Pompeckj (1901) e Schubert (1915), apud Höök et al. (2010), a origem biogênica do petróleo foi apoiada por estudos europeus sobre rochas ricas em matéria orgânica, bem como por estudos do Serviço Geológico dos EUA (USGS) que mostraram a origem orgânica do óleo californiano.

Em meados do século XX, Benjamin T. Brooks em seu artigo intitulado *“The Origin of Petroleum in the Light of Recent Research”* (BROOKS, 1948), destacava que a história da formação do petróleo e do gás natural não seria apenas um intrigante quebra-cabeças científico, mas um importante elemento para que os Geólogos de Petróleo pudessem explicar por quê certas áreas com boas estruturas geológicas favoráveis à acumulações petrolíferas não se revelavam como produtoras. Brooks acreditava que o conhecimento da origem dos hidrocarbonetos possibilitaria melhores resultados na prática exploratória:

^{vi}It is not too much to say that study of this problem now enables us to predict with fair assurance the nature of a crude petroleum which might be expected when drilling to various depths into oil-producing strata of different geological ages. If it is known beforehand at about what depth a particular producing sand is to be expected, we may be reasonably sure of the kind of crude we will find.

Passados mais de 150 anos desde o início dos debates sobre a formação do petróleo e uma vez chegado o final do século XX e iniciado o século XXI, embora a corrente predominante seja a abiogenia, ainda existem muitas controvérsias que não permitem conclusões definitivas sobre o tema.

De acordo com Kolesnikov et al. (2009), existem evidências generalizadas de que o petróleo é geralmente formado a partir de processos biológicos, embora seja uma questão ainda em aberto a possibilidade da produção de hidrocarbonetos a partir de moléculas abiogênicas precursoras submetidas a altas pressões e temperaturas na região do manto superior³⁷, de onde migrariam para a crosta³⁸ terrestre. Como visto, o debate prossegue.

5.1.1 Biogenia

A biogenia, teoria atualmente dominante sobre a formação do petróleo e do gás natural, sugere que sua origem seria a decomposição de grandes acumulações de organismos biológicos ao longo de eras geológicas. A teoria afirma que o soterramento da matéria orgânica por espessas camadas sedimentares sob a ação de elevadas temperaturas e pressões daria origem ao querogênio, precursor de todos os tipos de hidrocarbonetos.

Segundo Höök (2010), em 1913 o professor de química alemão Karl Engler publicou *“Die Chemie und Physik des Erdöls”*³⁹ onde relata a relação entre a temperatura do subsolo e a geração de petróleo, ao conseguir produzir hidrocarbonetos em

³⁷ Camada estrutural da Terra situada logo abaixo da Crosta, em profundidades que variam entre 10 e 670 km (JORDAN, 1979).

³⁸ Camada mais externa da Litosfera terrestre, posicionada entre 0 e 70 km de profundidade (JORDAN, 1979).

³⁹ “A Química e a Física do Petróleo”.

laboratório. Posteriormente, em 1915, o geólogo norte-americano David White introduziu a teoria de taxa de carbono, a qual afirma que a ocorrência de petróleo é dependente da história térmica de uma dada região. Höök afirma que os resultados de tais estudos indicariam que a geração de petróleo estaria conectada a processos de transformação natural de sedimentos ricos em matéria orgânica.

A geração do petróleo exige a existência de ambientes anóxicos⁴⁰, uma vez que em presença de O₂, a biodegradação da matéria orgânica é total, o que leva à formação de CO₂ e H₂O (TISSOT e WELTE, 1984, apud VASCONCELLOS, 2006).

O processo de transformação da matéria orgânica em petróleo tem início com a Diagênese, durante a qual o biopolímero⁴¹ inicial é transformado em um geopolímero, o querogênio. Para tal, são elementos importantes as características da matéria orgânica inicial e a natureza e extensão das atividades microbianas (VASCONCELLOS, 2006).

Em sequência passa a correr a Catagênese, quando ocorrem processos termoquímicos, os quais transformam o querogênio em outras classes de compostos orgânicos. Para tal, é um fator determinante a temperatura a que estará exposta a rocha geradora. Speight (2007), afirma que a faixa compreendida entre 130° C e 150° C é considerada a chamada “janela do óleo”, essencial para a transformação do querogênio em petróleo.

Segundo Vasconcellos (2006), a terceira fase evolutiva da degradação da matéria orgânica em petróleo, a Metagênese, tem início quando passam a ocorrer temperaturas e pressões ainda mais elevadas, em profundidades que podem chegar a 7.000 metros. Nessa fase, ocorre o craqueamento do óleo cru e tem início a geração de gás. Segundo Speight (2007), a temperatura necessária para a geração de gás situa-se em torno de 180° C.

⁴⁰ Pobres em oxigênio.

⁴¹ Moléculas orgânicas de elevada massa molecular, formadas por unidades repetidas, os monômeros, os quais se ligam entre si, como é o caso da celulose.

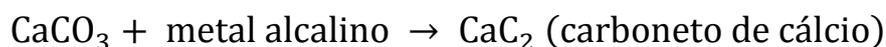
Craig (1953), apud Höök et al. (2010), afirmam que a espectrometria de massa permite a realização de análises que identificam a composição isotópica do carbono, o que pode caracterizar o óleo como de origem biótica. Além de Craig (1953), os autores citam diversos trabalhos (SILVERMAN E EPSTEIN, 1958, FUEx, 1977, CLAYTON, 1991, TANG ET AL., 2000) que concluem pela importância do querogênio para a geração do petróleo, o que seria uma confirmação de sua origem biótica.

5.1.2 Abiogenia

Segundo Speight (2007), a origem abiogênica do petróleo é uma teoria formalmente defendida desde o século XIX, quando em 1866 o químico francês Pierre Marcelin Berthelot (1827-1907) sugeriu que o acetileno, um hidrocarboneto da classe dos alcinos⁴², poderia ser produzido pela reação da água com carbonetos inorgânicos formados pela ação de metais alcalinos em carbonatos:



Figura 25: Pierre Marcelin Berthelot.



Em 1877, Mendeleev em seu trabalho intitulado “*L’origine Du petrole*” (MENDELEEV, 1877), deu sequência às discussões sobre o tema, o qual seria discutido em encontros científicos como o simpósio realizado pela “*American Philosophical Society*”, na Filadélfia, EUA, em fevereiro de 1897 (PECKHAM, 1898). Em seu trabalho, Peckham relata a condução do simpósio, cujo tema “*The Origin and Nature of Petroleum*” e as duas palestras citadas “*The Genesis of Petroleum*

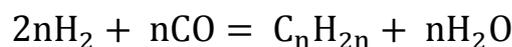
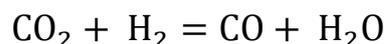
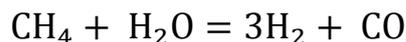
⁴² Os alcinos ou alquinos são hidrocarbonetos acíclicos que contêm no mínimo uma tripla ligação, cuja fórmula é do tipo $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$, sendo “n” maior ou igual a 2.

and Natural Gas” e *“The Occurrence of Petroleum in the Cavities of Fossils”* deixam claro o quão antiga é a busca por respostas sobre o tema.

Passados mais de 70 anos, Kudryavtsev (1951) apud Höök et al. (2010) apresentou uma versão atualizada da teoria de Mendeleev, baseada na hipótese de que a formação espontânea de metano ocorreria em ambientes sujeitos a altas temperaturas e pressões, como aquelas compatíveis com a região do manto terrestre.

Rudakov (1967), afirma que nas duas décadas anteriores o estudo da geologia do petróleo vinha sendo guiado pelo renascimento da teoria da origem abiogênica do petróleo, desenvolvida por Mendeleev. Na antiga União Soviética, evidências experimentais teriam sido obtidas, reforçando a teoria.

Embora não se trate propriamente de uma teoria de formação do petróleo, o processo de Fischer-Tropsch desenvolvido na década de 1920, é citado por Höök et al. (2010) como prova de que é possível criar hidrocarbonetos líquidos como gasolina e querosene, a partir de reagentes inorgânicos. O processo de Fischer-Tropsch tem a capacidade de converter carvão e gás natural em combustível com características de queima mais limpa (USEPA, 2002). O combustível resultante é incolor, inodoro e de baixa toxicidade, além de poder ser misturado ao diesel em qualquer proporção, com pouca ou nenhuma alteração no desempenho dos motores. Sob o aspecto ambiental, podemos citar como importantes benefícios a redução nas emissões de NO₂, CO e material particulado. O processo de Fischer-Tropsch, é baseado nas seguintes reações químicas fundamentais, segundo Opdal e Skreiberg (2006), e Lessa (2008):



Dentre as teorias abiogênicas de formação do petróleo, Kutcherov e Krayushkin (2010), descrevem a chamada “Teoria Abissal”, também conhecida como “Teoria

Russo-Ucraniana”, segundo a qual o petróleo e o gás natural seriam materiais primordiais formados a grandes profundidades na Terra, que migrariam até a crosta terrestre. Segundo os autores, resultados experimentais e análises geológicas confirmariam a teoria, permitindo reavaliar a distribuição, tamanho e localização das reservas globais de hidrocarbonetos. De acordo com a teoria, desenvolvida ao longo dos últimos 50 anos na Rússia e Ucrânia, os hidrocarbonetos gerados na região do manto terrestre poderiam formar depósitos em qualquer tipo de rocha e posição estrutural, e seriam parte do processo de degaseificação da Terra, o que, por sua vez, seria responsável pela criação da hidrosfera, da atmosfera e da biosfera terrestres (Kudryatsev, 1951, Kropotkin e Shakhvarstova, 1959, Porfir'ev, 1974, Krayshkin, 1984 e Chebanenko et al., 2005, apud Kutcherov e Krayushkin, 2010).

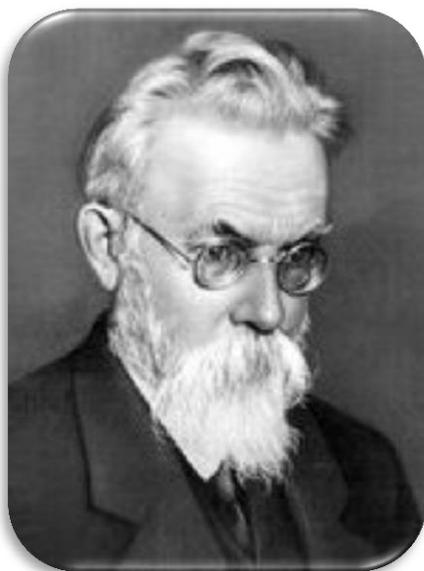


Figura 26: Vladimir Ivanovich Vernadsky.

Glasby (2006), afirma que além de Mendeleev, também o mineralogista e geoquímico russo Vladimir Ivanovich Vernadsky (1933)⁴³ assumiu a hipótese de que os hidrocarbonetos foram gerados no interior da Terra por ação da água com carboneto de ferro. Ainda segundo Glasby, Mendeleev e Vernadsky acreditavam que com o aumento da profundidade da Terra, o teor de oxigênio diminuiria proporcionalmente ao aumento do hidrogênio, favorecendo a geração de hidrocarbonetos em grandes profundidades.

A Teoria Russo-Ucraniana ficou praticamente restrita por muitos anos aos limites da antiga União Soviética em função da escassa publicação de artigos em língua distinta do russo, ao passo que mais de mil artigos teriam sido publicados em russo sobre a teoria, segundo Glasby (2006).

Um dos responsáveis pela divulgação da Teoria Russo-Ucraniana no Ocidente foi o astrônomo austríaco Thomas Gold (1920-2004). No final dos anos 1970, Gold teve contato pela primeira vez com a Teoria Russo-Ucraniana, ao mesmo tempo em que

⁴³ Vernadsky, V. I. (1933) The History of Minerals in the Earth's Crust. Vol. 2, Pt. I, Moscow-Leningrad (em Russo).

teve contato com outras teorias, como o potencial de áreas impactadas por meteoritos como abrigo de reservatórios de petróleo e a ação microbiana na formação do petróleo.

Segundo Glasby (2006), no início de suas pesquisas, Gold acreditava que grandes terremotos seriam capazes de facilitar a migração de gases, em especial metano, desde o interior da Terra até a superfície. Gold chegou a preparar um “mapa mundi” relacionando regiões sujeitas a sismos e sua respectiva produção de hidrocarbonetos. Posteriormente, Gold observou que algumas regiões, como o Oriente Médio, embora não sujeitas a sismos, são grandes produtoras de hidrocarbonetos, o que o levou a concluir pela existência de falhas profundas por onde o metano presente nas profundidades do manto terrestre pudesse ser deslocado por grandes distâncias até a crosta terrestre.



Figura 27: Thomas Gold.

Com base em tais conclusões, Gold passou a afirmar que o metano oriundo das camadas profundas do manto terrestre seria deslocado de forma contínua para regiões superiores da crosta terrestre por meio de falhas, zonas de subducção⁴⁴ e locais de impacto de meteoritos (HÖÖK et al. 2010). Nessas condições de lenta ascensão e arrefecimento, é presumido que parte desse metano seja polimerizado por meio de reações análogas ao Processo de Fischer-Tropsch, gerando hidrocarbonetos de cadeias longas e elevado peso molecular.

Algumas evidências que apoiam a teoria abiogênica são apresentadas por Speight (2007). Segundo o autor, meteoritos contendo condritos carbonáceos contém carbono e hidrocarbonetos. Aquecidos sob pressão, este material poderia liberar depósitos de carbono sólido, além de fluidos de hidrocarbonetos. Ao menos dez corpos celestes em nosso sistema solar apresentam ao menos indícios da existência

⁴⁴ Regiões da Terra onde verificam-se grandes temperaturas e pressões por conta do movimento de placas tectônicas uma em direção à outra.

de hidrocarbonetos, em especial em Titã, uma lua de Saturno, onde a sonda espacial Cassini encontrou em 2004 nuvens de metano e hidrocarbonetos.

Mukhopadhyay et al. (2010) apresentam uma interessante argumentação a favor da teoria abiogênica, quando afirmam que hidrocarbonetos de petróleo e macromoléculas de querogênio são abundantes em planetas ou luas dentro e fora do nosso sistema Solar, como as duas luas de Saturno (Hyperion e Titã), e possivelmente também em anéis de Saturno. Também citam a existência de sólidos orgânicos complexos com unidades de hidrocarbonetos aromáticos e alifáticos encontrados em muitos corpos no sistema Solar exterior, e abundância de água, metano e gás de hidratos em Marte.

Glasby (2006) e Speight (2007) convergem suas conclusões a respeito da confirmação da teoria da abiogenia, ao citarem os campos de petróleo no Oeste Siberiano e o Campo de White Tiger, no Vietnã, os quais produzem a partir de embasamentos cristalinos, fato que praticamente anula a origem biogênica daqueles campos.

Os recentes resultados de estudos apresentados por Spanu et al. (2011), reforçam de forma bastante interessante a teoria abiogênica de formação do petróleo. Segundo o estudo, um novo modelo computacional seria capaz de prever que metano líquido em contato com superfícies metálicas ou ricas em carbono e submetido a temperaturas e pressões extremamente elevadas poderia produzir hidrocarbonetos de cadeia longa. Embora o postulado não tenha sido confirmado de forma empírica, os autores afirmam a possibilidade de formação de hidrocarbonetos em locais com características geológicas específicas, tais como fendas e zonas de subducção, onde a temperatura pode ser superior a 1.500°K ($1.226,85^{\circ}\text{C}$) e a pressão pode ser de até 50.000 vezes a pressão na superfície terrestre. Para a formação dos hidrocarbonetos de cadeia longa, bastariam tais condições agirem sobre o metano puro, mas o processo poderia ser acelerado em presença de metais ou carbono, os quais agiriam como catalisadores. A existência de metano líquido sob condições de temperatura e pressão tão elevadas é devida às coordenadas de $4,5991\text{ Mpa} \times 190,56^{\circ}\text{K}$ correspondentes a seu ponto crítico (BALLARD 2002, apud

POVOLERI 2007) serem muito inferiores às citadas pelos autores (5.066,25 MPa x 1.500° K), conforme apresenta a Figura 28, a seguir.

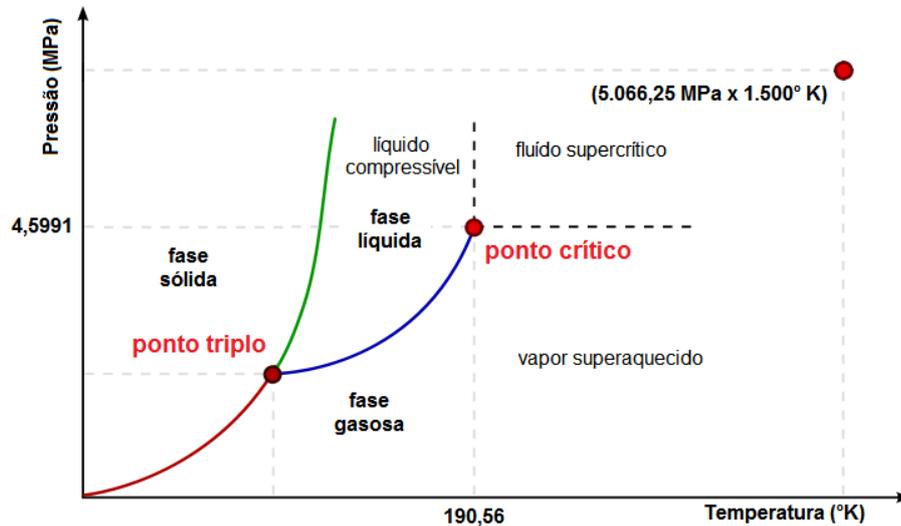


Figura 28: Diagrama de fases do gás natural.

Fonte: adaptado de Stradioto, 2011.

5.2 Composição química do petróleo bruto e do gás natural

Sob o ponto de vista químico, o petróleo é uma mistura extremamente complexa de compostos formados por carbono e hidrogênio, podendo apresentar pequenas quantidades de compostos oxigenados, nitrogenados e sulfurados, bem como traços de compostos metálicos (SPEIGHT, 2007). Os elementos não hidro-carbônicos são encontrados na forma de derivados orgânicos, ou seja, sempre associados aos hidrocarbonetos (ZILIO E PINTO, 2002).

O petróleo é formado por centenas de compostos, os quais variam de estrutura molecular, tamanho, polaridade, funcionalidade ou grupo químico (OLIVEIRA, 2004).

Encontrado em bacias sedimentares distribuídas ao redor de todo o globo terrestre, o petróleo pode existir nas formas gasosa, líquida ou sólida, de acordo com suas frações moleculares, composição química e condições de temperatura e pressão a que estiver submetido. As frações mais leves, que dão origem ao petróleo na forma gasosa, apresentam significativa preponderância do metano (C_1), podendo incluir etano (C_2), propano (C_3), butano (C_4) e alguns outros hidrocarbonetos de cadeias

mais pesadas (C_{5+}), além de dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), água (H_2O), dentre outras impurezas.

Segundo Thomas et al. (2004) e Guo e Ghalambor (2005), a composição típica de um gás natural pode ser descrita como apresentado na Tabela 11, a seguir.

Tabela 11: Composição típica de um gás natural.

COMPOSTO	FRAÇÃO MOLAR	
Metano (CH_4)	0,70 – 0,98 ^(a)	0,8407 ^(b)
Etano (C_2H_6)	0,01 – 0,10 ^(a)	0,0586 ^(b)
Propano (C_3H_8)	Traços – 0,05 ^(a)	0,0220 ^(b)
i-butano (C_4H_{10})	Traços – 0,02 ^(a)	0,0035 ^(b)
n-butano (C_4H_{10})		0,0058 ^(b)
i-pentano (C_5H_{12})	Traços – 0,01 ^(a)	0,0027 ^(b)
n-pentano (C_5H_{12})		0,0025 ^(b)
Hexano (C_6H_{16})	Traços – 0,05 ^(a)	0,0028 ^(b)
Heptanos e acima (C_7H_{14})	Traços – 0,05 ^(a)	0,0076 ^(b)
Dióxido de carbono (CO_2)	Traços – 0,05 ^(a)	0,0130 ^(b)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	Traços – 0,03 ^(a)	0,0063 ^(b)
Nitrogênio (N_2)	Traços – 0,15 ^(a)	0,0345 ^(b)
TOTAL	1,00	1,0000

Fonte: (a) Thomas et al. (2004), (b) Guo e Ghalambor (2005).

Embora o termo “petróleo” refira-se aos hidrocarbonetos encontrados nos estados gasoso, líquido e sólido, de forma mais corriqueira pode referir-se aos hidrocarbonetos especificamente na forma líquida. Outros termos comumente encontrados referindo-se ao petróleo em estado líquido são “petróleo bruto”, “óleo bruto” ou simplesmente “cru”.

Embora o petróleo seja essencialmente formado por hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos e pequenas quantidades de heterocompostos contendo átomos de enxofre, nitrogênio e oxigênio, sua composição pode variar bastante entre campos produtores próximos, e mesmo entre poços localizados em um mesmo campo produtor (VINHOZA, 2005). No entanto, as análises elementares

dos diversos petróleos apresentam de forma geral uma composição semelhante, como pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12: Análise elementar do óleo cru típico (% em peso).

ELEMENTO	PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL (%)		
Hidrogênio	11,00 – 14,00 ^(a)	10,00 – 14,00 ^(b)	11,00 – 14,00 ^(c)
Carbono	83,00 – 87,00 ^(a)	83,00 – 87,00 ^(b)	84,00 – 87,00 ^(c)
Enxofre	0,06 – 8,00 ^(a)	0,05 – 1,50 ^(b)	0,50 – 6,00 ^(c)
Nitrogênio	0,11 – 1,70 ^(a)	0,10 – 2,00 ^(b)	0,10 – 2,00 ^(c)
Oxigênio	0,10 – 2,00 ^(a)	0,05 – 6,00 ^(b)	0,10 – 0,50 ^(c)
Metais	Até 0,3 ^(a)	< 1.000 ppm ^(b)	Até 0,1 ^(c)

Fontes: (a) Thomas et al.(2004), (c) Speight (2007), (b) Ancheyta (2011).

5.2 Hidrocarbonetos

De uma forma bastante simplificada, Hidrocarbonetos são compostos orgânicos formados por carbono e hidrogênio (THOMAS et al., 2004). Segundo o autor, os hidrocarbonetos podem ser classificados de acordo com sua estrutura em saturados⁴⁵, insaturados⁴⁶ e aromáticos.

Por outro lado, API (2001) propõe uma classificação mais resumida, na qual os hidrocarbonetos de petróleo podem ser divididos apenas nas classes de compostos químicos saturados e insaturados, de acordo com o tipo de ligações químicas existentes entre os seus átomos de carbono. Os hidrocarbonetos saturados, também denominados parafinas ou alcanos, apresentam apenas ligações simples, podendo constituir cadeias lineares, ramificadas ou cíclicas. Já os hidrocarbonetos insaturados, também denominados olefinas, apresentam ao menos uma ligação dupla ou uma ligação tripla entre os átomos de carbono. Por último, os hidrocarbonetos que apresentam ao menos um anel benzênico em sua estrutura são denominados aromáticos ou arenos (FERREIRA, 2009).

Baseado nessa classificação, os compostos saturados podem ser subdivididos em três subclasses de acordo com sua estrutura molecular: cadeias lineares (n-

⁴⁵ Também chamados alcanos ou parafinas, cuja fórmula molecular é C_nH_{2n+2} .

⁴⁶ Também chamados alcenos, alquenos ou olefinas, cuja fórmula molecular é C_nH_{2n} .

alcanos), ramificadas (isoalcanos) ou cíclicas (cicloalcanos). Também é comum a utilização dos termos parafinas e cicloparafinas ou naftalenos para designar respectivamente os alcanos (ramificados ou não) e os cicloalcanos.

COMPOSTOS SATURADOS		
n-alcanos (parafinas)	Isoalcanos (parafinas)	Cicloalcanos (naftalenos)

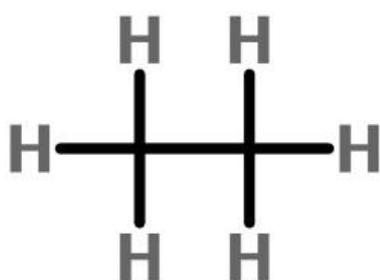


Figura 29: Fórmula estrutural do etano

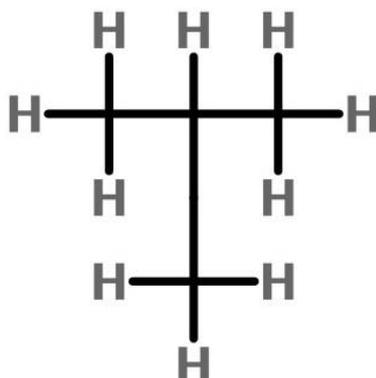


Figura 30: Fórmula estrutural do iso-butano.

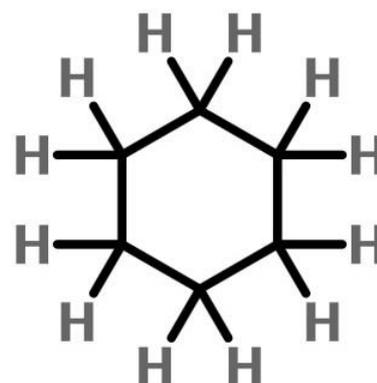


Figura 31: Fórmula estrutural do ciclohexano.

Por outro lado, os compostos insaturados podem ser subdivididos nas subclasses de compostos aromáticos e olefinas⁴⁷, respectivamente cíclicos e alifáticos.

COMPOSTOS INSATURADOS	
Aromáticos (cíclicos)	Olefinas (alifáticos)

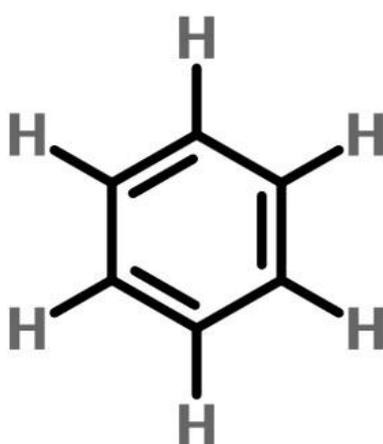


Figura 32: Fórmula estrutural do benzeno.

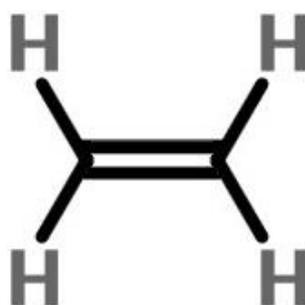


Figura 33: Fórmula estrutural do eteno (etileno).



Figura 34: Fórmula estrutural do etino (acetileno).

⁴⁷ Hidrocarboneto alifático, ou seja, de cadeia aberta, apresentando pelo menos uma ligação dupla entre os carbonos.

Diversas têm sido as classificações propostas para os hidrocarbonetos, cada qual com objetivos específicos e baseadas em parâmetros físico-químicos distintos. Tais classificações servem a interesses particulares tanto no aspecto das características das frações do hidrocarboneto obtidas pelo refino, quanto da origem geológica do petróleo (ZILIO E PINTO,2002).

Segundos os autores, a composição global do petróleo pode ser determinada pelo teor de:

- Hidrocarbonetos saturados, tanto parafínicos quanto naftênicos;
- Hidrocarbonetos aromáticos puros, cicloalcano-aromáticos e eventualmente compostos cíclicos sulfurosos;
- Resinas e asfaltenos, compostos heteroatômicos⁴⁸ fortemente polares e de elevado peso molecular, com a presença de nitrogênio, enxofre e oxigênio.

Segundo API (2001), a composição normal dos óleos crus é delimitada conforme apresentado pelo seguinte Diagrama Triangular:

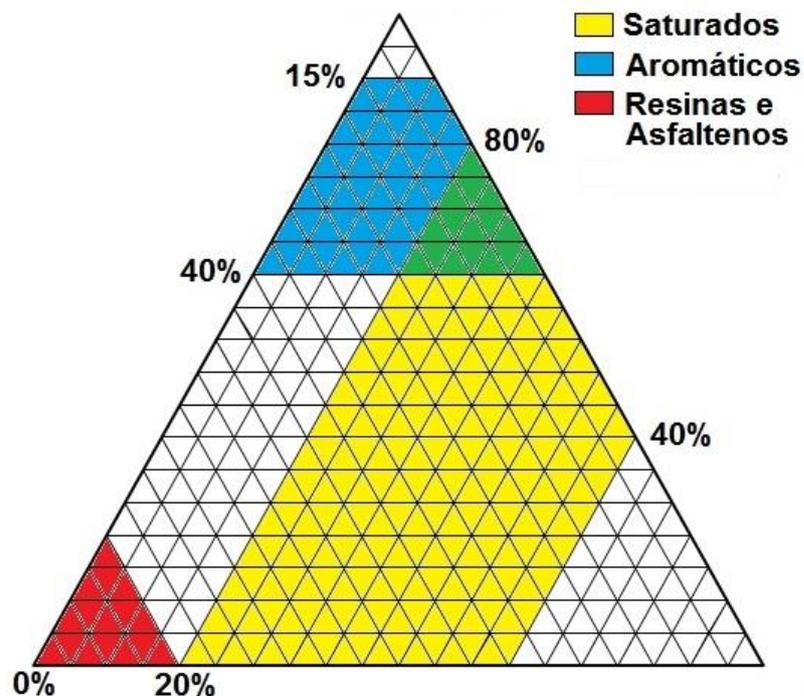


Figura 35: Diagrama triangular da composição normal dos óleos crus. Fonte: API (2001).

⁴⁸ Compostos orgânicos que contêm outros elementos químicos, além de carbono e hidrogênio. Os compostos heteroatômicos importantes na geoquímica do petróleo são aqueles que contêm átomos de nitrogênio, enxofre e oxigênio, os quais recebem a designação de compostos “NSO” (LOPES, 2002).

Uma classificação preliminar, baseada no tipo de ligações e cadeia carbônica é apresentada na Tabela 13, a seguir.

Tabela 13: Classificação dos hidrocarbonetos segundo o tipo de cadeia e ligações carbônicas.

CLASSE	TIPO DE CADEIA	TIPO DE LIGAÇÃO C-C		CLASSIFICAÇÃO	FÓRMULA
Alifáticos	Acíclica (aberta)	Saturada	Ligações simples	Alcanos ou parafinas	C_nH_{2n+2}
		Insaturada	Ligações duplas	Alcenos ou olefinas	C_nH_{2n}
			Ligações triplas	Alcinos	C_nH_{2n-2}
	Cíclica (fechada)	Saturada	Ligações simples	Ciclanos	C_nH_{2n}
		Insaturada	Ligações duplas	Ciclenos	C_nH_{2n-2}
			Ligações triplas	Ciclinos	C_nH_{2n-4}
Aromáticos	Cíclica (fechada)	Insaturada	Contém anel benzênico	Aromáticos	Variável

Fonte: o autor.

Zilio e Pinto (2002) citam estudo desenvolvido por Tissot e Welte (1984) em cortes de resíduos de petróleo a 210° C de cerca de 550 diferentes petróleos a partir do qual foi proposta uma classificação baseada nos teores de alcanos (compostos parafínicos), cicloalcanos (compostos naftênicos), aromáticos, resinas e asfaltenos (compostos nitrogenados, sulfurosos e oxigenados) e enxofre.

Tabela 14: Classificação proposta por Tissot e Welte para óleos crus.

TIPO DE PETRÓLEO	CONCENTRAÇÃO (T > 210° C)		TEOR DE ENXOFRE
Parafínico	Saturados > 50% Aromáticos + Resinas + Asfaltenos < 50 %	Parafinas > Naftênicos e Parafinas > 40%	< 1%
Parafínico-naftênico		Parafinas ≤ 40% e Naftênicos ≤ 40%	
Naftênico		Naftênicos > Parafinas e Naftênicos > 40%	
Aromático intermediário	Saturados ≤ 50% Aromáticos + Resinas + Asfaltenos ≥ 50 %	Parafinas > 10%	> 1%
Aromático-naftênico		Parafinas ≤ 10% e Naftênicos ≥ 25%	

Aromático-asfáltico	Parafinas \leq 10% e Naftênicos \leq 25%	Geralmente $<$ 1%
----------------------------	---	-------------------

Fonte: Tissot e Welte (1984), apud Zilio e Pinto (2002).

Thomas et al. (2004), apresenta uma classificação baseada no conteúdo químico primário de parafinas, naftênicos, resinas e asfaltenos, aromáticos, e compostos sulfurados.

Tabela 15: Classificação dos hidrocarbonetos baseada no conteúdo químico primário.

TIPO DE PETRÓLEO	PARAFINAS	NAFTÊNICOS	RESINAS E ASFALTENOS	AROMÁTICOS	ENXOFRE
Parafínico^(a)	\geq 75%		$<$ 10%	Anéis simples ou duplos	Baixo teor
Parafínico-naftênico^(b)	50% – 70%	25% – 40%	5% – 15%		$<$ 1%
Naftênico^(c)		$>$ 70%			Baixo teor
Aromático intermediário^(d)			10% – 30%	$>$ 50%	$>$ 1%
Aromático-naftênico^(e)		$>$ 35%	$>$ 25%		0,4% – 1%
Aromático-asfáltico^(f)			$>$ 35%		1% – 9%

Fonte: Adaptado de Thomas et al. (2004).

- (a) Óleos leves, fluidos ou de alto ponto de fluidez, apresentando densidade inferior a 0,85;
 (b) A maior parte do petróleo produzido na Bacia de Campos/RJ está incluída nesta Classe;
 (c) Incluem-se nesta Classe óleos da América do Sul, Rússia e do Mar do Norte;
 (d) Incluem-se nesta Classe óleos do Oriente Médio (Arábia Saudita, Catar, Kuwait, Iraque, Síria e Turquia), África Ocidental, Venezuela, Califórnia e Mediterrâneo (Sicília, Espanha e Grécia);
 (e) Incluem-se nesta Classe óleos da África Ocidental;
 (f) Incluem-se nesta Classe óleos do Canadá Ocidental, Venezuela e Sul da França.

5.3 Contaminantes

O petróleo bruto pode apresentar consideráveis quantidades de elementos contaminantes, tais como enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais geralmente concentrados em suas frações mais pesadas (THOMAS et al., 2004).

5.3.1 Enxofre

O enxofre é o terceiro elemento mais abundante encontrado no petróleo. Compostos sulfurados são encontrados em todos os tipos de petróleo, com maiores concentrações em petróleos mais densos. Sua presença é indesejável por aumentar a estabilidade das emulsões em função do aumento da polaridade dos óleos contaminados, pela corrosividade dos produtos do petróleo e por sua toxicidade. Sua combustão gera SO_2 e SO_3 , poluentes atmosféricos, os quais formam H_2SO_3 (ácido sulfuroso) e H_2SO_4 (ácido sulfúrico) em meio aquoso (THOMAS et al., 2004).

Segundo PETROBRAS (1994), apud Pedrozo et al. (2002), o American Petroleum Institute (API), reconhece em relação aos compostos sulfúricos, dois tipos de petróleo. Tal classificação, de grande importância sob o ponto de vista ambiental, de saúde e segurança, divide os petróleos em “doces” ou “ácidos”, de acordo com o teor de enxofre. Concentrações de até 6 ppm de gás sulfídrico (H_2S) caracterizam o petróleo como “doce”, ao passo que petróleos caracterizados como “ácidos” podem apresentar concentrações entre 50 a 180 mil ppm.

A presença de compostos organo-sulfurados no petróleo é prejudicial, por conta de sua corrosividade e toxicidade. A NR-15, expedida pelo Ministério do Trabalho e emprego, determina como limite de tolerância a exposição a 8 ppm por até 48 horas semanais, a partir do qual tem início o processo de irritação ocular. Concentrações de 500 ppm podem levar à perda de consciência e letalidade após 30 minutos a 1 hora sob exposição.

5.3.2 Nitrogênio

Compostos nitrogenados apresentam-se em maior concentração nas frações pesadas dos petróleos (THOMAS, 2004). Segundo Speight (2007), As concentrações de nitrogênio no petróleo bruto são em geral baixas, situando-se na faixa entre 0,1% a 0,9%, podendo chegar a 2%. Segundo o autor, não é incomum a ocorrência de petróleos brutos com concentrações não detectáveis de nitrogênio, mas em geral, quanto mais asfáltico for o petróleo, maior será a concentração de nitrogênio.

Embora a concentração de compostos de nitrogênio no petróleo cru seja em geral baixa, sua presença é de grande importância nas refinarias. Sua presença pode ser responsável pelo envenenamento de catalisadores durante o processo de craqueamento (VINHOZA 2005), e por formação de gomas, depósitos de resíduos, mau cheiro e emissões atmosféricas (MÜHLEN, 2007).

O nitrogênio é um componente usual de combustíveis fósseis, em geral associado à matéria orgânica. Existe a suspeita de que compostos heterocíclicos nitrogenados aromáticos apresentem efeito carcinogênico (OLIVEIRA, 2004).

Na cadeia da indústria petrolífera, é na etapa do refino que os principais problemas relacionados à presença de compostos nitrogenados se manifesta. Segundo Silva (2010), a remoção de compostos nitrogenados é relevante durante o refino do petróleo, uma vez que tais compostos podem resultar na formação de óxidos de nitrogênio (NO_x), durante a combustão.

5.3.3 Oxigênio

Segundo Speight (2007), compostos oxigenados podem ocorrer em uma ampla variedade de formas, tais como R-OH , Ar-OH , R-O-R' , $\text{R-CO}_2\text{H}$, Ar-CO_2 , $\text{R-CO}_2\text{R}$, $\text{Ar-CO}_2\text{R}$ e $\text{R}_2\text{C=O}$, onde R e R' são grupos alquil e Ar é um grupo aromático. A concentração de compostos oxigenados no petróleo bruto em geral é inferior a 2%, embora possam ser encontrados petróleos com maiores concentrações, na medida em que aumenta o ponto de ebulição das frações examinadas. Resíduos não voláteis podem ter até 8% de conteúdo de oxigênio.

Os compostos oxigenados são encontrados no petróleo quase nas mesmas concentrações dos compostos sulfurados, prevalecendo os ácidos naftênicos (ou alicíclicos) e em menores concentrações os fenóis e ácidos graxos (DOYLE 2001 e SPEIGHT 2001, apud VINHOZA 2005).

Em geral, os compostos oxigenados concentram-se nas frações mais pesadas do petróleo, sendo responsáveis pela acidez e coloração (ácidos naftênicos), pelo odor (fenóis) e pela formação de gomas e corrosividade nos derivados do petróleo (THOMAS 2004, TONIETTO 1995, apud VINHOZA 2005).

Apesar de compostos de alto peso molecular conterem a maior parte do oxigênio em éter de petróleo, pouco se sabe sobre a sua estrutura, ao passo que compostos de menor peso molecular tem sido investigados com maior sucesso, de forma que sabe-se serem formados por ácidos carboxílicos e fenóis.

Em geral ácidos carboxílicos em frações de petróleo menores que C_8 são quase que inteiramente alifáticos na natureza. Ácidos monocíclicos começam em C_6 e tornam-se predominantes acima de C_{14} , indicando a existência de uma correlação entre suas estruturas e os hidrocarbonetos aos quais estão associados no petróleo bruto.

Estima-se ainda a presença de cetonas, ésteres, éteres e anidridos para uma variedade de óleos brutos. No entanto, sua presença ainda carece de confirmação, em função de sua presença em resíduos não voláteis de alto peso molecular (SPEIGHT, 2007).

5.3.4 Metais

Segundo Thomas et al. (2004), os compostos metálicos podem ser encontrados como sais orgânicos dissolvidos na água emulsionada ao petróleo, facilmente removidos através do processo de dessalgação, e na forma de compostos organometálicos complexos, em geral concentrados nas frações mais pesadas.

Os metais que podem ser encontrados no petróleo são ferro, zinco, cobre, chumbo, molibdênio, cobalto, arsênico, manganês, cromo, sódio, níquel e vanádio, sendo os dois últimos de maior incidência.

Seus teores podem variar de 1 ppm em alguns óleos paleozoicos da Argélia e EUA, até 150 ppm de níquel e 1.200 ppm de vanádio em óleos do Campo de Boscan, da Venezuela.

A análise de 64 óleos brutos dos Estados Unidos, Canadá, Venezuela, África do Norte e Ocidental, Oriente Médio, União Soviética e Austrália revelou teores médios de 63 ppm de vanádio e 18 ppm de níquel (TISSOT E WELTE, 1984).

Os metais encontrados nos petróleos apresentam concentrações na ordem de ppb a ppm, nas formas de compostos organometálicos e sais inorgânicos dissolvidos na emulsão aquosa do petróleo (TONIETTO, 1995, SPEIGHT 2001 e REYES, 2003, apud VINHOZA, 2005). Apesar de tais concentrações serem bastante pequenas, a presença desses compostos prejudica o rendimento dos produtos finais, envenena catalisadores, provoca corrosão dos materiais e aumenta a poluição atmosférica.

Uma vez que contaminantes metálicos são encontrados em todos os petróleos brutos, é essencial a redução de suas concentrações por conta do seu efeito negativo sobre catalisadores usados na remoção de enxofre e nitrogênio, e em outros processos. Embora presentes em concentrações muito pequenas, os contaminantes metálicos são de grande interesse para a indústria do petróleo. Mesmo concentrações muito pequenas de ferro, cobre e em especial, níquel e vanádio nos carregamentos para craqueamento catalítico podem afetar as atividades do catalisador, resultando na formação de gases e coque, e diminuição do rendimento de gasolina. Nos geradores de energia de alta temperatura, tais como turbinas movidas a gás de petróleo, a presença de constituintes metálicos pode produzir depósitos de cinzas em seus rotores, reduzindo folgas e aumentando seu desgaste (SPEIGHT, 2007).

CAPÍTULO 6

A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E DO GÁS NATURAL

“

NÃO ACREDITE EM ALGO SIMPLEMENTE PORQUE OUVIU. NÃO ACREDITE EM ALGO SIMPLEMENTE PORQUE TODOS FALAM A RESPEITO. NÃO ACREDITE EM ALGO SIMPLEMENTE PORQUE ESTÁ ESCRITO EM SEUS LIVROS RELIGIOSOS. NÃO ACREDITE EM ALGO SÓ PORQUE SEUS PROFESSORES E MESTRES DIZEM QUE É VERDADE. NÃO ACREDITE EM TRADIÇÕES SÓ PORQUE FORAM PASSADAS DE GERAÇÃO EM GERAÇÃO. MAS DEPOIS DE MUITA ANÁLISE E OBSERVAÇÃO, SE VOCÊ VÊ QUE ALGO CONCORDA COM A RAZÃO E QUE CONDUZ AO BEM E BENEFÍCIO DE TODOS, ACEITE-O E VIVA-O.

”

SIDDHARTHA GAUTAMA (BUDA) — ☆
563 A.C. / † 483 A.C.

CAPÍTULO 6 – A INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E DO GÁS NATURAL

6.1 Descrição da Indústria do petróleo e do gás natural

Esta descrição da indústria do petróleo e do gás natural é baseada na visão compartilhada pela indústria, por meio do documento intitulado “*Compendium of Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry*”, doravante denominado resumidamente como Compendium API (API, 2009).

O Compendium API é uma coletânea de metodologias reconhecidas para a estimativa de emissões de gases de efeito estufa, como também fornece detalhes para que todos os segmentos de indústria de petróleo e gás natural possam melhorar sua consistência na estimativa de emissões.

O desenvolvimento do Compendium API foi patrocinado pelo American Petroleum Institute (API), sob a supervisão do “*API's Greenhouse Gas Emissions Methodologies Working Group*” e contou com a participação de representantes das empresas Chevron, ConocoPhillips, Devon, Dominion, Encana, ExxonMobil, Kinder Morgan, Magellan, Marathon Oil Company, Murphy Oil, Occidental Petroleum, Shell, Sunoco, e Williams.

Sua primeira edição ocorreu em junho de 2001 como uma versão “piloto”, a qual foi submetida à organizações governamentais, não-governamentais, e associações da indústria do petróleo e do gás natural, com a finalidade de permitir sua ampla revisão. Ao mesmo tempo, a API deu início a estudos de avaliação e comparações metodológicas com outros protocolos de estimativa de emissões de gases de efeito estufa, a fim de permitir melhor comparabilidade global das estimativas de emissões.

Em 2004, o American Petroleum Institute lançou a segunda edição do Compendium, e em 2009 foi lançada sua terceira edição, atualmente em vigor. No presente trabalho, todas as referências ao Compendium API estão relacionadas à sua terceira edição (API, 2009).

Em seu prefácio, a terceira edição do Compendium API reconhece que a estimativa das emissões atmosféricas de gases de efeito estufa é um processo em constante evolução, de forma que o próprio Compendium API destina-se a acompanhar esse processo de evolução, por meio de revisão contínua e atualizações regulares.

Segundo o Compendium API (API 2009), a indústria de petróleo e gás natural inclui um amplo conjunto de atividades diretamente relacionadas à produção, produtos de refino, transporte e comercialização de petróleo bruto e gás natural associado e refinado. A Figura 36 mostra um diagrama geral da indústria, destacando os principais GEE emitidos em cada segmento. Os gases destacados em retângulos pretos na figura indicam as mais significativas fontes de emissões, ao passo que os gases indicados sem destaque representam fontes de emissões de menor relevância.

Os principais segmentos da indústria com potencial de emissão de GEE incluem:

- Exploração, produção e processamento de gás;
- Transporte e distribuição;
- Refino;
- Varejo e marketing.

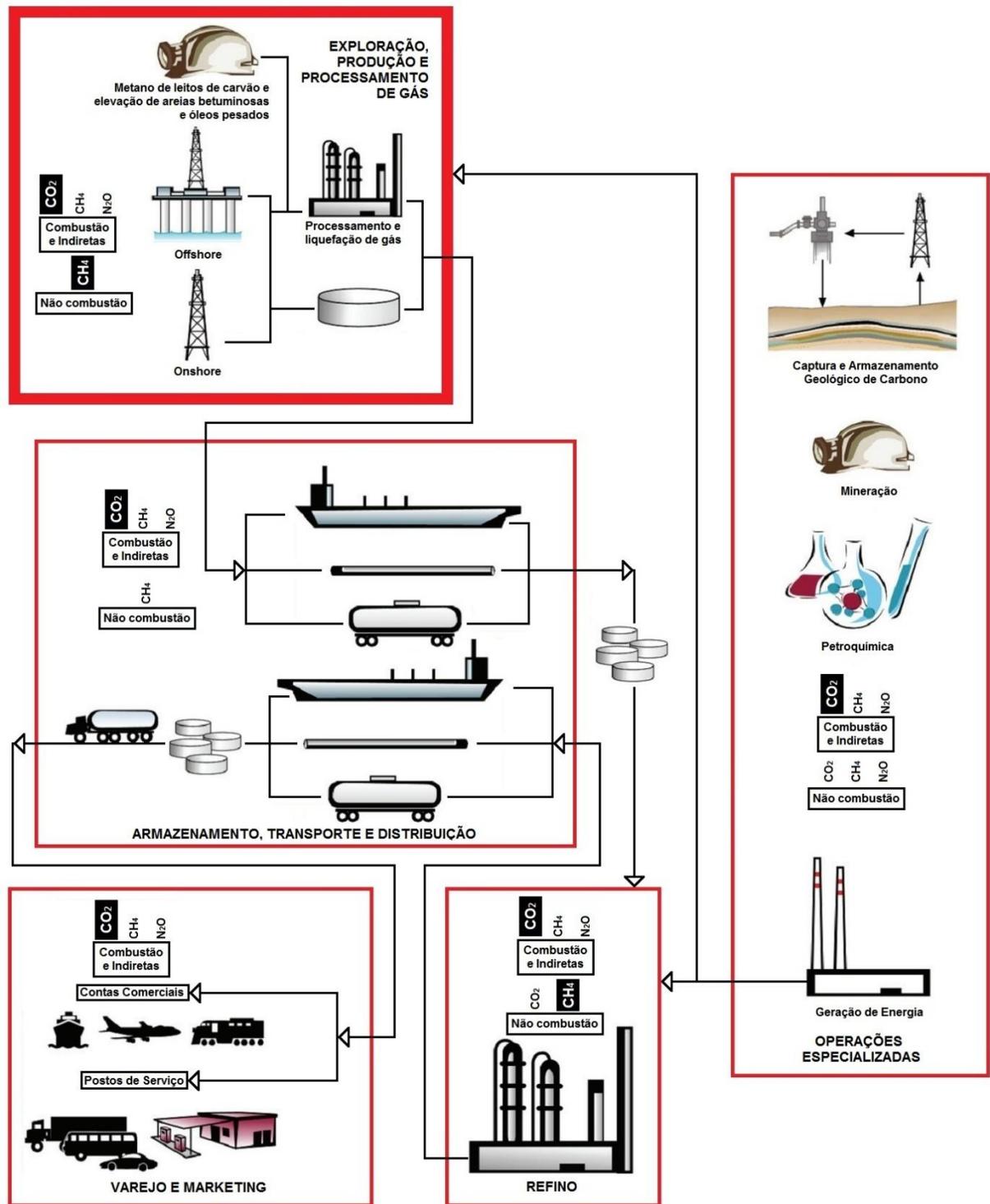


Figura 36: Diagrama esquemático das emissões de GEE da indústria do petróleo e do gás natural. Fonte: API (2009).

O Compendium API (API, 2009) descreve detalhadamente cada um dos doze segmentos por ele considerados como formadores da indústria do petróleo e do gás natural, indicando suas características e fontes de emissões de GEE.

De forma resumida conforme API (2009), cada um desses segmentos é apresentado no Anexo “A”.

6.2 A indústria de petróleo e gás natural e as emissões globais de GEE

A quantificação das emissões de GEE provenientes da indústria do petróleo é uma tarefa de extrema complexidade, agravada pela grande quantidade e variedade de fontes de emissão e da ampla diversidade da composição dos combustíveis consumidos pela indústria. Além disso, a qualidade das informações disponíveis para o cálculo das emissões, incluindo a composição e quantidades dos materiais sendo queimados pode variar substancialmente entre e dentro de subsetores da indústria (IPIECA, 2011).

Conforme apresentado pela Figura 37, a contribuição do setor Fornecimento de Energia às emissões globais de GEE é bastante significativa, da ordem de 25,9%. Quanto às emissões de CO₂ oriundas da queima dos chamados combustíveis fósseis, essa participação torna-se ainda mais relevante, chegando a 56,6% (IPCC, 2007).

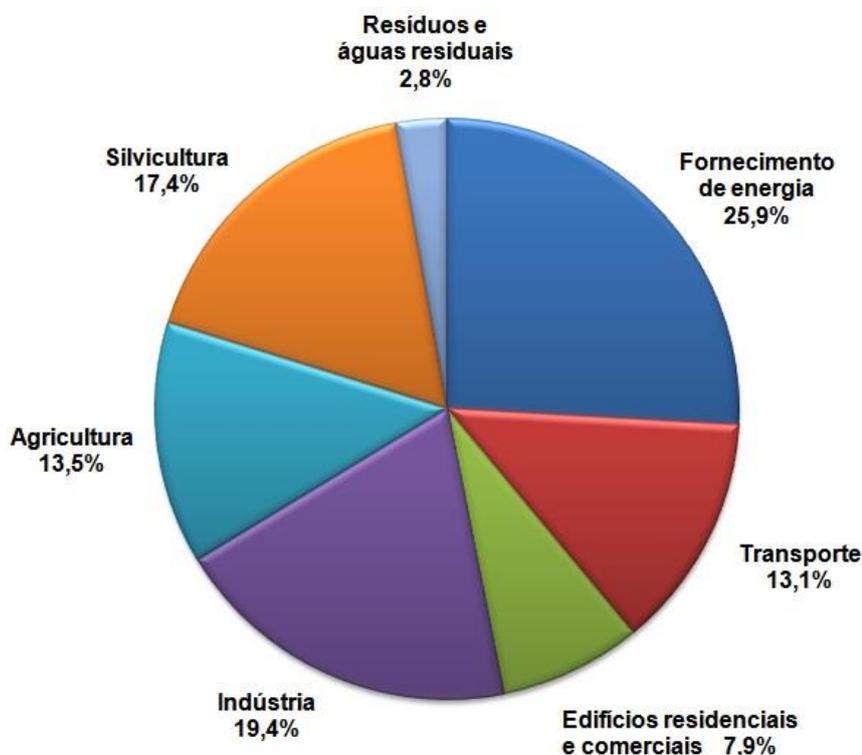


Figura 37: Participação setorial nas emissões de GEE antropogênicos em 2004 em CO₂ eq. Fonte: IPCC (2007).

Outra avaliação referente às emissões globais de GEE é apresentada por Herzog (2009). De acordo com o documento, o total de emissões de GEE no ano de 2005 teria sido estimado em $44,153 \times 10^9$ t CO₂ eq. (bilhões de toneladas), os quais seriam originados quase que totalmente a partir das indústrias e atividades humanas, conforme apresentado pela Figura 38.

Embora a classificação apresentada pelo documento apresente uma abordagem e distribuição das fontes de emissões distinta daquela apresentada por IPCC (2007), podemos observar a confirmação da relevante participação do setor energia nas emissões globais de GEE, chegando a 66,5% ($29,362 \times 10^9$ t CO₂ eq.).

Um importante dado informado pelo documento é a individualização do volume de emissões específico da indústria do petróleo, assim consideradas as atividades de “Extração, Refino e Processamento de Óleo e Gás”, as quais totalizariam 6,4% das emissões globais de GEE. Considerando a estimativa de emissões globais de $44,153 \times 10^9$ t CO₂ eq., tais emissões teriam sido equivalentes a $2,826 \times 10^9$ t CO₂ eq. (2,8 bilhões de toneladas de CO₂ eq.).

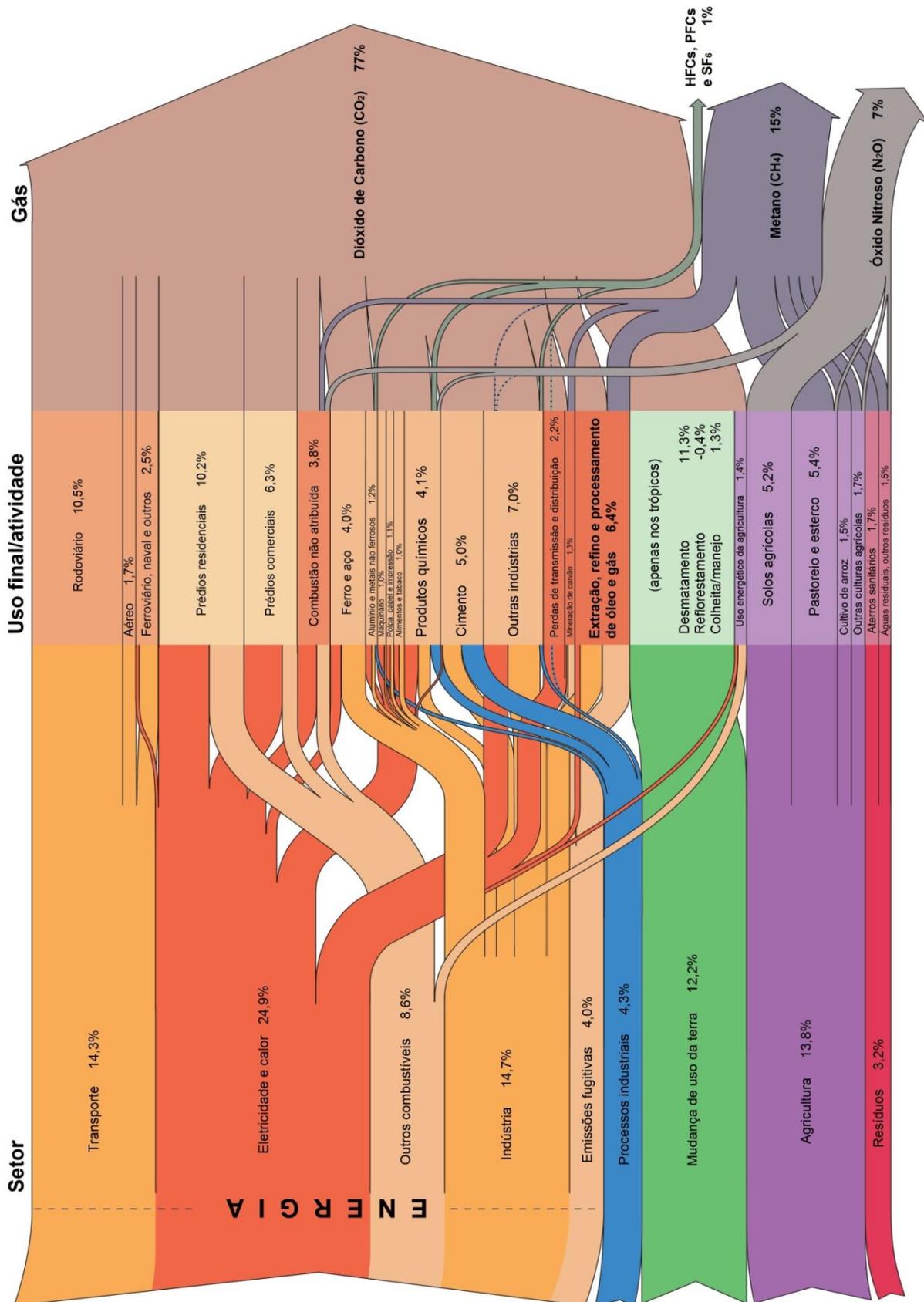


Figura 38: Emissões globais de GEE em 2005. Fonte: Herzog (2009).

Considerando um nível ainda maior de detalhamento, são apresentadas a seguir as emissões de GEE de cinco das maiores empresas petrolíferas em atividade, podendo ser observadas as emissões específicas de suas atividades de Exploração e Produção (upstream):

Exxon Mobil (Estados Unidos): Segundo o site Platts⁴⁹, especializado em energia, petroquímica, mineração e agricultura, em 2012 a Exxon Mobil era a maior empresa de petróleo do mundo, dona de ativos que ultrapassam a US\$ 331 bilhões, receita de US\$ 434 bilhões e lucro de mais de US\$ 41 bilhões.

A seção de segurança e meio ambiente apresentada em seu site (http://www.exxonmobil.com/Corporate/safety_climate.aspx, acessado em 19 de abril de 2013) afirma que a estratégia da empresa para redução das emissões de gases de efeito estufa está focada no aumento da eficiência energética no curto prazo, na implementação de tecnologias já comprovadas de redução de emissões no curto e médio prazo, e o desenvolvimento de novas tecnologias para o longo prazo.

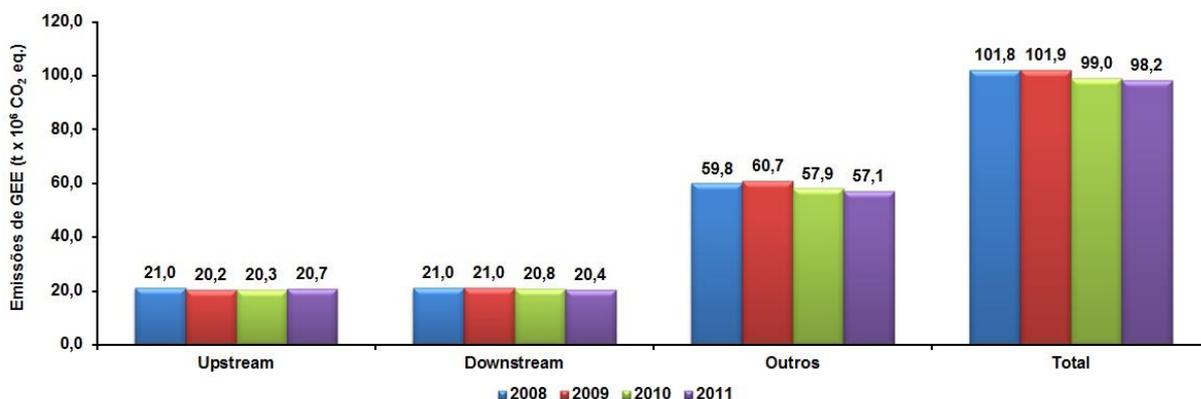


Figura 39: Evolução das emissões de GEE da Exxon Mobil no período 2008 – 2011. Fonte: Exxon Mobil (2012).

Royal Dutch Shell (Holanda): Segundo o site Platts, em 2012 a Shell era a segunda maior empresa de petróleo do mundo, dona de ativos que ultrapassam a US\$ 345 bilhões, receita de US\$ 470 bilhões e lucro de quase US\$ 31 bilhões.

⁴⁹ <http://top250.platts.com/Top250Rankings> – acessado em 13 de abril de 2013.

Segundo o “Sustainability Report 2012” da SHELL (SHELL, 2012), as emissões diretas de GEE de suas instalações totalizaram 72 milhões de toneladas de CO₂ eq. em 2012, uma redução de 2 milhões de toneladas de CO₂ eq. em relação à 2011. A principal razão foi a redução da queima de gás em “flare” em instalações na Nigéria e redução de investimentos em negócios de “downstream”.

Tal redução nas emissões foi parcialmente compensada pelo aumento da produção e das emissões na planta de GTL⁵⁰ no Qatar.

Cerca de 55% das emissões de GEE originou-se nas refinarias e plantas químicas nos negócios de “downstream”. A produção de petróleo e gás nos negócios de “upstream” representou mais de 40% das emissões, e as atividades de transporte (“shipping”) menos de 5%.

Além das emissões diretas descritas acima, o relatório cita que as emissões indiretas de GEE de energia comprada (eletricidade, calor e vapor) chegou a 9 milhões de toneladas de CO₂ eq. em 2012. A Figura 40 apresenta as suas emissões diretas.

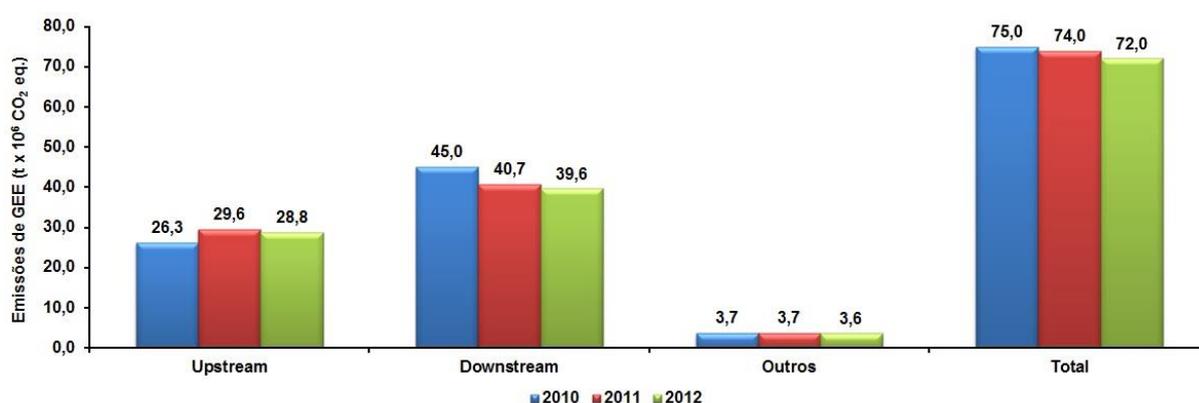


Figura 40: Emissões de CO₂ eq. no período 2010 a 2012, oriundas das atividades de Exploração e Produção (“upstream”) da SHELL. Fontes: SHELL (2010), SHELL (2011) e SHELL (2012).

⁵⁰ Gas to liquids.

Chevron (Estados Unidos): Segundo o site Platts, em 2012 a Chevron era a terceira maior empresa de petróleo do mundo, dona de ativos que ultrapassam a US\$ 209 bilhões, receita de US\$ 236 bilhões e lucro de quase US\$ 27 bilhões.

Desde 2001, a Chevron vem implementando seu Plano de Ação para as alterações climáticas para gestão e redução de suas emissões de GEE. O plano prevê como estratégia para redução das emissões o aumento da eficiência energética, investimento em pesquisa, desenvolvimento e melhoria da tecnologia, busca de oportunidades de negócios em tecnologias energéticas inovadoras, e apoio a políticas flexíveis e economicamente viáveis de mecanismos que protejam o meio ambiente (CHEVRON, 2012).

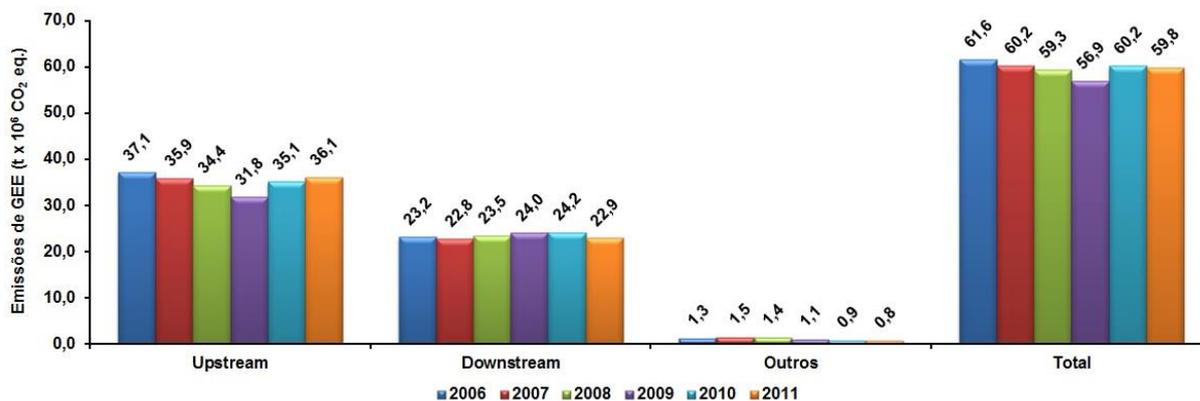


Figura 41: Evolução das emissões de GEE da Chevron no período 2006 – 2011. Fonte: Chevron (2012).

BP (Reino Unido): O site Platts informa que em 2012 a BP era a quarta maior empresa de petróleo do mundo, dona de ativos que ultrapassam a US\$ 293 bilhões, receita de US\$ 376 bilhões e lucro de quase US\$ 26 bilhões.

Segundo o “Sustainability Review 2012” da BP (BP, 2012), a empresa conseguiu reduzir suas emissões de GEE de 61,8 para 59,8 milhões de toneladas entre 2011 e 2012. Tal redução teria sido fruto de melhorias na eficiência energética operacional, da redução das emissões oriundas da queima de gás em “flare”, da diminuição das perdas por ventilação e pela definição de um custo interno à empresa relativo às emissões de carbono nas avaliações de investimento em novos projetos de engenharia.

No entanto, o mesmo relatório informa que na prática a redução ocorreu por conta da venda de ativos (redução de 0,7 Mt CO₂ eq.), melhorias na metodologia de cálculo das emissões (redução de 0,4 Mt CO₂ eq.), ações sustentáveis adotadas para a redução das emissões (redução de 0,2 Mt CO₂ eq.) e alterações operacionais ligadas à redução das atividades em refinarias norte-americanas e à redução das rotas de deslocamento marítimo (redução de 0,7 Mt CO₂ eq.).

A Figura 42 apresenta as emissões de CO₂ eq. da BP, demonstrando que no período 2001 a 2010, as emissões correspondentes às atividades de E&P (Upstream) oscilaram entre cerca de 26 a 31 milhões de toneladas.

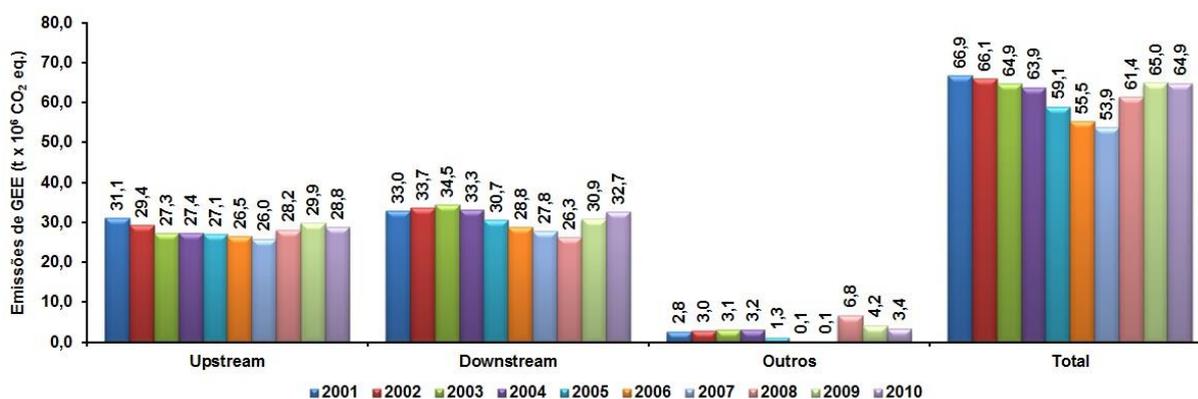


Figura 42: Evolução das emissões de GEE da BP no período 2001 – 2010. Fonte: BP (2010a).

PETROBRAS (Brasil): O site Platts informa que no ano de 2012 a PETROBRAS era a décima oitava maior empresa de petróleo do mundo, dona de ativos que ultrapassam a US\$ 290 bilhões, receita de US\$ 118 bilhões e lucro de quase US\$ 16 bilhões.

O Registro “Público de Emissões”⁵¹ da PETROBRAS, referente aos anos de 2008 a 2010 (GHG PROTOCOL 2008, GHG PROTOCOL 2009 e GHG PROTOCOL 2010) informa a emissão total de aproximadamente 50,9, 50,9 e 53,2 x 10⁶ t CO₂ eq. respectivamente nos anos de 2008 a 2010 (Figura 43). De tais volumes de emissões, as emissões específicas das atividades de Exploração e Produção

⁵¹ O Registro Público de Emissões é uma plataforma online desenvolvida pelo Programa Brasileiro GHG Protocol para elaboração e divulgação dos inventários corporativos de emissões de gases de efeito estufa (GEE) das empresas participantes do Programa de forma transparente, rápida e simples, sendo o primeiro deste tipo no país. Fonte: <http://www.registropublicodeemissoes.com.br/index.php>.

(Upstream) corresponderam a 34,97%, 47,54% e 39,29% dos volumes totais emitidos.

Anteriormente, em 2004, o Relatório de Desempenho – Gestão de Emissões Atmosféricas (PETROBRAS, 2005) já informava as emissões atmosféricas de GEE distribuídas pelas diversas atividades daquela companhia. Observa-se na Figura 44 que as atividades de Exploração e Produção eram então responsáveis por mais de um terço de suas emissões totais (37,18%), correspondentes a 16.512.162 t CO₂ eq., o que expressa claramente a sua relevância.

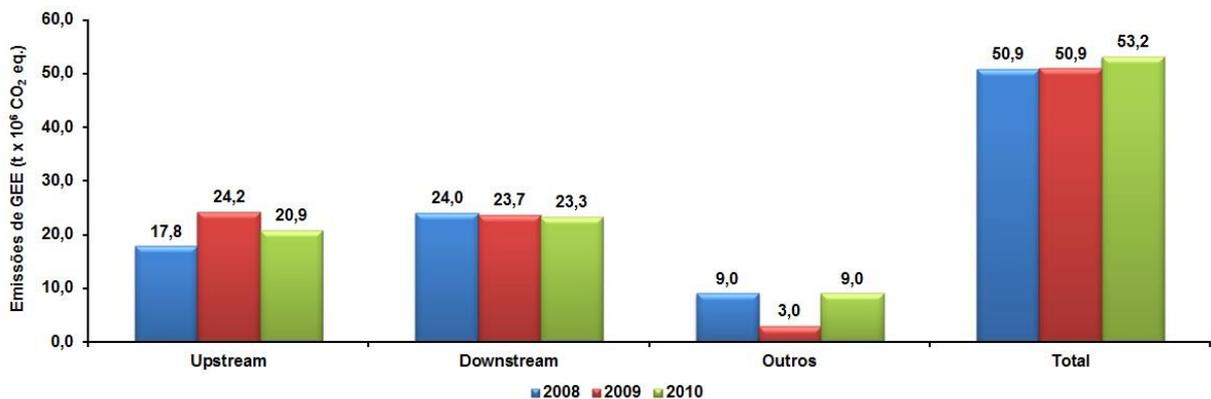


Figura 43: Evolução das emissões de GEE da PETROBRAS no triênio 2008 – 2010. Fonte: adaptado de GHG Protocol (2008), GHG Protocol (2009) e GHG Protocol (2010).

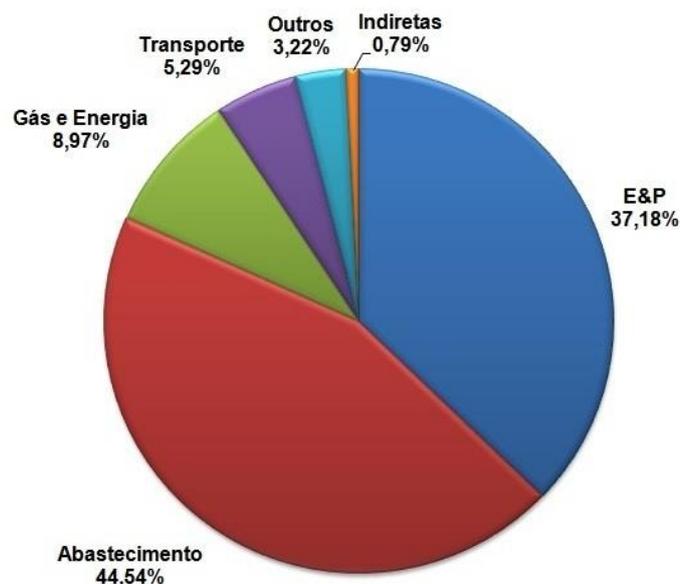


Figura 44 : Emissões de CO₂ eq. por atividade em 2004. Fonte: PETROBRAS (2005).

A fim de relativizar o volume de emissões de GEE da PETROBRAS, são comparadas as suas emissões em 2004 com as emissões de GEE realizadas pela Cidade do Rio de Janeiro em 2005 e pela ELETROBRÁS, outra empresa do Setor Energia, no ano de 2011.

Segundo SMAC/COPPE (2011) e ELETROBRAS (2012), as emissões de GEE de toda a Cidade do Rio de Janeiro em 2005 e da ELETROBRÁS em 2011 foram de 11.351.700 t CO₂ eq. e 9.367.574 t CO₂ eq. respectivamente, ao passo que as emissões de GEE da PETROBRAS referentes apenas às atividades de E&P em 2004 foram de 16.512.162 t CO₂ eq. Tais números não deixam dúvidas quanto à relevância das emissões oriundas das atividades de E&P de petróleo e gás.

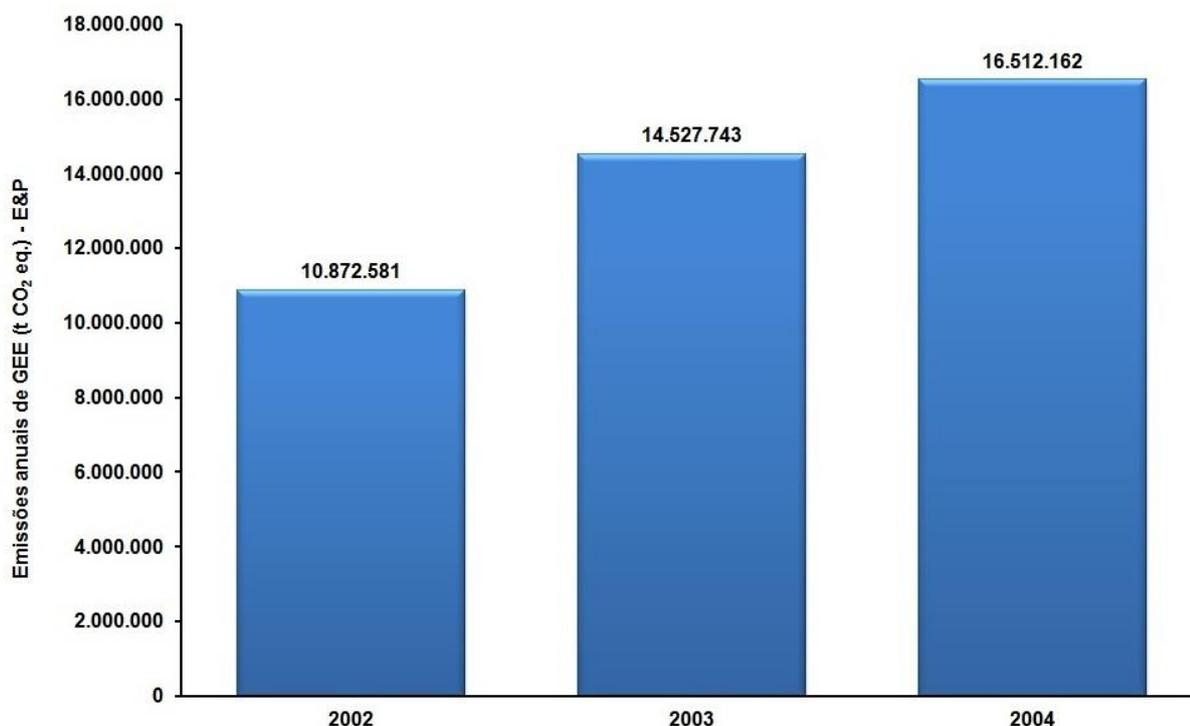


Figura 45: Evolução das emissões de CO₂ eq. no período 2002 – 2004, referentes às atividades de Exploração e Produção da PETROBRAS. Fonte: PETROBRAS (s.d.).

6.3 Gases de Efeito Estufa relevantes no setor de E&P da indústria do petróleo e do gás natural

Em fevereiro de 2013, a agência ambiental dos Estados Unidos (U.S. Environmental Protection Agency - EPA) divulgou pela primeira vez seus dados referentes a gases

de efeito estufa coletados no âmbito do “*Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP)*”, conforme exigência do Congresso norte-americano em 2008.

Os dados, referentes ao ano de 2011, foram coletados em mais de 1800 instalações de petróleo e gás, envolvendo operações de produção, processamento, transmissão e distribuição. No total, as emissões de GEE de tais instalações totalizaram 225×10^6 t CO₂ eq.

Essa avaliação foi desenvolvida em atendimento às regras estabelecidas para a elaboração de inventários de GEE para o setor de petróleo e gás natural através do marco regulatório denominado “*40 CFR Part 98 Subpart W*”, o qual define as fontes de emissões e os GEE que devem fazer parte dos inventários, tendo em vista a sua relevância.

Esta regra determina que instalações de petróleo e gás natural devam reportar suas emissões de CO₂ e CH₄ oriundas de fontes de emissões fugitivas e ventilação, e as emissões de CO₂, CH₄ e N₂O oriundas de fontes de combustão.

Tal determinação encontra ressonância no “*Compendium*” API (API, 2009). O “*Compendium*” foca suas atenções nas emissões de CO₂, CH₄ e N₂O, porque estes são os principais GEE emitidos a partir das operações da indústria de petróleo e gás natural. Apesar disso, o “*Compendium*” apresenta métodos de estimativa para todos os GEE conhecidos⁵², embora nem todos sejam necessariamente significativos para a indústria de petróleo e gás natural.

A Figura 46 apresenta as emissões de GEE da PETROBRAS e da SHELL no triênio 2008 a 2010, demonstrando claramente a acentuada preponderância das emissões de dióxido de carbono, principal gás causador do efeito estufa.

⁵² A única exceção é o trifluoreto de nitrogênio (NF₃), incluído no Anexo “A” do protocolo de Quioto em 2012, portanto três anos após a edição 2009 do “*Compendium*”.

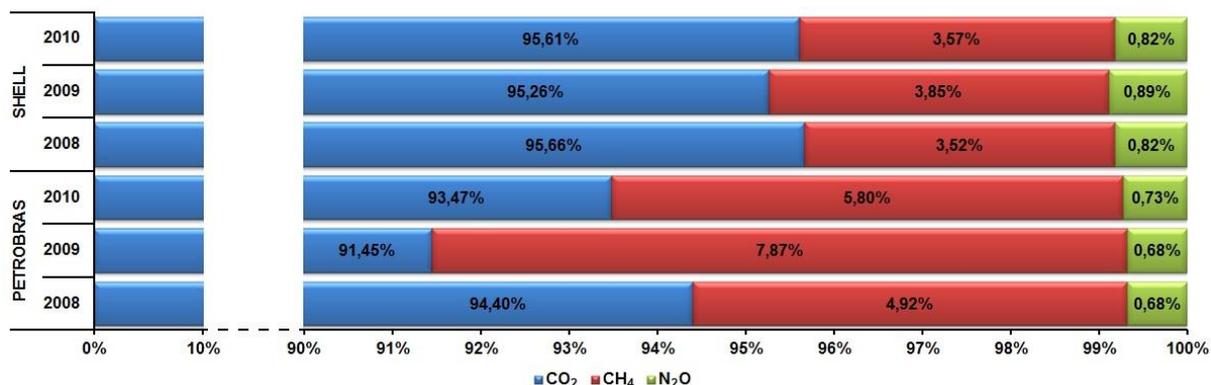


Figura 46: Emissões de GEE em CO₂ eq. da PETROBRAS e da SHELL no triênio 2008 a 2010.
Fontes: GHG Protocol (2008), GHG Protocol (2009), GHG Protocol (2010) e SHELL (2012).

Segundo EPA (2013)⁵³, os sistemas de petróleo e gás natural são uma das categorias mais complexas abordadas pelo GHGRP, tendo em vista o elevado número de fontes de emissão cobertas, a complexidade técnica e a variabilidade das instalações.

6.3.1 CO₂ - Dióxido de Carbono

Nas atividades de E&P, as emissões de dióxido de carbono basicamente ocorrem a partir de fontes de combustão, mas também podem ocorrer a partir da produção de gás, de operações de CCS⁵⁴, através de algumas fontes de ventilação e emissões fugitivas.

As emissões oriundas de campos ricos em CO₂ são particularmente importantes, uma vez que as concentrações de CO₂ no gás natural são geralmente inferiores a 2%, de tal modo que as emissões oriundas de ventilação e emissões fugitivas são pequenas se comparadas com as emissões produzidas pela combustão (API, 2009).

Nas bacias petrolíferas brasileiras, as concentrações de dióxido de carbono comumente encontradas situam-se em torno de 4 a 5% (MME 2009, LIMA 2009, COPPE sd). No entanto, as recentes descobertas⁵⁵ e prospectos localizados no

⁵³ Obtido em <http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/2013Workshop/supporting-info-2011-data-summary.pdf>, acessado em 22 de abril de 2013.

⁵⁴ “Carbon Capture and Storage” – Captura e Armazenamento de Carbono, na sigla em inglês.

⁵⁵ Campos produtores de Bem-te-vi, Carioca, Guará, Parati, Tupi, Iara, Caramba, Júpiter e Azulão.

“cluster”⁵⁶ do pré-sal na Bacia de Santos revelam concentrações bastante superiores, podendo chegar a 8 a 12% em Tupi (LIMA 2009, MME 2009, NAKANO et al. 2009 apud ALMEIDA et al. 2010, MELLO 2011) e 79% em Júpiter (ANP 2010).

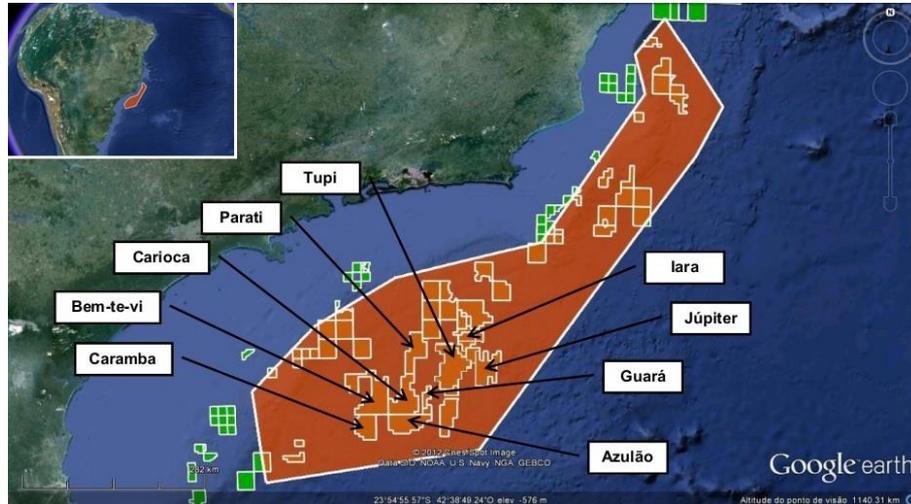


Figura 47: “Cluster” do pré-sal na Bacia de Santos.

6.3.2 CH₄ – Metano

O metano é emitido quando ocorrem vazamentos de gás natural a partir de fontes de emissões fugitivas, ou quando o gás natural é ventilado diretamente durante os procedimentos de manutenção ou de emergência. Metano também é encontrado nos gases de escape, como resultado da combustão incompleta do combustível (API, 2009).

6.3.3 N₂O - Óxido Nitroso

As emissões de óxido nitroso podem ter origem natural, através de várias reações biológicas no solo e na água, e antropogênica através de atividades industriais, gestão de resíduos e atividades agrícolas.

Na indústria de petróleo e gás natural, entre 1 e 2% das emissões totais em CO₂ eq. são devidas à formação de óxido nitroso formado a partir de reações entre nitrogênio e oxigênio, que ocorrem durante a queima de combustíveis.

⁵⁶ Região central do polígono do pré-sal.

A quantidade de óxido nitroso formado durante a combustão varia de acordo com o tipo de combustível, equipamentos e dispositivos de controle de poluição, tais como conversores catalíticos instalados para reduzir as emissões de veículos a motor, os quais podem aumentar as emissões de óxido nitroso (API, 2009).

As emissões de óxido nitroso, embora em geral não cheguem a representar 1% do total de emissões das atividades de E&P, não devem ser menosprezadas por conta de uma análise em termos relativos ao volume total de emissões, tendo em vista que em termos absolutos, seus volumes são significativos, conforme apresentado pela Tabela 16.

Tabela 16: Emissões de N₂O da PETROBRAS e da SHELL no triênio 2008 a 2010.

EMISSÕES DE N₂O		
EMPRESA	ANO	EMISSÕES (t CO₂ eq.)
SHELL	2008	344.500
	2009	348.524
	2010	387.599
PETROBRAS	2008	620.000
	2009	620.000
	2010	620.000

Fontes: GHG Protocol (2008), GHG Protocol (2009), GHG Protocol (2010) e SHELL (2012).

CAPÍTULO 7

PENSAMENTO SISTÊMICO E DINÂMICA DE SISTEMAS

“

NÃO SE ESPANTE COM A ALTURA DO VÔO. QUANTO MAIS ALTO, MAIS LONGE DO PERIGO. QUANTO MAIS VOCÊ SE ELEVA, MAIS TEMPO HÁ DE RECONHECER UMA PANE. É QUANDO SE ESTÁ PRÓXIMO DO SOLO QUE SE DEVE DESCONFIAR.

”

SANTOS DUMONT – AERONAUTA E
INVENTOR BRASILEIRO – ☆ 1873 /
† 1932

CAPÍTULO 7 – PENSAMENTO SISTÊMICO E DINÂMICA DE SISTEMAS

O Pensamento Sistêmico é um tipo de abordagem para o desenvolvimento de modelos que extrapola a visão das partes de uma estrutura e exige uma visão global, qualquer que seja a natureza⁵⁷ dessa estrutura, permitindo a compreensão da interrelação entre os eventos que atuam sobre as variáveis da estrutura, os padrões de comportamento que surgem a partir dos eventos, e a própria ação dos padrões de comportamento sobre os eventos que os geraram, gerando comportamentos de "feedback"⁵⁸ conforme ilustram de forma simplificada as Figuras Figura 48 e Figura 49.

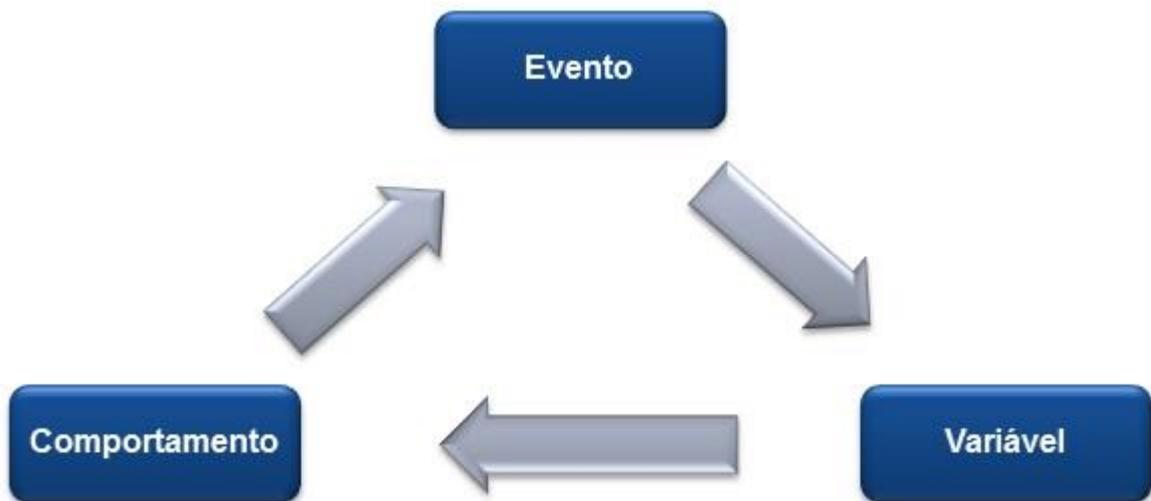


Figura 48: Retroalimentação ("feedback") entre eventos e padrões de comportamento gerados pelo evento.

⁵⁷ Segundo Rodrigues Jr. (2000), apud Misoczky (2003), a teoria sistêmica apresenta diversos significados, por conta de sua origem interdisciplinar (biologia, cibernética, física, química, economia, ciências sociais).

⁵⁸ Retroalimentação.

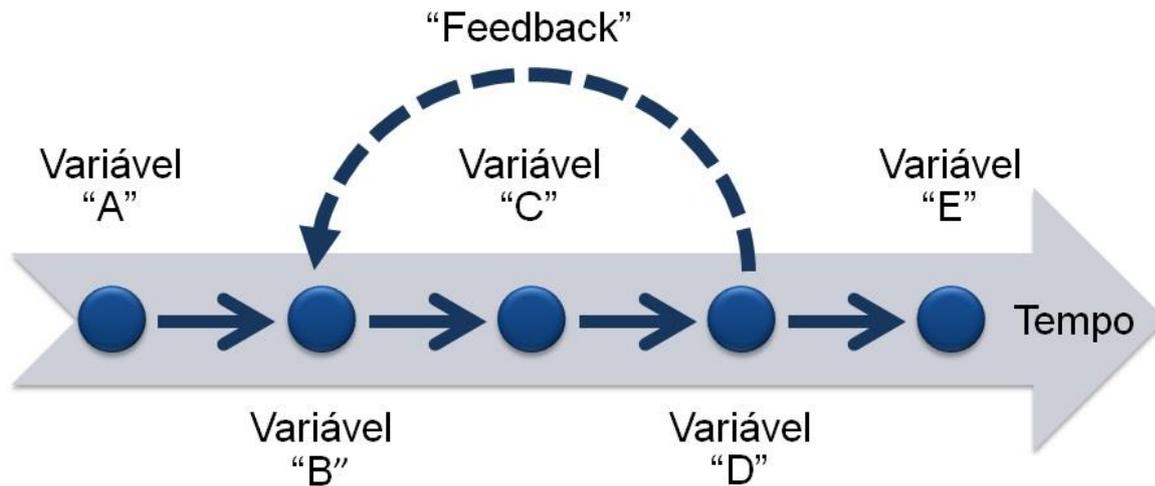


Figura 49: Sistema complexo.

O pensamento sistêmico pressupõe pensar em processos, os quais configuram a existência do todo, e é por meio desses processos que se realiza a existência de uma situação ou fenômeno a ser investigado, que busca entender os padrões e processos da organização, para possibilitar a renovação e reorganização da situação, além de melhorar a capacidade de aprendizagem (PRETO E FIGUEIREDO, 2012).

A Dinâmica de Sistemas foi criada na década de 1950 por Jay Wright Forrester no Massachusetts Institute of Technology (MIT) e consolidada em seu livro *“Industrial Dynamics”*, publicado em 1961. Parte do pressuposto de que é a estrutura do sistema que gera o seu comportamento. Em outras palavras, a forma como se relacionam as diversas partes de um sistema, seja ele um ecossistema natural, uma planta industrial, uma plataforma de petróleo ou um organismo vivo, por exemplo, é que determinarão seu comportamento.

Utiliza como ferramentas a modelagem, por meio da qual procura reproduzir a estrutura das relações de causa e efeito entre os elementos de um sistema, e a simulação, que analisa a forma como se comportam essas estruturas ao longo do tempo.

Seu maior benefício é permitir avaliar as melhores opções para alcançar os resultados desejados e evitar os indesejados por meio da manipulação de cada

parte, avaliando sua influência sobre a estrutura. Como efeito, é possível testar decisões, avaliar seus resultados e corrigir antecipadamente os rumos necessários para alcançar os resultados esperados.

7.1 Teoria geral dos sistemas

A Teoria Geral dos Sistemas - TGS deu início às tentativas de desenvolvimento das idéias sistêmicas como uma nova abordagem do conhecimento científico.

A percepção de que o modelo analítico era inadequado e a necessidade de contrabalançar a progressiva fragmentação da ciência foram as principais razões apontadas para a necessidade do seu desenvolvimento. A Teoria Geral dos Sistemas teria sido concebida não como uma nova disciplina, mas sim como uma nova perspectiva geral para as ciências. Seus objetivos eram investigar as características gerais dos sistemas e o desenvolvimento de modelos aplicáveis a mais de uma disciplina (Rapoport; 1976, apud Kasper, 2000).

Os fundamentos da Teoria Geral dos Sistemas são encontradas na biologia, na tentativa de compreensão da organização e do funcionamento dos sistemas vivos contemplados pela teoria dos sistemas abertos.

As concepções da teoria dos sistemas abertos foram publicadas em 1950 por Ludwig Von Bertalanffy, no artigo intitulado "The Theory of Open Systems in Physics and Biology", considerado como o documento base do movimento sistêmico.

Neste artigo Bertalanffy distinguiu entre sistemas fechados, não abertos ao fluxo de matéria e energia, de sistemas abertos, que trocam matéria e energia com o seu ambiente.

Segundo Bertalanffy (1950), um sistema é fechado se nenhum material entra ou sai dele, ao passo que é aberto se ocorre importação e exportação de forma que seus componentes possam ser alterados. Os sistemas vivos são sistemas abertos, que se mantêm em troca de materiais com o ambiente, e em contínua construção e quebra de seus componentes.

Apesar dessa origem teórica fortemente marcada na biologia, os conceitos apresentados pela TGS aplicam-se igualmente a organizações sociais, empresariais e tecnológicas.

O conceito de sistemas reconhece nestas organizações a existência de sistemas, subsistemas, interconectividade e interdependência entre suas diversas partes, da mesma forma como ocorre em sistemas biológicos. Uma organização, qualquer que seja a sua espécie, é formada por uma rede em que o funcionamento ou mal funcionamento de uma de suas partes implica em alterações na sua estrutura geral. O relacionamento interdependente entre as partes pode ser tal que uma alteração pode gerar um “*feedback*” que tanto pode contribuir positivamente para a sua evolução, como pode gerar danos catastróficos para a organização.

Em seu livro “General systems theory: Foundations, development, applications”, Bertalanffy explicita a aplicação da TGS em organizações que extrapolam os limites da biologia (BERTALANFFY, 1968):

...outro desenvolvimento recente é a teoria das organizações formais, isto é, estruturas plenamente instituídas, como as de um exército, a burocracia, uma empresa, etc. Esta teoria é enquadrada em uma filosofia que aceita a premissa de que a única maneira significativa para estudar a organização é estudá-la como um sistema de variáveis mutuamente dependentes. Por isso a moderna teoria da organização leva quase inevitavelmente a uma discussão sobre a Teoria Geral de Sistemas.

7.2 Sistemas

Um sistema é um conjunto de componentes interligados que atuam de forma simultânea com o objetivo de atingir um resultado específico. Em termos matemáticos, cada componente é uma variável do sistema, a qual pode assumir valores reais ou complexos.

A palavra “sistema” pode referir-se a entidades tão variadas quanto a sistemas biológicos, um ecossistema natural, uma empresa, uma cidade, uma plataforma de petróleo, o mercado de capitais, dentre tantos outros. O que torna similares elementos tão distintos é sua constituição interna, formada por partes interligadas e

interdependentes cada uma da qual essencial para a execução dos objetivos daquele sistema.

Bertalanffy, considerado como o fundador da Teoria Geral dos Sistemas, define sistema como “uma entidade que mantém sua existência através da mútua interação de suas partes”.

A expressão "mútua interação" significa dizer que um intrínseco relacionamento ocorre entre as partes ao longo do tempo. Assim, as partes são ao mesmo tempo interdependentes e interligadas, de forma que qualquer alteração sobre cada uma delas afetará não apenas a própria parte, mas o próprio funcionamento do conjunto. Esta definição de sistema vai além da simples relação de causa e efeito. Ao invés de simplesmente o elemento “A” afetar o elemento “B”, existe a implicação de que “B” também afeta “A” (Figura 50), o que caracteriza a interdependência entre os elementos.

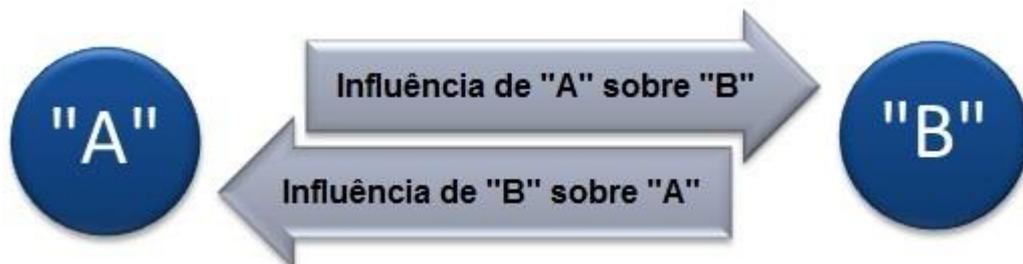


Figura 50: interação mútua entre as partes de um sistema.

Um importante aspecto a ser destacado é que aquilo que em determinado horizonte de análise poderia ser caracterizado como um “sistema”, em um horizonte mais amplo poderia ser caracterizado como um “subsistema”. Assim, em escala de complexidade crescente, poderíamos entender como sistemas: partículas, átomos, moléculas, células, órgãos, pessoas, comunidades, estados, nações, continentes, o planeta Terra, o Sistema Solar, a Via Láctea e o Universo. Na verdade, dentro do contexto do exemplo, o único sistema existente é o Universo, e todos os demais sistemas são meros subsistemas deste sistema maior. O que vai definir o sistema e os subsistemas de um estudo a ser desenvolvido são os horizontes da pesquisa.

A Figura 51 apresenta um exemplo de relacionamento entre sistemas e subsistemas. De acordo com o nível de abrangência (horizonte) de determinado estudo, teríamos níveis diferentes de relacionamento, determinando qual seria o sistema e seus subsistemas. Assim, caso o objeto de estudo fosse o Universo, teríamos seis subsistemas a serem estudados (Via Láctea, Sistema Solar, planeta Terra, continentes, nações e estados). Por outro lado, caso o objeto de estudo fosse o Planeta Terra, este, que em relação ao sistema Universo era um subsistema, passaria a ser um sistema com três subsistemas (continentes, nações e estados).



Figura 51: Relacionamento entre sistemas e sub-sistemas.

7.3 Sistemas complexos

A compreensão do conceito de “sistemas complexos” deve passar preliminarmente pela análise etimológica da palavra “complexo”. A origem dessa palavra tem como raiz a palavra latina “plexus” (entrelaçamento, conexão, aderência), da qual tem origem a palavra “complexus”. Seu antônimo não é “simplex” (simples), mas “implexus” cujo significado é “irredutível”.

Assim sendo, no contexto da Dinâmica de Sistemas, o adjetivo “complexo” não deve ser encarado como sinônimo de “complicado”. O que define um sistema complexo como tal é a existência interna de inúmeras unidades menores, cujo comportamento e compreensão podem ser muito simples, mas que se apresentam sob a forma de uma intrincada rede de conexões, a qual, como um todo, é a responsável por seu comportamento global.

Tarride (1995) afirma que é comum considerarmos como sistemas complexos aqueles que são formados por muitos componentes e estes, por sua vez, apresentam muitas relações. A partir dessa concepção, muitas disciplinas, segundo

o autor, teriam alcançado grande desenvolvimento durante a segunda metade do século XX ao se dedicarem ao estudo dos mais diversos tipos de sistemas por meio do conhecimento de suas partes e interrelações. No entanto, o simples fato de que um sistema apresenta muitas partes e/ou relações não o caracteriza como um sistema complexo.

Menezes Filho (2003) declara que o caráter marcadamente multidisciplinar e antireducionista, faz com que não exista uma definição rigorosa e abrangente de tais sistemas.

Quando tratamos da análise de sistemas complexos, a estratégia de reduzir o objeto de estudo em partes menores para analisá-lo por etapas revela-se inadequada, uma vez que o comportamento global dos sistemas complexos é nitidamente distinto daquele obtido considerando-se unicamente a soma de suas partes, ou deixando-se de avaliar a influência mútua entre seus elementos constituintes. Dessa forma, seu comportamento acentuadamente sistêmico implica que as propriedades destes sistemas só podem ser identificadas durante o seu comportamento coletivo (MENEZES FILHO, 2003).

Na visão de Takeda (2001), a estrutura apresentada por sistemas complexos é orgânica, participativa e descentralizada, o que é característico de sistemas heterárquicos. Estes sistemas têm como característica a existência em cada nível de sua estrutura de todas as competências necessárias à execução de seus objetivos.

Vermuri (1978), apud Magacho (2010), destaca uma interessante característica dos sistemas complexos. Segundo a autora, sistemas complexos evoluem com o tempo, em função de suas características de “sistema aberto”, que se mantém em constante interação com o ambiente a seu redor. Essa característica permitiria ao sistema agregar novos valores ao longo do tempo, caracterizando o chamado “aprendizado” do sistema.

O conceito de sistemas complexos tem recebido diversas definições a partir de diversas disciplinas tais como biologia, física, engenharia, matemática, ciência da computação, etc. Uma definição consistente a partir da literatura para quase todas

aquelas disciplinas é que um sistema é um conjunto de peças interligadas, formando um “todo” integrado, e o adjetivo "complexo" implica que um sistema tem propriedades que não são facilmente compreensíveis a partir das propriedades de suas partes (GOLDEN ET AL, 2012).

Segundo Sussman apud Sussman (2002), um sistema é complexo quando ele é composto de um conjunto de subsistemas cujos grau e natureza das relações é pouco conhecido. Seu comportamento global é difícil de prever, mesmo quando o comportamento do subsistema é facilmente previsível. Seu comportamento a longo e curto prazo pode ser muito diferente e pequenas mudanças em entradas ou parâmetros podem produzir grandes mudanças no comportamento.

O estudo de sistemas complexos é considerado por muitos como um novo campo científico, e distingue-se por ser uma disciplina que tem aplicações em muitas áreas distintas do conhecimento científico. O estudo de Redes Neurais, padrões de tráfego, Inteligência Artificial, Sistemas Sociais, e muitas outras áreas científicas podem ser consideradas no âmbito de sistemas complexos, e podem ser estudadas a partir desta nova perspectiva (SMITH, 2002). Segundo o autor, o site do “New England Complex Systems Institute⁵⁹” (NECSI) descreve um sistema complexo como "vários componentes que interagem cujo comportamento coletivo não pode simplesmente ser inferido a partir do comportamento dos componentes". O reconhecimento de que a compreensão das partes não pode explicar o comportamento coletivo levou a vários novos conceitos e metodologias que estão afetando todos os campos da ciência e da engenharia, sendo aplicados em tecnologia, negócios e até mesmo política social.

⁵⁹ <http://necsi.edu>. Segundo seu site, o Instituto é uma instituição de pesquisa educacional independente com estudantes, bolsistas de pós-doutorado e professores. Além da equipe de pesquisa própria, o instituto tem professores associados, alunos e afiliados do MIT, Harvard, Brandeis e de outras universidades nacionais e internacionais. Suas áreas de pesquisa não se limitam à abordagem clássica para o estudo científico dos sistemas complexos, tais como organizações sociais, organismos biológicos e comunidades ecológicas, atuando também nas áreas de engenharia, administração e medicina. Além de aulas, seminários e conferências para auxiliar os alunos, professores e profissionais em sua compreensão de sistemas complexos, o NECSI patrocina doutorados, fornece recursos de pesquisa on-line, e apresenta a Conferência Internacional sobre Sistemas Complexos.

7.4 Fundamentos da dinâmica de sistemas

A Dinâmica de Sistemas foi desenvolvida na década de 1950 no âmbito do Massachusetts Institute of Technology (MIT), por Jay Wright Forrester, e foi consolidada em sua obra “Industrial Dynamics”⁶⁰, publicada em 1961, para estudar as relações e influências existentes entre os elementos de uma corporação (MUSSE, 2010).

Segundo Fernandes (2003), o livro de Forrester demonstrou a maneira por meio da qual a estrutura de um sistema e as políticas que são utilizadas para seu controle determina o comportamento resultante, mostrando a conexão existente entre decisão, estrutura do negócio e desempenho.

As bases do conhecimento da Dinâmica de Sistemas originaram-se principalmente dos conceitos de realimentação (“*feedback*”) e da teoria dos servomecanismos (sistema de controle no qual a grandeza de saída é de natureza mecânica), originários respectivamente da cibernética⁶¹ e da engenharia (Fernandes, 2003).

O foco inicial de sua abordagem tinha como objetivo a análise de problemas dinâmicos da administração industrial, como problemas de gerenciamento, problemas de flutuação de inventário, queda das ações de uma empresa e a instabilidade da força de trabalho (FORRESTER, 1961, apud KASPER, 2000).

Entretanto, o campo de aplicação da abordagem ampliou-se, passando a ser aplicada na modelagem de sistemas complexos em diversos campos de estudo, os quais incluem sistemas urbanos, econômicos e ecológicos (KASPER, 2000), bem como gestão empresarial, ciclos de negócios, ecologia, economia, além de fenômenos sociais como criminalidade e propagação de doenças, dentre muitos outros (FERNANDES, 2003).

⁶⁰ O livro “Industrial Dynamics” elevou a dinâmica de sistemas ao patamar de disciplina acadêmica. Os conceitos básicos da metodologia são apresentados e aplicados na análise do comportamento de uma cadeia industrial de suprimentos. Seu conteúdo apresenta inúmeras explicações e exemplos matemáticos, em alguns casos tornando a obra de difícil leitura e compreensão para leigos.

⁶¹ Ciência do comando e do controle, orientada para fins, fundada sobre os estudo dos processos de comunicação nos sistemas tecnológicos, biológicos, sociológicos e econômicos (FERNANDES, 2003).

7.4.1 Jay Wright Forrester

Jay Wright Forrester nasceu no dia 14 de julho 1918 em uma fazenda de gado perto de Climax, Nebraska, EUA, filho de Ethel Pearl Wright Forrester (1886-1958) e Marmaduke ("Duke") Montrose Forrester (1883-1975).

Sua educação fundamental foi fora dos padrões acadêmicos tradicionais. Seus primeiros quatro anos de ensino foram conduzidos de forma doméstica por seus pais, associados à vivência prática da manutenção das necessidades de uma fazenda de gado no interior do Estado de Nebraska. O jovem Forrest cresceu acostumando-se a consertar campainhas, baterias e telégrafos, o que permitiu a ele desenvolver a capacidade de encontrar soluções práticas para problemas concretos, como um gerador de energia eólica por ele desenvolvido para dispor energia elétrica para a fazenda de seus pais.

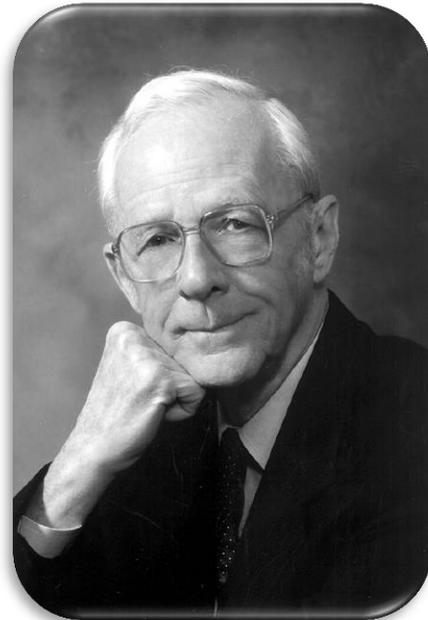


Figura 52: Jay Wright Forrester.

Por conta de uma bolsa de estudos, Forrester cursou engenharia elétrica na Universidade de Nebraska onde dispôs de um sólido núcleo de ensino em teoria dinâmica, o que o auxiliou em seus estudos de circuitos elétricos e acumuladores até sua graduação em 1939.

Após sua graduação, Forrester mudou-se para Massachusetts por conta de uma oferta do MIT, onde começou a trabalhar com geradores eletrostáticos de alta tensão. Sua posição no MIT permitiu a ele trabalhar ao lado de Gordon Brown, pioneiro nas teorias de servomecanismos e controle de "feedbacks". Em 1940, ele e Brown fundaram e tornaram-se Diretores Associados do Laboratório de Servomecanismos do MIT.

Diversas pesquisas foram desenvolvidas sobre vários aspectos dos sistemas de controle de "feedback", incluindo o controle de barras em reatores nucleares e máquinas de usinagem numericamente controladas.

Durante a II Guerra Mundial, Forrest trabalhou para o governo dos EUA e empreiteiros associados, no desenvolvimento de sistemas de combate a incêndios e servocontroladores para sistemas de radares (LANE, 2007).

Sua biografia profissional é detalhadamente descrita no livro *“Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators”* (LANE E STERMAN, 2011).

Segundo os autores, por meio de seu trabalho inicial no MIT, ligado a servomecanismos e computação digital, Forrester integrou os conceitos de retroalimentação (*“feedback”*) e os recursos então emergentes da computação, criando uma nova abordagem que permitia a simulação do comportamento de sistemas sociais, e explicando a forma como a concepção de políticas eficazes poderiam melhorar o comportamento e o desempenho de sistemas.

Baseando-se naquele trabalho, ele desenvolveu e fundou o campo da Dinâmica de Sistemas. Através da integração de conceitos da teoria de controle de *“feedbacks”* e computação digital, Forrester criou uma nova abordagem para simular o comportamento de sistemas sociais, explicando o comportamento e a concepção de políticas eficazes para melhorar o desempenho dos sistemas. A partir de então, a Dinâmica de Sistemas passou a ser aplicada como uma disciplina autônoma na “MIT Sloan School of Management”⁶².

A princípio, Forrester nomeou a nova ciência da mesma forma como batizara seu livro, ou seja, como “Industrial Dynamics” (Dinâmica Industrial). Após algum tempo, ele percebeu que a abrangência de suas teorias extrapolava as fronteiras dos sistemas industriais e as rebatizou da forma como hoje a conhecemos: System Dynamics (Dinâmica de Sistemas).

⁶² O MIT Sloan School of Management, com sede em Cambridge, Massachusetts, é uma das principais escolas de negócios do mundo. Desde 1914, como currículo de administração de engenharia do Departamento de Economia e Estatística do MIT, oferece a realização de pesquisas de ponta e formação em gestão para os melhores estudantes de mais de 60 países.

7.4.2 Ciclos de feedback: reforço e equilíbrio

Forrester (1998), apud Musse (2010), afirma que os laços de realimentação, ou “*feedbacks*”, são considerados os blocos de construção dos sistemas e são o fundamento da Dinâmica de Sistemas.

De acordo com Forrester (1971), apud Fernandes (2003), existem duas categorias de sistemas: sistemas abertos e sistemas fechados.

Sistemas abertos são caracterizados por “*outputs*” que respondem a “*inputs*”, embora estejam isolados uns dos outros e onde os “*outputs*” não exercem influência sobre os “*inputs*”, não reconhecendo nem reagindo à sua própria performance (Figura 53).



Figura 53: Modelo esquemático de sistemas abertos.

Em sistemas abertos, embora haja uma relação direta entre causa e efeito, o efeito não realimenta a causa, de forma que inexiste o “*feedback*” (Figura 53).

Em sistemas fechados, o sistema sofre a influência de seu próprio comportamento passado (FERNANDES, 2003), de forma que “*outputs*” influenciam os “*inputs*”, de tal forma que causa e efeito se confundem. Tais sistemas são ditos “dinâmicos” por conta da influência que o evento passado tem sobre o evento futuro (Figura 54).



Figura 54: Modelo esquemático de sistema fechado.

Forrester (1998), apud Musse (2010), afirma que os “feedbacks” (também chamados de “laços de realimentação”) são o fundamento da Dinâmica de Sistemas. Tais “feedbacks”, associados a “delays”⁶³ (atrasos) compõem a estrutura do sistema, que por sua vez determina todo o seu comportamento (FERNANDES, 2003).

Os “loops de feedbacks” formam-se quando duas ou mais variáveis constituem um circuito fechado de relações, influenciando-se mutuamente em uma relação causa-efeito-causa sem identificação clara sobre sua origem.

Os “loops de feedbacks” são os responsáveis pelos mecanismos de reforço ou equilíbrio que determinam o comportamento crescente, oscilatório, decrescente ou estagnado de um sistema. Os termos “reforço” e “equilíbrio” correspondem ao efeito que determinada alteração no sistema impõe a uma variável após percorrer todo o ciclo dentro do qual se encontra e retornar até essa mesma variável. Se o efeito sobre essa variável tiver o mesmo sentido que ela impõe sobre a variável seguinte, então temos um ciclo de reforço (R). Ao contrário, se esse efeito tiver o sentido contrário, teremos então um ciclo de equilíbrio (E).

Ciclos de reforço, também chamados de ciclos virtuosos ou ciclos viciosos, são um tipo de “feedback” que geram respectivamente crescimentos ou declínios

⁶³ Algumas relações de causa e efeito não ocorrem de forma imediata. Nestes casos, a manifestação do evento sobre a variável só altera o comportamento do sistema passado um determinado período de tempo, que pode variar de alguns poucos segundos ou minutos até períodos muito mais longos, como dias, meses, anos ou ainda mais.

exponenciais. No entanto, um ciclo de reforço, seja virtuoso ou vicioso, não necessariamente será mantido para sempre. Fatores externos poderão ao longo do tempo surgir e transformar o ciclo de reforço em um ciclo de equilíbrio.

Ciclos de equilíbrio são típicos de situações que atuam de forma autoreguladora. Seu comportamento atua de forma a conter o sentido original de mudança presente em cada uma das variáveis do sistema. Ou seja, uma ação sobre determinada variável tem a tendência de agir sobre ela de forma contrária ao estímulo inicial, ao final de cada ciclo.

A Figura 55 ilustra as diferenças entre os dois tipos de “*feedback*”. No exemplo, o aumento (+) da atividade exploratória gera um aumento (+) da produção, que por sua vez reforça o aumento (+) da atividade exploratória por maior disponibilidade de recursos, melhor conhecimento geológico das bacias petrolíferas, etc. Por outro lado, o aumento (+) da atividade exploratória aumenta (+) os impactos ambientais, o que provocaria uma diminuição (-) da atividade exploratória por conta de pressões da sociedade, dos órgãos ambientais, etc.



Figura 55: Diagrama de enlace causal.

Em um Diagrama de Enlaces Causais, os sinais “+” e “-” nada tem a ver com aritmética. O sinal “+” na extremidade “1” significa que a variável “Atividade Exploratória” atua sobre a variável “Produção” no mesmo sentido, ou seja, se o valor da variável “Atividade Exploratória” aumentar, o valor da variável “Produção” também aumentará. De forma inversa, O sinal “-” na extremidade “4” significa que a variável “Impactos Ambientais” atua sobre a variável “Atividade Exploratória” em sentido inverso, ou seja, se o valor da variável “Impactos Ambientais” aumentar, o valor da variável “Atividade Exploratória” diminuirá. Dessa forma, em “*feedbacks*” de Equilíbrio (E), ao menos uma das variáveis inverterá o sentido de ação da variável

anterior, ao passo que em “*feedbacks*” de Reforço (R), cada variável reforçará o sentido de ação da variável anterior, seja ele crescente ou decrescente.

Os comportamentos apresentados pelos sistemas são determinados pela forma como estão presentes os “*feedbacks*” e como eles se relacionam entre si. Em função de influências externas e da inclusão de novas variáveis no sistema, esse comportamento pode apresentar mudanças ao longo do tempo, o que interfere em seu comportamento final.

Musse (2010), afirma que os sistemas podem apresentar como comportamentos fundamentais o “*feedback*” positivo, o “*feedback*” negativo e a oscilação.

Ocorre um “*feedback*” positivo ou de reforço quando a estrutura do sistema apresenta a tendência de realimentar o seu comportamento. Segundo o autor, matematicamente isso significa que o nível de um sistema é alimentado ou esvaziado por uma taxa percentual fixa, sendo representado por um gráfico de crescimento exponencial (Figura 56).

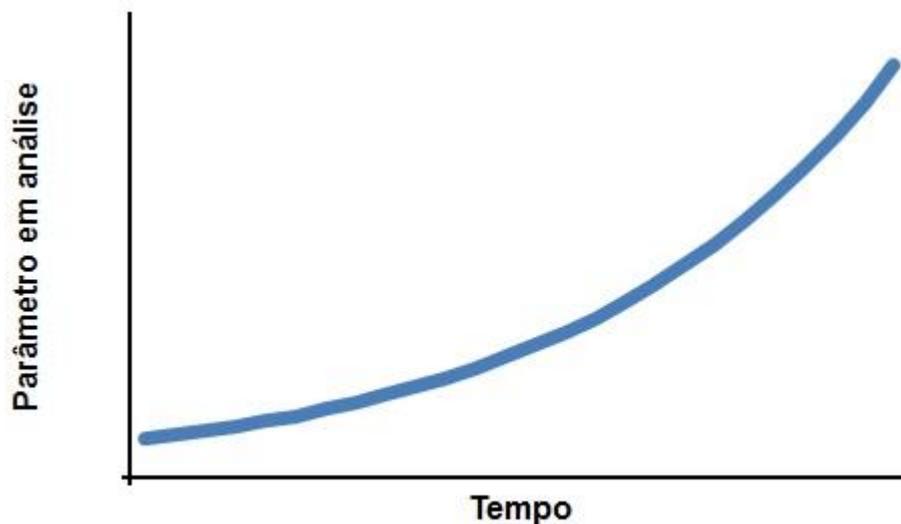


Figura 56: Comportamento de sistema com “*feedback*” positivo.

Os “*feedbacks*” negativos ou de equilíbrio representam comportamentos de autorregulação, de um estado que vai se aproximando cada vez mais de uma meta ou estado desejado, ao longo do tempo (Figura 57).

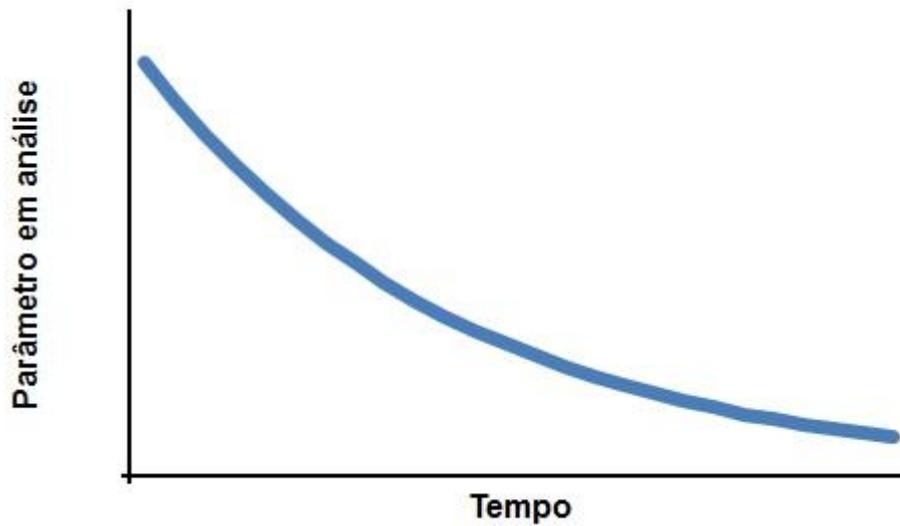


Figura 57: Comportamento de sistema com “*feedback*” negativo.

Comportamentos oscilatórios do tipo “*goal seeking*” ou tendência à meta ocorrem como consequência de processos auto ajustáveis tanto de “*feedbacks*” de reforço quanto de equilíbrio, quando o sistema busca por um estado desejado de forma explícita ou implicitamente determinada, e por ações corretivas que reduzem ao longo do tempo a distorção entre o estado atual e o desejado, eliminando o desequilíbrio existente.

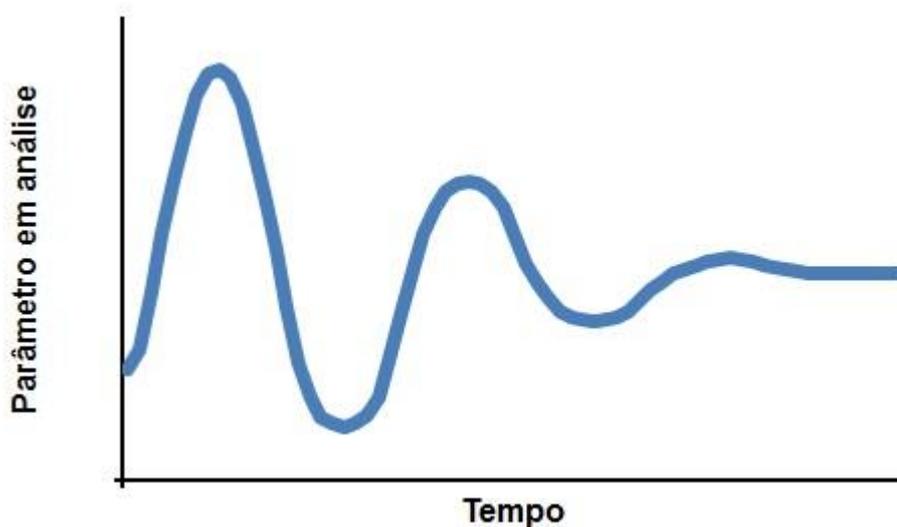


Figura 58: Comportamento oscilatório de um sistema – tendência ao equilíbrio (“*goal seeking*”).

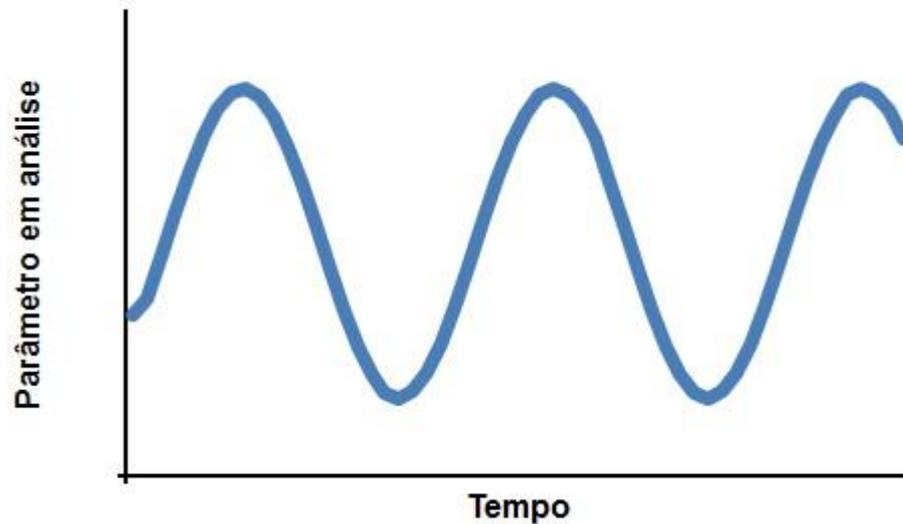


Figura 59: Comportamento oscilatório de um sistema – tendência ao retorno.

Os movimentos para a aproximação da meta são maiores do que o necessário. Dessa forma, o estado do sistema oscila em torno do seu objetivo (CORBETT NETO, 2003 apud MUSSE 2010). A representação mais comum desse comportamento é alguém tentando regular a temperatura da água de um chuveiro. Como a mudança na temperatura não é imediata, a pessoa pode continuar virando a torneira até perceber que precisa esperar para conhecer o resultado da ação anterior (Figura 58). O comportamento oscilatório também pode ocorrer com retorno às condições anteriores desde que as entradas e saídas no sistema sejam idênticas e ocorram em períodos regulares (Figura 59).

7.4.3 Modelagem “soft”

Este tipo de modelagem permite a visualização dos sistemas por meio da identificação de suas características, indicando as relações de causa e efeito e de suas estruturas de “*feedback*”. Utiliza a técnica dos Diagramas de Enlace Causal, os quais permitem a compreensão do comportamento do sistema em função da simplicidade de seus elementos e da forma como a interação entre eles é representada de forma estruturada (ANDRADE, 1997).

A modelagem “soft” baseia-se na forma como percebemos nosso ambiente de estudo. Nossas crenças e hipóteses sobre o funcionamento do sistema definem a nossa visão sobre a estrutura do sistema e as relações entre suas partes.

Segundo Fernandes (2003), a modelagem “soft” permite a visualização de quaisquer sistemas humanos, por meio da identificação de sua estrutura, de suas relações de causa e efeito e das estruturas de “feedback” existentes. Para tal, são utilizados os diagramas de enlace causal (“causal loop diagrams”), cuja natureza qualitativa permite a descrição dos principais elementos que dão origem a um sistema de “feedback”.

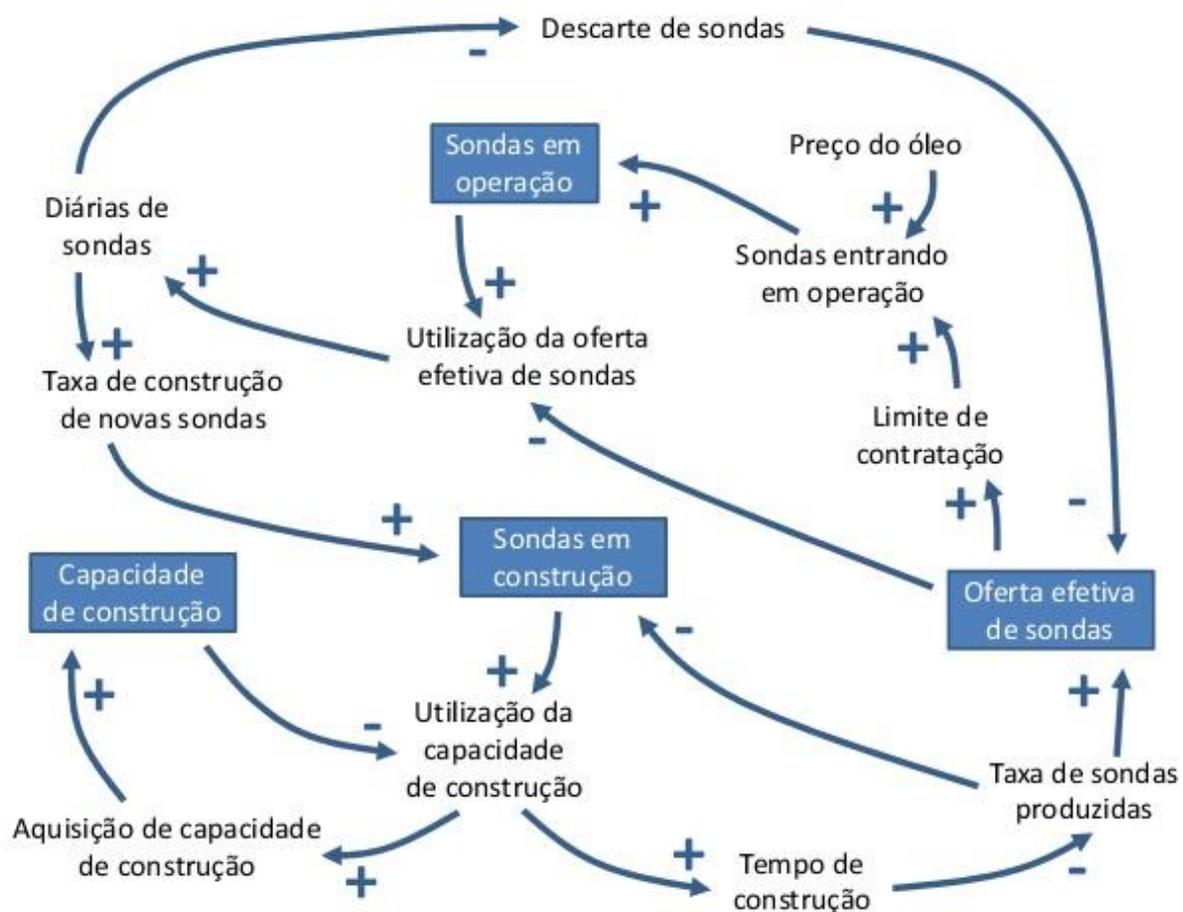


Figura 60: Exemplo de Diagrama de Enlace Causal. Fonte: Fernandes (2003).

Uma característica da modelagem “soft” é a possibilidade de uma rápida percepção dos ciclos de reforço e equilíbrio.

No exemplo apresentado pela Figura 60, são observado diversos “feedbacks” de reforço e equilíbrio, como os destacados na Figura 61 (“feedback” de Reforço) e na Figura 62 (“feedback” de Equilíbrio). Note-se que em ambas as figuras, ocorre a presença de sinais “+” e “-” em algumas das variáveis. O que caracteriza o ciclo como de Equilíbrio ou Reforço é o sentido da ação de uma variável sobre a seguinte.

Na Figura 61, podemos observar que se a variável “Tempo de construção” **aumentar** de valor, a variável “Taxa de sondas produzidas” **diminuirá** de valor, invertendo o sentido da ação, o que justifica o sinal “-“. Em sequencia, se a variável “Taxa de sondas produzidas” **diminuir** de valor, a variável “Oferta efetiva de sondas”, também **diminuirá** de valor, mantendo o sentido da ação, o que justifica o sinal “+“. Ou seja, sempre que ocorre a inversão do efeito da ação de uma variável sobre outra, essa inversão é representada pelo sinal “-“, seja esse efeito em sentido crescente ou decrescente. Da mesma forma, mantendo-se o efeito da ação de uma variável sobre outra, essa manutenção é representada pelo sinal “+“, seja também esse efeito em sentido crescente ou decrescente.

Em resumo, nos “*feedbacks*” de reforço qualquer que seja a variável que seja tomada como ponto de partida, quando a análise do ciclo for completada sobre ela mesma, o efeito da ação dessa variável sobre a variável seguinte será mantido, seja ele crescente ou decrescente.

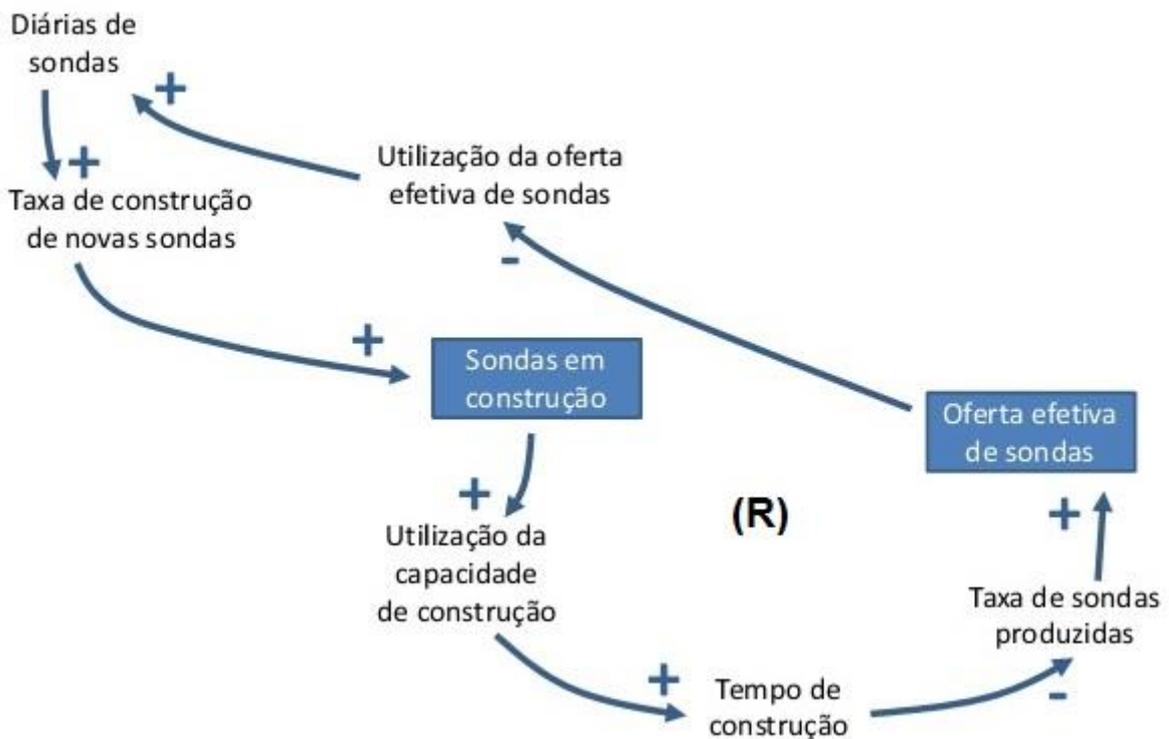


Figura 61: Detalhe de um “*feedback*” de Reforço (R), do exemplo da Figura 60.

Na Figura 62, observamos a mesma sequencia anterior desde a variável “Tempo de construção” até a variável “Oferta efetiva de sondas”, não se verificando daí em

diante outros efeitos de inversão de uma variável sobre outra, independente de ser crescente ou decrescente.

Assim sendo, tendo ocorrido no exemplo apenas uma inversão do efeito da ação de uma variável sobre a seguinte, o resultado final é que todas as variáveis terão seu efeito invertido, a cada vez que a análise do ciclo for completada sobre elas mesmas.

Em resumo, nos “*feedbacks*” de equilíbrio, qualquer que seja a variável que seja tomada como ponto de partida, quando a análise do ciclo for completada sobre ela mesma, o efeito da ação dessa variável sobre a variável seguinte será invertido, seja ele crescente ou decrescente.

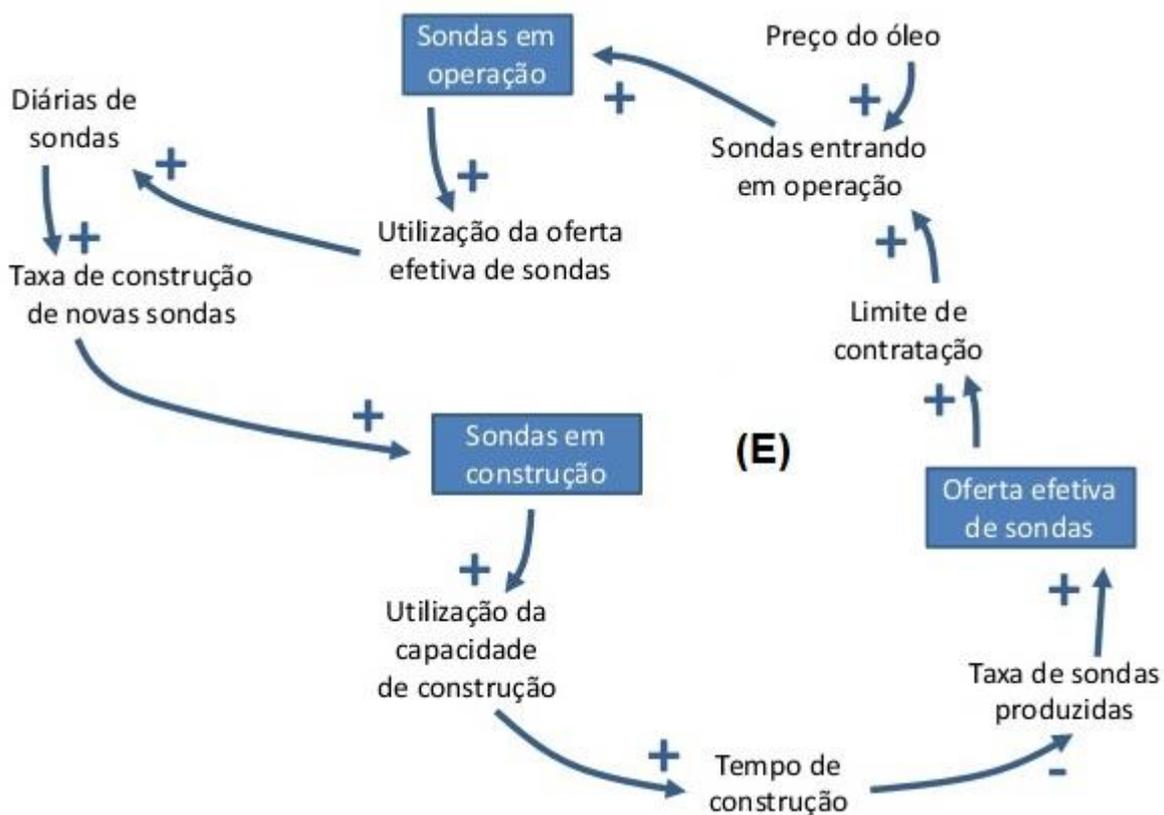


Figura 62: Detalhe de um “*feedback*” de Equilíbrio (E), do exemplo da Figura 60.

7.4.4 Modelagem “hard”

Sob a ótica da perspectiva de simulação computacional, a mera utilização dos diagramas de enlace causal não permite uma análise eficaz tanto no que diz respeito aos aspectos quantitativos quanto ao próprio comportamento do sistema ao longo do tempo. Para tal, foi necessário o desenvolvimento de uma abordagem que preenchesse tais lacunas, permitindo o estudo da evolução de um sistema ao longo do tempo. Essa abordagem, a modelagem “hard” é conhecida como “Diagrama de Fluxos e Estoques” (SANNINO, 2006).

7.4.5 A Linguagem de fluxos e estoques

Segundo Fernandes (2003), na origem do desenvolvimento da Dinâmica de Sistemas a elaboração de modelos foi baseada nos dois simples conceitos de Estoques e Fluxos. A dificuldade então vigente de escrever programas computacionais onde estivessem presentes um grande número de equações gerou a necessidade de uma simplificação das equações utilizadas na modelagem, a fim de simplificar a visualização daquilo que estava sendo modelado. Esse conceito deu origem àquilo que é até hoje conhecido como “*A Linguagem dos Fluxos e dos Estoques*”.

Para Forrester (1998), apud Musse (2010), a compreensão dos conceitos de estoques e fluxos é essencial para a construção dos diagramas de fluxos. De acordo com o autor, ao passo que os estoques e os fluxos são os blocos que formam os laços de realimentação (“*feedbacks*”), por sua vez os laços de realimentação são os blocos que formam os sistemas. As Figuras Figura 63 e Figura 64 representam o conceito de Forrester.

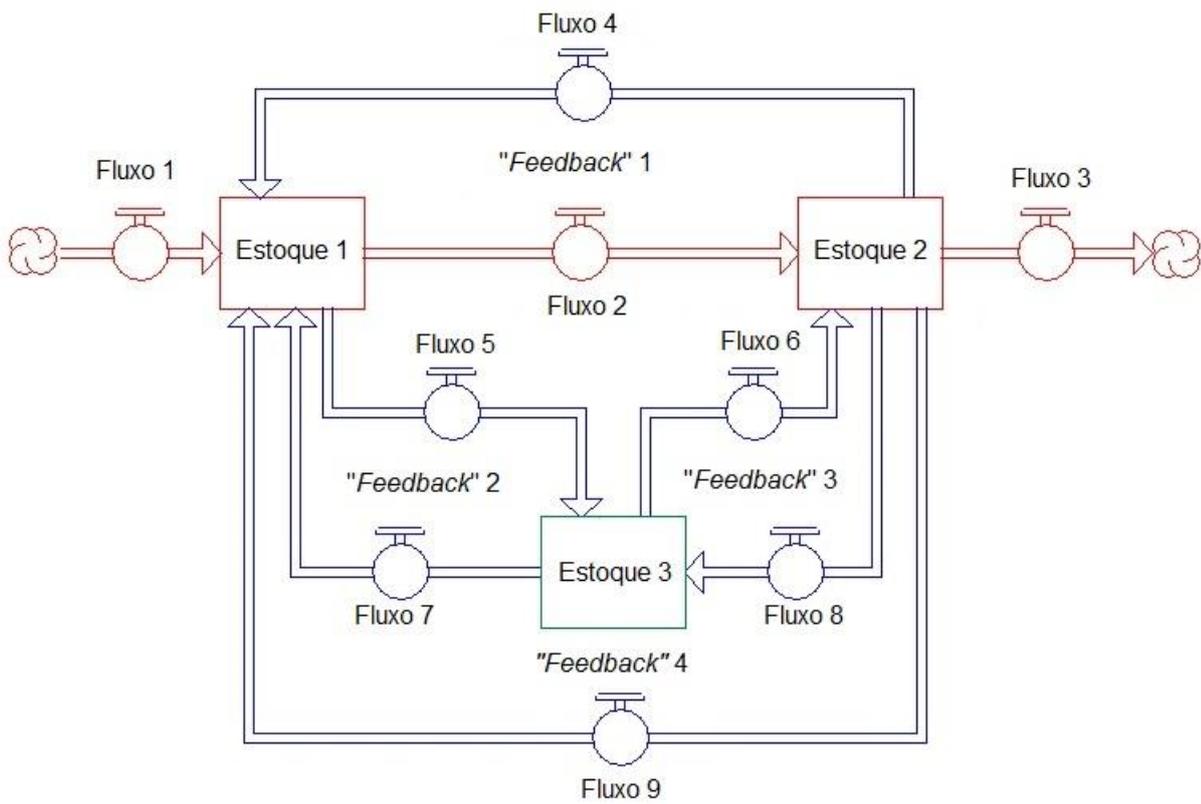


Figura 63: Exemplo de sistema, apresentando seus limites, Fluxos, Estoques e “feedbacks”, formadores dos blocos que dão origem ao sistema de acordo com Forrester. Fonte: o autor.

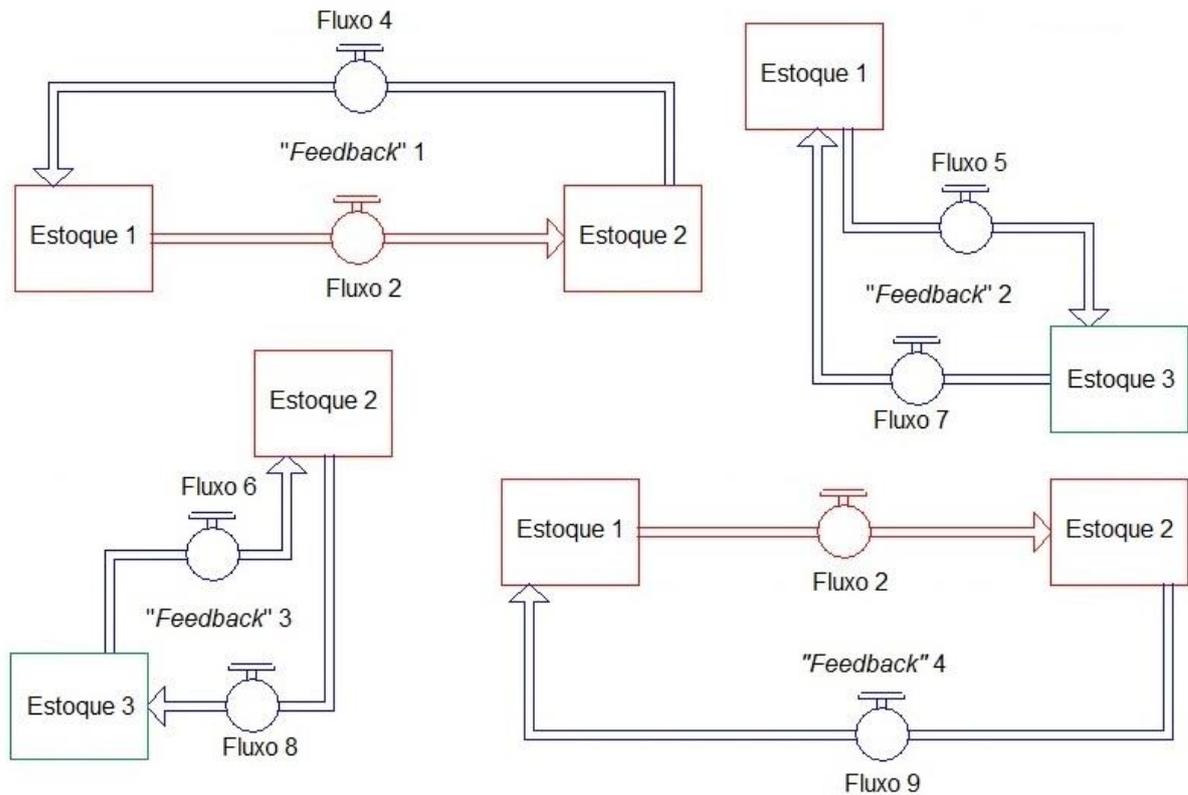


Figura 64: Laços de realimentação (“feedbacks”) com seus respectivos blocos (Estoques e “Feedbacks”) formadores do sistema representado pela Figura 63, segundo o conceito de Forrester.

Em termos matemáticos, o pensamento de Forrester pode ser traduzido de acordo com as seguintes funções:

$$f(\text{"feedbacks"}) = \sum_i^n \text{Estoques} + \text{Fluxos}$$

$$f(\text{sistema}) = \sum_i^n \text{"feedbacks"}$$

7.4.5.1 Estoques

Os Estoques representam variáveis que podem ser diversas unidades físicas, tais como posição, velocidade, força, massa, trabalho, energia, momento, dentre outras (SANTOS ET AL, 2000) ou mesmo não físicas, como conhecimento (MUSSE, 2010).

Richmond e Petersen (1994), apud Fernandes (2003), classificam os estoques em dois tipos: consumíveis e não consumíveis ou catalíticos. Estoques consumíveis são

aqueles cujo valor é diminuído à medida que a atividade dentro do sistema se desenvolve, como por exemplo, o estoque de matéria prima sendo consumido para gerar um produto final. Estoques catalíticos são aqueles que possibilitam transformações envolvendo estoques consumíveis, como por exemplo o preço de um produto, que embora não seja consumível, influencia as suas vendas, que por sua vez influenciam o estoque (consumível) do produto.

Forrester (1998), apud Musse (2010), considera que os estoques representam a acumulação dos resultados das ações do sistema, ou seja, são os valores atuais das variáveis, resultantes da diferença acumulada entre os fluxos de entrada e de saída.

7.4.5.2 Fluxos

Fluxos representam as taxas de mudanças no estado de uma variável do tipo estoque ao longo do tempo. Por este motivo, fluxos sempre estão ligados a estoques que representam aquela variável. Os fluxos podem se relacionar com os estoques como fluxos de entrada ou de saída, fazendo com que os valores dos estoques cresçam ou diminuam. Seu sentido de atuação pode ocorrer tanto de forma unidirecional quanto bidirecional, representando então em relação aos estoques a eles conectados respectivamente fluxos de entrada ou saída e fluxos de entrada e saída. Fluxos podem representar unidades físicas como velocidade, aceleração, força, potência, dentre outras (SANTOS ET AL, 2000).

As nuvens no início e final de cada fluxo representam elementos de origem e destino final fora dos limites do sistema em análise, os quais não estão sendo considerados (MUSSE, 2010).

7.4.5.3 Elementos auxiliares

Os elementos auxiliares são utilizados para formular os dados no intuito de definir as equações dos fluxos. Servem para combinar através de operações algébricas os fluxos, estoques e outros elementos auxiliares. São usados para modelar as informações, e não o fluxo físico, podendo ser alterados instantaneamente, sem atrasos (COVER, 1996 apud SIMONETTO E LÖBLER, 2012). Bastos (2003) acrescenta que os elementos auxiliares além de serem os responsáveis pela

realização das operações algébricas também representam fontes de informações externas ao sistema.

7.4.5.4 Conversores

Os Conversores podem ser utilizados tanto como valores constantes tanto como funções. Como funções, convertem os valores de uma variável de acordo com uma equação definida pelo usuário. Apresentam as taxas que modificam e emprestam valores para os fluxos e são representados por meio de círculos (MUSSE, 2010).

7.4.5.5 Conectores

Os Conectores servem para estabelecer uma relação entre dois componentes na construção do diagrama (SANTOS ET AL, 2000), representando a passagem de informações entre as variáveis (MUSSE, 2010) as quais formarão as expressões matemáticas utilizadas no modelo.

7.4.5.6 “Delays”

Segundo Sannino (2006), “delays” ou atrasos são ao lado do conceito de “*feedback*” os responsáveis por grande parte dos sistemas complexos.

“*Delays*” são o resultado de uma ação que produziu efeitos diferentes no tempo e no espaço. Em um “*feedback*”, a retroalimentação pode ocorrer com atraso em relação as variáveis envolvidas, gerando comportamentos inesperados (MARTELANC, 1998 apud BASTOS, 2003).

Esse atraso ocorre quando os efeitos de uma variação em um dos elementos do sistema não ocorrem de forma imediata, causando efeitos indesejados, como oscilações ou amplificações (SANNINO, 2006).

De acordo com Corbet Neto (2003) apud Musse (2010), não apenas podem ocorrer os atrasos, mas também a sua própria percepção, o que é usual em nosso dia-a-dia. Ainda segundo o autor, leva tempo a medição e o relato das mudanças, bem como a tomada de decisões e conseqüentemente o efeito dessas decisões sobre o estado do sistema.

Para Sterman (2003) apud Musse (2010), um conceito bastante interessante sobre os “*delays*” é sua tese de que em sua evolução, o homem aprendeu a perceber problemas cujos efeitos são imediatos, como sentir a pele queimar ao colocar a mão no fogo. Segundo o autor, a mente humana tem dificuldade de perceber uma relação causal quando causa e efeitos estão distantes no tempo.

Os “*delays*” são representados por duas barras paralelas posicionadas ao longo do relacionamento no qual ocorre o atraso.

CAPÍTULO 8

A INCERTEZA NOS CÁLCULOS DAS EMISSÕES DE GEE

“

UM CAMINHO É SÓ UM CAMINHO, E NÃO HÁ DESRESPEITO A SI OU AOS OUTROS EM ABANDONÁ-LO, SE É ISTO QUE O CORAÇÃO NOS DIZ... EXAMINE CADA CAMINHO COM MUITO CUIDADO E DELIBERAÇÃO. TENTE-O MUITAS VEZES, TANTO QUANTO JULGAR NECESSÁRIO. SÓ ENTÃO PERGUNTE A VOCÊ MESMO, SOZINHO, UMA COISA... ESTE CAMINHO TEM CORAÇÃO? SE TEM, O CAMINHO É BOM, SE NÃO TEM, ELE NÃO LHE SERVE. UM CAMINHO É SÓ UM CAMINHO.

”

CARLOS CASTAÑEDA – ESCRITOR
E ANTROPÓLOGO PERUANO –
☆1925 / † 1998

CAPÍTULO 8 – A INCERTEZA NOS CÁLCULOS DAS EMISSÕES DE GEE

O estudo das incertezas inerentes aos inventários de emissões de GEE poderia ser considerado como um estudo à parte, tal é sua extensão e complexidade. A enorme variedade de instalações de exploração e exploração, as características estequiométricas dos hidrocarbonetos, as metodologias de aquisição e manipulação dos dados, dentre outros parâmetros, contribuem de forma significativa para os desvios em torno dos resultados que se pretende obter.

IPCC (2006), afirma que inventários devem ser acurados no sentido de que eles não sejam nem sub nem superestimados tanto quanto seja possível, e precisos no sentido de que as incertezas sejam reduzidas tanto quanto seja possível. Um inventário realizado com acurácia deve ser realizado isento de idéias pré concebidas, mas ainda assim pode gerar resultados precisos ou imprecisos. Um inventário preciso pode aparentar ter baixo nível de incertezas, mas se o inventário for impreciso, então o inventário sistematicamente apresentará resultados que sub ou superestimem as verdadeiras emissões. Imprecisão pode ocorrer devido à falta de identificação de todas as emissões relevantes ou porque os dados disponíveis não são representativos de situações do mundo real. Não existe um nível predeterminado de precisão, em parte por causa da variabilidade inerente de algumas categorias.

A Figura 65 apresenta uma comparação conceitual entre acurácia e precisão, onde os dados coletados seriam em (a) precisos mas inacurados, em (b) imprecisos e inacurados, em (c) imprecisos mas acurados e em (d) precisos e acurados.

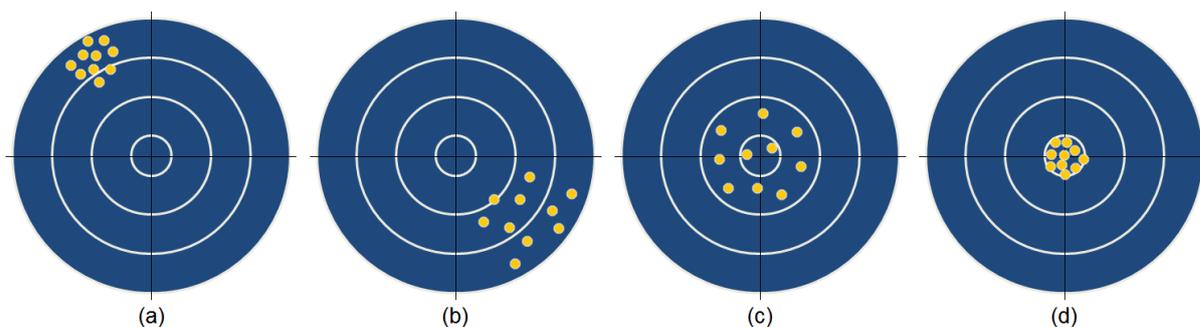


Figura 65: Comparação conceitual entre acurácia e precisão. Fonte: adaptado de IPCC (2006).

8.1 Tipos de incertezas associadas aos inventários de GEE

Diversas fontes de incerteza podem contribuir para a incerteza global de um inventário corporativo de emissões de GEE. Por exemplo, as incertezas podem ser introduzidas quando se lida com as emissões originárias de fontes operadas por terceiros ou também pela falta de garantia de que todas as fontes relevantes foram incluídas. Ao fazer uma avaliação global das incertezas, as empresas devem estar conscientes destas questões. Incertezas associadas a inventários de GEE provenientes de fontes conhecidas podem de uma forma geral categorizados em incerteza científica e incerteza estimativa. A incerteza científica é função da compreensão da ciência das emissões reais e dos processos de remoção. A própria quantificação dos valores adotados para o Potencial de Aquecimento Global (PAG) dos diversos GEE envolve uma incerteza científica significativa. Analisar e quantificar tal categoria de incerteza científica é extremamente problemático e é provável que esteja além do escopo dos esforços de inventário da maioria das empresas (IPIECA, 2011).

8.1.1 Incerteza científica

Incerteza relacionada ao incompleto conhecimento científico dos processos de emissão e remoção.

8.1.2 Incerteza estimativa

Incerteza associada aos métodos de quantificação das emissões de GEE

8.1.3 Incerteza matemática

Incerteza associada às equações utilizadas para a estimativa das emissões de GEE.

8.1.4 Incerteza paramétrica

Incerteza associada à quantificação dos parâmetros usados no modelo de estimativa de emissões.

8.1.5 Incerteza estatística

Incerteza causada pela variabilidade aleatória dos dados amostrais.

8.1.6 Incerteza sistemática

Incerteza associada com erros sistemáticos que ocorrem nos processos de estimativas, como fatores de emissão não representativos ou falhas de medições.

Tendo em vista que apenas as incertezas paramétricas estão dentro do escopo viável da maioria das empresas, as estimativas de incerteza para inventários de GEE corporativos serão naturalmente permeadas por incertezas e erros. Além disso, nem sempre dados amostrais robustos estarão disponíveis para avaliar a incerteza estatística de cada parâmetro. É comum que para determinados parâmetros apenas uma fonte de dados esteja disponível.

Além disso, a quantificação de algumas das incertezas sistemáticas associadas aos parâmetros para a estimativa de incertezas estatísticas obrigam as empresas a basearem-se em pareceres de peritos. O problema com tais pareceres é que é difícil de serem feitos de forma comparável e consistente em todos os parâmetros, categorias de fontes ou empresas.

Pelo exposto, quase todas as estimativas completas de incertezas de inventários de GEE não apenas serão imperfeitas, como também contarão com um componente subjetivo. Em outras palavras, apesar de todos os esforços, as estimativas de incerteza para os inventários de GEE devem ser consideradas imprecisas. Para muitos tipos de emissões, as estimativas de incerteza não podem ser interpretadas como métricas objetivas que pudessem ser usadas como uma medida imparcial de qualidade para comparação entre categorias de origens ou empresas diferentes. Se as emissões consistirem predominantemente de fontes bem caracterizadas de emissões, como é o caso das emissões de combustão do “downstream” da indústria do petróleo e gás, a incerteza na estimativa das emissões será muito menor (IPIECA 2011).

De acordo com IPCC (2006), os modelos podem ser tão simples quanto a mera multiplicação aritmética de Fatores de emissão e Fatores de Atividade para cada categoria e a soma posterior das emissões de todas as categorias, mas também podem incluir modelos de processos complexos específicos para determinadas categorias. O documento apresenta duas abordagens para a combinação de

incertezas. A Abordagem 1 é um procedimento de cálculo baseado em planilha relativamente simples, que utiliza alguns pressupostos para simplificar os cálculos. A Abordagem 2 é baseada em simulação de Monte Carlo e pode ser aplicada de modo mais geral. Ambas as abordagens fornecem estimativas das incertezas globais associados com inventários de GEE. Tais abordagens não serão tratadas no presente trabalho, uma vez que o estudo das incertezas não é sequer parte de seus objetivos, apesar de sua importância no estudo das emissões atmosféricas de GEE.

CAPÍTULO 9

MODELO PROPOSTO

“

NÃO É O CRÍTICO QUE CONTA, NEM AQUELE QUE APONTA COMO O HOMEM FORTE TROPEÇOU, OU ONDE O REALIZADOR DE PROEZAS PODERIA TÊ-LAS FEITO MELHOR. TODO O CRÉDITO PERTENCE AO HOMEM QUE ESTÁ DE FATO NA ARENA, CUJA FACE ESTÁ MARCADA PELA POEIRA, PELO SUOR E PELO SANGUE, AQUELE QUE LUTA COM VALENTIA, AQUELE QUE ERRA E TENTA DE NOVO, ATÉ ACERTAR. AQUELE QUE CONHECE O GRANDE ENTUSIASMO, AS GRANDES DEVOÇÕES E SE CONSUME POR UMA CAUSA JUSTA, AQUELE QUE CONHECERÁ, AO FIM DE SUA JORNADA, O TRIUNFO DAS GRANDES REALIZAÇÕES, OU, NA PIOR DAS HIPÓTESES, SE FALHAR, AO MENOS TERÁ FALHADO POR SUA OUSADIA, NA BUSCA DO TRIUNFO FINAL DOS GRANDES FEITOS, DE MODO QUE O SEU LUGAR JAMAIS SERÁ ENTRE AS ALMAS TÍMIDAS, QUE NÃO CONHECERÃO JAMAIS NEM A VITÓRIA, NEM A DERROTA.

”

THEODORE ROOSEVELT JR. — HISTORIADOR,
NATURALISTA, EXPLORADOR, ESCRITOR E 26º
PRESIDENTE DOS EUA — ☆ 1858 / † 1919

CAPÍTULO 9 – MODELO PROPOSTO

9.1 Modelos e simulação

Modelos são a representação ou interpretação simplificada da realidade, ou ainda uma interpretação de um fragmento de um sistema de acordo com conceitos mentais ou experimentais (KURTZ DOS SANTOS, 1997).

Nossos modelos mentais, sobre os quais são construídos nossos modelos matemáticos, correspondem e limitam-se à nossa capacidade de percepção do mundo dentro do qual estamos inseridos. Em geral, tal percepção nos leva a estruturar modelos mentais relativamente simples, que incluem poucos elementos dentre aqueles efetivamente presentes no mundo real. Assim, em nosso processo de construção mental dos modelos, tendemos a confundir correlações⁶⁴ e causalidades⁶⁵, a não perceber os efeitos da ação conjunta e cruzada entre as variáveis presentes e aquilo que pode ser o mais grave, nossa rotineira incapacidade de perceber a circularidade das relações, entendendo-as como meras relações lineares de causa e efeito.

No entanto, a dinâmica da vida, dos negócios e das organizações exige outro tipo de percepção que permita a inserção da não linearidade e da complexidade na variável tempo. Em suma, por mais simplificados que sejam os modelos, é essencial que eles tenham a capacidade de identificar e inserir os elementos essenciais do sistema a ser modelado e reproduzir o mais próximo possível o sistema em estudo.

Os modelos representam uma simplificação da realidade como uma forma de tentativa de compreensão de sistemas que podem estar além de nossa capacidade mental de compreensão. Seu aspecto subjetivo, originário na capacidade de interpretação do modelador ou do conjunto de modeladores, determina o grau de simplificação que tanto pode implicar em um excesso de reduções que inviabilizem a

⁶⁴ A correlação significa a existência de uma relação regular entre dois conjuntos de ocorrências ou variáveis sem que necessariamente elas estejam relacionadas entre si.

⁶⁵ A causalidade representa a influência causal de um fator ou variável sobre outro, em que a variável independente é a que produz um efeito sobre outra variável, a variável dependente.

capacidade do modelo, como por outro lado pode levar à inclusão de um excessivo número de variáveis que pode extrapolar as suas necessidades de representação.

A transcrição dos modelos mentais para modelos matemáticos representa a tentativa de reprodução de um sistema real realizada por meio de um conjunto de equações matemáticas. Tais equações relacionam os efeitos dos processos no comportamento das variáveis e dos componentes interconectados, caracterizando as propriedades e o próprio comportamento do sistema.

Os modelos de simulação são representados em diversas propostas de classificação. Mello (2007) sugere uma classificação que distribui os modelos de simulação em determinísticos, estocásticos, estáticos e dinâmicos.

Modelos determinísticos não admitem que suas variáveis sejam aleatórias, de forma que para um conjunto conhecido de dados de entrada teremos um único conjunto de resultados de saída. Além disso, apresentam como características operacionais relações exatas, em vez de funções de probabilidade.

Modelos estocásticos apresentam ao menos uma de suas características operacionais como uma função de probabilidade. Geralmente são mais complexos que modelos determinísticos. Sua entrada de dados é feita por meio de variáveis aleatórias, de forma que as saídas são igualmente aleatórias, devendo então ser consideradas como meras estimativas das características verdadeiras do modelo.

Modelos estáticos não levam em consideração a variável tempo, ao passo que em modelos dinâmicos os resultados variam de acordo com a passagem do tempo, caracterizando a ocorrência de uma ordem temporal entre os eventos.

Os modelos dinâmicos podem ainda ser classificados como discretos ou contínuos. Modelos discretos levam em consideração apenas os eventos em que ocorrem alterações no sistema, de forma que o tempo entre cada alteração do estado do sistema não é importante para o alcance dos resultados da simulação. Por outro lado, em modelos contínuos o sistema se altera a cada fração de tempo.

A simulação de um sistema é o processo de colocação em operação de um modelo criado com base nas características desse sistema. Um modelo pode ser reconfigurado e experimentado, o que via de regra é inviável para o sistema real por questões de custo ou operacionais. O funcionamento do modelo pode ser estudado, de forma que as propriedades previstas para o comportamento do sistema real podem ser inferidas. Dessa forma, a simulação é uma ferramenta utilizada para avaliar o desempenho de um sistema sob diversas configurações e ao longo de grandes períodos de tempo (MARIA, 1997).

Segundo a autora, a simulação é utilizada com a finalidade de alterar um sistema já existente ou não, no intuito de reduzir as chances de não atendimento de especificações, de evitar a sub ou superutilização de recursos e otimizar o desempenho de um sistema.

Segundo Santos (1999), simulações envolvem a criação de uma representação artificial de um sistema, a partir da qual pode ser feita a inferência de como o sistema real funciona.

O comportamento do sistema pode então ser estudado por meio da construção de um modelo de simulação, o qual assume a forma de um conjunto de considerações representadas por relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre as entidades de interesse do sistema. Após ter sido construído e validado, um modelo pode ser utilizado para avaliar previamente as mudanças a serem efetuadas e as consequências no mundo real.

A Simulação também pode ser usada para estudar sistemas ainda em estágio de projeto, sendo então usada tanto como ferramenta de análise para prever o efeito de mudanças em sistemas já existentes, quanto como uma ferramenta para prever o desempenho de novos sistemas diante de variadas circunstâncias.

Richardson e Pugh (1989), apud Hong (2008), sugerem cinco etapas para o desenvolvimento de um modelo dinâmico de sistemas conforme a Figura 66:

- Definição do problema: definir os objetivos do processo de modelagem significa estabelecer um foco objetivo o qual determina a forma, os limites e o que deve ser incluído e excluído do modelo;
- Desenvolvimento do modelo dinâmico: uma vez definido o objeto da modelagem, são então definidos os fatores que podem alterar o comportamento do sistema e as relações causais (“*feedbacks*”) entre eles. Para tal, são utilizados os Diagramas de Enlace Causal e os Diagramas de Fluxos e Estoques;
- Formulação do modelo: com base na compreensão do objeto de estudo obtida a partir do modelo conceitual desenvolvido na etapa anterior, tem início a tradução da estrutura do modelo por meio de equações matemáticas que transformem a mera visão conceitual em uma representação quantitativa do sistema em estudo. Para tal, devem ser compreendidas as relações entre fluxos e estoques e definidos os estados iniciais e seus valores numéricos, permitindo a observação de como o comportamento do sistema pode ser alterado por cada variável ao longo do tempo.
- Validação do modelo: após a construção do modelo, é necessário que seja definido o quão válido ele é na representação do fragmento de mundo real que pretende reproduzir. Na prática, a validação consiste em um conjunto de ações úteis na análise se o modelo representa de fato o sistema em estudo, podendo para tal ser utilizados métodos estatísticos como análise de variância, determinação de intervalo de confiança, testes de hipótese, ajustamento de curvas, análises de regressão e análises de séries temporais, ou métodos subjetivos quando não é possível conduzir incursões apropriadas sobre o sistema em estudo (SILVA, 2006).
- Análise de políticas: Uma vez que a confiança no modelo foi estabelecida, ele está pronto para ser utilizado no desenho de políticas de melhoria do sistema em estudo. O modelo validado permite a exploração dos efeitos da aplicação de diversas políticas de mudanças no sistema real com vistas não apenas à melhoria do sistema como também à própria compreensão de sua estrutura de “*feedbacks*”. Tais políticas consistem em alterações nas variáveis modeladas, através das interfaces gráficas chamadas de “simulador de vôo”, “micromundo” ou “laboratório de aprendizagem”, geradas por programas

como Stella/iThink (isee Systems⁶⁶), VenSim (Ventana Systems Inc.⁶⁷) ou Powersim (Powersim Software AS⁶⁸).



Figura 66: Processo de modelagem aplicada na abordagem dinâmica de sistemas. Fonte: Richardson e Pugh (1989), apud Hong (2008).

9.2 O Compendium API e suas metodologias e procedimentos para estimativa de emissões de GEE

O Compendium API (*“API Compendium of Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for the Oil and Gas Industry”*) é o resultado final de um longo processo de discussões conduzido por um Grupo de Trabalho formado pelo American Petroleum Institute (API), suas diversas companhias associadas, governos e organizações não governamentais. Tal Grupo de Trabalho avaliou e documentou uma série de técnicas de cálculo, diversos protocolos existentes, fatores de emissão úteis para o desenvolvimento de inventários de emissões de GEE a fim de elaborar metodologias comuns e garantir uma ampla revisão de seus esforços.

Para tal, foram analisados os seguintes documentos:

- Australian Greenhouse Office (AGO), Workbook for Fuel Combustion Activities (AGO, 1999);

⁶⁶ <http://www.iseesystems.com>.

⁶⁷ <http://www.ventanasystems.com/index.php>.

⁶⁸ <http://www.powersim.com>.

- Australian Petroleum Production and Exploration Association (APPEA), Greenhouse Challenge Report (APPEA, 2000);
- Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP), Global Climate Change Voluntary Challenge Guide (CAPP, 2000);
- Canadian Industrial Energy End-Use Data and Analysis Center (CIEEDAC) memorandum on “Guide for the Consumption of Energy Survey” (CIEEDAC, 2000);
- Environmental Protection Agency (EPA) Emission Inventory Improvement Program (EIIP, 1999);
- Exploration and Production Forum (E&P Forum) Methods for Estimating Atmospheric Emissions from E&P Operations (E&P Forum, 1994);
- Gas Technology Institute (GTI), GRI-GJGCalc'Version 1.0 (GRI, 1999);
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 1997; UNECE/EMEP, 1999; IPCC, 2001);
- Regional Association of Oil and Natural Gas Companies in Latin America and the Caribbean (ARPEL), Atmospheric Emissions Inventories Methodologies in the Petroleum Industry (ARPEL, 1998);
- UK Emissions Trading Scheme (DEFRA, 2001);
- World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development, The Greenhouse Gas Pro-ocol (WRI/WBCSD, 2001).

Trata-se, portanto, de uma compilação de metodologias reconhecidas aplicáveis às operações da indústria de Exploração e Produção de petróleo e gás.

O Compêndium API tem como objetivos os seguintes aspectos (API 2009):

- Desenvolvimento de uma extensa coletânea de fatores e Metodologias de emissões relevantes para estimar as emissões de GEE, com base em documentos públicos disponíveis atualmente;
- Detalhamento das rotinas para diferentes sistemas de conversões de unidades de medida, com especial ênfase sobre a implementação de padrões para a indústria do petróleo e do gás natural;

- Fornecer descrições dos múltiplos segmentos da indústria de petróleo e gás natural, da natureza de suas operações e as emissões de GEE associadas que devem ser considerados fontes;
- Desenvolver exemplos baseados em inventários de emissões em instalações selecionadas de várias indústrias de petróleo e gás natural, para demonstrar a ampla aplicabilidade das metodologias.

As metodologias apresentadas no Compendium podem ser usadas para orientar a estimativa das emissões de GEE para projetos individuais, instalações inteiras (como plataformas de petróleo) ou inventários corporativos. As metodologias são mais focadas nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), uma vez que tais compostos são os GEE relevantes para a indústria de petróleo e gás (RITTER ET AL. 2010).

Apesar de seu foco nas emissões de CO₂ e CH₄, as metodologias apresentadas pelo Compendium podem ser utilizadas para a estimativa dos demais GEE, embora suas emissões não possam ser consideradas significativas.

O Compendium API (API, 2009), apresenta diversas alternativas para a determinação das emissões de GEE, cada qual apresentando sua específica precisão. A Tabela 17 apresenta a variabilidade de opções disponíveis para estimativa das emissões de GEE.

Tabela 17: Abordagens para estimativas de emissões – Considerações gerais.

TIPO DE ABORDAGEM	CONSIDERAÇÕES GERAIS
1: Fatores de emissão disponíveis em literatura	<ul style="list-style-type: none"> • Contabilização para operações ou condições médias; • Simples de aplicar; • Requer compreensão e aplicação adequadas de unidades de medida e condições padrão subjacentes; • A precisão depende da representatividade do fator relativo à fonte de emissão atual; • A precisão pode variar entre os constituintes dos GEE.

2: Fatores de emissão informados pelos fabricantes dos equipamentos	<ul style="list-style-type: none"> • Sob medida para os parâmetros específicos do equipamento; • A precisão depende da representatividade das condições de teste em relação às atuais condições e práticas operacionais; • A precisão depende da adoção de práticas de inspeção dos fabricantes, de manutenção e rotinas de calibração; • A precisão depende do ajuste dos fatores de emissão à composição do combustível usado no local; • Alterações nas especificações originais dos equipamentos alteram os fatores de emissão informados pelos fabricantes.
3: Cálculos de Engenharia	<ul style="list-style-type: none"> • A precisão depende da simplificação de suposições duvidosas que podem estar contidas dentro dos métodos de cálculo; • Podem ser necessários dados detalhados.
4: Processos de simulação ou modelagem computacional	<ul style="list-style-type: none"> • A precisão depende da simplificação de suposições duvidosas que podem estar contidas dentro dos métodos de modelagem; • Pode exigir a entrada de dados detalhados para caracterizar adequadamente as condições do processo; • Pode não ser representativo das emissões que são devidos às operações fora do intervalo de condições simuladas.
5: Monitoramento sobre uma faixa de condições e derivação de fatores de emissão	<ul style="list-style-type: none"> • A precisão depende da representatividade da operação e das condições ambientais monitoradas relativas às fontes de emissão atuais; • Cuidados devem ser tomados na adequação para representar as condições normais aplicáveis; • Custos de equipamentos, operação e manutenção devem ser considerados para os equipamentos de monitoramento.
6: Monitoramento periódico ou contínuo das emissões ou parâmetros para cálculo das emissões	<ul style="list-style-type: none"> • Contabilização para as condições operacionais específicas das fontes; • Pode fornecer alta confiabilidade se a frequência de monitoramento for compatível com a variação temporal dos parâmetros de atividade; • Instrumentação não está disponível para todos os gases de efeito estufa ou aplicável a todas as fontes; • Custos de equipamentos, operação e manutenção devem ser considerados para os equipamentos de monitoramento.

Fonte: Adaptado de API (2009).

As abordagens apresentadas pela Tabela 17 implicam em diferentes níveis de qualidade do inventário bem como em diferentes custos, ambos incrementados no sentido da abordagem “1” para a abordagem “6”. De uma forma geral, o método de estimativa a ser adotado é determinado pelo nível de detalhamento exigido, pela disponibilidade de dados, pelo objetivo da análise e pelos respectivos custos.

Outra forma de abordagem no que se refere à metodologia e à qualidade dos inventários é apresentada por INGAA (2005), segundo a qual a elaboração de inventários e estimativas de emissões é desenvolvida com base em uma abordagem por fatores de emissão, de acordo com a Equação 12, cujo princípio assemelha-se à IPCC (1997) e API (2009), que pode ser observado na Equação 13.

Equação 12: Cálculo de emissões segundo INGAA (2005).

$$\boxed{\text{Taxa de emissão} = \text{Fator de Emissão} \times \text{Dado de Atividade}}$$

Tais estimativas de emissão podem ser obtidas por abordagens categorizadas em diferentes níveis de acurácia e precisão. Tais níveis, conhecidos como “*Tier*” (camadas, em português), são comumente aplicados com base no nível de detalhamento das informações disponíveis, de acordo com a seguinte hierarquia:

- Tier 1: estimativa geral com entradas mínimas exigidas (por exemplo, fatores de emissão baseados em milhas de gasoduto utilizado para estimar o inventário de GEE).
- Tier 2: Necessita de dados e fatores de emissão baseados especificamente na instalação para a qual está sendo realizado o inventário;
- Tier 3: Os requisitos de dados e as emissões são avaliados com base na operação do processo ou informações sobre a situação dos equipamentos da instalação para a qual está sendo realizado o inventário;
- Tiers adicionais (Tier 3+, Tier 4, e além) envolvem determinações de emissões que exigem dados adicionais e conseqüentemente maiores custos para o desenvolvimento do inventário. Essas abordagens vão normalmente além das práticas atuais para o desenvolvimento do inventário. As abordagens também exigem a documentação completa para garantir que um revisor ou auditor externo possa entender e validar a estimativa.

O presente trabalho adota como metodologia de cálculo a utilização dos fatores de emissão disponíveis em literatura conforme API (2009), basicamente pelos seguintes motivos:

- Facilidade de aquisição dos dados;
- Simplicidade em sua aplicação;
- Rápida atualização do modelo em caso de atualização dos fatores;
- Plena adequação aos objetivos do modelo.

Fatores de emissão representam uma taxa de emissões "típica" ou "média" da massa das emissões de GEE por unidade de atividade, onde a atividade é tipicamente uma taxa de processo ou contagem de equipamentos. A incerteza

associada aos fatores está diretamente ligada às limitações técnicas associadas ao conjunto de dados que constituem a base do fator. A incerteza também depende da precisão dos métodos de medição associados com as emissões e os dados sobre a atividade. Por exemplo, os fatores de emissão de CO₂ de combustão são mais precisos, devido à relativa simplicidade da determinação de suas emissões, enquanto que as emissões fugitivas de CH₄ têm uma incerteza maior, devido à complexidade de medir diretamente tais emissões, bem como as significativas diferenças entre diversas instalações (INGAA, 2005).

Fatores de emissão são geralmente expressos como uma massa ou volume de emissões por tipo de fonte ou medida de atividade relacionada com a fonte, conforme o exemplo a seguir (API, 2009).

$$\frac{\text{scf CH}_4 / \text{ano}}{\text{válvula}} \quad \text{ou} \quad \frac{\text{gCO}_2}{\text{litro de diesel queimado}}$$

Um inventário de emissões baseado em fatores de emissão é calculado com base nos produtos entre os diversos fatores de emissão (FE) correspondentes a cada uma das fontes específicas inventariadas e seus correspondentes fatores de atividade (FA). Um inventário é a soma de todas as emissões de uma específica instalação ou corporação, conforme a Equação 13 (IPCC, 1997 e API, 2009)

Equação 13: Inventário de emissões segundo IPCC (1997) e API (2009).

$$\text{Inventário de Emissões} = \sum_{i=1}^{\# \text{ de fontes}} \text{FE}_i \times \text{FA}_i$$

Segundo API (2009), é importante observar suposições e convenções usadas para definir os fatores de emissão. Os itens abaixo realçam algumas das áreas chaves onde o erro pode ser introduzido no cômputo se as convenções não forem tratadas corretamente.

- Condições padrão do gás: quando convertido de uma base de volume a uma base de massa, as condições padrão usadas no documento são 14,7 libras por polegada quadrada (psia) e 60 graus Fahrenheit (°F) (equivalente a

101,325 quilo-Pascals absoluto (kPaa) e 15,6 graus Centígrados (°C) em unidades métricas). Isto é equivalente a 379,3 pés cúbicos padrão (scf)/lb-mole (836.2 scf/kg-mole) ou 23,685 centímetros cúbicos (cm³)/g-mole.

- Especificações HHV⁶⁹ (High Heating Value⁷⁰) e LHV⁷¹ (Low Heating Value): ao converter entre volume de combustível e energia, o HHV ou valor calorífico total é a convenção preferida. Porém, LHV ou valores caloríficos líquidos são também informados.
- Unidades: são apresentadas unidades na mesma convenção usada na fonte de referência. Isto permite ao usuário conferir facilmente atualizações das fontes de referência. Cada fator de emissão é informado também em termos de tonnes⁷² por unidade de atividade onde a unidade de atividade é expressa no Sistema Internacional de Unidades (unidades SI) e unidades habituais norte-americanas (USC).
- Queima de combustível: propriedades do combustível em termos de valores de aquecimento (heating values) e conteúdo de carbono são fornecidos para uma variedade de combustíveis comerciais (API 2009, Tabela 3-8). Emissões de dióxido de carbono associadas com a combustão de combustíveis fósseis ou produtos refinados são baseadas na conversão de 100% do carbono presente no combustível em CO₂.

A definição dos fatores de emissão é uma tarefa bastante complexa e permeada por amplas incertezas. A escolha dos fatores de emissão corretos depende de diversas condições, tais como um profundo conhecimento das características tecnológicas das fontes inventariadas, da composição química dos gases e combustíveis cujas emissões serão inventariadas, dentre outros.

⁶⁹ Maior Valor de Aquecimento ou Valor Calorífico Total. A quantidade de calor produzida pela combustão completa de uma unidade de volume ou peso de combustível que assume que a água produzida é completamente condensada (estado líquido) e o calor é recuperado.

⁷⁰ Quantidade de energia liberada quando um combustível é totalmente queimado.

⁷¹ Menor Valor de Aquecimento ou Valor Calorífico Líquido. A quantidade de calor produzida pela combustão completa de uma unidade de volume ou peso de combustível que assume que a água produzida permanece como vapor e o calor do vapor não é recuperado. A diferença entre o HHV e LHV é o calor latente de vaporização da água produzida (i.e., o LHV é reduzido pela entalpia necessária para vaporizar a água líquida).

⁷² Uma tonelada métrica, equivalente a 1.000 kg ou 2.204,6 libras dos EUA. Toneladas métricas são a convenção padrão para informar emissões equivalentes de GEE's usada pelo IPCC e outras organizações de mudanças climáticas internacionais.

Por outro lado, a definição dos fatores de atividade, embora bastante mais simples, também depende do conhecimento das instalações e das atividades da empresa a ser inventariada.

Fatores de atividade são geralmente valores medidos, que representam qualquer ação ou operação que influencia a liberação de GEE tal como a contagem do número de equipamentos que são fontes de emissão ou a quantidade de combustível consumido (API, 2009).

9.3 Características de um inventário robusto de GEE

Segundo IPIECA/API/OGP (2011), frequentemente as corporações adotam conjuntos de princípios que são utilizados como base para seus relatórios de informações ambientais. O mesmo documento cita como tais os cinco princípios desenvolvidos pelo World Business Council for Sustainable Development and World Resources Institute (WRI/WBCSD, 2004), os quais são baseados em princípios contábeis financeiros, devidamente adequados para a contabilização de inventários de GEE.

Tais princípios têm como objetivo garantir que as informações apresentadas:

- Representem uma conta fiel, verdadeira e apropriada das emissões de GEE de uma organização;
- Sejam confiáveis e objetivas no tratamento e apresentação dos temas.

Os cinco princípios desenvolvidos por (WRI/WBCSD, 2004), são apresentados a seguir:

9.3.1 Aplicabilidade

Definir os limites que reflitam adequadamente as emissões de GEE de organizações e as necessidades de tomada de decisão dos usuários.

9.3.2 Integridade

Contabilizar todas as fontes de atividades e emissões de GEE dentro dos limites organizacionais e operacionais escolhidos. Documentar e justificar qualquer exclusão especial. Estabelecer e justificar qualquer exclusão especial.

9.3.3 Consistência

Utilizar metodologias consistentes e medidas que permitam a comparação válida das emissões ao longo do tempo. Documentar de forma explícita quaisquer alterações dos dados, métodos, e qualquer outro fator na série histórica.

9.3.4 Transparência

Tratar todas as questões relevantes de forma objetiva e consistente, com base em uma trilha de auditoria clara. Divulgar os pressupostos e fazer referências apropriadas para as metodologias de cálculo e fontes de dados utilizadas.

9.3.5 Exatidão

Garantir que as estimativas de emissões de GEE não são sistematicamente nem superiores nem inferiores às emissões reais, tanto quanto possa ser estimado, e que as incertezas são quantificadas e reduzidas na medida do possível. Garantir uma suficiente precisão para permitir que os usuários tomem decisões com razoável segurança quanto à integridade das informações apresentadas.

9.4 Etapas da abordagem para elaboração do modelo

No ano de 2010 a agência ambiental norte-americana (USEPA) promulgou sua regulação 40 CFR Part 98 *“Mandatory Reporting of Greenhouse Gases: Petroleum And Natural Gas Systems; Final Rule”*. Tal regulamento determina que operadores e proprietários de instalações que emitam ao menos 25×10^3 t CO₂ eq. por ano devem reportar as emissões de todas as fontes localizadas nas instalações de acordo com os métodos definidos no regulamento (USEPA, 2010).

Em seu item *“II. Reporting Requirements for Petroleum and Natural Gas Systems - D. Summary of the Requirements for Petroleum and Natural Gas Systems (Subpart W)”*, USEPA (2010) define que o termo *“Offshore petroleum and natural gas production”* utilizado no regulamento é aplicável a quaisquer plataformas temporárias ou permanentes utilizadas para extração de hidrocarbonetos e seus processos e tratamentos para transferência dos hidrocarbonetos para navios de transporte ou para terra.

Além disso, a produção offshore inclui plataformas secundárias ligadas à plataforma principal por meio de passarelas, além de tanques de armazenamento associados à estrutura de plataforma, e FPSO's. Nesta categoria não estão incluídos os relatórios de emissões de perfuração e exploração que não é realizada em plataformas de produção offshore.

Em 12 de abril de 2010, a USEPA propôs a “*subpart W*”, uma emenda ao Regulamento 40 CFR Part 98, alterando os requisitos para o Programa de Relatórios de Gases de Efeito Estufa (GHGRP). Segundo essa emenda, as plataformas offshore devem reportar as seguintes emissões (USEPA, 2012c):

- CH₄ a partir dos equipamentos identificados⁷³ na última edição do “*Gulfwide Offshore Activities Data System*”⁷⁴ (GOADS), à exceção de suas emissões a partir dos equipamentos de combustão;
- CO₂, CH₄ e N₂O a partir dos flares;
- CO₂, CH₄ e N₂O a partir das fontes de combustão estacionárias, tais como caldeiras, aquecedores, queimadores, motores a gasolina, diesel ou gás natural, turbinas a gás natural, diesel ou “*dual fuel*”.

As instalações reguladas pela “*subpart W*” devem reportar as seguintes informações:

- Emissões anuais totais de GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq.
- Emissões anuais individualizadas de cada GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq.
- Emissões anuais individualizadas de cada GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte.

Em fevereiro de 2013 a USEPA divulgou seu primeiro relatório nos termos do Greenhouse Gas Reporting Program (GHGRP), referente a emissões ocorridas durante o ano de 2011 (USEPA, 2013).

⁷³ Amine Units, Boilers/Heaters/Burners, Diesel and Gasoline Engines, Drilling Rigs, Combustion Flares, Fugitives, Glycol Dehydrators, Losses from Flashing, Mud Degassing, Natural Gas Engines, Natural Gas Turbines, Pneumatic Pumps, Pressure/Level Controllers, Storage Tanks e Cold Vents.

⁷⁴ Year 2008 Gulfwide Emissions Inventory Study: U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study BOEMRE 2010-045, December 2010.

O relatório apresenta dados relativos às emissões de mais de 1.800 instalações envolvidas com as atividades de produção, processamento, transmissão e distribuição de petróleo e gás. Tais instalações foram responsáveis pelas emissões de 225 milhões de toneladas métricas de CO₂ eq.

Segundo USEPA (2013), dentre as mais de 1.800 instalações inventariadas, foram recebidos 99 relatórios de emissões de GEE de instalações no segmento de produção offshore (5,5% do total das instalações), as quais teriam sido responsáveis pelas emissões de cerca de $6,0 \times 10^6$ t CO₂ eq. (2,7% do total das emissões). Desse total, $4,0 \times 10^6$ t CO₂ eq. seriam oriundas das fontes de combustão, $1,0 \times 10^6$ t CO₂ eq. das fontes de ventilação, $0,5 \times 10^6$ t CO₂ eq. dos “flares” e $0,4 \times 10^6$ t CO₂ eq. das emissões fugitivas.

Tais resultados demonstram a grande relevância das fontes de combustão e ventilação em relação ao total de emissões, correspondendo a 94% das emissões totais (Figura 67).

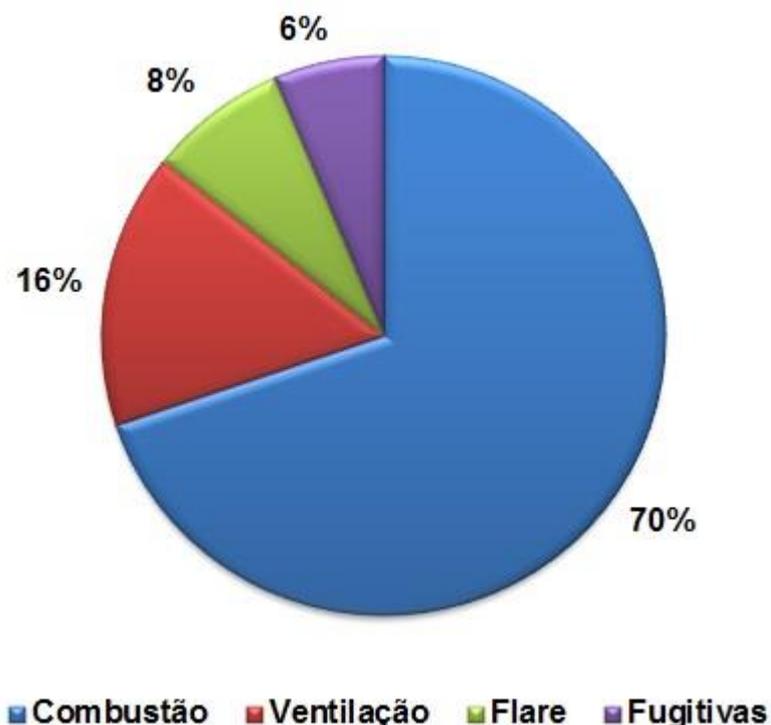


Figura 67: Distribuição percentual das emissões de GEE de acordo com as categorias de fontes, segundo USEPA (2013).

Ainda no âmbito da USEPA, encontra-se em desenvolvimento desde o ano de 1993 o programa “*Natural Gas STAR*”, uma parceria voluntária que incentiva as empresas de petróleo e gás a implementarem tecnologias e práticas de baixo custo com a finalidade de reduzir as emissões de metano.

Muitas dessas tecnologias e práticas podem ser eficazes na redução das emissões de metano em todos os setores de gás natural e petróleo. O programa STAR oferece documentos técnicos que cobrem uma ampla gama de tecnologias e práticas recomendadas que tem vários custos de implementação e períodos de retorno esperados.

A USEPA estima que as emissões de metano contribuam com cerca de 11% das emissões totais de metano provenientes da indústria de petróleo e gás natural. A Figura 68 mostra a distribuição das emissões do segmento offshore, discriminadas por grupos de fontes. Observa-se a grande predominância das emissões oriundas de ventilação e da combustão, as quais totalizam quase dois terços das emissões totais de metano.

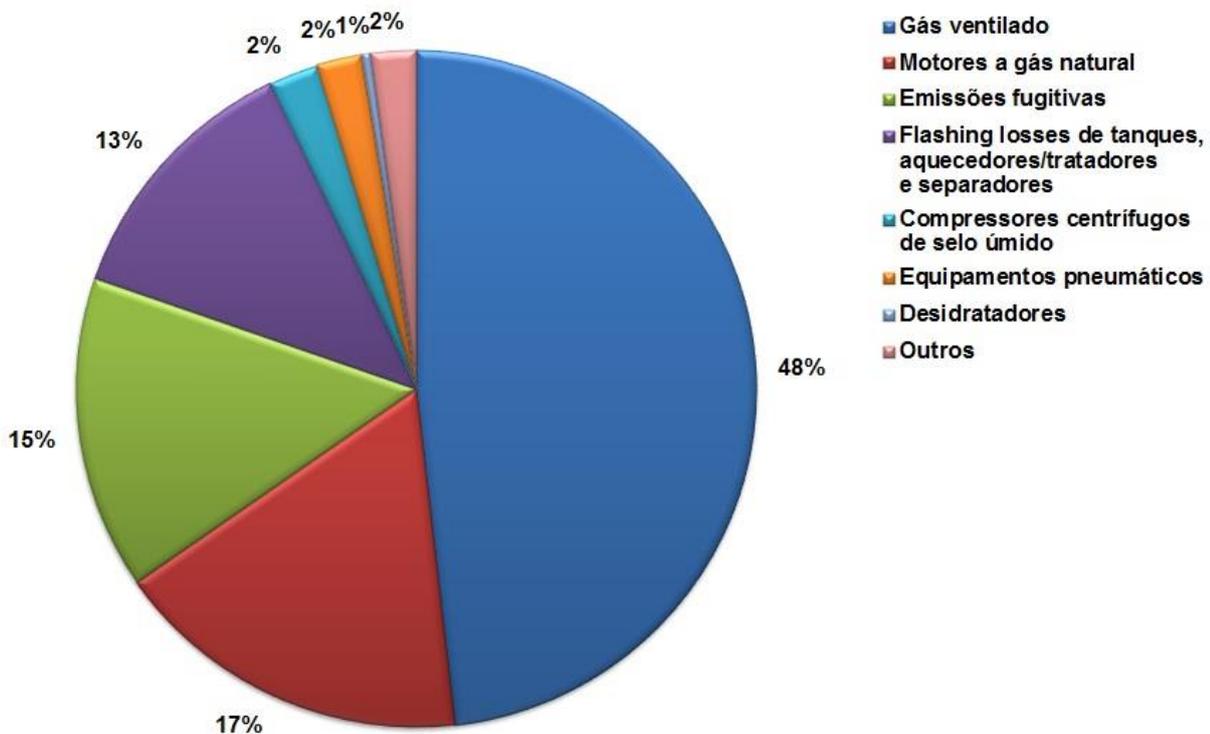


Figura 68: Emissões de metano no segmento offshore, discriminadas por grupos de fontes. Fonte: USEPA (2013a).

Schmall (2008), afirma que o perfil das emissões de GEE na indústria do petróleo e do gás natural pode variar em função das características dos processos e das atividades de “*upstream*” e “*downstream*”. Acrescenta que o tipo de combustível consumido, a RGO⁷⁵, o grau de complexidade das operações de refino, a qualidade do óleo processado, dentre outras características, são fatores determinantes no perfil de emissões. Segundo o autor, mais de 50% das emissões da área de exploração e produção de petróleo e gás podem vir das operações das tochas (“*flares*”).

GHG Protocol (2008, 2009 e 2010) apresentam os resultados das emissões de GEE da PETROBRAS desagregadas por tipos de fonte, onde se verifica que as emissões oriundas de fontes de combustão estacionária e processo (ventilação), correspondem a 89% das emissões totais (Figura 69).

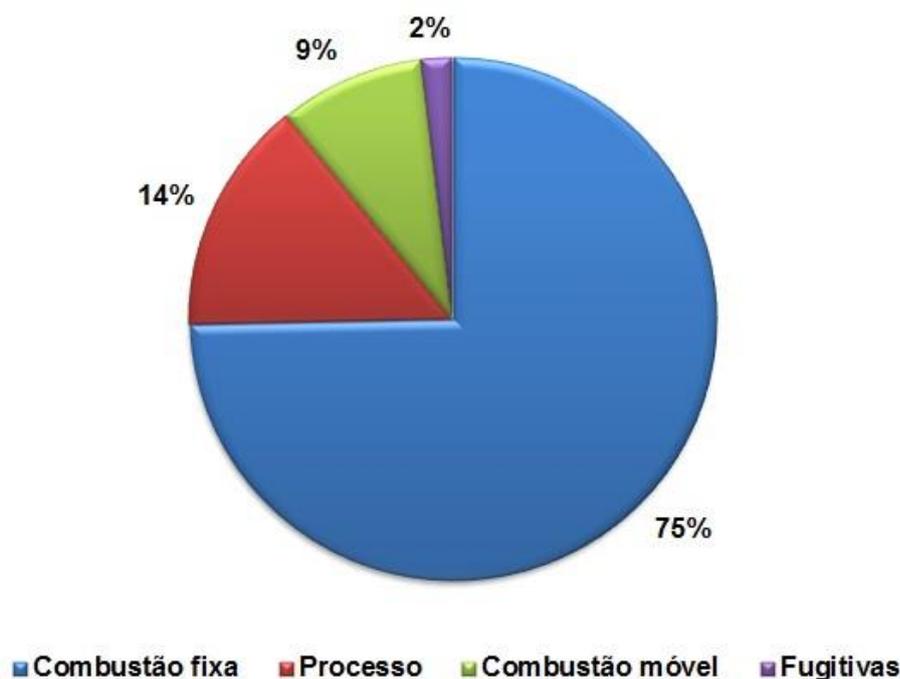


Figura 69: Emissões da PETROBRAS no triênio 2008 – 2010, desagregadas por tipo de fonte.

Fonte: GHG Protocol, 2008, 2009 e 2010.

Esse amplo conjunto de informações apresentadas representa um quadro por meio do qual podemos verificar que apesar de o Compendium API relacionar 43 fontes

⁷⁵ Razão gás-óleo: relação entre a vazão de gás e a vazão de óleo, medidas nas condições de superfície.

distintas de emissões de GEE não há necessidade de incluir a todas em um processo de inventário, uma vez que até 90% das emissões totais podem ser oriundas das fontes de combustão estacionária e de processos de ventilação.

O modelo desenvolvido tomou como base as fontes de emissão de GEE apresentadas na Tabela 2-1 do Compendium API (API, 2009), reproduzida no presente trabalho como Tabela 22. As 43 fontes listadas distribuem-se entre fontes que tanto podem ser específicas das instalações de exploração ou produção, quanto podem ser comuns a ambas as atividades. Tais fontes são ainda divididas em quatro grandes grupos de fontes de emissões:

- Emissões da combustão;
- Emissões fugitivas;
- Emissões dos processos de ventilação;
- Emissões de fontes indiretas.

Com base nas premissas apresentadas, as 43 fontes relacionadas em API 2009 foram reduzidas para as 13 fontes relacionadas nas Tabelas Tabela 18 e Tabela 19.

Tabela 18: Fatores de Atividade (FA) e Fatores de Emissão (FE) do CO₂.

FONTES		FATORES DE ATIVIDADE (FA) E EMISSÃO (FE) DO CO ₂						
		FA	FE	(FAxFE)				
FONTES DE COMBUSTÃO	Equipamentos estacionários	Caldeiras e geradores de vapor	FA1	4,00E+05	FE1	1,92E-03	768,89	t/ano
		Reaquecedores de desidratação	GP	Gás produzido	FE2	2,80E-02	Variável	t/ano
		Aquecedores e depuradores	FA2	4,00E+05	FE3	1,92E-03	768,89	t/ano
		Geradores com motor de combustão interna	FA3	6,06E+02	FE4	2,64E-06	0,00	t/ano
		Flares	GQ	Gás queimado	FE5	1,40E+00	Variável	t/ano
Fontes móveis	Equipamentos móveis de perfuração	FA4	7,71E+01	FE6	2,64E+00	203,54	t/ano	
FONTES DE VENTILAÇÃO	Ventilação de processo	Processos de desidratação	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
		Bombas de desidratação Kimray	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-	-x-
		Processos de purificação do gás	GP	Gás produzido	FE7	3,90E-03	Variável	t/ano

Outras ventilações	Perfuração exploratória	FA5	4,00E+00	FE8	2,80E-08	0,00	t/ano
	Completações e testes de poços	FA6	3,00E+00	FE9	3,32E+00	9,96	t/ano
Manutenção e parada	Completação de poços	FA7	6,00E+01	FE10	7,30E+00	438,00	t/ano
	Saída e reentrada de poços	FA8	5,00E+00	FE11	7,30E+00	36,50	t/ano

Fontes: Resumido e convertido para Unidades Internacionais (UI) a partir de API 2009 (Tabelas 4-12, 5-2, 5-5, 5-23, 8-8, 8-28, 8-30, Exhibit 5.30), TCEQ 2010 (Tabelas 4-9 e B-2.0), WRI 2007 (Tabelas V-I-2, VI-3 e V-17), IPCC 2000, Bylin et al 2010, CEPA 2009, PSI 1990 e AP-42 (Tabela 1.4-2).

Tabela 19: Fatores de Atividade (FA) e Fatores de Emissão (FE) do CH₄.

FONTES		FATORES DE ATIVIDADE (FA) E EMISSÃO (FE) DO CH ₄						
		FA	FE	(FAxFE)				
FONTES DE COMBUSTÃO	Caldeiras e geradores de vapor	FA9	4,00E+05	FE12	3,68E-08	0,01	t/ano	
	Reaquecedores de desidratação	GP	Gás produzido	FE13	1,87E-01	Variável	t/ano	
	Aquecedores e depuradores	FA10	4,00E+05	FE14	3,68E-08	0,01	t/ano	
	Geradores com motor de combustão interna	FA11	6,06E+02	FE15	1,32E-04	0,08	t/ano	
	Flares	GQ	Gás queimado	FE16	8,80E-04	Variável	t/ano	
Fontes móveis	Equipamentos móveis de perfuração	FA12	7,71E+01	FE17	1,53E-04	0,01	t/ano	
FONTES DE VENTILAÇÃO	Processos de desidratação	GP	Gás produzido	FE18	7,94E-08	Variável	t/ano	
	Bombas de desidratação Kimray	GP	Gás produzido	FE19	1,20E-07	Variável	t/ano	
	Processos de purificação do gás	GP	Gás produzido	FE20	6,54E-01	Variável	t/ano	
	Outras ventilações	Perfuração exploratória	FA13	4,00E+00	FE21	4,30E-07	0,00	t/ano
		Completações e testes de poços	FA14	3,00E+00	FE22	1,40E-02	0,04	t/ano
	Manutenção e parada	Completação de poços	FA15	6,00E+01	FE23	1,32E+02	263,00	t/ano
	Saída e reentrada de poços	FA16	5,00E+00	FE24	4,71E-02	0,09	t/ano	

Fontes: Resumido e convertido para Unidades Internacionais (UI) a partir de API 2009 (Tabelas 4-12, 5-2, 5-5, 5-23, 8-8, 8-28, 8-30, Exhibit 5.30), TCEQ 2010 (Tabelas 4-9 e B-2.0), WRI 2007 (Tabelas V-I-2, VI-3 e V-17), IPCC 2000, Bylin et al 2010, CEPA 2009, PSI 1990 e AP-42 (Tabela 1.4-2).

9.5 Seleção dos GEE a serem incluídos no modelo

Segundo API (2009), dentre todos os GEE elencados no Protocolo de Quioto, os dois GEE que obrigatoriamente devem ser incluídos em inventários são o CO₂ e o CH₄, face à sua relevância quanto às emissões gerais do setor. De fato como podemos observar na Tabela 2 e na Figura 46, as emissões de N₂O sequer chegam a 1% das emissões totais de GEE da PETROBRAS e da SHELL nos períodos relatados, o que caracteriza sua baixa relevância no setor de E&P.

Assim, apesar de USEPA (2012c) sugerir a inclusão das emissões de N₂O a partir dos flares e das fontes de combustão estacionárias, o presente modelo trata especificamente das emissões de CO₂ e CH₄.

9.6 Seleção da metodologia de inventário de GEE

Segundo Chan (2006), além do American Petroleum Institute (API), responsável pela publicação do Compendium API, diversas outras instituições desenvolveram metodologias próprias para determinação das emissões de GEE, tais como as metodologias do IPCC, do WBCSD/WRI⁷⁶ e do API.

Segundo o autor, a metodologia desenvolvida pelo IPCC em conjunto com a Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) e a International Energy Agency (IEA) tem como seu principal objetivo a elaboração de inventários nacionais, tendo inclusive servido de metodologia para os inventários nacionais de emissões apresentados pelo governo brasileiro desde 2004.

Ainda segundo Chan (2006), a metodologia do WBCSD/WRI apresenta uma importante característica que é a contabilização do tipo “*bottom-up*”, ou seja, toma como base o cálculo de emissões a partir de fontes locais, permitindo agregar as informações em níveis progressivamente mais amplos, tais como instalações, unidades de negócio, podendo mesmo chegar ao nível de inventários nacionais ou regionais.

⁷⁶ World Business Council for Sustainable Development/World Resources Institute.

A última metodologia citada pelo autor, o Compendium API, na prática deve ser entendido como bem mais do que uma específica metodologia. O Compendium API, como já descrito no presente trabalho, é fruto de um trabalho desenvolvido por diversas instituições de âmbito global tais como o próprio API e a IPIECA, especializadas na área de petróleo e gás. Tal especificidade confere ao Compendium API um grau de especialização que o distingue dos demais protocolos hoje disponíveis para a realização de inventários de emissões de GEE.

As diversas metodologias apresentadas pelo Compendium permitem a seleção de diversos níveis de abordagem, proporcionais à qualidade requerida pelos inventários e a seus proporcionais custos, conforme a Figura 70, a qual resume as informações apresentadas pela Tabela 17.

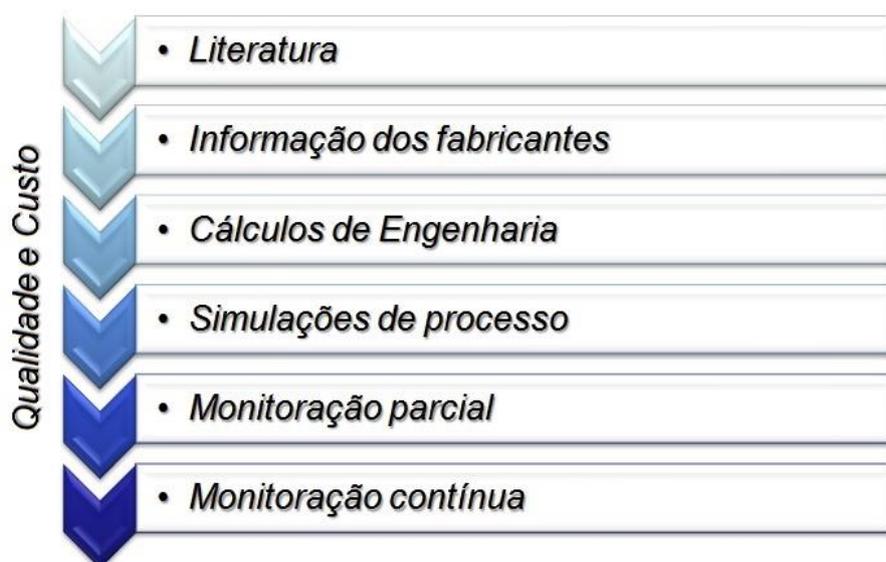


Figura 70: Tipos de abordagem para estimativas de emissões de GEE segundo API (2009).

Por conta da flexibilidade da metodologia e da disponibilidade de dados em literatura, foi então escolhida como metodologia para o modelo proposto a adoção dos fatores de emissão e atividade, como preconizado por API (2009) e IPCC (1997).

Cabe ressaltar que apesar de toda a facilidade de aplicação dessa metodologia e de seus baixos custos, dentre as demais opções disponíveis (balanço de massa, monitoramento pontual), é aquela que apresenta os maiores níveis de incerteza,

inacurácia e imprecisão face ao caráter em geral generalista dos Fatores de Atividade e Emissão disponíveis na literatura. Uma forma eficaz de ao menos reduzir tais aspectos negativos é utilizar fatores de emissão o menos genéricos possível, preferencialmente elaborados dentro das corporações por meio de coleta de dados a partir de características específicas de suas próprias instalações e processos.

O modelo ora apresentado deve então ser entendido como uma etapa preliminar no estudo das avaliações das opções a serem desenvolvidas no estado da arte dos inventários corporativos de emissões de GEE, devendo certamente passar por avaliações, adaptações, evolução e até mesmo migração para outras metodologias que minimizem as incertezas envolvidas.

9.7 Construção do modelo

A utilização do Compendium API permite não apenas a utilização de uma metodologia suficientemente aceita pelo mercado, como também uma definição clara das diversas fontes de emissões existentes no segmento Exploração & Produção, objeto do modelo ora proposto.

De acordo com IPCC (1997) e API (2009), as emissões para uma fonte específica são calculadas como o produto entre o Fator de Emissão (FE) da fonte e um fator de Atividade (FA). Um inventário corresponde à soma de todas as emissões de uma instalação ou companhia, conforme a Equação 13, abaixo reproduzida:

$$\text{Inventário de Emissões} = \sum_{i=1}^{\text{\# de fontes}} \text{FE}_i \times \text{FA}_i$$

Das 43 fontes de emissões relacionadas na Tabela 2-1 do Compendium API (API, 2009), foram selecionadas 13 delas, representando os dois principais grupos de fontes de emissões, responsáveis por cerca de 80% do total de emissões de GEE. Seus Fatores de Emissão (FE) e Atividade (FA) foram coletados em diversas fontes bibliográficas e relacionados nas Tabelas Tabela 18 e Tabela 19.

Os valores de saída para emissões anuais apresentados nas tabelas citadas são apresentados em t/ano, a fim de uniformizar as informações que servem de base para alimentar o modelo.

Ocorre que as informações disponíveis na literatura especializada são apresentados em variados padrões métricos, ora utilizando o Sistema Internacional (SI), ora utilizando o Sistema Inglês, mais adotado nos EUA. Em função dessa característica, todos os FE e FA precisaram ser uniformizados para o SI e convertidos para t/ano. Para tal, foi utilizado como apoio o “*Guide for the Use of the International System of Units (SI)*”, do National Institute of Standards and Technology (NIST, 2008).

Uma vez obtidos os FE e FA e devidamente convertidos para uma base comum em t/ano, para a conversão das emissões de CO₂ e CH₄ para emissões em CO₂ eq., foram utilizados os valores de Potencial de Aquecimento Global (PAG) de 1 e 25 respectivamente, conforme IPCC (2007).

Por último, as emissões foram calculadas com base nas curvas de produção de gás apresentadas pela PETROBRAS para o Campo de Roncador, na Bacia de Campos (PETROBRAS, 2009), apresentadas na Tabela 20 a seguir.

Tabela 20: Produção estimada diária conjunta para os Módulos 3(P-55) e 4 (P-62) em 10⁶ m³/dia.

PRODUÇÃO ESTIMADA DIÁRIA CONJUNTA PARA OS MÓDULOS 3 (P-55) E 4 (P-62) EM 10 ⁶ M ³ /DIA					
Ano	Produzido	Consumido	Queimado	Exportado	Gas lift
2012	0,57	0,24	0,24	0,09	0,00
2013	3,32	0,64	0,70	1,98	0,31
2014	6,52	0,99	0,65	4,87	0,95
2015	6,85	0,98	0,69	5,19	1,29
2016	5,00	1,00	0,50	3,50	1,57
2017	3,54	0,99	0,35	2,19	1,63
2018	2,93	0,99	0,29	1,65	2,26
2019	2,48	0,98	0,25	1,25	2,96
2020	2,10	0,98	0,21	0,91	3,04
2021	1,84	0,95	0,18	0,70	3,16

2022	1,65	0,95	0,16	0,53	3,39
2023	1,45	0,94	0,15	0,37	3,43
2024	1,30	0,93	0,13	0,24	3,38
2025	1,20	0,80	0,12	0,29	3,51

Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2009a).

Das 5 curvas de produção apresentadas, as curvas de Gás Produzido (GP) e de Gás Queimado (GQ) foram utilizadas no modelo a fim de obter as emissões de 5 das 13 fontes listadas. Tais curvas de produção são apresentadas na Figura 71 seguir:

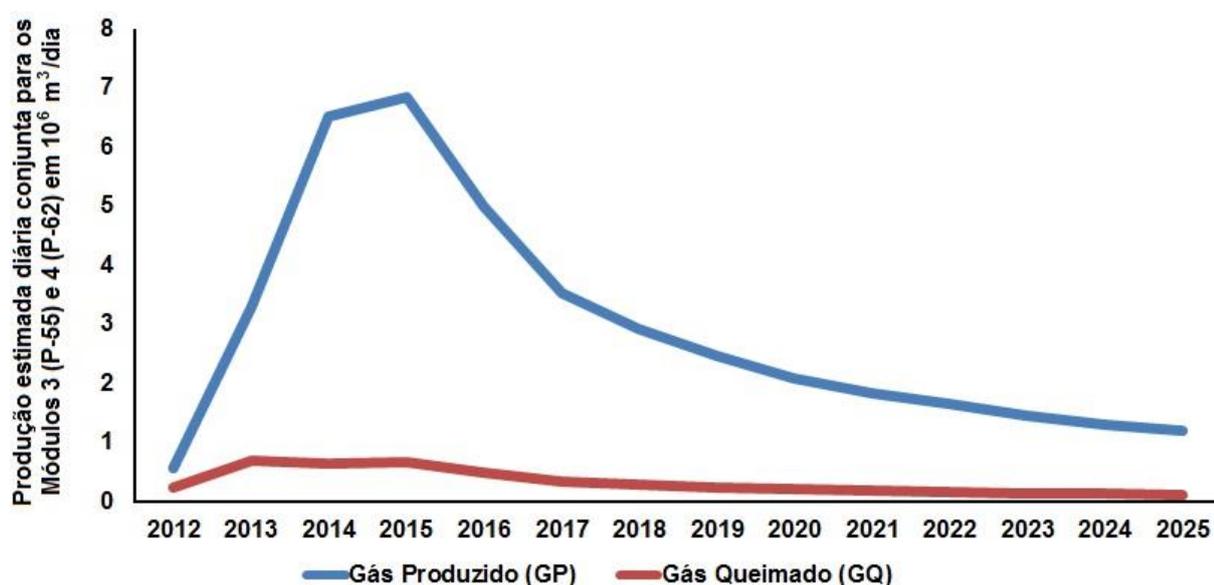


Figura 71: Produção conjunta dos Módulos 3 e 4 de gás produzido e gás queimado. Fonte: PETROBRAS (2009).

Os valores de produção e queima diária de gás apresentados na Tabela 20 foram convertidas para valores anuais, e somente então tais valores foram utilizados no modelo.

9.8 Softwares disponíveis para modelagem dinâmica

A modelagem dinâmica de sistemas conta com uma grande variedade de programas para sua execução, cada qual com características e abordagens próprias. De acordo com o site da Sociedade de Dinâmica de Sistemas (System Dynamics Society, <http://www.systemdynamics.org/>), os três principais softwares comerciais atualmente disponíveis são os seguintes:

- iThink/STELLA (<http://www.iseesystems.com/>): iThink e STELLA são dois nomes para uma mesma plataforma de desenvolvimento de modelos, diferenciadas pelos objetivos da modelagem. Enquanto STELLA destina-se à educação e pesquisa, iThink destina-se à modelagem de políticas e negócios. Os softwares estão disponíveis em diferentes tipos de licenças, incluindo versões educacionais e uma versão completa com prazo de execução limitado. O modelo apresentado neste trabalho foi desenvolvido no software iThink.
- Powersim Studio (<http://www.powersim.com/>): Powersim Studio está disponível em diferentes configurações, disponíveis sob licenças comerciais, educacionais e uma versão gratuita - Powersim Studio Express.
- Vensim (<http://vensim.com/>): Vensim está disponível sob licenças comerciais e gratuitas para fins educacionais, sendo neste caso disponibilizada uma versão com recursos limitados.

Além desses, diversos outros programas estão disponíveis, tanto em licenças comerciais como em licenças gratuitas e até mesmo “*open-source*”. Dentre esses, podem ser citados os seguintes:

- AnyLogic, produzido pela AnyLogic Company (<http://www.anylogic.com/>);
- Smia, produzido pela Dynaplan (<https://www.dynaplan.com/?message>);
- GoldSim, produzido pelo The GoldSim Technology Group (<http://www.goldsim.com/Home/>);
- Berkeley Madonna, produzido pela University of California at Berkeley. (<http://www.berkeleymadonna.com/>);
- Exposé, produzido pelo Attune Group Inc. (<http://www.attunegroup.com/>);

- Simile, produzido pela Simulistics from the University of Edinburgh (<http://www.simulistics.com/>);
- Simgua, produzido pela yourlingua.com (<http://simgua.com/>);
- TRUE, produzido pela True-World System Dynamics (<http://www.true-world.com/htm/en/index.html>).

A escolha do software iThink deveu-se à familiaridade do autor com o programa, à sua interface gráfica bastante intuitiva e à facilidade de acesso aos recursos do programa. No entanto, qualquer dos demais programas é igualmente capaz de gerar os resultados esperados.

9.9 Apresentação do modelo desenvolvido no software iThink

A programação no software iThink é orientada a objetos, os quais são simbolizados por ícones que representam variáveis com funções específicas (estoques, fluxos e conversores ou variáveis auxiliares), os quais descrevem de forma visual o modelo matemático definido para representar o fenômeno real em estudo. Dessa forma, a elaboração do modelo teve início com a definição das variáveis envolvidas, de forma a enquadrá-las corretamente em sua categoria de variável.

Baseado nessa premissa, cada fonte de emissões de GEE foi considerada como um fluxo, os grupos e categorias de fontes foram considerados estoques e os Fatores de Emissão, Fatores de Atividade, e as curvas de produção e queima do gás foram considerados como variáveis auxiliares.

A Figura 72 apresenta o modelo desenvolvido no software iThink para a estimativa das emissões de GEE.

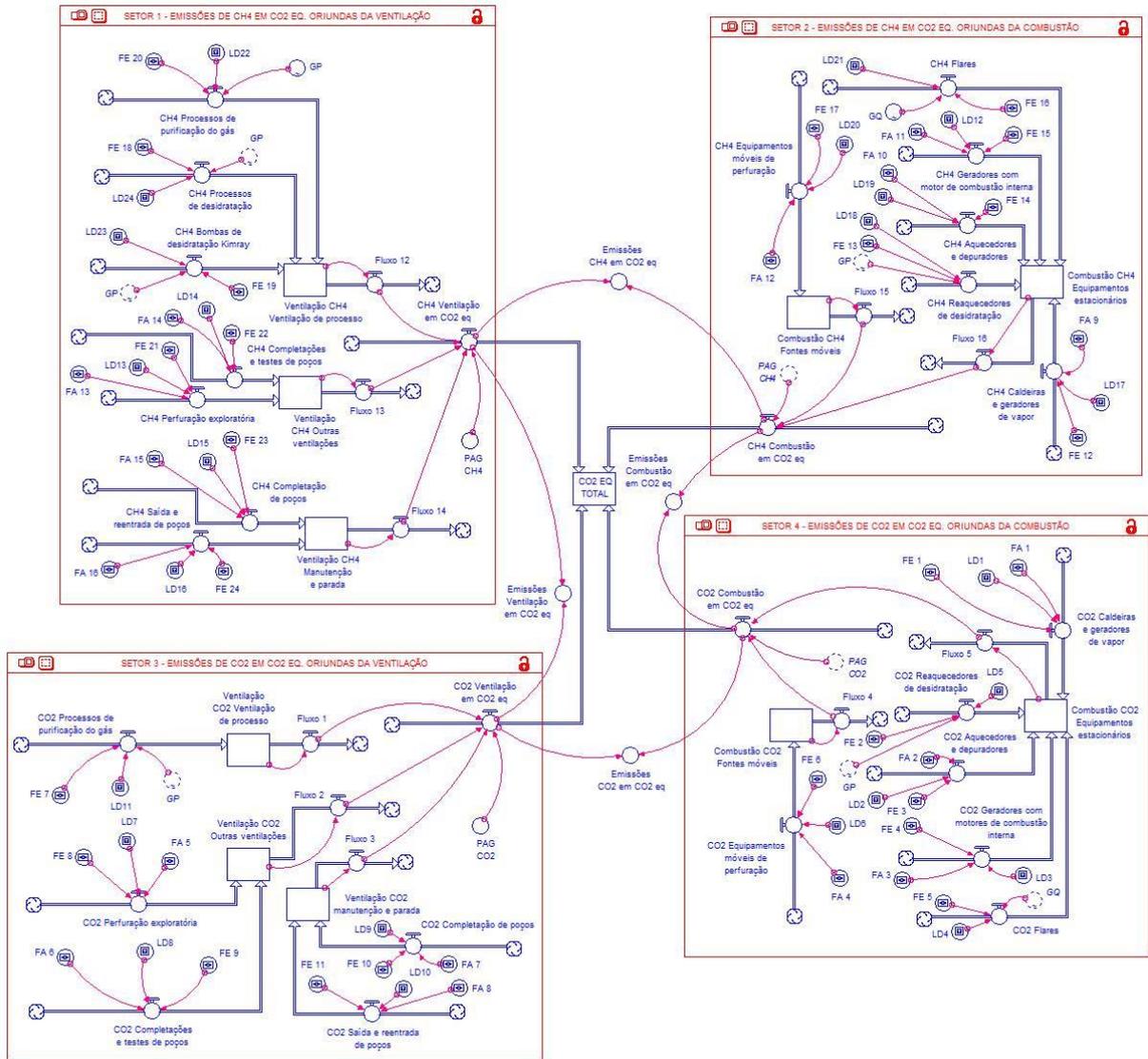


Figura 72: Modelo desenvolvido para cálculo das emissões atmosféricas de GEE.

O modelo foi desenvolvido de uma forma tal que as exigências elencadas pela “subpart W” do Regulamento 40 CFR Part 98 da USEPA (USEPA, 2012c) fossem integralmente atendidas. Assim, o modelo permite apresentar a estimativa das emissões anuais totais de GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq., as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte.

Das 13 fontes de emissões de GEE incluídas no modelo, 5 delas utilizam curvas de produção e queima de gás natural para o cômputo de suas estimativas de emissões de CH₄ e 3 delas para o CO₂. Para tal, as curvas de produção e queima de gás

apresentadas na Tabela 20 foram inseridas no modelo como variáveis flutuantes ao longo do período de 14 anos da simulação (Figuras Figura 73 e Figura 74).

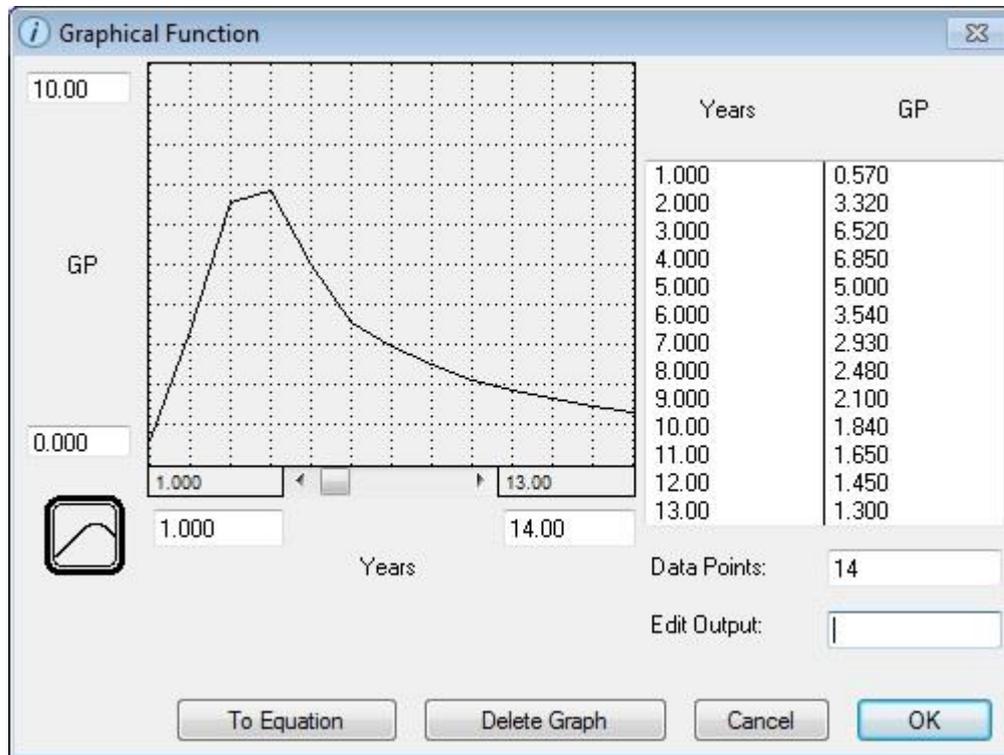


Figura 73: Inserção no modelo iThink dos valores anuais de produção de gás ao longo do período de duração da simulação.

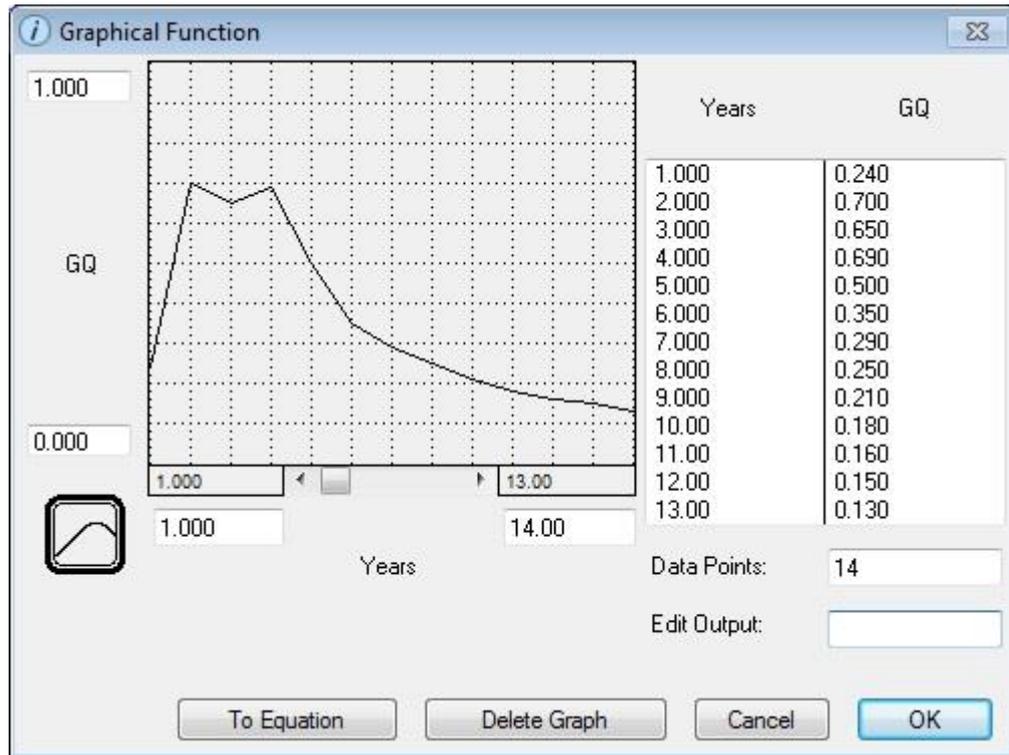


Figura 74: Inserção no modelo iThink dos valores anuais de queima de gás ao longo do período de duração da simulação.

Em modelos produzidos no software iThink, a manipulação das variáveis, estoques e fluxos incluídos é realizada por meio de um "Painel de Controle", uma interface gráfica onde são apresentadas as informações de entrada e saída, além de gráficos e tabelas onde são apresentados os resultados das simulações.

Essa interface gráfica é totalmente flexível, podendo ser construída pelo modelador de acordo com as informações que sejam de seu interesse apresentar.

A Figura 75 apresenta o "Painel de Controle" desenvolvido para o modelo.

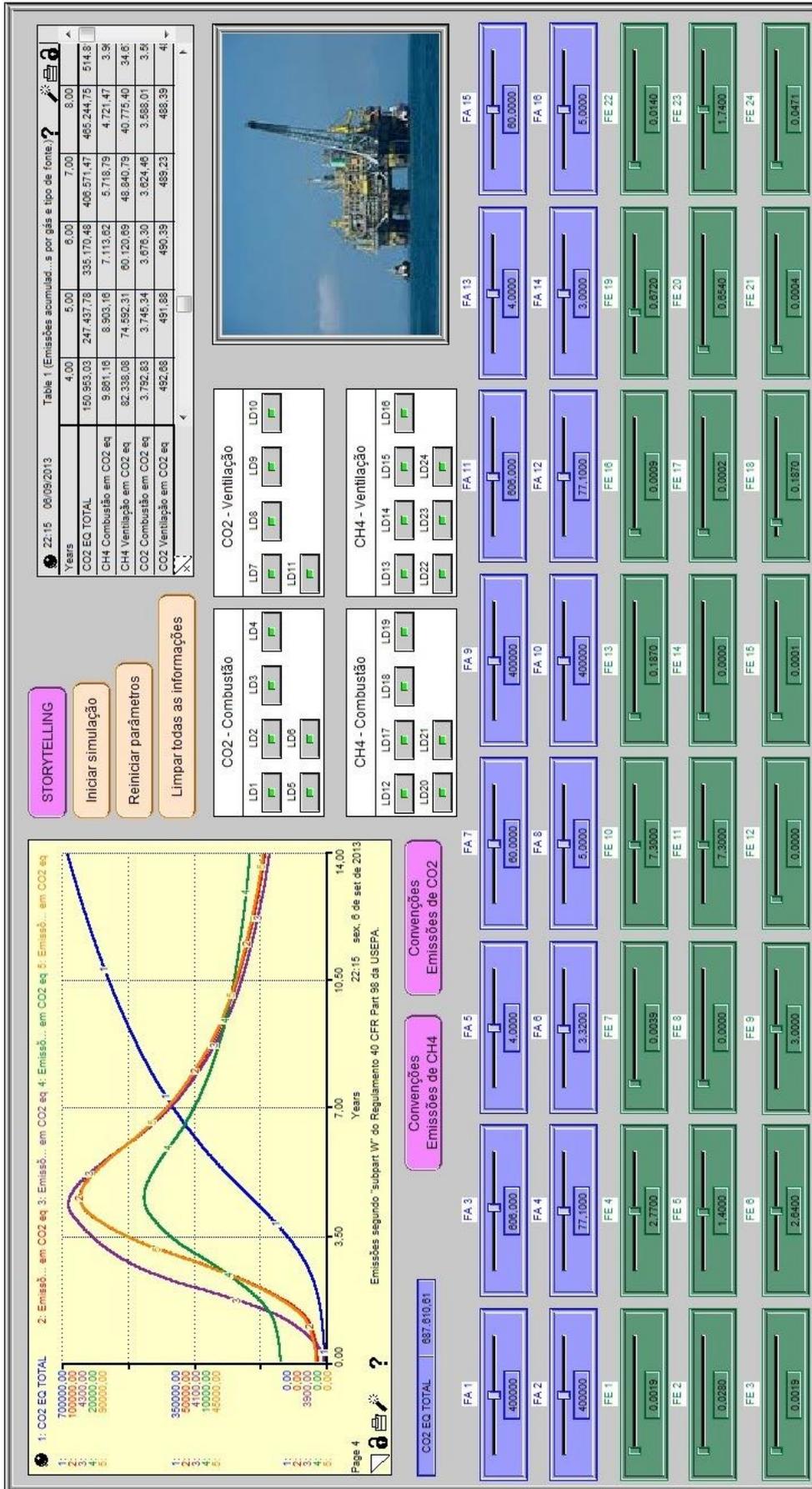


Figura 75: Painel de Controle do modelo.

No “Painel de Controle” do modelo, diversos controles podem ser observados, cada qual com funções específicas:

- Controles deslizantes (Figura 76): permitem alterar os valores ajustados para cada uma das variáveis representadas por este tipo de controle. Seus limites de amplitude podem ser definidos a critério do modelador, de forma que novos valores para a específica variável podem ser alterados sem que seja necessário alterar o modelo.



Figura 76: Controle deslizante.

- “Switches” (Figura 77): controles que “ligam” ou “desligam” a participação de uma ou mais variáveis no cômputo das emissões. No modelo, cada fonte de emissões foi conectada a um “switch”, de forma que cada uma delas pode ser incluída ou excluída na estimativa de emissões.

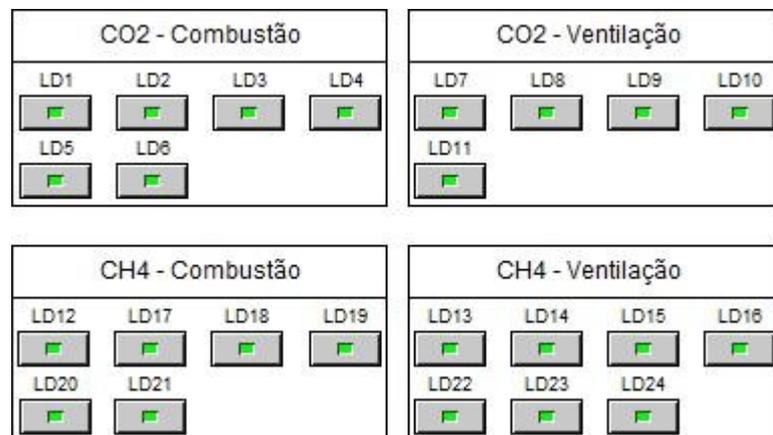


Figura 77: “Switches”.

- Gráficos (Figura 78): uma mesma interface gráfica pode apresentar diversas “páginas” de gráficos, de forma que uma mesma simulação pode apresentar um grande volume de informações.

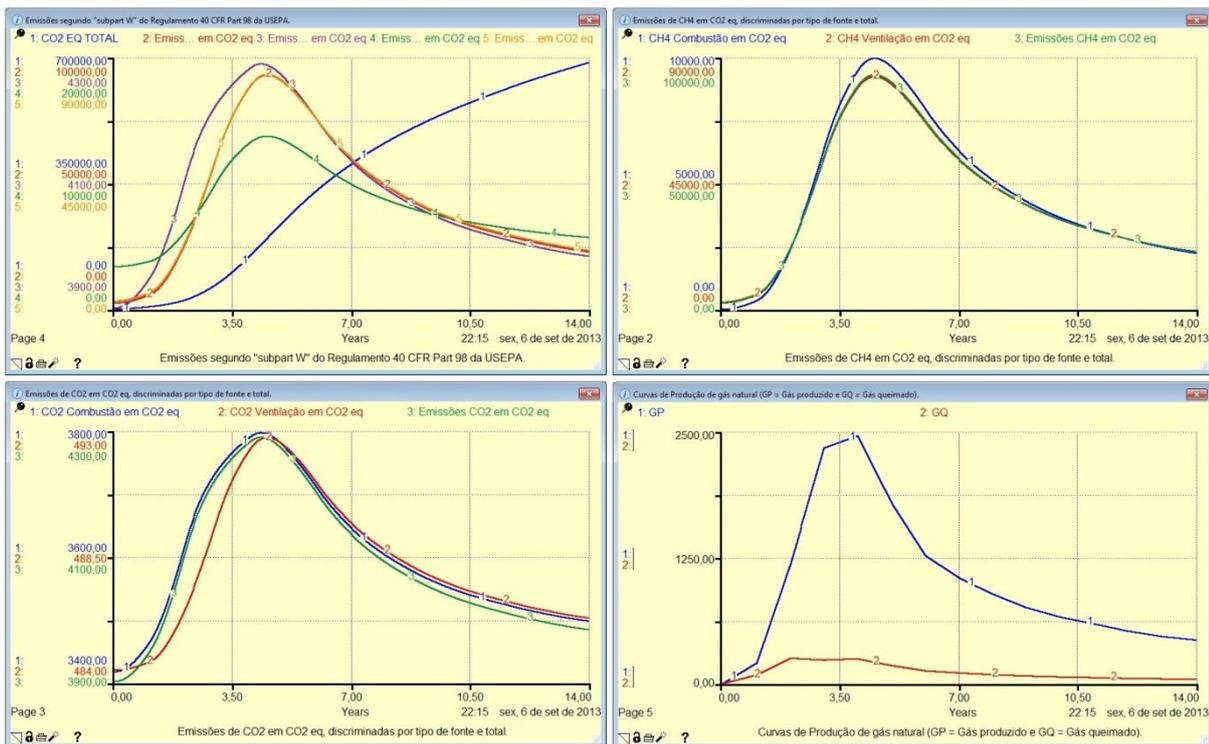


Figura 78: Gráficos gerados em uma mesma simulação pelo software iThink.

- Tabelas (Figura 79): da mesma forma que os gráficos, diversas tabelas podem ser geradas em uma mesma simulação.

Years	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	567,5
CO2 EQ TOTAL	247.437,78	335.170,48	406.571,47	465.244,75	514.818,01	567,5
CH4 Combustão em CO2 eq	8.903,16	7.113,62	5.718,79	4.721,47	3.967,52	3,4
CH4 Ventilação em CO2 eq	74.592,31	60.120,89	48.840,79	40.775,40	34.678,21	30,11
CO2 Combustão em CO2 eq	3.745,34	3.678,30	3.624,46	3.588,01	3.560,70	3,5
CO2 Ventilação em CO2 eq	491,88	490,39	489,23	488,39	487,77	4,1

Figura 79: Tabela gerada pelo software iThink.

- Botões de comando (Figura 80): os botões de comando são definidos pelo modelador de acordo com suas preferências e objetivos do modelo e de suas simulações. O botão “*storytelling*” permite ao modelador descrever passo-a-passo o modelo para uma plateia, de forma que cada etapa seja descrita detalhadamente. Os botões “Convenções Emissões de CH₄” e “Convenções Emissões de CO₂” apresentam duas janelas onde o modelador pode verificar a correspondência de cada “switch” com suas correspondentes fontes, de

forma a selecionar ou excluir as fontes ou conjuntos de fontes da modelagem. As Figuras Figura 81 e Figura 82 apresentam as citadas janelas.

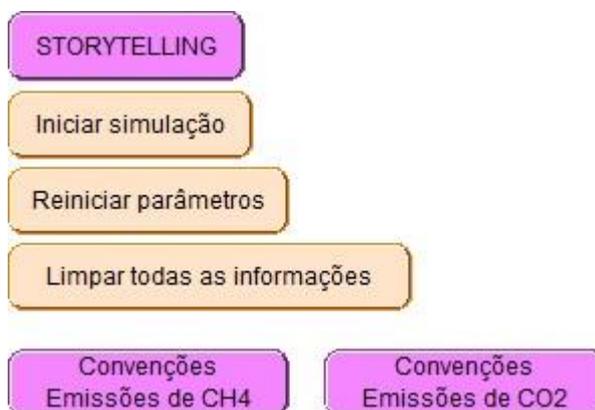


Figura 80: Botões de comando.

CONVENÇÕES – EMISSÕES DE CH ₄					
FONTES DE COMBUSTÃO	Equipamentos estacionários	Caldeiras e geradores de vapor	FA9	FE12	LD17
		Reaquecedores de desidratação	GP	FE13	LD18
		Aquecedores e depuradores	FA10	FE14	LD19
		Geradores com motor de combustão interna	FA11	FE15	LD12
		Flares	GQ	FE16	LD21
Fontes móveis	Equipamentos móveis de perfuração	FA12	FE17	LD20	
FONTES DE VENTILAÇÃO	Ventilação de processo	Processos de desidratação	GP	FE18	LD24
		Bombas de desidratação Kimray	GP	FE19	LD23
		Processos de purificação do gás	GP	FE20	LD22
	Outras ventilações	Perfuração exploratória	FA13	FE21	LD13
		Completações e testes de poços	FA14	FE22	LD14
	Manutenção e parada	Completação de poços	FA15	FE23	LD15
		Saída e reentrada de poços	FA16	FE24	LD16

Figura 81: Janela apresentada pelo acionamento do botão “Convenções Emissões de CH₄”.

CONVENÇÕES – EMISSÕES DE CO ₂						
FONTES DE COMBUSTÃO	Equipamentos estacionários	Caldeiras e geradores de vapor	FA1	FE1	LD1	
		Reaquecedores de desidratação	GP	FE2	LD5	
		Aquecedores e depuradores	FA2	FE3	LD2	
		Geradores com motor de combustão interna	FA3	FE4	LD3	
		Flares	GQ	FE5	LD4	
	Fontes móveis	Equipamentos móveis de perfuração	FA4	FE6	LD6	
FONTES DE VENTILAÇÃO	Ventilação de processo	Processos de desidratação	-x-	-x-	-x-	
		Bombas de desidratação Kimray	-x-	-x-	-x-	
		Processos de purificação do gás	GP	FE7	LD11	
	Outras ventilações	Perfuração exploratória	FA5	FE8	LD7	
		Completações e testes de poços	FA6	FE9	LD8	
	Manutenção e parada	Completação de poços	FA7	FE10	LD9	
		Saída e reentrada	de poços	FA8	FE11	LD10

Figura 82: Janela apresentada pelo acionamento do botão “Convenções Emissões de CO₂”.

9.10 Descrição da montagem do modelo

Como já dito anteriormente, o principal objetivo do modelo era atender às recomendações da “subpart W” do Regulamento 40 CFR Part 98 da USEPA, que embora tenha validade para as empresas em atividade nas bacias petrolíferas norte-americanas, suas exigências são perfeitamente aplicáveis para o mercado brasileiro.

As exigências da USEPA são relevantes na medida em que exigem que os inventários de emissões informem não apenas seus volumes totais em CO₂ eq., mas também as emissões discriminadas por fonte e tipo de fonte, também em CO₂ eq. Tal medida permite uma avaliação pontual da participação específica de cada fonte em relação ao cômputo global, servindo como importante ferramenta em inventários “botton-up”

O modelo ora apresentado não apenas permite a precisa determinação da participação de cada fonte no cômputo global de emissões, como também o comportamento de suas emissões ao longo do período de tempo avaliado. Isso possibilita uma prévia avaliação das ações eventualmente necessárias para processos de mitigação das emissões, seja por política própria das empresas, seja por força de normatizações legais que possam impactar as atividades da empresa.

Observando a Figura 72, verificamos que o layout do modelo foi desenvolvido dividindo-o em 4 setores, cada um dos quais concentrando as emissões em seus 4 fluxos de saída, correspondentes a:

- Setor 1: emissões totais de CH₄ oriundas da ventilação, convertidas para CO₂ eq. (Figura 83);
- Setor 2: emissões totais de CH₄ oriundas da combustão, convertidas para CO₂ eq. (Figura 84);
- Setor 3: emissões totais de CO₂ oriundas da ventilação, convertidas para CO₂ eq. (Figura 85);
- Setor 4: emissões totais de CO₂ oriundas da combustão, convertidas para CO₂ eq. (Figura 86).

A "subpart W", do Regulamento 40 CFR Part 98 exige que as plataformas que emitam ao menos 25.000 toneladas de CO₂ eq por ano reportem as seguintes emissões:

- Emissões anuais totais de GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq., representadas pelo somatório das emissões dos quatro setores;
- Emissões anuais individualizadas de cada GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq., representadas pelo somatório das emissões do 1º e do 2º setores para representar as emissões de CH₄, e pelo somatório das emissões do 3º e do 4º setores para representar as emissões de CO₂;
- Emissões anuais individualizadas de cada GEE, expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte, representadas pelo somatório das emissões do 1º e do 3º setores para representar as emissões

oriundas da ventilação, e pelo somatório das emissões do 2º e do 4º setores para representar as emissões oriundas da combustão.

Em cada setor, os fluxos iniciais representam as emissões de CH₄ ou CO₂ oriundas da ventilação ou da combustão, de acordo com seu setor específico. Para que seja efetuado o cálculo das emissões de cada fonte, por meio de conversores conectados a cada um dos fluxos são incluídos os Fatores de Atividade (FA) e os Fatores de Emissão (FE), a fim de iniciar o inventário conforme a Equação 13. Os conversores "LD" são controles do tipo "switch" que permitem incluir ou não no inventário as emissões de cada específica fonte.

Tais fluxos são concentrados em estoques parciais, os quais representam as emissões de CH₄ ou CO₂ por grupo de fontes de ventilação. Os fluxos oriundos de cada estoque são concentrados em um único fluxo de saída do setor, representando as emissões totais de CH₄ ou CO₂ oriundas da ventilação ou da combustão, de acordo com o setor. O produto de tais emissões por seu correspondente PAG permite a obtenção das emissões devidamente convertidas para CO₂ eq.

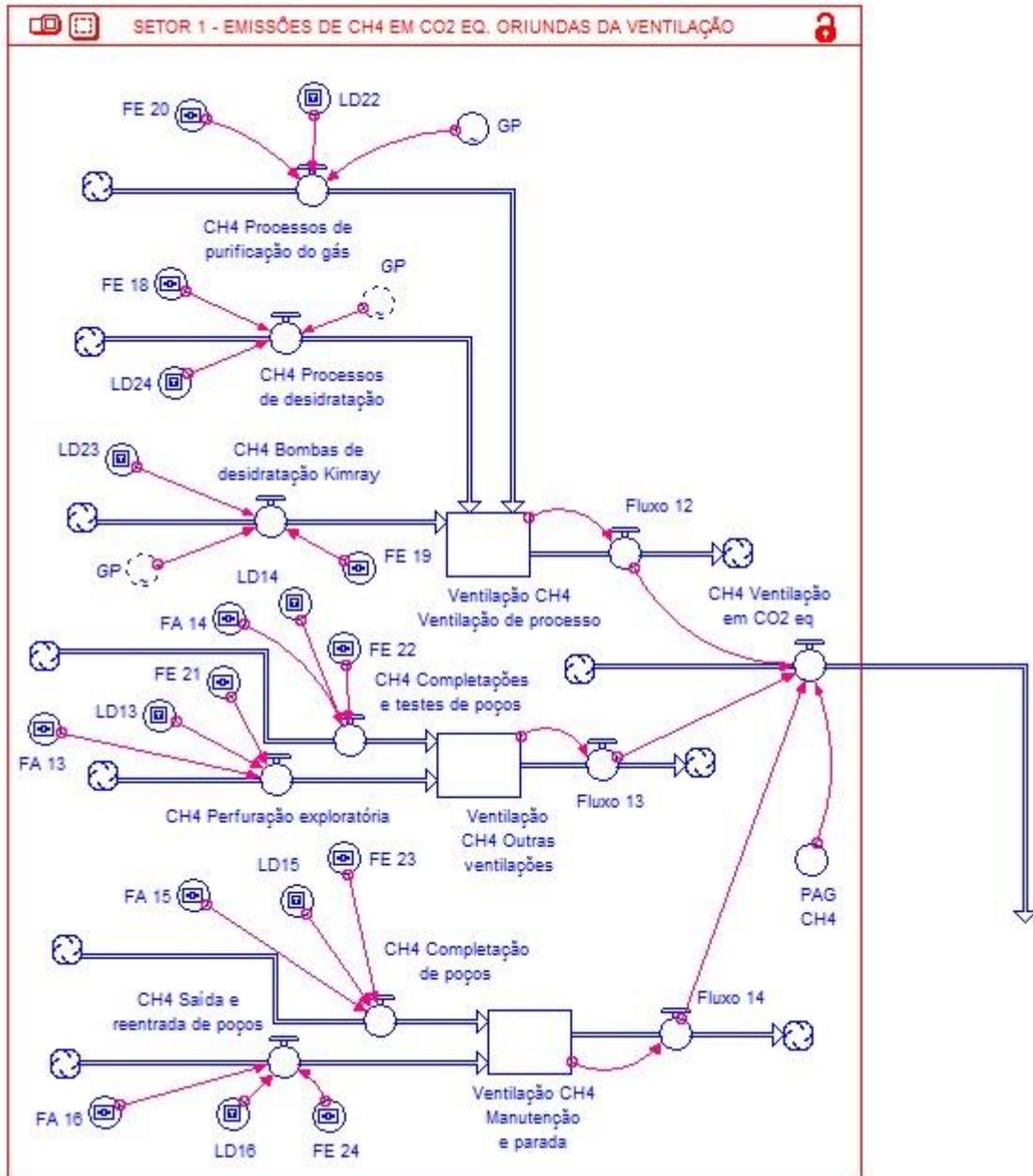


Figura 83: Setor 1: emissões de CH₄ oriundas das fontes de ventilação.

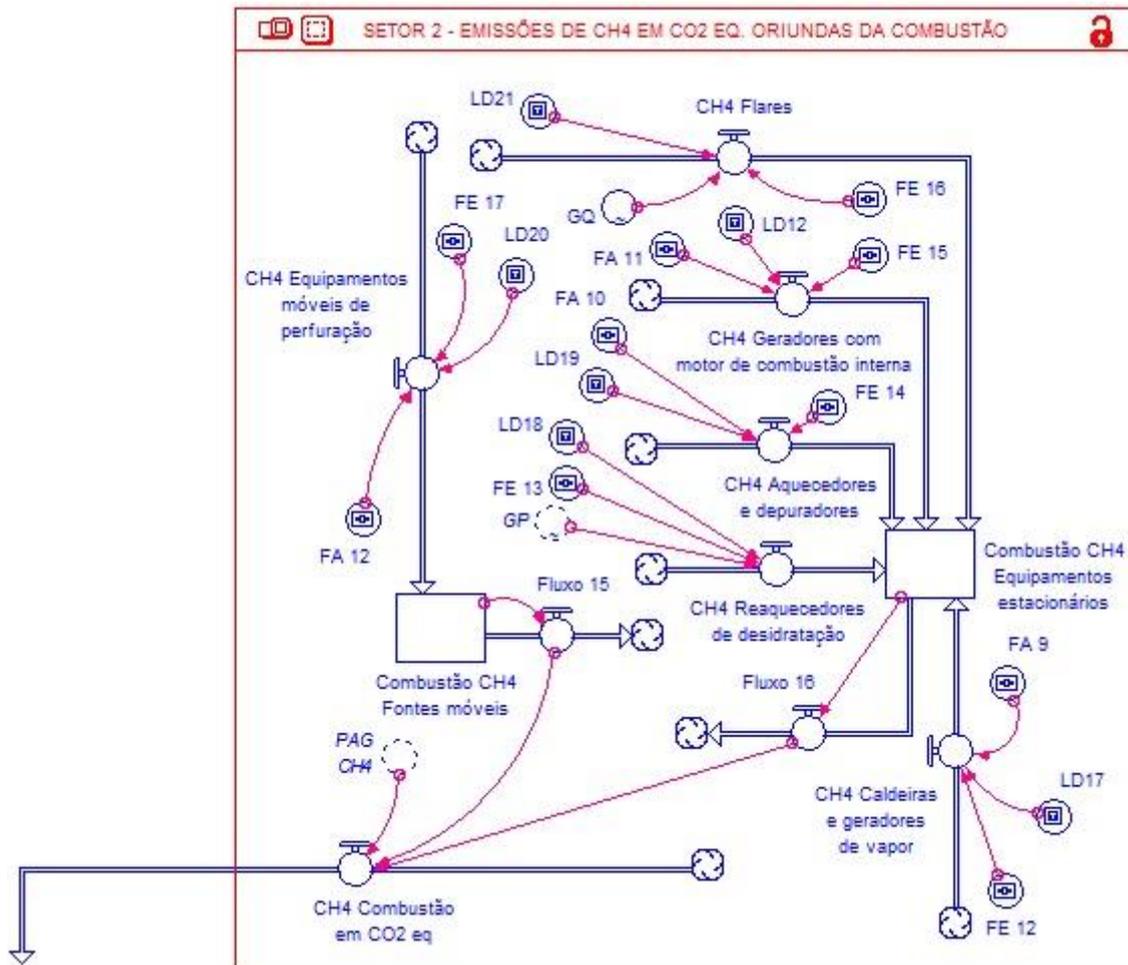


Figura 84: Setor 2: emissões de CH₄ oriundas das fontes de combustão.

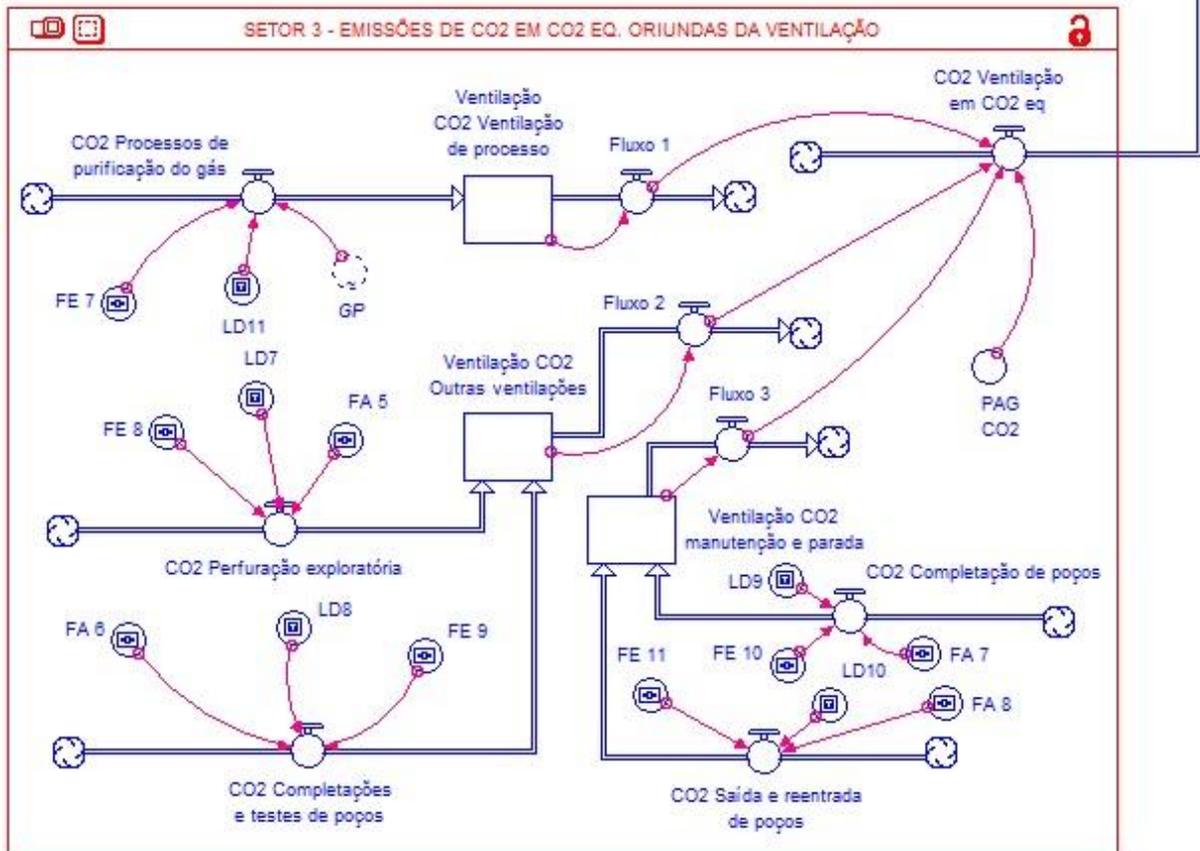


Figura 85: Setor 3: emissões de CO₂ oriundas das fontes de ventilação.

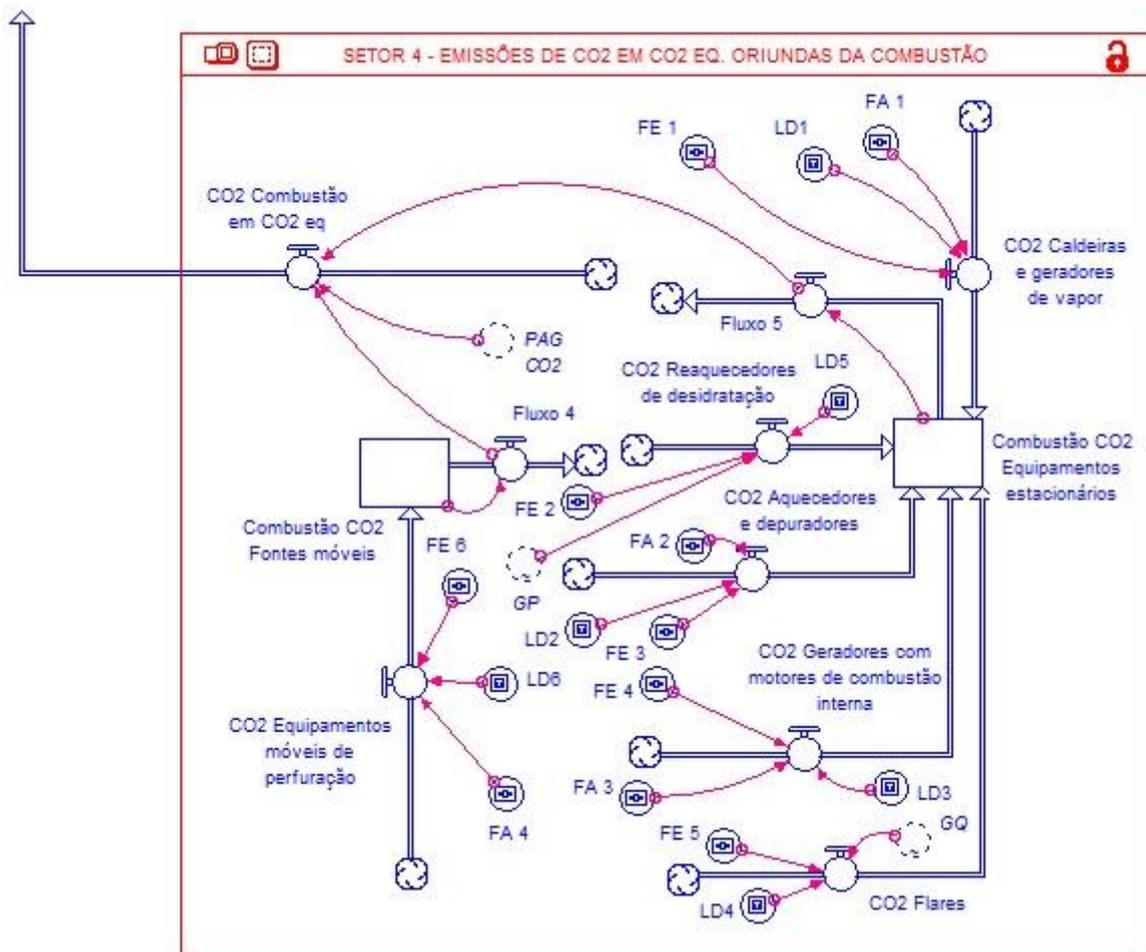


Figura 86: Setor 4: emissões de CO₂ oriundas das fontes de combustão.

Os fluxos de saída de cada quadrante representam as emissões em massa de CO₂ e CH₄, já convertidas para CO₂ eq. Esses fluxos são somados em um estoque central e final, que representa as emissões totais de GEE em CO₂ eq. (Figura 87).

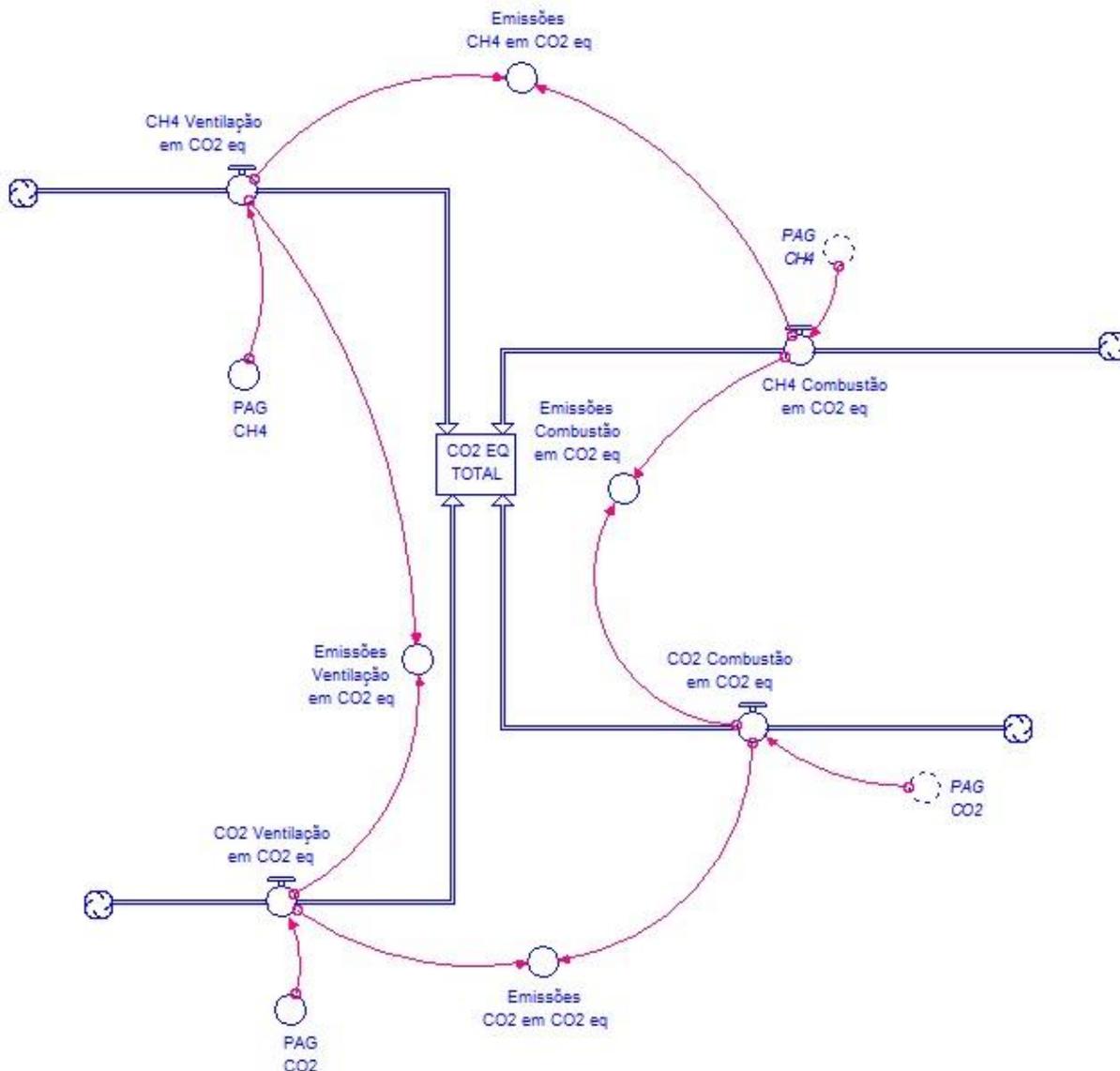


Figura 87: Emissões totais de CO₂ e CH₄ em CO₂ eq., emissões totais oriundas da ventilação e da combustão em CO₂ eq. e emissões totais em CO₂ eq. conforme solicitado pela “subpart W” do Regulamento 40 CFR Part 98 da USEPA.

9.11 Resultados obtidos a partir do modelo e das simulações

Uma vez montado o modelo de forma a atender as exigências da “subpart W”, foi gerada a simulação que resultou na geração de diversas informações importantes.

A primeira delas é a própria geração das informações exigidas pela “subpart W”, conforme apresentado pela Figura 88. Os dados que geram as curvas apresentadas na Figura 88 são apresentados na tabela representada pela Figura 89. Essa tabela

é a mesma presente na interface do modelo, apenas tendo sido apresentada na vertical para efeitos didáticos.

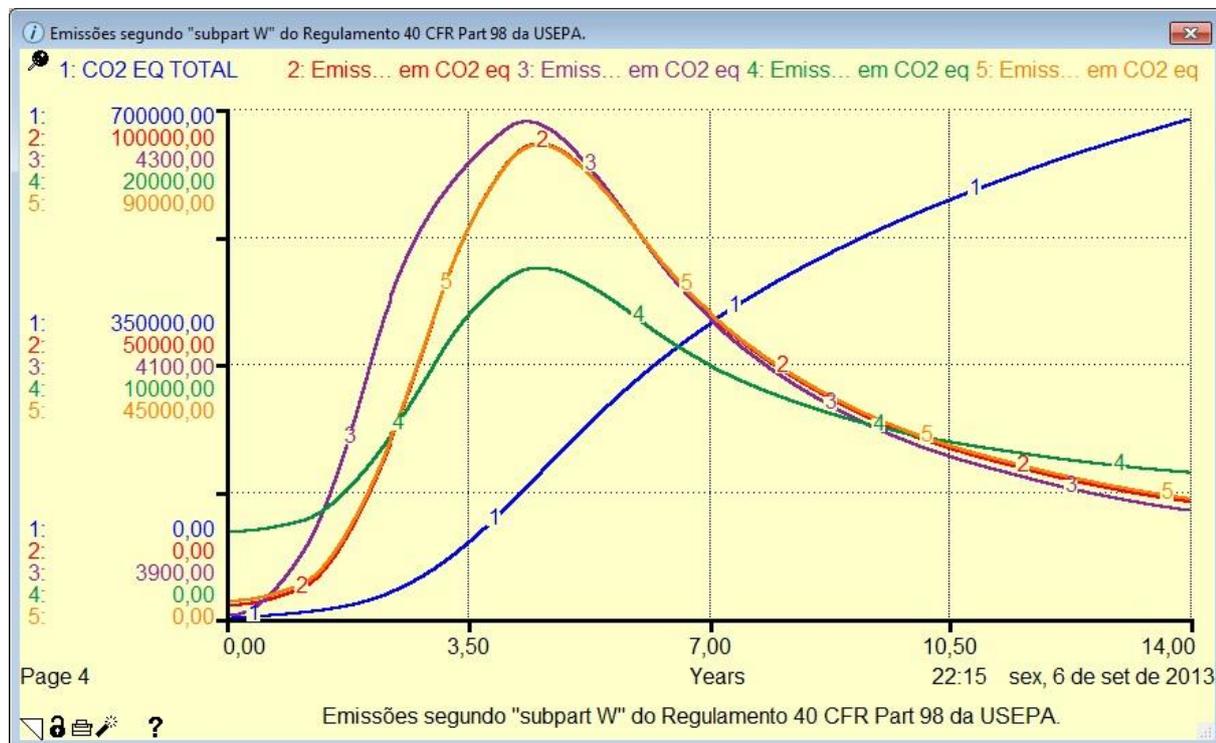


Figura 88: Emissões de GEE segundo “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA, ao longo dos 14 anos representados pela simulação.

Years	CO2 EQ TOTAL	Emissões CH4 em CO2 eq	Emissões CO2 em CO2 eq	Emissões Combustão em CO2 eq	Emissões Ventilação em CO2 eq
.00	0,00	3.717,40	3.918,83	3.558,02	4.078,01
1.00	7.638,03	13.104,02	4.011,87	4.683,94	12.431,78
2.00	24.751,72	41.252,53	4.170,09	7.938,03	37.484,59
3.00	70.174,34	78.520,65	4.258,04	11.903,09	68.875,60
4.00	150.953,03	92.189,24	4.285,51	13.653,99	82.830,76
5.00	247.437,78	83.496,47	4.237,22	12.648,50	75.084,19
6.00	335.170,48	67.234,31	4.168,89	10.789,92	60.811,08
7.00	408.571,47	54.559,58	4.113,89	9.343,25	49.330,02
8.00	465.244,75	45.496,87	4.078,40	8.309,47	41.263,80
9.00	514.818,01	38.645,73	4.048,46	7.528,22	35.185,97
10.00	557.512,20	33.594,10	4.027,95	6.952,26	30.869,80
11.00	595.134,28	29.804,21	4.012,59	6.520,18	27.296,62
12.00	628.951,06	26.620,23	3.999,70	6.157,20	24.482,73
13.00	659.570,98	24.050,33	3.989,30	5.884,23	22.175,40
Final	687.810,81				

Figura 89: Valores gerados pelo modelo referentes às emissões anuais de GEE .

Diversas outras informações podem ser obtidas, tais como curvas comparativas geradas pela inclusão ou exclusão de fontes ou grupos de fontes (Figura 90), perfis de emissão de fontes específicas (Figura 91) ou perfis de emissões de grupos de fontes (Figura 92).

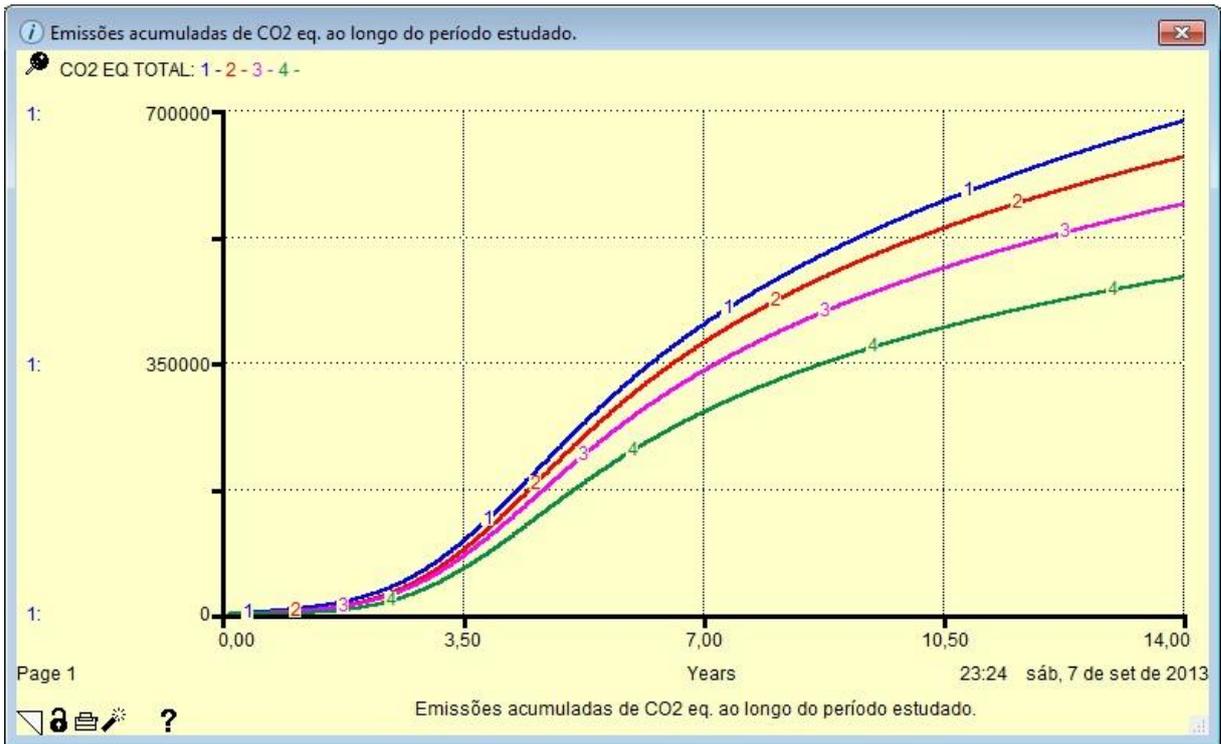


Figura 90: Curvas comparativas das emissões totais de CO2 eq.

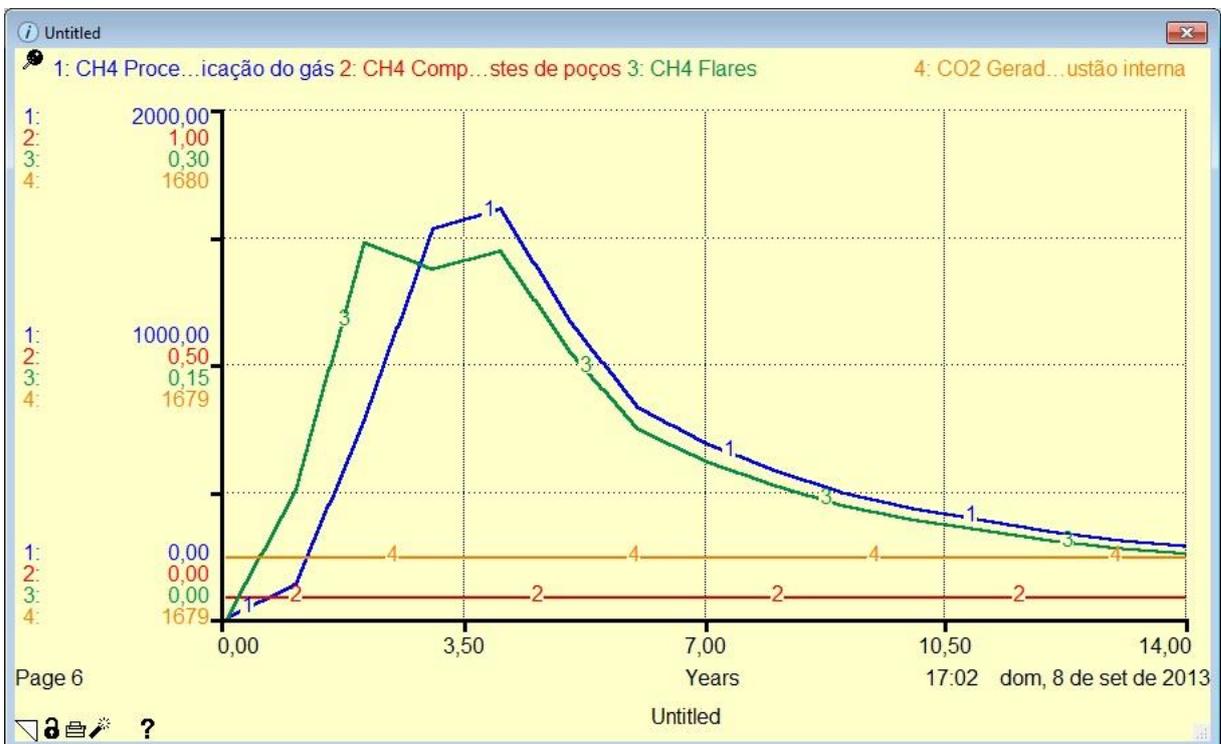


Figura 91: Perfis de emissão de fontes específicas.

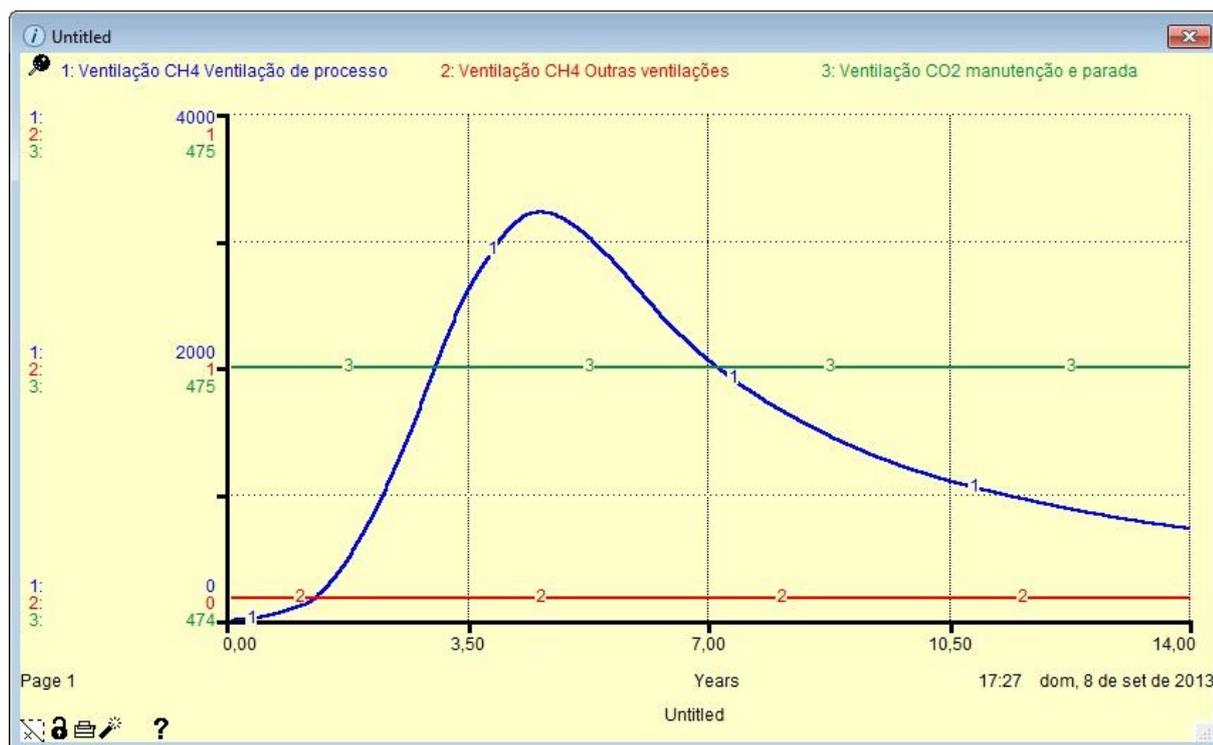


Figura 92: Perfis de emissões de grupos de fontes.

Tais informações permitem que o modelador disponha de um conjunto completo de informações que o habilitam a determinar quais ações adotar no intuito de mitigar as emissões e em que pontos da instalação tais ações deverão ser adotadas.

A partir dos valores obtidos pela simulação e pela observação da Tabela 21 podemos concluir que as emissões totais acumuladas em CO₂ eq. ao longo dos 14 anos da simulação ultrapassaram a 687×10^3 t CO₂ eq. Desse montante, o CH₄ participou com quase 92% das emissões totais em CO₂ eq., com participações anuais que oscilaram entre 76,56% e 95,56% à exceção do primeiro ano de produção, quando suas emissões limitaram-se à 48,68% do total de emissões. No que se refere às emissões por tipo de fonte, as fontes de ventilação contribuíram com mais de 83% das emissões totais em CO₂ eq., com participações anuais que oscilaram entre 72,63% e 85,85% à exceção do primeiro ano de produção, quando suas emissões limitaram-se à 53,40% do total de emissões.

Tabela 21: Perfil completo de emissões.

EMISSIONES EM CO ₂ EQ.									
ANO	TOTAL ACUMULADO	CH ₄ ANUAL		CO ₂ ANUAL		COMBUSTÃO ANUAL		VENTILAÇÃO ANUAL	
0	0,00	3.717,40	48,68%	3.918,63	51,32%	3.558,02	46,60%	4.078,01	53,40%
1	7.636,03	13.104,02	76,56%	4.011,67	23,44%	4.683,94	27,37%	12.431,76	72,63%
2	24.751,72	41.252,53	90,82%	4.170,09	9,18%	7.938,03	17,48%	37.484,59	82,52%
3	70.174,34	76.520,65	94,73%	4.258,04	5,27%	11.903,09	14,74%	68.875,60	85,26%
4	150.953,03	92.199,24	95,56%	4.285,51	4,44%	13.653,99	14,15%	82.830,76	85,85%
5	247.437,78	83.495,47	95,17%	4.237,22	4,83%	12.648,50	14,42%	75.084,19	85,58%
6	335.170,48	67.234,31	94,16%	4.166,69	5,84%	10.789,92	15,11%	60.611,08	84,89%
7	406.571,47	54.559,58	92,99%	4.113,69	7,01%	9.343,25	15,92%	49.330,02	84,08%
8	465.244,75	45.496,87	91,78%	4.076,40	8,22%	8.309,47	16,76%	41.263,80	83,24%
9	514.818,01	38.645,73	90,52%	4.048,46	9,48%	7.528,22	17,63%	35.165,97	82,37%
10	557.512,20	33.594,10	89,29%	4.027,95	10,71%	6.952,26	18,48%	30.669,80	81,52%
11	595.134,26	29.804,21	88,13%	4.012,59	11,87%	6.520,18	19,28%	27.296,62	80,72%
12	628.951,06	26.620,23	86,94%	3.999,70	13,06%	6.157,20	20,11%	24.462,73	79,89%
13	659.570,98	24.050,33	85,77%	3.989,30	14,23%	5.864,23	20,91%	22.175,40	79,09%
14	687.610,61	630.294,67	91,66%	57.315,94	8,34%	115.850,30	16,85%	571.760,33	83,15%
				687.610,61				687.610,61	

Essa visão claramente definida do comportamento das emissões ao longo do período simulado, sua distribuição por tipo de fonte, por fontes específicas ou grupos de fontes e pelo tipo de gás permite uma ampla melhoria na capacidade de tomada de decisões na geração ou mudanças de políticas no intuito de mitigar as emissões.

Esse é apenas um exemplo que demonstra o poder das informações geradas pelo modelo proposto.

Há dois interessantes aspectos a serem destacados no modelo.

Por um lado, o modelo ora apresentado não se limita a atender às exigências da “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA. Seu comportamento dinâmico permite não apenas estimar as emissões de GEE em um determinado momento no tempo, mas vai além, permitindo acompanhar o comportamento esperado das emissões ao longo do período da simulação. Tal característica permite ao operador da instalação cujas emissões estejam sendo modeladas um planejamento prévio de

suas manutenções ou mudanças de processo, de forma a atender a exigências internas ou normas ambientais que limitem suas emissões.

Por outro lado, o modelo foi desenvolvido de tal forma que cada específica fonte de emissões pode ser conectada ou desconectada do conjunto de emissões. Essa característica permite a realização de amplas variedades de estimativas, indo desde as emissões de uma única e específica fonte, passando pelas emissões totais de grupos de fontes, emissões de cada gás e obviamente, chegando às emissões totais.

O efeito conjunto dessas duas características confere ao modelo uma grande flexibilidade, permitindo ao modelador a manipulação de variáveis ou de conjuntos de variáveis de acordo com suas necessidades específicas.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

“

TENHA EM MENTE QUE TUDO QUE VOCÊ APRENDE NA ESCOLA É TRABALHO DE MUITAS GERAÇÕES. RECEBA ESSA HERANÇA, HONRE-A, ACRESCENTE A ELA E, UM DIA, FIELMENTE, DEPOSITE-A NAS MÃOS DE SEUS FILHOS

”

ALBERT EINSTEIN – FÍSICO
ALEMÃO – ☆ 1804 / † 1869

CAPÍTULO 10 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A proposta de desenvolver um modelo computacional para estimativas de emissões atmosféricas de GEE é um desafio bastante árduo e estimulante, tendo em vista a complexidade do tema. Diversos fatores relevantes devem ser levados em conta, tais como a escolha dentre os diferentes protocolos e metodologias disponíveis, a compreensão da complexidade das instalações de exploração e produção de petróleo e gás, os diversos graus de incerteza na estimativa dos fatores de emissão, dentre outros fatores que agregam dificuldades e incertezas na modelagem.

A utilização da Dinâmica de Sistemas na modelagem de inventários de emissões atmosféricas de Gases de Efeito Estufa (GEE) revela-se uma importante ferramenta para a elaboração de inventários de emissões, uma vez que sua capacidade de manipulação de cada variável isoladamente ou em grupos gera inúmeras informações de saída distintas, o que permite quantificar as emissões de cada específica fonte, identificando a importância de cada variável ou conjunto de variáveis.

Dessa forma, considerando cada fonte de emissões de GEE como uma variável, a definição da relevância de cada fonte no cômputo geral de emissões permite o direcionamento das atenções e recursos nos pontos específicos das instalações de exploração e produção de petróleo e gás mais relevantes em termos de emissões.

Por outro lado, o uso da modelagem dinâmica para a determinação das fontes mais relevantes dentre aquelas listadas no Compendium API possibilita uma melhor definição das estratégias de mitigação e seus respectivos custos. Isso ocorre na medida em que as simulações permitem a identificação da efetiva participação de cada fonte ou grupo de fontes no cômputo total, permitindo a exclusão daquelas cuja participação nas emissões possa ser considerada irrelevante.

O estágio de desenvolvimento em que se encontra o modelo já permite a geração de informações relevantes, a ponto de permitir a definição de políticas de gestão e manutenção das instalações que efetivamente contribuam para a diminuição das emissões.

No entanto, há que se reconhecer a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento do modelo, por meio da inclusão de diversos outros fatores não incluídos no modelo apresentado, tais como estequiometria dos hidrocarbonetos, incertezas referentes às abordagens para a determinação dos fatores de emissão e fatores de atividade, características dos equipamentos utilizados nas instalações de E&P e sua manutenção, dentre outras.

Assim sendo, considerando os elevados custos que quaisquer alterações nas instalações petrolíferas podem representar para as empresas, tais como instalação de filtros, troca de equipamentos, alterações nas rotinas de manutenções, a utilização da Dinâmica de Sistemas para a modelagem de emissões atmosféricas na área de E&P de petróleo e gás revela-se uma poderosa ferramenta de análise, planejamento e controle de custos.

O modelo proposto relaciona algumas das principais fontes de emissões de GEE no setor de E&P convencional segundo API (2009), permitindo estimar as emissões pelo volume total de emissões em CO₂ eq., pelo tipo de gás em seus próprios volumes de emissão e no correspondente volume em CO₂ eq., por grupo ou sub-grupo de fontes de emissão e mesmo pelas emissões específicas de cada fonte.

Seu desenvolvimento foi feito de forma a atender às exigências da “subpart W” do Regulamento CFR Part 98 da USEPA, a qual determina que instalações de E&P de petróleo e gás que emitam ao menos 25×10^3 t CO₂ eq / ano devem reportar suas estimativas das emissões anuais totais de GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq., as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e as emissões anuais individualizadas de cada GEE expressas em toneladas métricas de CO₂ eq. e discriminadas por tipo de fonte.

Dessa forma, é possível não apenas identificar o papel de cada uma das variáveis no volume total de emissões, bem como os efeitos obtidos por mudanças em cada uma delas individualmente ou em conjunto. A partir daí, quaisquer alterações a serem realizadas nas instalações passam a ser precedidas por uma estimativa prévia robusta, de forma a determinar o melhor custo-benefício entre investimentos e grau de mitigação.

Apesar de já suficiente para gerar informações relevantes e úteis na tomada de decisões para a formulação de políticas, o estágio de desenvolvimento em que se encontra o modelo pode ser considerado como uma fase ainda introdutória, por conta da forma simplificada que foi desenvolvido.

Dentre as metodologias disponíveis para cálculo de emissões, a utilização de Fatores de Emissão é a mais simples, mas em contrapartida, é aquela em que são verificadas as maiores incertezas. Durante o desenvolvimento do trabalho ficou bastante claro que apesar da simplicidade na utilização dos fatores de Emissão, a sua obtenção nem sempre se caracterizou como uma tarefa simples. Observou-se que em muitos casos ocorre uma grande diferença metodológica entre os diversos protocolos, fazendo com que além da incerteza inerente à obtenção dos fatores de Emissão, fosse observada uma incerteza adicional por conta das diferenças entre as informações apresentadas pelos distintos protocolos.

Outro aspecto que pode alterar o grau de precisão nas estimativas de emissões é a incerteza oriunda dos próprios métodos de mensuração utilizados para determinar a precisão dos Fatores de Emissão. A precisão do método de mensuração utilizado depende dos recursos tecnológicos disponíveis, da precisão desejada e dos custos envolvidos. Segundo API (2009), para a estimativa das emissões de CO₂, tal abordagem baseia-se no conteúdo médio de conteúdo de carbono e nas informações consistentes sobre a composição química dos hidrocarbonetos comerciais.

Embora a fórmula indicada por IPCC (1997) e API (2009) seja bastante simples, existem fontes de erro intrínsecas aos valores adotados para os Fatores de Emissão. Dessa forma, é importante considerar as condições padrão para conversão do gás de uma base de volume para uma base de massa, considerar as especificações de valor calorífico (HHV ou LHV), considerar as unidades utilizadas (unidades apresentadas no Sistema Internacional ou no Sistema Inglês) e por último as propriedades do combustível em termos de valores de aquecimento e conteúdo de carbono.

Dessa forma, observa-se que apesar de já se revelar como uma ferramenta válida e justificável que haja uma tendência de aprimoramento do modelo, com vistas a reduzir as fontes de erro inerentes à metodologia adotada.

Uma importante alteração que deverá ser avaliada e possivelmente incorporada ao modelo é a inclusão da estequiometria dos hidrocarbonetos como uma variável auxiliar. A composição química dos hidrocarbonetos é extremamente variável, de forma que se levarmos em consideração que os Fatores de Emissão disponíveis em literatura são baseados em conteúdo médio de carbono de hidrocarbonetos comerciais, em condições padrão de temperatura e pressão e em especificações de conteúdo calorífico, verificamos que as fontes de erro são extensas e tendem a se agregar. Assim sendo, a utilização de dados específicos dos hidrocarbonetos explotados pela instalação que estiver sendo modelada já será um grande avanço nos sentido de minimizar as incertezas.

Outra alteração que deverá ser avaliada é a substituição dos Fatores de Emissão por cálculos de Balanço de Massa para estimativas das emissões de CO₂ na queima de combustíveis e “flares” e para as emissões fugitivas e evaporativas do CH₄. Tal metodologia permitirá uma estimativa mais acurada e precisa das emissões. Todo esse procedimento deverá passar pelo “redesenho” do modelo, permitindo a inclusão de todas as fontes de emissões, de forma a efetivamente concluir por quais fontes de fato poderão ser deixadas de lado por conta de sua baixa relevância em relação ao volume total de emissões.

A inclusão de todas as fontes de emissões previstas por API (2009) em sua Tabela 2-1 implicará na necessidade de criação de um mecanismo interno ao modelo que distinga as fontes comuns às atividades de Exploração e Produção, bem como aquelas específicas de cada atividade. Além disso, permitirá estimar a exata participação de cada fonte no volume total de emissões, identificando os específicos pontos das instalações que exijam maior atenção dos operadores. Tais características darão ao modelo uma grande flexibilidade, na medida em que fontes específicas ou grupos de fontes poderão ser estudados individualmente ou por outro lado poderão ser excluídos, uma vez que suas emissões sejam consideradas irrelevantes diante do volume global.

Por último, uma importante etapa no desenvolvimento do modelo é a inclusão das alternativas de mitigação às emissões, baseadas no perfil de emissões e na relevância de cada fonte. Tais parâmetros devem ser os elementos balizadores para a escolha de metodologias de mitigação, as quais necessariamente levarão em conta para sua escolha os aspectos financeiro, tecnológico e ambiental.

Uma vez concluída a reavaliação do estágio atual e o desenvolvimento dessa nova versão do modelo, sua utilização pretende fazer com que os inventários deixem de ser meras ferramentas contabilísticas, passando a ser efetivamente ferramentas de gestão ambiental, que permitam a compatibilização entre redução de emissões e viabilidade em termos de custos.

Além de todas as propostas apresentadas, o desenvolvimento do trabalho implica na inclusão de mecanismos de avaliação das diversas opções de mitigação (GTL, CCS e reinjeção), aquelas que melhor se adaptem, caso a caso, às características específicas das instalações e empreendimentos, avaliando seus respectivos custos e viabilidade sob a ótica financeira, tecnológica e ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

“

PORQUE VOS PREOCUPAIS COM O VESTUÁRIO? OLHAI COMO CRESCEM OS LÍRIOS DO CAMPO! NÃO TRABALHAM NEM FIAM. POIS EU VOS DIGO: NEM SALOMÃO, EM TODA A SUA MAGNIFICÊNCIA, SE VESTIU COMO QUALQUER DELES. ORA, SE DEUS VESTE ASSIM A ERVA DO CAMPO, QUE HOJE EXISTE E AMANHÃ É LANÇADA AO FOGO, COMO NÃO FARÁ MUITO MAIS POR VÓS, HOMENS DE POUCA FÉ?

”

JESUS CRISTO – SALVADOR DA
HUMANIDADE

☆8-4 A.C / † 29-36 D.C.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, D. T.; SHONNARD, D. R. 2001. **Green engineering environmentally conscious design of chemical processes**. Prentice Hall PTR. Upper Saddle River, NJ 07458. ISBN 0-13-061908-6. 2001.

ALMEIDA, A. S.; ROCHA, P. S. M. V.; LIMA, S. T. C.; PINTO, A. C. C.; BRANCO, C. C. M.; SALOMÃO, M. C. **A study on the potential for CCGS in the Pre-salt cluster of Santos Basin: the Tupi pilot application**. Rio Oil & Gas Expo and Conference. 2010.

ANCHEYTA, J. 2011. **Modeling and simulation of catalytic reactors for petroleum refining**. First Edition. © 2011 John Wiley & Sons, Inc. Published 2011 by John Wiley & Sons, Inc.

ANDRADE, A. L. 1997. **Pensamento Sistêmico: Um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional**. REAd - Edição 05 Vol. 3 nº 1, mai-jun 1997.

ANP 2010. **Exame e avaliação de dez descobertas e prospectos selecionadas no play do pré-sal em águas profundas na Bacia de Santos, Brasil**. Gaffney, Cline & Associates. CG/JW/RLG/C1820.00/GCABA.1914. 15 de setembro de 2010.

API 2001. **Risk-based methodologies for evaluating petroleum hydrocarbon impacts at oil and natural gas E&P sites**. Regulatory and Scientific Affairs Department. API PUBLICATION NUMBER 4709. February 2001.

API 2009. **Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for the Oil and Gas Industry**. Washington. 807 p.

ARRHENIUS, S. **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, April 1896, pages 237-276.

ARRHENIUS, S. **Worlds in the making the evolution of the universe**. Harper & Brothers Publishers, 1908.

AVILA, A. M. H. **Uma síntese do quarto relatório do IPCC**. Revista Multiciência. Campinas. Edição nº 8 . Mudanças Climáticas. Maio 2007.

BASTOS, A. A. P. (2003). Dissertação: **A Dinâmica de Sistemas e a compreensão de estruturas de negócios**. Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Zwicker. São Paulo, 2003. 135 p. Dissertação (Mestrado em Administração). Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo. Recuperado em 01 de junho de 2013, de <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/12/12139/tde-10112003-181900>.

BERTALANFFY, L. V. **The theory of open systems in physics and Biology**. Science. January 13, 1950, Vol. 111.

BERTALANFFY, L. V. (1968). **General systems theory: Foundations, development, applications (Revised Edition ed.)**. New York: George Braziller Publishing.

BODEN, T.A., G. MARLAND,; R.J. ANDRES. 2011. **Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO₂ Emissions**. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi10.3334/CDIAC/00001_V2011

BOUCHER, O.; REDDY, M. S. **Climate trade-off between black carbon and carbon dioxide emissions**. Energy Policy 36 (2008) 193–200.

BP – **Sustainability Review 2012 - Building a stronger, safer BP**. 2012.

BP – **HSE charting tool – greenhouse-gas**. Recuperado em 2013-04-18, de <http://www.bp.com/sectionbodycopy.do?categoryId=9048973&contentId=7083700#/greenhouse-gas>. 2013

BRASIL. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Ministério da Ciência e Tecnologia – Coordenação-Geral de Mudanças Globais do Clima – CGMC. Brasília, 2010.

BROOKS, B. T. **The origin of petroleum in the light of recent research**. The Ohio Journal of Science. VOL. XLVIII JULY, 1948 No. 4.

CALLENDAR, G. S. **The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature**. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. John Wiley & Sons, Ltd. Pages 223 - 240. 1938.

CAPP – CANADIAN ASSOCIATION OF PETROLEUM PRODUCERS. 2003. **Guide: Calculating Greenhouse Gas Emissions**. April 2003. 61 p

CHAN, W. N. Dissertação: **Quantificação e Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa em uma Refinaria de Petróleo**. Orientador: Prof. Dr. Arnaldo César da Silva Walter. Campinas, 2006. 156 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos). Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica - Comissão de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. 2006.

CHEVRON 2012. **Additional Information on Chevron's Greenhouse Gas Management Activities**. March 2012.

DEFRA 2011. **2011 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting**. Department of Energy and Climate Change (DECC) and the Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra). Version 1.2, updated august 19, 2011.

DORBIAN, C. S.; WOLFE, P. J.; WAITZ, I. A. 2011. **Estimating the climate and air quality benefits of aviation fuel and emissions reductions**. Atmospheric Environment 45 (2011) 2750 – 2759.

ELETROBRAS. **Inventário de emissões de gases de efeito estufa - ano base 2011**. 2012

EMBRAPA. **Uso do Nitrogênio na Agricultura e suas Implicações na Emissão do Gás de Efeito Estufa Óxido Nitroso (N₂O)**. ISSN 1678-9644 - dezembro, 2009.

EPI. Earth Policy Institute from National Aeronautics and Space Administration, Goddard Institute for Space Studies, “**Global Land-Ocean Temperature Index in 0.01 Degrees Celsius**”, at data.giss.nasa.gov/gistemp/taledata/GLB.Ts+dSST.txt, updated January 2012.

EXXON MOBIL. **Greenhouse Gas Emissions (Normalized). Net equity, CO₂-equivalent emissions (metric tons of throughput or production)**. Acessado em 19 de abril de 2013. 2013.

FAO/PNUD/PNUMA. **Estrategia del Programa ONU-REDD 2011-2015**. Programa ONU-REDD. 2011.

FEARNSIDE, P. M. **Hidrelétricas como “fábricas de metano”: o papel dos reservatórios em áreas de floresta tropical na emissão de gases de efeito estufa**. *Oecol. Bras.*, 12 (1): 100-115, 2008.

FERNANDES, A. C. Tese: **Scorecard Dinâmico: em direção à integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard**. Orientador: Rogério de Aragão Bastos do Valle, D. Sc. Rio de Janeiro, 2003. 320 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). COPPE/UFRJ, 2003.

FERNÁNDEZ, C. G. **La evidencia del cambio climático. La necesidad de las políticas económicas preventivas**. *Nómadas* [en línea] 2010, [citado 2012-01-27]. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=18112179002>. ISSN 1578-6730. 2010.

FERREIRA, T. F. Dissertação: **Emprego de *Yarrowia lipolytica* na degradação de óleo cru**. Orientadores: Maria Alice Zarur Coelho, D.Sc. e Maria Helena Miguez da

Rocha-Leão, D.Sc. Rio de Janeiro, 2009. 138 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. 2009.

FIGUEIREDO, T.; RIBEIRO, L. F.; RIBEIRO, A. C.; FERNANDES, L. F. **Clima e Recursos Naturais: Conferências de Homenagem ao Prof. Doutor Dionísio Gonçalves**. Instituto Politécnico de Bragança. ISBN: 978-972-745-108-1. 2010.

FLEMING, J. R. **Historical perspectives on climate change**. Oxford University Press, Inc. ISBN: 0-19-507870-5. 1998.

FOLADORI, G. **El papel de la ciencia en la moderna consciência ambiental – El caso de los desastres naturales**. Revista Saúde e Ambiente / Health and Environment Journal, v. 6, n. 1, jun. 2005.

FOLLAND, C. K.; KARL, T. R.; CHRISTY, J. R.; CLARKE, R. A.; GRUZA, G. V.; JOUZEL, J.; MANN, M. E.; OERLEMANS, J.; SALINGER, M. J.; WANG, S. W., 2001: **Observed Climate Variability and Change**. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; BERNTSEN, T.; BETTS, R.; FAHEY, D. W.; HAYWOOD, J.; LEAN, J.; LOWE, D. C.; MYHRE, G.; NGANGA, J.; PRINN, R.; RAGA, G.; SCHULZ M.; VAN DORLAND R., 2007: **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing**. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

FOURIER, J. B. J. **Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires**. Annales de Chimie et de Physique, Vol. 27, pp. 136–167. 1824.

FOURIER, J. B. J. **Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planétaires**. Memoires de l'Academie Royale des Sciences, Vol. 7, pp. 569-604. 1827.

FTHENAKIS, V.; CLARK, D. O.; MOALEM, M.; CHANDLER, P.; RIDGEWAY R. G.; HULBERT, F. E.; COOPER, D. B.; MAROULIS, P. J. **Life-Cycle Nitrogen Trifluoride Emissions from Photovoltaics**. Environ. Sci. Technol. 2010,44,8750–8757. 2010.

FUGLESTVEDT, J. S.; BERNTSEN, T. K.; GODAL, O.; SAUSEN, R.; SHINE, K. P.; SKODVIN, T. **Metrics of Climate Change: assessing radiative forcing and emissions indices**. Climatic Change 58: 267–331, 2003.

GCA. **Exame e Avaliação de Dez Descobertas e Prospectos Seleccionados no Play do Pré-sal em Águas Profundas na Bacia de Santos, Brasil**. CG/JW/RLG/C1820.00/GCABA.1914. ANP. 15 de Setembro de 2010.

GHG PROTOCOL. **Inventário das emissões de gases de efeito estufa. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A. – 2008.**

_____ **Inventário das emissões de gases de efeito estufa. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A. – 2009.**

_____ 2009a. **Sistema de Produção e Escoamento de Óleo e Gás Natural nos Módulos 3 (P-55) e 4 (P-62) do Campo Roncador, Bacia de Campos**. Estudo de Impacto Ambiental - EIA - Revisão 00 - 09/2009.

_____ **Inventário das emissões de gases de efeito estufa. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A. – 2010.**

GLASBY, G. P. **Abiogenic origin of hydrocarbons: an historical overview.** RESOURCE GEOLOGY, vol. 56, no. 1, 85–98, 2006.

GODAL, O. **The IPCC's assessment of multidisciplinary issues: the case of greenhouse gas indices.** Climatic Change 58: 243–249, 2003.

GOLDEN, B.; AIGUIER, M.; KROB, D. **Modeling of complex systems II: a minimalist and unified semantics for heterogeneous integrated systems.** Applied Mathematics and Computation 218 (2012) 8039–8055. 2012.

GÓMEZ, L. E.; GONZALEZ, R. C. L.; EZPELETA, A. M. **La cuestion del cambio climatico, realidad y noticia. Una aproximacion desde el territorio galego.** Revista de Geografia. vol. XXXII-XXXIII, 1998-99, pp. 67-78.

GUO, B.; GHALAMBOR, A. **Natural Gas Engineering Handbook.** Gulf Publishing Company. 2005.

HENRY, J. T. **The early and later history of petroleum, with authentic facts in regard to its development in western Pennsylvania.** PHILADELPHIA: JAS. B. Rodgers CO., Printers, 52 & 54 North Sixth St. 1873.

THE EARLY AND LATER WITH AUTHENTIC FACTS IN REGARD TO ITS DEVELOPMENT IN WESTERN PENNSYLVANIA,

HERZOG, T. **World Greenhouse Gas Emissions in 2005.** WRI Working Paper. World Resources Institute. 2009.

HONG, Y. Tese: **A dynamic approach for evaluating the sustainability performance of infrastructure projects.** The Hong Kong Polytechnic University Department of Building and Real Estate. Hong Kong, 2008. 407 p. Tese (Doctorate in Philosophy). 2008.

HÖÖK, M.; BARDI, U.; FENG, L.; PANG, X. **Development of oil formation theories and their importance for peak oil.** Marine and Petroleum Geology 27 (2010) 1995 – 2004. 2010.

INGAA. **Greenhouse gas emission estimation guidelines for natural gas transmission and storage. Volume 1 – GHG emission estimation methodologies and procedures.** Revision 2. September 28, 2005.

IPCC 1990. **Climate Change The IPCC Scientific Assessment.** Report Prepared for IPCC by Working Group 1. Edited by J. T. HOUGHTON, G. J. JENKINS and J. J. EPHRAUMS. Cambridge University Press.

_____ 1996. **Climate Change 1995. The Science of Climate Change.** Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell. Cambridge University Press.

_____ 2000. **Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Activities.** Disponível em http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gp/bgp/2_6_Fugitive_Emissions_from_Oil_and_Natural_Gas.pdf. Acesso em 16.07.2013.

_____ 2001. **Climate Change 2001: The Scientific Basis.** Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp

_____ 2006. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan.

_____ 2007. **Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de Trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo**

Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.

IPEA. **O acordo de Copenhague e as decisões de Cancun no contexto da Convenção do Clima**. Comunicados do IPEA nº 109. 29 de agosto de 2011.

IPIECA. **Directrices de la industria petrolera para la notificación de emisiones de gases de efecto invernadero**. Diciembre 2003.

_____. **A Guide to the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 4th Edition, May 2006.

_____. **Petroleum industry guidelines for reporting greenhouse gas emissions**. Second edition. Climate change 2011.

JORDAN, T. H. **Structural geology of the Earth's interior**. Proc. Natl. Acad. Sci. USA. Vol. 76, No. 9, pp. 4192-4200, September 1979.

JOUZEL, J.; MASSON-DELMOTTE, V.; CATTANI, O.; DREYFUS, O. G.; FALOURD, S.; HOFFMANN, G.; MINSTER, B.; NOUET,; BARNOLA, J. J. M.; CHAPPELLAZ, J.; FISCHER, H.; GALLET, J. C.; JOHNSEN, S.; LEUENBERGER, M.; LOULERGUE, L.; LUETHI, D.; OERTER, H.; PARRENIN, F.; RAISBECK, G.; RAYNAUD, D.; SCHILT,A.; SCHWANDER, J; SELMO, E.; SOUCHEZ, R.; SPAHNI, R.; STAUFFER, B.; STEFFENSEN, J. P.; STENNI, B.; STOCKER, T. F.; TISON, J. L.; WERNER, M.; WOLFF, E. W. **Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years**. Science 317, 793 (2007). DOI: 10.1126/ science. 1141038. August 2007.

KAI, F. M.; TYLER, S. C.; RANDERSON, J. T.; BLAKE, D. R. **Reduced methane growth rate explained by decreased Northern Hemisphere microbial sources**. Nature 476, doi:10.1038/nature10259. August 2011.

KASPER, H. Dissertação: **O processo de pensamento sistêmico: um estudo das principais abordagens a partir de um quadro de referência proposto**.

Orientador: Luís Henrique Rodrigues, PhD. Porto Alegre, 2000. 308 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia – PPGEP – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2000

KEELING, C. D. **The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere**. Scripps Institution of Oceanography, University of California. Tellus Volume 12, number 2. June 1960.

KEELING, C. D.; PIPER, S. C.; BACASTOW, R. B.; WAHLEN, M.; WHORF, T. P.; HEIMANN, M.; MEIJER H. A. **Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ exchange with the terrestrial biosphere and oceans from 1978 to 2000: observations and carbon cycle implications**, pages 83-113, in "A History of Atmospheric CO₂ and its effects on Plants, Animals, and Ecosystems", editors, Ehleringer, J.R., T. E. Cerling, M. D. Dearing, Springer Verlag, New York, 2005.

KNOHL, A.; VELDKAMP, E. **Indirect feedbacks to rising CO₂**. Nature 475, 177–178. doi:10.1038/475177a. July 2011.

KOLESNIKOV, A.; KUTCHEROV, V.; GONCHAROV, A. F. **Methane-derived hydrocarbons produced under upper-mantle conditions**. Nature Geoscience 2, 566 - 570 (2009) Published online: 26 July 2009 | doi:10.1038/ngeo591.

KURTZ DOS SANTOS, A. C., THIELO, M. R.; KLEER, A. A. **Students modelling environmental issues**. Journal of Computer Assisted Learning, Vol. 13, Nº 1, P 35-47, March, 1997.

KUTCHEROV, V. G.; KRAYUSHKIN, V. A. **Deep-seated abiogenic origin of petroleum: from geological assessment to physical theory**. Rev. Geophys., 48, RG1001. doi:10.1029/2008RG000270. 2010.

LANE, D. C. (2007). **The power of the bond between cause and effect: Jay Wright Forrester and the field of system dynamics**. Syst. Dyn. Rev., 23: 95–118. doi: 10.1002/sdr.370.

LANE, D. C.; STERMAN, J. D. (2011). **Jay Wright Forrester. Chapter 20 in Profiles in Operations Research: Pioneers and Innovators.** S. Gass and A. Assad (eds.). New York, Springer: 363-386.

LASHOF, D. A.; AHUJA, D. R. **Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming.** Nature 344, 529 - 531 (05 April 1990). doi:10.1038/344529a0.

LESSA, J. H. P. **Análise técnico-econômica do processo BTL (Biomass-to-liquid) pela síntese Fischer-Tropsch no Brasil.** Programa EQ-ANP – Processamento, gestão e meio ambiente na indústria do petróleo e gás natural. UFRJ/EQ, 2008.

LIMA, P. C. R. **O pré-sal e o aquecimento global.** Biblioteca digital da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação. Dezembro de 2009.

LOPES, J. P. Dissertação: **Estimativas do grau API e viscosidade dos petróleos durante a etapa de perfuração de poços na Bacia de Campos a partir de indícios de óleos extraídos de amostras de calhas e testemunhos.** Orientadores: Luiz Antonio Freitas Trindade e Luiz Landau. Rio de Janeiro, 2002. 150 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil). COPPE/UFRJ/CENPES/PETROBRAS. 2002.

MAGACHO, L. A. M. Dissertação: **Parque de inovação de serviços para as pessoas - metodologias para o planejamento.** Orientadora: Profa. Maria Ângela Campelo de Melo. Rio de Janeiro, 2010. 200 p. Dissertação (Mestrado em Administração de Empresas). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Administração, 2010.

MARIA, A. **Introduction to Modeling and Simulation.** Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. 7-10 December 1997, Renaissance Waverly Hotel, Atlanta, GA. Ed. David H. Withers (General Chair), Barry L. Nelson (Program Chair), Sigrún Andradóttir (Proceedings Editor) and Kevin J. Healy (Associate Proceedings Editor). 1997.

MARLAND, G.; ROTTY, R. M. **Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950-1982**. *Tellus* (1984), 36B, 232-261.

MASSAMBANI, O.; AMBRIZZI, T. **O clima da Terra: processos, mudanças e impactos**. Departamento de Ciências Atmosféricas – IAG-USP. ACA 0415 – 2008.

MCT. **Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa – Relatórios de referência. Emissões fugitivas de gases de efeito estufa na indústria de petróleo e gás natural**. Ministério da Ciência e Tecnologia – 2010.

MEDINA-ELIZALDE, M; LEA, D. W. **The Mid-Pleistocene Transition in the Tropical Pacific**. *Science* 310, 1009 (2005): doi: 10.1126/science.1115933.

MELLO, B. A. **Simulação de Sistemas**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Departamento de Engenharias e Ciência da Computação. 2007.

MELLO, S. F. Dissertação: **Estudo sobre simulação composicional de reservatórios de petróleo com Injeção de CO₂**. Orientador: Prof. Dr. Denis José Schiozer. Campinas, 2011. 250 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Petróleo). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências. 2011.

MENDELEEV, D. **L'origine Du petrole**. *La Revue Scientifique de la France et de l'étranger. Revue des cours scientifiques (2^e série). 7^e année, numéro 18, 3 novembre 1877.*

MENEZES FILHO, A. P. Tese: **Não-extensividade termodinâmica, invariância discreta de escala e elasto-plasticidade: estudo numérico de um modelo geomecânico auto-organizado criticamente**. Orientador: Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr. Rio de Janeiro, 2003. 189 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. 2003.

MISOCZKY, M. C. A. **Da abordagem de sistemas abertos à complexidade: algumas reflexões sobre seus limites para compreender processos de interação social.** Cadernos EBAPE.BR. Fundação Getúlio Vargas. Volume I – Número 1 – Agosto 2003.

MME. **Pré-sal – perguntas e respostas. Perguntas mais frequentes sobre o Marco Regulatório do pré-sal.** 2009.

MÜHLEN, C. V. Tese: **Caracterização química de compostos nitrogenados do petróleo brasileiro e de óleos voláteis de plantas brasileiras usando cromatografia gasosa bidimensional abrangente.** Orientadores: Profa. Dra. Elina Bastos Caramão, Profa. Dra. Cláudia Alcaraz Zini e Prof. Dr. Philip John Marriot. Porto Alegre, 2007. 210 p. Tese (Doutorado em Química). UFRS, Instituto de Química, Programa de pós-graduação em Química. 2007.

MUKHOPADHYAY, P. K.; MOSSMAN, D. J.; EHRMAN, J. M. **Review on the origin of oil and hydrocarbon gases within our solar system – biogenic and abiogenic?** SPIE (2010) Volume: 7819, Pages: 781901 – 781905.

MULTILATERAL FUND. **Creating a real change for the environment.** Secretariat of the Multilateral Fund for the Implementation of the Montreal Protocol. 2007

MUSSE, J. O. Tese: **Backcasting e Dinâmica de Sistemas como instrumentos para criar conhecimento em sistemas complexos, visando à tomada de decisão.** Orientador: Prof. Dr. Gregório Jean Varvakis Rados. Florianópolis, 2010. 387 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento). Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia e Gestão do Conhecimento. 2010.

MYHRE, G.; HIGHWOOD, E. J.; SHINE, K. P. **New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases.** Geophysical Research Letters, Vol. 25, No 14, pages 2715-2718, July 15, 1998.

NAKANO, C. M. F.; PINTO, A. C. C.; MARCUSSO, J. L.; MINAMI, K. **Pre-salt Santos Basin – Extended well test and production pilot in the Tupi área: the planning phase.** Petroleum Abstracts. Volume 49, Number 30, July 25, 2009.

NAS. National Academy of Sciences. **Energy and Climate: Studies in Geophysics**. Geophysics Study Committee, Geophysics Research Board, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, National Research Council. ISBN: 0-309-11235-4, 176 pages, 8 1/2x11, (1977). Downloaded from <http://www.nap.edu/catalog/12024.html>.

NIST 2008. **Guide for the use of the International system of Units (SI)**. National Institute of Standards and Technology. U. S. Department of Commerce. NIST Special Publication 811. 2008 Edition.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **The NOAA annual greenhouse gas index (AGGI)**. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. Updated summer 2012.

NOAA/ESRL. **Combined Nitrous Oxide data from the NOAA/ESRL global monitoring division**. Obtido em ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/hats/n2o/combined/HATS_global_N2O.txt, acessado em 26/05/2012.

OLIVEIRA, E. C. Tese: **Estudo dos compostos nitrogenados em frações de petróleo**. Orientadoras: Prof^a Dr^a Maria Goreti Rodrigues Vale e Prof^a Dr^a Elina Bastos Caramão. Porto Alegre, 2004. 136 p. Tese (Doutorado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, Programa de Pós-graduação em Química.

OLIVEIRA, M. J. Dissertação: **Incertezas associadas à temperatura do ar no contexto das mudanças climáticas: determinação das causas e efeitos de heterogeneidades e discussão das implicações práticas**. Orientador: Prof. Dr. Francisco A. S. Vecchia. São Carlos, 2010. 456 p. Dissertação (Mestrado em Ciências). Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

ONÇA, D. S. **Os primórdios da noção de aquecimento global**. Anais do IX Seminário de Pós-Graduação em Geografia da UNESP Rio Claro, 3 a 5 de novembro de 2009. ISBN: 978-85-88454-19-4.

O'NEILL, B. C. **The jury is still out on global warming potentials**. Climatic Change 44: 427–443, 2000.

OPDAL, O. A., SKREIBERG, O. **Production of synthetic biodiesel via Fischer-Tropsch synthesis**. Department of Energy & Process engineering. Faculty of Engineering Science and Technology. Norwegian University of Science and Technology. Norway, 2006.

PECKHAM, S. F. **The genesis of bitumens, as related to chemical geology**. Proceedings of the American Philosophical Society, Vol. 37, No. 157 (Jan., 1898), pp. 108-139.

PEDROZO, M. F. M.; BARBOSA, E. M.; CORSEUIL, H. X.; SCHNEIDER, M. R.; LINHARES, M. M. **Ecotoxicologia e avaliação de risco do petróleo**. Centro de Recursos Ambientais, 2002. 246 p.; 15 x 21cm. - (Cadernos de referência ambiental; v. 12) ISBN 85-88595-11-7

PETROBRAS. **Gestão de emissões atmosféricas – Relatório de desempenho**. 2005.

_____. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa**. Programa Brasileiro GHG Protocol. 2009.

_____. **Sistema de Produção e escoamento de Óleo e Gás Natural nos Módulos 3 (P-55) e 4 (P-62) do Campo de Roncador, Bacia de Campos**. Estudo de Impacto Ambiental – EIA. Revisão 00. Setembro de 2009. 2009a.

PITTOCK, A. B. **Climate change : the science, impacts and solutions**. CSIRO Publishing, ISBN 978-1-84407-786-1, 2009.

PLAZA, C. M. C. A.; SANTOS, N. **Certificados de emissões reduzidas e o mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL): socialização dos prejuízos e privatização dos lucros**. Revista Científica Internacional. ISSN 1679-9844. Ano 2, nº 4, janeiro de 2009.

PNUMA. **Manual del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la Capa de Ozono**. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Secretaria del Ozono. ISBN 978-92-807-2770-8. Séptma Edición (2006).

PNUMA. **Relatório sobre o déficit de emissões 2012**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. 2012.

POVOLERI, F. B. Dissertação: **Modelagem e simulação da formação de hidratos de metano: um estudo do equilíbrio termodinâmico sólido-líquido-vapor**. Orientadores: Prof. Dr. Luiz Nelio Henderson Guedes de Oliveira e Prof. Dr. Gustavo Mendes Platt. Nova Friburgo, 2007. 91 p. Dissertação (Mestrado em Modelagem). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico.

PRATHER, M. J.; HSU, J. **NF₃, the greenhouse gas missing from Kyoto**. Geophysical Research Letters, Vol. 35, L12810, doi:10.1029/2008GL034542, 2008.

PRETO, S. C. S.; FIGUEIREDO, L. F. G. **Systemic thinking as a tool of management organizational design group in production solidary economical**. Projética Revista Científica de Design. Londrina. V.3, N.1, Julho 2012.

PSI 1990. **Pipeline Systems Incorporated. Annual Methane Emissions Estimate of the Natural Gas Systems in the United States, Phase 2**. For Radian Corporation, September 1990.

RAMASWAMY, V.; BOUCHER, O.; HAIGH, J.; HAUGLUSTAINE, D.; HAYWOOD, J.; MYHRE, G.; NAKAJIMA, T.; SHI, G. Y.; SOLOMON, S. **2001: Radiative Forcing of Climate Change**. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

RITTER, K.; LEV-ON, M; SHIRES, T. **Development of a Consistent Methodology for Estimating Greenhouse Gas Emissions from Oil and Gas Industry**

Operations, Presented at the 11th Emissions Inventory Conference of the U.S. Environmental Protection Agency, Atlanta, GA, April 2002.

ROSA, L. P.; SCHAEFFER, R. **Global warming potentials. The case of emissions from dams**. Energy Policy, Vol. 23. No. 2. pp. 149-158. 1995.

RUDAKOV, G. **Recent developments in the theory of the non-biogenic origin of petroleum**. Chem. Geol., 2 (1967) 179-185.

RUDDIMAN, W. F. **The antropogenic greenhouse era began thousands of years ago**. Climatic Change 61: 261–293, 2003.

SACHS, J. P.; ANDERSON, R. F.; LEHMAN, S. J. **Glacial surface temperatures of the southeast Atlantic Ocean**. Science 293, 2077 (2001); doi: 10.1126/science.1063584.

SANNINO, F. A. Dissertação: **A Dinâmica em um Projeto de Tecnologia de Grande Porte**. Orientador: Silvio Hamacher. Rio de Janeiro, 2006. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). PUC, Departamento de Engenharia Industrial, 2006.

SANTOS, M. P. **Introdução à Simulação Discreta**. Departamento de Matemática Aplicada. Instituto de matemática e Estatística. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 1999.

SANTOS, A. C. K.; CHO, Y.; ARAUJO, I. S.; GONÇALVES, G. P. **Algumas possibilidades de utilização dos princípios de sistemas de Forrester em tópicos de Física, através da ferramenta de modelagem quantitativa STELLA**. Cad. Cat. Ens. Fís., v. 17, n. 1: p. 81-95,abr. 2000.

SARASWAT, R.; NIGAM, R.; WELDEAB, S.; MACKENSEN, A.; NAIDU, P. D. **A first look at past sea surface temperatures in the equatorial Indian Ocean from Mg/Ca in foraminifera**. Geophysical Research Letters, Vol. 32, L24605, doi:10.1029/2005GL024093, 2005.

SCHMALL, V. H. Dissertação: **Subsídios para uma sistemática de verificação de inventário de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na indústria do petróleo**. Orientador: Prof. Gilson Brito Alves Lima, D.Sc. Niterói, 2008. 114 p. Dissertação (Mestrado em Gestão do Meio Ambiente). Universidade Federal Fluminense, 2008.

SHELL. **Royal Dutch SHELL PLC Sustainability Report 2010**. 2010.

_____. **Royal Dutch SHELL PLC Sustainability Report 2011**. 2011.

_____. **Royal Dutch SHELL PLC Sustainability Report 2012**. 2012.

SHINE, K. P. **The global warming potential - the need for an interdisciplinary retrieval**. *Climatic Change* (2009) 96:467–472 DOI 10.1007/s10584-009-9647-6.

SHINE, K. P.; FUGLESTVEDT, J. S.; HAILEMARIAM, K.; STUBER N. **Alternatives to the global warming potential for comparing climate impacts of emissions of greenhouse gases**. *Climatic Change* (2005) 68: 281–302.

SHINE, K. P.; BERNSTEN, T. K.,; FUGLESTVEDT, J. S.; SKEIE, R. B.; STUBER, N. **Comparing the climate effect of emissions of short- and long-lived climate agents**. *Phil. Trans. R. Soc. A* 2007 365, 1903-1914. doi: 10.1098/rsta.2007.2050.

SILVA, L. C.; **Verificação, validação e experimentação com modelos de simulação**. UFES – Universidade Federal do Espírito Santo. Departamento de Engenharia Rural. Boletim Técnico: MS: 03/06 em 19/06/2006.

SILVA, D. H. **Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum e diferenças fundamentais**. *Rev. bras. polít. int.*, Brasília, v. 52, n. 2, Dec. 2009 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-73292009000200009&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 25 de Janeiro de 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-73292009000200009>.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3ª edição revisada e atualizada. UFSC/PPGEP/LED. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Laboratório de Ensino a Distância. 2001.

SIMONETTO, E. O.; LÖBLER, M. L. **Simulation based on system dynamics to evaluate scenarios about the generation and disposal of municipal solid waste**. African Journal of Business Management Vol. 6(50), pp. 11976-11985, 19 December, 2012.

SKODVIN, T.; FUGLESTVEDT, J. S. **A comprehensive approach to climate change: political and scientific considerations**. Ambio Vol. 26 No. 6, Sept. 1997.

SMAC/COPPE. **Plano de ação para redução de emissões de gases de efeito estufa da Cidade do Rio de Janeiro**. Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro. Secretaria Extraordinária de Desenvolvimento. Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos. Nº 20110302. Março – 2011.

SMITH, J. B. **A Technical Report on Complex Systems**. Department of Computing Sciences Villanova, University Villanova, Pennsylvania, 2002. U.S.A.

SMITH, S. J.; WIGLEY, T. M. L. Global warming potentials: 1. **Climatic implications of emissions reductions**. Climatic Change44: 445–457, 2000.

SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; ALLEY, R. B.; BERNTSEN, T.; BINDOFF, N. L.; CHEN, Z.; CHIDTHAISONG, A.; GREGORY, J. M.; HEGERL, G. C.; HEIMANN, M.; HEWITSON, B.; HOSKINS, B. J.; JOOS, F.; JOUZEL, J.; KATTSOV, V.; LOHMANN, U.; MATSUNO, T.; MOLINA, M.; NICHOLLS, N.; OVERPECK, J.; RAGA, G.; RAMASWAMY, V.; REN, J.; RUSTICUCCI, M.; SOMERVILLE, R.; STOCKER, T. F.; WHETTON, P.; WOOD, R. A.; WRATT, D. **2007: Technical Summary**. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.

Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

SPANU, L.; DONADIO, D.; HOHL, D.; SCHWEGLER, E.; GALLI G. **Stability of hydrocarbons at deep Earth pressures and temperatures**. PNAS. April 26, 2011. Vol. 108, no. 17, 6843–6846.

SPEIGHT, J. G. **The chemistry and technology of petroleum**. CRC Press. ISBN 13:978-0-8493-9067-8. 2007.

STERN, N. **The Economics of Climate Change. The Stern Review**. HM Treasury, London. Cambridge University Press. ISBN: 9780521700801. 712 pages. 2006.

STOTT, L.; CANNARIATO, K.; THUNELL, R.; HAUG, G. H.; KOUTAVAS, A.; LUND S. **Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch**. Nature Vol. 431. September 2004.

STRADIOTO, D. A. Dissertação: **Análise energética e exergética da cadeia do gás natural líquido e a integração do processo de regasificação com ciclos combinados de potência**. Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider. Porto Alegre, 2011. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

SUSSMAN, J. M. **Collected Views on Complexity in Systems**. Massachusetts Institute of Technology. Engineering Systems Division. Working paper Series ESD-WP-2003-01.06. 2002.

TAKEDA, J. Dissertação: **Modelagem de redes de cooperação: abordagem metodológica de sistemas complexos e aplicação no modelo de gerenciamento de projetos cooperativos no Instituto de Tecnologia do Paraná**. Orientador: Prof. Dr. Alfredo Iarozinski Neto. Curitiba, 2001. 150 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia). Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia.

TANAKA, K.; KRIEGLER, E.; BRUCKNER, T.; HOOSS, G.; KNORR, W.; RADDATZ, T. **Aggregated carbon cycle, atmospheric chemistry, and climate model (ACC2) – Description of the forward and inverse modes**. Max-Planck - Institut für Meteorologie. Berichte zur Erdsystemforschung. 2007.

TANAKA, K.; O'NEILL, B. C.; ROKITYANSKIY, D.; OBERSTEINER, M.; TOL, R. S. J. **Evaluating global warming potentials with historical temperature**. Climatic Change (2009) 96:443–466, doi: 10.1007/s10584-009-9566-6.

TANIMOTO, A. H.; LINDOSO, D. P.; DEBORTOLI, N. **As emissões antropogênicas pré-revolução industrial afetando o clima do planeta**. IV Encontro Nacional da ANPPAS. 4,5 e 6 de junho de 2008. Brasília – DF – Brasil.

TARRIDE, M. **Complexidade e sistemas complexos**. Hist. cienc. saude-Manguinhos [online]. 1995, vol.2, n.1 [citado 2013-04-28], pp. 46-66. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-597019950002_00004&lng=pt&nrm=iso>. ISSN 0104-5970. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-597019950002000>.

TCEQ 2010. **Offshore Oil and Gas Platform Report - Final Report**. TCEQ Contract No. 582-7-84003. Work Order No. 582-7-84003-FY10-25. Eastern Research Group, Inc. 1600 Perimeter Park Drive. Morrisville, NC 27560. Agosto 2010.

THOMAS, J. E.; TRIGGIA, A. A.; VEROTTI FILHO, C.; MACHADO, J. C. V.; SOUZA FILHO, J. E.; DE ROSSI, N. C. M.; GOUVEA, P. C. V. M.; BARRAGAN, R. V. **Fundamentos de engenharia de petróleo**. Editora Interciência, Rio de Janeiro – 2001.

THORNALLEY, D. J. R.; ELDERFIELD, H.; MCCAVE N. **Holocene oscillations in temperature and salinity of the surface subpolar North Atlantic**. Nature Vol. 457, 5 February 2009, doi:10.1038/nature07717.

TISSOT, B. P.; WELTE, D. H. **Petroleum formation and occurrence**. Springer-Verlag, Berlin, 1984.

UNESCO. **CHANGES OF CLIMATE - Proceedings of the Rome Symposium organized by UNESCO and the World Meteorological Organization.** United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 1963.

UNFCCC. **Information unit for Conventions (IUC).** United Nations Environment Programme. Disponível em <http://unfccc.int/cop3/fccc/climate/fact17.htm>. Acesso em 22.01.2013.

URIA, L. A. B.; SCHAEFFER, R. **Efeito Radioativo das Emissões de Gases de Efeito Estufa por Parte de Automóveis no Brasil.** SBPE, Revista Brasileira de Energia Vol. 6, nº 1. 1997.

USEPA. **AP-42: Emission Factor Documentation for Compilation of air Pollutant Emission factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources.** Fifth Edition, AP-42, Section 1.4, Natural Gas Combustion, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC, March 1998.

_____ (2002). **Clean Alternative Fuels: Fischer-Tropsch.** Transportation and Air Quality Transportation and Regional Programs Division. EPA420-F-00-036, March 2002.

_____ (2010). **40 CFR Part 98. Mandatory Reporting of Greenhouse Gases: Petroleum and Natural Gas Systems; Final Rule.** Disponível em <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2010-11-30/pdf/2010-28655.pdf>. Acesso em 16.07.2013.

_____ (2011). **Petroleum and Natural Gas Systems 2011 Data Summary.** Greenhouse Gas Reporting Program. Disponível em <http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/2013Workshop/supporting-info-2011-data-summary.pdf>. Acesso em 14.07.2013.

_____ (2012). **Monthly mean CH₄ concentrations for Cape Grim, Australia.** Disponível em ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/ch4/flask/month/cgo_01D0_mm.ch4. Acesso em 01.03.2012.

_____ (2012a). **Historical CH₄ records since about 1000 A.D. from ice core data.** Disponível em http://cdiac.ornl.gov/trends/atm_meth/lawdome_meth.html. Acesso em 01.03.2012.

_____ (2012b). **Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores.** Disponível em ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/paleo/icecore/antarctica/epica_domec/edc-ch4-2005-650k.txt. Acesso em 01.03.2012.

_____ (2012c). **Offshore Petroleum and Natural Gas Production. Final Rule: Petroleum and Natural Gas Production (40 CFR 98, subpart W).** Disponível em http://www.epa.gov/ghgreporting/documents/pdf/infosheets/SubpartW_OffshoreInfosheet.pdf. Acessado em 17.07.2013.

_____ (2013). **Petroleum and Natural Gas Systems 2011 Data Summary. Greenhouse Gas Reporting Program.** Disponível em <http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/2013Workshop/supporting-info-2011-data-summary.pdf>. Acesso em 14 de julho de 2013.

_____ (2013a). **Emission reduction options for the offshore natural gas and petroleum production segment. 2013.** Disponível em http://www.epa.gov/gasstar/methaneemissions/offshore_production.html. Acessado em 17.07.2013.

VASCONCELLOS, S. P. Tese: **Atividades enzimáticas e de biodegradação de microrganismos do petróleo da Bacia de Campos (Pampo Sul).** Orientadoras: Prof^a Dr^a Anita Jocelyne Marsaioli e Prof^a Dr^a Valéria M. de Oliveira. Campinas, 2006. 238 p. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química.

VELDERS, G. J. M.; ANDERSEN, S. O.; DANIEL, J. S.; FAHEY, D. W.; MCFARLAND M. **The importance of the Montreal Protocol in protecting climate**. PNAS, March 20, 2007, vol. 104 no. 12. doi: 10.1073, PNAS.0610328104.

VINHOZA, M. M. J. Tese: **Estudo do comportamento dos metais chumbo e mercúrio na presença do 1-dodecanotiol e do ácido hexanóico em matriz de hidrocarbonetos**. Orientadoras: Prof^a. Judith Felcman e Dr^a. Maria Luiza B. Tristão. Rio de Janeiro, 2005. 131 p. Tese (Doutorado em Ciências). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Química.

WEISS, R. F.; MÜHLE, J.; SALAMEH, P. K.; HARTH C. M. **Nitrogen trifluoride in the global atmosphere**. Geophysical Research Letters, Vol. 35, L20821, doi:10.1029/2008GL035913, 2008.

WIGLEY, T. M. L. **The Kyoto Protocol: CO₂, CH₄ and climate implications**. Geophysical Research Letters, Vol. 25, no. 13, pages 2285-2288, July 1, 1998.

WILSON, D.; BILLINGS, R.; OOMMEN, R.; LANGE, B.; MARIK, J.; MCCLUTCHEY, S.; PEREZ, H. 2010. **Year 2008 Gulfwide emission inventory study**. U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Regulation and Enforcement, Gulf of Mexico OCS Region, New Orleans, LA. OCS Study BOEMRE 2010-045. 186 pp.

WMO. **Boletín sobre los gases de efecto invernadero Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2008**. N° 5: 23 de noviembre de 2009. 2009.

_____. **Boletín sobre los gases de efecto invernadero Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2009**. N° 6: 24 de noviembre de 2010. 2010.

_____. **Scientific Assessment of ozone Depletion: 2010 - Pursuant to Article 6 of the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer**. World

Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 52. 2010a.

_____. **WMO statement on the status of the global climate in 2010.** WMO - No. 1074. ISBN 978-92-63-11074-9. 2011.

_____. **Boletín sobre los gases de efecto invernadero Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2010.** N° 7: 21 de noviembre de 2011. 2011a.

WRI 2007. **Discussion Paper for a Natural Gas Transmission and Distribution Greenhouse Gas Reporting Protocol. Final Draft Report.** Prepared for California Climate Action Registry and World Resources Institute. Prepared by URS Corporation and The LEVON Group. June 6, 2007.

WUEBBLES, D. J.; HAYHOE, K. **Atmospheric methane and global change.** Earth-Science Reviews 57 (2002) 177–210.

ZÍLIO, E. L.; PINTO, U. B. **Identificação e distribuição dos principais grupos de compostos presentes nos petróleos brasileiros.** Bol. Téc. PETROBRAS, Rio de Janeiro, 45 (1): 21-25, jan./mar. 2002.

ANEXO A

ANEXO A – EVOLUÇÃO DO CONHECIMENTO SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E AQUECIMENTO GLOBAL

A.1 Joseph Fourier, ☆ 1768 / † 1830



Jean-Baptiste Joseph Fourier foi um matemático e físico francês conhecido por seu pioneirismo na análise matemática sobre a decomposição de funções periódicas em séries trigonométricas convergentes e sua aplicabilidade em problemas de condutividade térmica. Suas fórmulas descrevem o fluxo do calor e permanecem úteis até hoje. São conhecidas como “Transformadas de Fourier”.

Figura 93: Joseph Fourier. Baseado em suas teorias, em 1822 Fourier publicou seu livro mais conhecido, *“Théorie analytique de la chaleur”* (Teoria analítica do calor) e dá início ao estudo sistemático da propagação do calor em meios compostos por diversas substâncias.

Em 1824, seu artigo *“Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires”* (FOURIER, 1824) apresenta suas conclusões sobre diversas possíveis fontes de calor que justificassem a temperatura terrestre, até que em 1827 Fourier publica *“Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires”* (FOURIER, 1827), onde admite a existência na atmosfera de um mecanismo de aumento de temperatura semelhante ao observado numa estufa, o que criaria um ambiente adequado ao desenvolvimento da vida animal e vegetal. Fourier também afirmou que a elevação da temperatura da superfície terrestre era devida à absorção de energia solar na forma de calor, por conta de alguns gases atmosféricos.

Em seu trabalho de 1827, Fourier afirma que um objeto do tamanho da Terra à tamanha distância do Sol, deveria ser consideravelmente mais frio do que se o planeta fosse aquecido apenas pelos efeitos da radiação solar incidente. As conclusões de seus trabalhos de 1824 e 1827 permitiram a Fourier afirmar que embora a radiação solar pudesse ser fortemente responsável por parte do calor

adicional, a atmosfera da Terra deveria atuar como uma espécie de isolante térmico, o que até hoje é reconhecido como a primeira hipótese a tratar daquilo que hoje é conhecido como “efeito estufa”.

A.2 John Tyndall, ☆ 1820 / † 1893

Após cerca de quarenta anos dos estudos iniciados por Fourier, o cientista irlandês John Tyndall introduziu a idéia de que as variações na temperatura média da Terra poderiam ser devidas às correspondentes variações de concentrações do dióxido de carbono na atmosfera.

Seus estudos avaliaram a capacidade de absorção de calor não apenas pelo dióxido de carbono, como também pelo vapor d’água e o metano. Em 1859 Tyndall apresentou provas de suas teorias, sem contudo provocar um grande impacto na comunidade científica da época.

Entre abril e maio daquele ano, Tyndall conduziu experimentos que procuravam explicar como alguns gases permitiam a entrada da radiação solar na atmosfera terrestre, ao mesmo tempo em que bloqueavam o retorno para a atmosfera do calor emitido pela superfície terrestre na forma de radiação infravermelha. Suas pesquisas puderam comprovar as teorias de Fourier, de que algo presente na atmosfera terrestre teria a capacidade de reter o calor, mantendo a temperatura média global em 14° C.

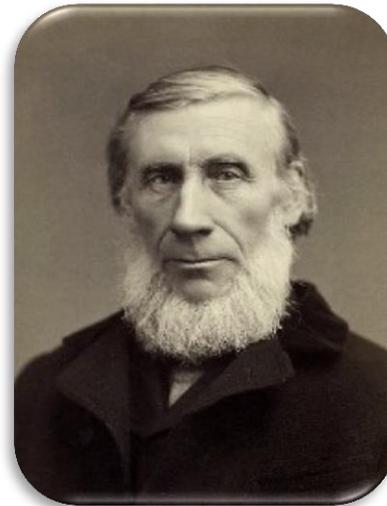


Figura 94: John Tyndall.

Os estudos de Tyndall tinham como objetivo não apenas entender a mecânica do fluxo de energia solar na atmosfera, mas também buscavam esclarecer as causas da última era glacial, ocorrida há cerca de 20.000 anos.

Os resultados de suas pesquisas, embora não tenham sido conclusivos, foram suficientes para manter vivo o interesse da comunidade científica pelo tema.

A.3 Svante Arrhenius, ☆ 1859 / † 1927



Figura 95: Svante Arrhenius.

Físico, matemático e químico sueco, Svante Arrhenius previu em 1896 que a queima de combustíveis fósseis, como o petróleo, aumentaria a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera e levaria ao aumento das temperaturas em todo o globo terrestre.

Para tal, Arrhenius criou um modelo matemático para estudar a influência do gás carbônico da atmosfera sobre a temperatura da Terra. Seu modelo calculou o aumento da temperatura se a quantidade de CO₂ na atmosfera duplicasse. Para isso, baseou-se no conceito

de “estufa”, apresentado em 1827 por Fourier.

Seus estudos concluíram que a temperatura média da superfície da Terra, em torno de 15° C, seria fruto da capacidade do vapor d’água e do dióxido de carbono em absorver a radiação infravermelha emitida pela Terra, bem como sugeriram que uma duplicação da concentração de CO₂ levaria a um aumento da temperatura entre 5° C e 6° C.

Seu estudo intitulado *“On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground”* (ARRHENIUS, 1896), procurava mostrar que reduções da quantidade de CO₂ atmosférico poderiam explicar o advento das glaciações.

Naquela época pensava-se que influências humanas seriam insignificantes em comparação com as forças naturais, como a atividade solar e a circulação oceânica. Acreditava-se também que os oceanos eram tão grandes sumidouros de dióxido de carbono que seriam capazes de neutralizar as emissões antrópicas.

Apesar de reconhecer que as emissões de CO₂ resultantes das atividades industriais provocariam um aumento de sua concentração atmosférica, Arrhenius não demonstrava preocupações com as consequências das ações antrópicas sobre o sistema climático global. Suas convicções nesse sentido eram tamanhas, que em seu livro *“Worlds in the Making”* (ARRHENIUS, 1908) afirma que o aumento da

concentração de CO₂ provocaria uma melhoria no clima, em especial nas regiões mais frias do planeta.

A.4 Guy Stewart Callendar, ☆1898 / † 1964

Após os cálculos apresentados por Arrhenius na virada do século XIX para o século XX, uma nova pausa se formou nos estudos que procuravam determinar a correlação entre a temperatura terrestre e a concentração dos gases atmosféricos. Em 1938, o britânico Guy Stewart Callendar foi o pioneiro na argumentação de que a queima de combustíveis fósseis teria a capacidade de elevar a concentração de gás carbônico a um nível capaz de provocar alterações na temperatura global. As suas conclusões baseavam-se na análise de séries de temperatura obtidas em mais de 200 estações meteorológicas espalhadas pelo mundo e em observações do recuo dos glaciares das montanhas.

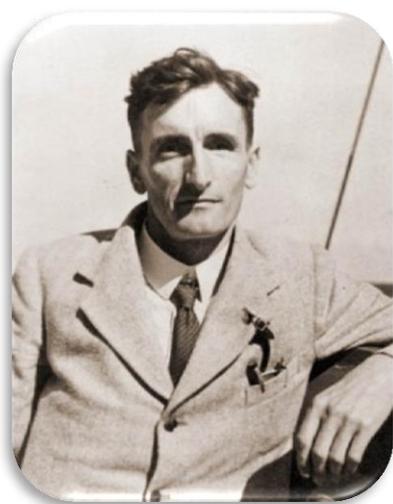


Figura 96: Guy Stewart Callendar.

No entanto, Callendar não era climatologista, meteorologista ou físico. Sua formação era na área de Engenharia, o que fez com que suas análises fossem recebidas com grande ceticismo e praticamente caíssem no esquecimento.

Tal desconfiança não foi propriamente culpa das conclusões apresentadas por Callendar, mas das próprias condições técnicas disponíveis na época para a medição das concentrações de dióxido de carbono.

Apesar disso, suas observações e análises, em especial aquelas apresentadas em seu trabalho *“The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature”* (CALLENDAR, 1938) foram suficientes para que os estudos sobre as alterações climáticas fossem levados adiante.

Em seu trabalho, Callendar afirmou:

^{vii}By fuel combustion man has added about 150,000 million tons of carbon dioxide to the air during the past half century. The author estimates from the

best available data that approximately three quarters of this has remained in the atmosphere.

The radiation absorption coefficients of carbon dioxide and water vapour are used to show the effect of carbon dioxide on “sky radiation”. From this the increase in mean temperature, due to the artificial production of carbon dioxide, is estimated to be at the rate of 0.003°C per year at the present time.

The temperature observations at 200 meteorological stations are used to show that world temperatures have actually increased at an average rate of 0.005°C per year during the past half century.

I have examined 21 very accurate set of observations, taken about the year 1900, on the amount of carbon dioxide in the free air, in relation to the weather maps of the period. From them I concluded that the amount of carbon dioxide in the free air of the North Atlantic region, at the beginning of this century, was 2.74 ± 0.05 parts in 10,000 by volume of dry air (CALLENDAR, 1938).

Suas observações indicavam a percepção da relevante participação das emissões antrópicas no aumento da temperatura, bem como do aumento da taxa de crescimento da temperatura global.

Quase 7 décadas após as conclusões apresentadas por Callendar, o quarto relatório do IPCC (IPCC, 2007), apresentou suas conclusões de que com 90% de certeza o homem estava interferindo na temperatura global.

A.5 Charles David Keeling, ☆ 1928 / † 2005

Charles David Keeling foi um climatologista norte-americano especialista em química pela Universidade de Illinois em 1948 e PhD pela Universidade Northwestern em 1954, responsável por importantes contribuições para a ciência do clima.

Em 1958, pouco depois da realização do Ano Geofísico Internacional⁷⁷, Keeling tomou parte de um esforço internacional para realizar a medição e o monitoramento da concentração de gases atmosféricos em escala planetária.

Sabia-se então que embora a concentração de dióxido de carbono na água do mar fosse bastante superior à concentração na atmosfera, os oceanos não teriam a capacidade de atuar como sumidouros das imensas quantidades de dióxido de carbono de origem antropogênica lançadas anualmente na atmosfera. Dessa forma, concluiu-se que os oceanos e a vegetação terrestre não seriam capazes de absorver o excesso de dióxido de carbono que as atividades humanas lançavam na atmosfera terrestre, de forma que a concentração desse gás na atmosfera só tenderia a crescer.

Parte do esforço para monitorar a concentração de dióxido de carbono na atmosfera foi a instalação de uma base de pesquisas na ilha vulcânica de Mauna Loa, no Havaí, em meio ao Oceano Pacífico. Mauna Loa é um dos lugares mais remotos e distantes do planeta, ficando praticamente imune a atividades que sejam responsáveis pela introdução ou remoção de dióxido de carbono na atmosfera terrestre. No entanto, cedo ou tarde as correntes aéreas que passam pela ilha trazem consigo amostras de ar provenientes de todo o planeta. Ao mesmo tempo, outra base foi instalada na Antártida, também distante de fontes próximas de emissões de dióxido de carbono. Dois anos de medições na Antártica, foram suficientes para Keeling concluir que a concentração atmosférica de CO₂ estava aumentando e que esse aumento era compatível com a hipótese de que apenas parte das emissões antropogênicas estavam a ser dissolvidas nos oceanos (KEELING, 1960).



Figura 97: Charles David Keeling.

⁷⁷ O Ano Geofísico Internacional, considerado entre o período de 1 de julho de 1957 a 31 de dezembro de 1958, envolveu mais de 60 mil cientistas oriundos de 67 países, responsáveis pelo estudo da meteorologia, geomagnetismo, sismologia, oceanografia, radiação cósmica, ionosfera, glaciologia, paleoclimatologia, além de pesquisas biológicas e geológicas.

Como membro do Caltech, o Instituto de Tecnologia da Califórnia, nos EUA, Keeling ajudou a instalar as bases de pesquisas e iniciou as leituras da concentração de dióxido de carbono em Mauna Loa em 1958. Passados mais de 50 anos, as leituras continuam sendo obtidas diariamente.

A apresentação gráfica dessas leituras é conhecida como “Curva de Keeling”, por meio da qual é possível observar uma flutuação sazonal, como seria esperado, no entanto acompanhada de um aumento anual constante na concentração do dióxido de carbono atmosférico.

A conclusão mais importante e preocupante que pode ser inferida a partir da “Curva de Keeling” é a constância da taxa de crescimento das concentrações atmosféricas de dióxido de carbono. Desde a primeira medição, realizada em março de 1958 e a última medição disponível, realizada em dezembro de 2012, verifica-se o aumento nas concentrações das médias mensais variando de 315,71 ppm a 391,84 ppm, respectivamente (SCRIPPS, 2012).

As medições de Keeling em Mauna Loa confirmaram os resultados obtidos na Antártida e passaram a constituir uma prova reconhecida e amplamente citada nos meios científicos da interferência antropogênica sobre o sistema climático.

A.6 J. Murray Mitchel, ☆1928 / † 1990

J. Murray Mitchell foi por mais de 35 anos um importante climatologista da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) e de outras Agências Federais norte-americanas, sendo considerado por seu trabalho como um dos principais nomes da climatologia moderna.

Ainda na década de 1960, antes mesmo do surgimento do moderno ambientalismo, Mitchell advertia que as alterações climáticas deveriam ser estudadas com mais atenção antes que chegassem a uma situação fora de controle.



Figura 98: J. Murray Mitchel.

Seus estudos foram pioneiros na tentativa de compreender as causas dos períodos cíclicos de secas ou chuvas torrenciais, das mudanças da temperatura global a longo prazo e dos efeitos do crescimento populacional sobre o clima.

Dentre as várias hipóteses que tentavam explicar as alterações no clima, seus estudos versaram sobre os ciclos das manchas solares, as influências lunares, e a atividade vulcânica.

Em outubro de 1961 a Organização Meteorológica Mundial (WMO) e a UNESCO organizaram um Simpósio Internacional sobre Mudanças do Clima, em Roma. Os trabalhos apresentados e as conclusões do encontro foram reunidos na publicação *“CHANGES OF CLIMATE Proceedings of the Rome Symposium organized by Unesco und the World Meteorological Organization”* (UNESCO, 1963).

Mais de 100 cientistas de 36 países participaram do encontro, cujo tema principal era a discussão a respeito da aparente tendência não mais de aquecimento, mas de resfriamento global que se verificava nas duas décadas anteriores.

A palestra de conclusão do simpósio, proferida por C. C. Wallén, do “Swedish Hydrological and Meteorological Office, Stockholm”, afirmou que todos os autores teriam comprovado de forma estatisticamente significativa o aquecimento de grandes regiões do globo desde o final do século XIX até meados do século XX, seguido da progressiva diminuição no ritmo de crescimento da temperatura global a partir de então.

O próprio trabalho apresentado por Mitchell, *“On the world-wide pattern of secular temperature change”*, teria chegado a tal conclusão, mas o que distinguiu Mitchell da maioria dos demais cientistas presentes, que adotaram o consenso do “resfriamento global”, foi sua cautela em adotar conclusões nesse sentido:

^{viii}...it has been extremely difficult by this means to avoid the conclusion that the warming trends [up to the 1940s] for the world as a whole, and for the Northern Hemisphere in particular, are truly planetary in scope. On the other hand, it cannot yet be demonstrated in this way beyond a reasonable doubt that the net cooling since the 1940s has likewise been planetary in scope. That this cooling is of such nature, however, seems reasonable and this

should be verifiable if the cooling in the data areas were to continue for another decade or two in the future (UNESCO, 1963).

Sua cautela deveu-se à suas pesquisas realizadas ainda em 1961, quando ele anunciara que grandes erupções vulcânicas poderiam causar significativas variações nas temperaturas médias anuais, em função do lançamento de aerossóis na atmosfera, os quais dispersariam parte da radiação solar de volta ao espaço. De fato, a queda nas temperaturas médias verificada desde 1940 coincidia com um período em que haviam ocorrido grandes erupções vulcânicas.

Em 1976, ele classificou como irresponsáveis as previsões de que o planeta estaria na iminência de uma nova idade do gelo, e alertou que as quantidades crescentes de dióxido de carbono lançadas na atmosfera provocariam gradualmente o aquecimento global.

A.7 Conferência Mundial sobre o Ambiente Humano, 1972

Segundo Plaza e Santos (2009), a realização da Conferência Mundial sobre o Ambiente Humano em Estocolmo, precursora das Negociações sobre Mudanças Climáticas, teria feito emergir uma visão, ainda que preliminar, sobre a necessidade de conscientização global relativa aos riscos provocados pela ação antrópica no meio ambiente e a necessidade de um esforço coletivo de governos, indústria e sociedade.

A.8 National Academy of Sciences, 1977

Confirmando as avaliações apresentadas por Mitchell em 1976 que contestara as previsões de um “resfriamento global” em voga na ocasião, a National Academy of Sciences divulgou o estudo *“Energy and Climate: Studies in Geophysics”* (NAS, 1977) apresentando as tendências climáticas dominantes, confirmando a tendência de aquecimento do planeta.

O estudo apresentou algumas importantes conclusões:

a) Sobre a persistência do dióxido de carbono na atmosfera e a previsão de emissões futuras:

^{ix}According to the data and estimates in Chapters 4 and 10, somewhat less than half of the carbon dioxide released by man since the industrial revolution has remained in the atmosphere. During that time, about a 13 percent rise in atmospheric concentration of carbon dioxide has taken place. Most of the remainder is inferred to have been taken up by the oceans and by the terrestrial biosphere. One can estimate the amount of carbon dioxide that may be released through the middle of the next century and, by the use of models of the carbon cycle, the amount that may be expected to remain in the atmosphere. It is not implausible that the peak atmospheric concentration occurring in A.D. 2150 to A.D. 2200 might be four to eight times the preindustrial level. Moreover, concentrations much higher than today's may persist for many centuries thereafter. (NAS, 1977).

b) Sobre a transição entre o uso de combustíveis fósseis e outras fontes alternativas de energia:

^xThe climatic effects of carbon dioxide release may be the primary limiting factor on energy production from fossil fuels over the next few centuries. The prospect of damaging climatic changes may thus be the stimulus for greater efforts at conservation and a more rapid transition to alternate energy sources than is justified by economic considerations alone. (NAS, 1977).

c) Sobre o efeito conjunto do dióxido de carbono, outros GEE e gases industriais:

^{xi}The potential effect of carbon dioxide on climate could be exacerbated by fluorocarbons, nitrous oxide, and other industrial gases. The natural variability of climate could increase or reduce the impact of such man-made effects. (NAS, 1977).

d) Sobre as incertezas sobre o ciclo do carbono, o clima e sua interdependência:

^{xii}There are profound uncertainties regarding the carbon cycle, climate, and their interdependence. These uncertainties can be resolved only by a well coordinated effort of extraordinarily interdisciplinary character. The focus for such an effort is not provided by any existing institutional mechanisms. (NAS, 1977).

e) Sobre a queda da temperatura em décadas passadas e as incertezas e ela relativas:

^{xiii}There is considerable evidence that, between the 1940's and about 1970, the climatic changes of the earlier part of this century had tended to undergo

a reversal. Temperatures had mostly fallen, especially in the Arctic and the Atlantic sub-Arctic, where sea ice has been increasing. The circulation of the northern hemisphere appears to have shifted in a manner suggestive of an increasing amplitude of the planetary waves and of greater extremes of weather conditions in many areas of the world (the situation in the southern hemisphere has not been so well documented). These events have culminated, at times in the last several years, in the emergence of anomalous conditions in the monsoon belt of the tropics and in widespread drought in the Sahel zone of Africa and in northwest India. To what extent these calamitous recent events are related to each other as manifestations of a globally coherent fluctuation of climate is not clear. In any event, they dramatize the fact that climatic variability, whether globally coherent or not, is to be expected no less on time scales of months and years than on time scales of centuries and millennia. An evident faltering of these tendencies of climate, in just the last five or ten years, attests also to the ephemeral nature of all climatic trends. Such is the nature of climate and climatic variations. (NAS, 1977).

f) Sobre a qualidade das informações disponíveis e as incertezas então vigentes e a necessidade de melhorar a compreensão científica da dinâmica do clima:

^{xiv} A large part of our difficulty in attempting to assess man's possible effects stems from the fact that we have such a poor data base that we do not yet adequately understand natural climatic phenomena. To answer the questions raised in this volume, we need to understand the dynamics of climate. The purpose of this paper is to explain the need for climate monitoring and to outline a way to carry out such monitoring. The mechanisms that produce and control the earth's climate are exceedingly complex. One usually considers climate as mainly an atmospheric phenomenon, but it is the atmosphere's interaction with the ocean, the land, and ice masses, together with the sun and space, that controls the atmosphere's behavior. If we are to assess man's possible influence on climate and predict what man's activities might do to our climate, we must first understand the basic mechanisms and physics of climate well enough to model it. This is beyond our grasp at present. (NAS, 1977).

A.9 I Conferência Climática Mundial, 1979

A I Conferência Climática Mundial, realizada em Genebra em 1979, reconheceu que as mudanças climáticas são um problema de elevada gravidade e cuja solução deve ser compromisso de todas as nações do planeta. Esta reunião, de cunho

essencialmente científico, apresentou informações sobre como as mudanças climáticas podem afetar as atividades humanas. A conferência organizou quatro grupos de trabalho, responsáveis pela análise de dados climáticos, identificação de tópicos sobre o clima, estudos integrados de impacto e pesquisa em variabilidade climática e mudanças.

Segundo Onça (2009), até então não havia uma opinião unânime sobre os danos que a ação antrópica poderia causar sobre a atmosfera, tampouco sobre a urgência em serem tomadas quaisquer ações corretivas. Embora não houvesse dúvidas sobre o aumento das concentrações de CO₂ atmosférico, seu ciclo e sua atuação na atmosfera ainda não eram bem conhecidos. Assim, ainda que fosse plausível o aumento de temperatura, uma previsão confiável sobre o nível de aumento ainda não era possível.

A conferência emitiu uma declaração pedindo aos governos do mundo que previssem e prevenissem potenciais mudanças de origem antrópica no clima que pudessem ser adversas ao bem-estar da humanidade.

Também apoiou os planos para estabelecer um Programa Mundial do Clima (WCP), sob a responsabilidade conjunta da Organização Meteorológica Mundial (WMO), o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), e o Conselho Internacional das Uniões Científicas (ICSU).

Outro importante resultado foi o início das conversações sobre a criação do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), que veio a ser criado onze anos depois, pela WMO e a UNEP.

A.10 I Conferência de Villach, 1980

Após a Conferência Climática Mundial realizada em Genebra no ano anterior, as preocupações sobre as consequências do aumento da concentração atmosférica de gases de efeito estufa passaram a ser mais presentes no âmbito Organizações das Nações Unidas (ONU) até que e em 1980, por iniciativa da WMO, do UNEP e pelo ICSU, é realizada na Áustria a I Conferencia de Villach, na qual a visão de que o aquecimento, até então considerado positivo, passa a ser apresentado como

catastrófico. De acordo com Sarewitz e Pielke (2000), apud Foladori (2005), daí em diante toda a propaganda, investigação e políticas passam a ser focadas em formas de deter o aquecimento global.

A I Conferência de Villach foi o primeiro encontro científico internacional onde foi discutido o papel do CO₂ nas mudanças climáticas. Segundo Onça (2009), as discussões desenvolveram-se em torno do cenário desenvolvido por Marland e Rotty (1983), segundo o qual a concentração atmosférica de CO₂ atingiria 450 ppm em 2025 e, caso ela dobrasse, a temperatura média global seria elevada entre 1,5° C e 3,5° C.

Apesar dos indicativos já aceitos de que a queima de combustíveis fósseis pudesse provocar alterações climáticas caso o seu ritmo de crescimento prosseguisse, a conferência concluiu que em função das incertezas ainda vigentes, a determinação de medidas de contenção das emissões de CO₂ somente deveria ser definida após o estabelecimento de bases científicas mais consolidadas.

A.11 II Conferência de Villach, 1985

Cinco anos depois, na mesma cidade austríaca, é realizada a II Conferência de Villach convocada pelas mesmas organizações WMO, UNEP e ICSU.

Segundo Gómez et al. (1999), nesta conferência foi proposto que o cenário de duplicação da concentração de CO₂ atmosférico teria como consequência o aumento da temperatura global entre 1,5° C e 4,5° C, bem como a elevação do nível do mar entre 0,2 m e 1,4 m.

Nesse momento, o problema do aquecimento global havia conseguido romper a difícil barreira entre os limites da ciência e a política, de tal forma que a gravidade do consenso obtido em Villach causou grandes preocupações e impacto nos meios científico e político, acabando por provocar uma série de reuniões posteriores a respeito da questão climática.

A.12 Protocolo de Montreal, 1987

O Protocolo de Montreal sobre Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio (SDO)⁷⁸ é um dos exemplos mais bem sucedidos de cooperação internacional para superar um grande problema de dimensão global, que ameaça o meio ambiente. Desde a negociação do Protocolo em 1987, suas partes tiveram de se adaptar continuamente em resposta às novas provas científicas e avanços tecnológicos. A produção e o consumo do grupo de produtos químicos perigosos com capacidade para empobrecer a camada de ozônio tem sido eliminados com sucesso em países desenvolvidos e o mesmo processo está em andamento nos países em desenvolvimento. Globalmente, cerca de 95 por cento dos produtos químicos que destroem o ozônio têm até agora sido postos de lado. Este é um esforço notável das Partes do Protocolo de Montreal (PNUMA, 2006).

O Protocolo de Montreal foi assinado em 16 de setembro de 1987, recebendo de imediato a adesão de 46 Partes⁷⁹, mas entrou em vigor no dia 1º de janeiro de 1989, tendo passado por revisões em reuniões realizadas em Londres (1990), Copenhague (1992), Viena (1995), Montreal (1997) e Pequim (1999). Posteriormente, mais de 150 países aderiram ao protocolo, assumindo o compromisso de diminuir de forma significativa ou eliminassem o uso de SDO em um prazo de 10 anos.

As SDO também são gases de efeito estufa que contribuem para o forçamento radiativo, atuando diretamente nas mudanças climáticas. Segundo Velders et al. (2007), os resultados de proteção do clima alcançados pelo Protocolo de Montreal por si só são muito maiores do que a meta de redução do primeiro período de compromisso do Protocolo de Quioto. Benefícios climáticos adicionais que são significativos em comparação com a meta de redução do Protocolo de Kyoto poderiam ser alcançados por ações no âmbito do Protocolo de Montreal, através do gerenciamento das emissões de gases substitutos aos fluorcarbonos e/ou a implementação de gases alternativos com menor potencial de aquecimento global.

⁷⁸ Substâncias que reagem quimicamente com o ozônio na parte superior da estratosfera, como os grupos Clorofluocarbonos (CFCs), Halons, Tetracloretos de Carbono (CTCs) e Hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), emitidas em todo o globo, a partir dos processos de industrialização (Silva, 2009).

⁷⁹ Países participantes.

Segundo Silva (2009), o cumprimento do Protocolo foi viabilizado pelo “Fundo Multilateral” (FML). O “Fundo Multilateral para Implementação do Protocolo de Montreal” (www.multilateralfund.org) é dedicado a reverter a deterioração da camada de ozônio da Terra. Foi criado em 1991 para ajudar os países em desenvolvimento a cumprir os seus compromissos do Protocolo de Montreal. É gerido por um Comitê Executivo com participação igual de países desenvolvidos e em desenvolvimento. A Secretaria do Fundo em Montreal auxilia o Comitê nessa tarefa. Segundo seu relatório de 2007 (Multilateral Fund, 2007), desde 1991 o Fundo aprovou 5520 projetos desenvolvidos em 144 países os quais eliminaram o consumo ou a produção de quase 375 mil toneladas de SDO, tendo investido para tal o montante de US\$ 2,2 bilhões.

A expectativa é que até 2075, a camada de ozônio que protege a Terra retome seus níveis anteriores à década de 1980. O Protocolo de Montreal foi o primeiro acordo ambiental internacional a ter medidas com obrigações legais vinculantes. Devido à grande adesão mundial, o então secretário-geral da ONU, Kofi Annan, afirmou que talvez fosse o acordo internacional mais bem sucedido de todos os tempos.

A.13 Conferência de Toronto, 1988

Ao final da década de 1980, as discussões referentes às alterações climáticas já faziam parte da agenda política de diversos governos. Em junho de 1988, patrocinada pelo governo canadense, pela WMO e pelo UNEP, foi realizada a Conferência de Toronto.

Pela primeira vez, embora a conferência fosse de base científica e não política, os pesquisadores presentes emitiram uma declaração de cunho político, conclamando os governos mundiais a reduzir suas emissões de GEE em 20% com relação aos níveis de 1988 até 2005.

Seu relatório concluiu que a poluição atmosférica antropogênica já estava causando danos e deveria ser enfrentada sem demora (WEART, 2003 e SCHNEIDER, 1989), apud Onça (2009).

Segundo Fernández (2010), a maior importância desta conferência foi a conclusão de que a humanidade deveria adotar medidas imediatas para a redução dos Gases de Efeito Estufa (GEE), o que levou a Assembleia Geral da Nações Unidas a criar naquele mesmo ano o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, segundo sua sigla em inglês) com o objetivo de analisar o estado da arte do conhecimento científico sobre mudanças climáticas, seus impactos, seus aspectos econômicos, e as possíveis medidas de mitigação e adaptação.

A.14 IPCC,1988

Em 1988, durante a realização da Conferência de Toronto, as nações presentes determinaram a criação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC é um organismo intergovernamental aberto a todos os países membros da WMO e do UNEP, criado com o objetivo de fornecer aos formuladores de políticas a avaliação das informações técnico-científicas e sócio-econômicas disponíveis a respeito dos impactos potenciais das mudanças no clima, e as possíveis opções para adaptação e mitigação em função de tais mudanças (IPIECA, 2006).

O objetivo inicial do IPCC era a preparação de um único relatório de avaliação para aconselhar a Assembleia Geral da ONU sobre a necessidade de negociações para a criação da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, segundo sua sigla em inglês). O IPCC está organizado em três grupos de trabalho, cada qual dedicado a áreas temáticas específicas:

- Grupo de Trabalho I (WG1): sistema climático;
- Grupo de Trabalho II (WG2): impactos e opções de resposta;
- Grupo de Trabalho III (WG3): dimensões econômica e social.

A partir de 1990, o IPCC passou a divulgar periodicamente relatórios de avaliação, fornecendo análises metodológicas e outras necessárias à UNFCCC. Os Relatórios de Avaliação (Assessment Reports) do IPCC e os relatórios dos grupos de trabalho tornaram-se padrão de referência, amplamente utilizados pelos formuladores de políticas, cientistas e outros experts.

O IPCC já divulgou quatro Relatórios de Avaliação, além de inúmeros outros documentos científicos:

- 1990: Primeiro Relatório de Avaliação (FAR-1990).
 - Overview Chapter;
 - WG1: Scientific Assessment of Climate Change;
 - WG2: Impacts Assessment of Climate Change;
 - WG3: The IPCC Response Strategies.
- 1995: Segundo Relatório de Avaliação (SAR-1995).
 - IPCC Second Assessment;
 - WG1: The Science of Climate Change;
 - WG2: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change;
 - WG3: Economic and Social Dimensions of Climate Change.
- 2001: Terceiro Relatório de Avaliação (TAR-2001).
 - Synthesis Report;
 - WG1: The Scientific Basis;
 - WG2: Impacts, Adaptation and Vulnerability;
 - WG3: Mitigation.
- 2007: Quarto Relatório de Avaliação (AR4-2007).
 - The AR4 Synthesis Report;
 - WG1: The Physical Science Basis;
 - WG2: Impacts, Adaptation and Vulnerability;
 - WG3: Mitigation of Climate Change.

O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC (AR5), cuja publicação está prevista para 2013/2014, prevê a atualização dos conhecimentos científicos, técnicos e sócio-econômicos das alterações climáticas.

Será composto por três relatórios do grupo de trabalho e um relatório de síntese (SYR). Mais de 800 autores estão envolvidos na preparação dos relatórios:

- AR5 Relatório Síntese (SYR) – conclusão prevista para outubro de 2014;
- WG1: A Base das Ciências Físicas – conclusão prevista para setembro de 2013;

- WG2: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade – conclusão prevista para março de 2014;
- WG3: Mitigação das Mudanças Climáticas – conclusão prevista para abril de 2014.

A.15 IPCC FAR (First Assessment Report), 1990

O primeiro Relatório de Avaliações do IPCC apresentou as seguintes principais conclusões:

- as emissões resultantes de atividades humanas estão aumentando substancialmente as concentrações atmosféricas dos gases de efeito estufa dióxido de carbono, metano, CFCs e óxido nitroso. O aumento de tais concentrações reforçará o efeito estufa, resultando em um aquecimento adicional da superfície da Terra;
- o dióxido de carbono tem sido responsável por mais da metade do efeito estufa;
- gases com longo tempo de persistência na atmosfera exigem reduções imediatas em níveis superiores a 60% a fim de estabilizar suas concentrações em níveis atuais;
- o cenário BAU⁸⁰ (Business as Usual) baseado em modelos atuais, prevê o aumento da temperatura média global durante o século 21 de cerca de 0,3° C por década, o que é maior do que a observada ao longo dos últimos 10 mil anos;
- ainda existem muitas incertezas nas previsões particularmente com relação ao tempo, magnitude e padrões regionais de mudanças climáticas, devido à compreensão incompleta a respeito de fontes e sumidouros de GEE, nuvens, oceanos e gelo polar.
- é prevista uma taxa média de aumento do nível médio global do mar de cerca de 0,06 m por década durante o próximo século, principalmente devido à expansão térmica dos oceanos e o derretimento de gelo da terra. O aumento previsto é de cerca de 0,2 m em 2030, e 0,65 m até o final do próximo século.

⁸⁰ Cenário de emissões em que são mantidos os atuais índices de crescimento das emissões de CO₂.

A.16 II Conferência Climática Mundial, 1990

A II Conferência Climática Mundial, também realizada em Genebra, teve como objetivo rever o Programa Mundial do Clima (WCP), da WMO/UNEP e recomendar políticas de ação.

A conferência foi realizada em um momento muito importante das conversações internacionais sobre o clima, uma vez que o IPCC havia recém divulgado o seu primeiro relatório de avaliações.

Destaca-se a declaração final oficial da conferência, em que ficou estampado que passados onze anos desde a I Conferência, havia sido criado um claro consenso na comunidade científica de que já era hora de a comunidade mundial tomar medidas efetivas que reduzissem as emissões e aumentassem os sumidouros de gases de efeito estufa, apesar das incertezas ainda presentes. Apesar de não terem sido especificadas quaisquer metas de redução, foram definidos diversos princípios que mais tarde seriam incluídos na Convenção sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2000).

A.17 RIO 92, 1992

Vinte anos após a realização da Conferência Mundial sobre o Ambiente Humano em Estocolmo, foi realizada entre 3 a 14 de junho de 1992, a II Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, também conhecida como “Cúpula da Terra” ou “Eco-92”. Da conferência participaram 185 nações, contando com a participação direta de 108 chefes de Estado com o objetivo de definir mecanismos de conciliação entre o desenvolvimento sócio-econômico e a proteção dos ecossistemas e dos recursos naturais da Terra.

A conferência foi de grande valor para a consolidação do conceito de “desenvolvimento sustentável” e da necessidade de fornecimento de apoio financeiro e tecnológico para que os países em desenvolvimento pudessem avançar em direção à sustentabilidade.

Dentre os documentos oficiais elaborados, foi assinada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), a qual estabelece um quadro

geral para os esforços intergovernamentais para enfrentar o desafio relativo às alterações climáticas. Ela reconhece que o sistema climático é um recurso compartilhado cuja estabilidade pode ser afetada por emissões de dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa.

A Convenção foi adotada na sede das Nações Unidas, em Nova York, em 9 de maio de 1992. De acordo com seu artigo 20, foi aberta para assinatura no Rio de Janeiro durante a realização da Rio-92, e posteriormente na sede das Nações Unidas entre 20 de junho de 1992 a 19 de Junho de 1993. Até essa data, a Convenção havia recebido 166 assinaturas.

A Convenção entrou em vigor em 21 de Março de 1994, nos termos do artigo 23, a partir do nonagésimo dia após a data de depósito do quinquagésimo instrumento de ratificação, aceitação, aprovação ou adesão.

Atualmente, existem 195 Partes da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

A partir desta convenção surgem as Conferências das Partes (COPs) com a finalidade de implementar meios de alcançar os objetivos precípuos da UNFCCC.

A.18 IPCC SAR (Second Assessment Report), 1995

O segundo Relatório de Avaliações do IPCC apresentou as seguintes principais conclusões:

- o dióxido de carbono continua a ser o mais importante contribuinte antropogênico causador das alterações climáticas;
- projeções da mudança de temperatura média global futura e o aumento do nível do mar confirmam que as atividades humanas vem alterando o clima da Terra a um ponto sem precedentes na história humana;
- os longos períodos de persistência de alguns gases de efeito estufa na atmosfera e a resposta do sistema climático para suas acumulações, permitem concluir que muitos aspectos importantes das mudanças climáticas são efetivamente irreversíveis.

A.19 COP 1/1995 – Berlim, Alemanha

Os países signatários da Convenção do Clima constituem o chamado Grupo Ad Hoc do Mandato de Berlim, destinado a definir medidas de consenso sobre os esforços necessários ao combate às alterações climáticas.

De acordo com Carpenter (1995) apud Plaza e Santos (2009), foi discutida a necessidade de criar um protocolo para a UNFCCC⁸¹ com ações apropriadas para além do ano 2000, bem como o fortalecimento dos compromissos entre os países do Anexo I⁸², submetidas à aprovação na COP-3.

Tem início o processo de discussão de metas e prazos específicos para a redução de emissões de gases de efeito estufa pelos países desenvolvidos. Para as nações em desenvolvimento não são definidas metas de redução de emissões, em respeito ao princípio da Convenção que fala sobre “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”. É apresentada a sugestão de criação de um protocolo a ser apresentado dois anos depois, em 1997, o qual viria a ser o Protocolo de Quioto.

A.20 COP 2/1996 – Genebra, Suíça

Por meio da “Declaração de Genebra” diversos aspectos importantes são destacados, tais como a ratificação do conceito de “responsabilidades comuns, porém diferenciadas”, o reconhecimento e apoio ao segundo Relatório de Avaliação do IPCC, o apoio e estímulo aos países em desenvolvimento para que apresentem suas comunicações nacionais iniciais, a criação de obrigações legais de metas de redução pelos países “Anexo I” e a permissão de que os países “não Anexo I”⁸³ solicitem à Conferência das Partes apoio financeiro para o desenvolvimento de programas de redução de emissões, com recursos do Fundo Global para o Meio Ambiente.

⁸¹ United Nations Framework Convention on Climate Change (Convenção-Quadro das Nações Unidas em Mudanças Climáticas).

⁸² Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bielo-Rússia, Bulgária, Canadá, Comunidade Européia, Croácia, Dinamarca, Eslováquia, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Holanda, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia, e Ucrânia.

⁸³ Países em desenvolvimento, não obrigados a assumir metas de redução de emissões, apesar de poderem adotar ações voluntárias nesse sentido, como é o caso do Brasil.

A.21 COP 3/1997 – Quioto, Japão

É criado o Protocolo de Quioto, o qual estabelece metas de redução de gases de efeito estufa para os principais países emissores, chamados países do Anexo I.

Ficam pendentes para reuniões posteriores as decisões relativas à sua regulamentação, detalhes operacionais e sistemas de medição e avaliação dos esforços realizados e obtidos em cada país. Oitenta e quatro países assinaram o Protocolo de Quioto, que, para entrar em vigor, deveria ser ratificado por pelo menos 55 dos países signatários, incluído entre eles um conjunto de países do Anexo 1 responsáveis por, no mínimo, 55% das emissões mundiais totais de dióxido de carbono em 1990. Essa ratificação só veio a ocorrer quase oito anos depois, com a adesão da Rússia em 16 de fevereiro de 2005.

A.22 COP 4/1998 – Buenos Aires, Argentina

O objetivo básico da conferência foi estabelecer um calendário de prazos para a definição de acordos, definição de conceitos e procedimentos que garantissem na prática a implementação do Protocolo de Quioto. Esse objetivo ficou delineado na resolução chamada “Plano de Ação de Buenos Aires”.

O prazo estabelecido na resolução foi a COP 6, a ser realizada dois anos depois, quando então os países deveriam definir diversos aspectos essenciais ao cumprimento do Protocolo de Quioto, tais como metodologias de contabilização das metas nacionais e reduções das emissões, regulamentação das remoções por sumidouros, formas de avaliação quanto à obediência ao Protocolo e transferência de tecnologia e assistência aos países em desenvolvimento.

A.23 COP 5/1999 – Bonn, Alemanha

Os resultados basicamente limitaram-se à continuidade da implementação do Plano de Ação de Buenos Aires e ao início das discussões sobre uso da terra, mudança de uso da terra e florestas (LULUCF)⁸⁴.

⁸⁴ Land Use, Land Use Change and Forestry.

A.24 COP 6 Parte I/2000 – Haia, Holanda

Nesta COP, ficou clara a grande dificuldade que seria a obtenção de consenso a respeito das questões referentes à mitigação, sumidouros, LULUCF, Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, mercado de carbono e financiamento de países em desenvolvimento.

As negociações foram suspensas pela falta de acordo entre a União Européia e os Estados Unidos em assuntos relacionados a sumidouros e às atividades de mudança do uso da terra. Diante do impasse e sem possibilidade de se chegar a algum tipo de acordo, a COP 6 foi suspensa, na expectativa de retomada de seus trabalhos em 2001.

Em março de 2001, os Estados Unidos comunicaram sua rejeição ao Protocolo, alegando a falta de definição de metas de redução ou limitação de emissões para os países em desenvolvimento, além de afirmar que seu comprometimento com o Protocolo de Quioto poderia prejudicar sua economia. Apesar de tal posicionamento, os demais países continuaram a realizar consultas e reuniões, dedicados a reverter o fracasso da COP 6.

A.25 COP 6 Parte II/2001 – Bonn, Alemanha

Entre 16 e 27 de julho de 2001, foram retomados os trabalhos interrompidos na COP 6 – Parte I, com o propósito de finalizar a pauta proposta para a reunião de Haia. Delegados e ministros retomaram o trabalho, empenhando-se no sentido de superar os impasses identificados em Haia.

Apesar dos esforços, novas discordâncias surgiram especialmente em referência à obediência e o regime de cumprimento do Protocolo de Quioto. Da mesma forma, não foi atingido consenso sobre os assuntos referentes ao uso da terra e florestas (LULUCF), ficando sua discussão final adiada para a COP 7.

A.26 IPCC TAR (Third Assessment Report), 2001

O terceiro Relatório de Avaliações do IPCC apresentou as seguintes principais conclusões:

- a temperatura da superfície global média tem aumentado ao longo do século 20 em cerca de 0,6° C;
- as temperaturas subiram durante as últimas quatro décadas nos 8 quilômetros iniciais da atmosfera;
- a cobertura de neve e a extensão de gelo diminuíram;
- a confiança na capacidade dos modelos para projetar o clima futuro aumentou, embora ainda existam incertezas específicas associadas com nuvens e sua interação com a radiação e aerossóis;
- há evidências novas e mais fortes que a maioria do aquecimento observado durante os últimos 50 anos é atribuível a atividades humanas;
- a projeção de aumento da temperatura média da superfície terrestre é projetada para aumentar de 1,4° a 5,8° C durante o período de 1990 a 2100, devendo o nível do mar subir entre 0,1 a 0,9 metros ao longo no mesmo período;
- a grande variação nas previsões é baseada em diferentes cenários que assumem diferentes níveis de futuras emissões de CO₂. O resultado mais otimista supõe uma campanha agressiva para reduzir as emissões de CO₂, enquanto o mais pessimista é o cenário BAU.

A.27 COP 7/2001 – Marrakesh, Marrocos

O objetivo da conferência era a finalização dos detalhes operacionais do compromisso para a redução de emissão de gases geradores do efeito estufa, estabelecido no Protocolo de Quioto, de 1997. Além disso, trabalhou-se também na busca de consenso sobre as ações que visavam à melhor implementação da Convenção-Quadro de Mudanças Climáticas. No entanto, a saída dos Estados Unidos do processo de negociação ainda na COP 6, e a não adesão do chamado “*Umbrella Group*”⁸⁵ deixaram pendentes questões relativas aos pré-requisitos para a elegibilidade e os procedimentos de transferência de créditos contábeis para os mecanismos de apoio aos países em desenvolvimento.

⁸⁵ Aliança formada pelos países do Anexo I, incluindo Canadá, Austrália, Japão, Federação Russa, Nova Zelândia além dos EUA.

Ao largo de todas as divergências, foi assinado o “Acordo de Marrakesh”, o qual define regras operacionais para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), Joint Implementation (Implementação Conjunta), Comércio de Emissões e LULUCF.

A.28 RIO + 10, 2002

Passados 10 anos da Rio 92, foi realizada em Joanesburgo a Conferência Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável, conhecida como Rio + 10, da qual participaram representantes de 191 países no intuito de verificar o estágio de implementação dos compromissos acordados na Cúpula da Terra.

A conferência foi considerada um fracasso, pela ausência de quaisquer acordos ou metas relevantes, e da constatação de que os compromissos assumidos na Rio 92, passada uma década, ainda não haviam sido implementados.

De positivo, cita-se a ratificação do Protocolo de Quioto pelo Canadá e pela China.

Além disso, a convenção reforçou a necessidade de cumprimento das diretrizes da UNFCCC e do protocolo de Quioto.

A.29 COP 8/2002 – Nova Delhi, Índia

As negociações basicamente limitaram-se a discussões sobre o estabelecimento de metas de uso de fontes renováveis na matriz energética dos países membros. Um fato importante verificado na COP 8 foi a adesão da iniciativa privada e de organizações não governamentais ao Protocolo de Quioto.

A.30 COP 9/2003 – Milão, Itália

Destaca-se a questão das discussões sobre a regulamentação dos sumidouros de carbono no âmbito de projetos do MDL. Outro ponto importante da conferência foram as discussões para resolução dos últimos detalhes técnicos a respeito do Protocolo de Quioto.

A.31 COP 10/2004 – Buenos Aires, Argentina

Com a adesão da Rússia ao Protocolo de Quioto em 4 de novembro de 2004, finalmente fora atingido o quórum mínimo de 55 nações responsáveis por 55% das emissões globais das emissões de gases de efeito estufa.

Pouco mais de um mês depois, a COP 10 discute e aprova as regras para a entrada em vigor do Protocolo, e as questões relacionadas à regulamentação de projetos do MDL de pequena escala que haviam sido iniciadas na COP 9.

A.32 COP 11/MOP⁸⁶ 1/2005 – Montreal, Canadá

A COP 11, primeira conferência realizada após a entrada em vigor do Protocolo de Quioto, foi a maior conferência climática intergovernamental desde a adoção do Protocolo de Quioto, em 1997. Cerca de 10.000 pessoas participaram. Pela primeira vez, as questões das emissões oriundas do desmatamento das florestas tropicais e de mudanças no uso da terra são incluídas na pauta de discussões no âmbito da Convenção.

Têm início as discussões referentes ao segundo período de aplicação do Protocolo de Quioto, com início previsto para 2012.

A.33 COP 12/MOP 2/2006 - Nairóbi, Quênia

A compreensão de que a emissão de gases de efeito estufa é responsável pelo aquecimento global já é hegemônica e inequívoca. Os representantes das 189 nações presentes aprovam a criação de um fundo para financiar a adaptação dos países pobres aos efeitos das mudanças climáticas, por meio da utilização de parte dos recursos gerados no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Tal decisão é vista como um retrocesso, uma vez que representa uma mudança no rumo das discussões de COPs anteriores, que debatiam medidas de mitigação do aquecimento global em vez de propor ações de adaptação a suas consequências.

O Economista Nicholas Stern, membro do Governo Britânico, apresenta pessoalmente o Relatório “*Stern Review on the Economics of Climate Change*” (STERN, 2006), por meio do qual define o fenômeno do aquecimento global como a maior falha de mercado que a humanidade já vivenciou até hoje, dotada de proporções globais e efeitos potencialmente irreversíveis. O “Relatório Stern” afirma que a aplicação de 1% do PIB global por ano seria capaz de evitar que a

⁸⁶ 1ª Conferência das Partes servindo como Reunião das Partes do Protocolo de Quioto.

concentração de CO₂ atinja 550 ppm em 2035, como prevê, a qual provocaria prejuízos de até 20% do PIB mundial.

O governo brasileiro apresenta a proposta de criação de um mecanismo de incentivos para países em desenvolvimento que reduzam suas emissões através do combate ao desmatamento.

As discussões sobre a prorrogação do Protocolo de Quioto para um segundo período de aplicação entre 2012 e 2016 foi cercada de divergências, por conta de pressões de países desenvolvidos como EUA e Austrália, que exigem que todos os países, inclusive aqueles em desenvolvimento, assumam metas concretas de redução de emissões.

A.34 IPCC AR4 (Fourth Assessment Report), 2007

O quarto Relatório de Avaliações do IPCC apresentou as seguintes principais conclusões:

- o aquecimento do sistema climático é inequívoco;
- a maior parte do aumento observado nas temperaturas médias globais desde meados do século 20 muito provavelmente se deve ao aumento observado nas concentrações antropogênicas de gases de efeito estufa;
- dióxido de carbono, metano e óxido nitroso aumentaram acentuadamente como resultado das atividades humanas desde 1750 e agora excedem em muito os valores pré-industriais;
- a quantidade de dióxido de carbono na atmosfera em 2005 (379 ppm) excede em muito a faixa natural dos últimos 650.000 anos (180 a 300 ppm);
- a quantidade de metano na atmosfera em 2005 (1774 ppb) excede em muito a faixa natural dos últimos 650.000 anos (320-790 ppb);
- principal fonte do aumento do dióxido de carbono é o uso de combustíveis fósseis, mas as mudanças de uso da terra também são uma importante contribuição;
- a principal fonte do aumento do metano é muito provável que seja uma combinação de atividades agrícolas humanas e uso de combustíveis fósseis;

- as concentrações de óxido nitroso aumentaram de um valor pré-industrial de 270 ppb para um valor de 319 ppb 2005. Mais de um terço desse aumento é devido à atividade humana, principalmente a agricultura.
- onze dos 12 anos no período 1995 a 2006 estão entre os 12 anos mais quentes desde 1880;
- observações desde 1961 mostram que o oceano tem absorvido mais de 80% do calor acrescentado ao sistema climático, e que as temperaturas do oceano aumentaram a profundidades de, pelo menos, 3000 m;
- as temperaturas do Ártico aumentaram em taxa quase que duas vezes maior do que a taxa média global dos últimos 100 anos;
- o aquecimento dos oceanos fez com que a água do mar se expandisse, o que contribuiu para que o nível do mar venha subindo a uma taxa média de cerca de 1,8 mm/ano durante o período 1961 a 2003. O aumento do nível do mar durante o período 1993 a 2003 foi a uma taxa média de 3,1 mm/ano. Não está claro se esta é uma tendência de longo prazo ou apenas variabilidade.
- O forçamento radiativo⁸⁷ total a partir da soma de todas as atividades humanas é de cerca de 1,6 watts.m⁻², ao passo que o forçamento radiativo provocado pelo aumento da intensidade solar desde 1750 é de cerca de 0,12 watts.m⁻²;
- O forçamento radiativo combinado do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso muito provavelmente (> 90%), vem aumentando mais rapidamente durante a era atual (desde 1750) do que em qualquer outro momento nos últimos 10 mil anos.

A.35 COP 13/MOP 3/2007 – Bali, Indonésia

Pela primeira vez, uma COP inclui como objeto de suas discussões a questão da redução dos desmatamentos das florestas tropicais como forma de redução das emissões dos gases de efeito estufa. Para tal, foi criado o chamado “Mapa do Caminho de Bali” (Bali Road Map), o qual determinou o mecanismo REDD⁸⁸

⁸⁷ Forçamento radiativo é uma medida da influência que um fator exerce sobre o balanço de entrada e saída de energia no sistema Terra-atmosfera. É um índice de importância do fator como mecanismo potencial de mudança climática. É expresso em Watts/m² (Wm⁻²).

⁸⁸ O Programa das Nações Unidas REDD é um esforço colaborativo para reduzir as emissões por desmatamento e degradação florestal (REDD) em países em desenvolvimento. O programa foi lançado em 2008 e tem o poder e a experiência da Organização das Nações Unidas para a

(Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação Florestal) como instrumento potencial de mitigação das alterações climáticas, devendo ser concluído até 2009, definindo as metas de redução de emissões oriundas do desmatamento em países em desenvolvimento. Posteriormente, foi criado o conceito REDD+, o qual inclui na sua definição as atividades de conservação, manejo sustentável e aumento dos estoques de florestas em países em desenvolvimento.

A.36 RIO + 15, 2007

Cinco anos após a Conferência RIO + 10 em Joanesburgo, foi realizado em Jacarta na Indonésia, o encontro Rio +15, com o objetivo de avaliar as ações propostas pela Cúpula da Terra. Uma vez mais, a questão climática recebeu grande destaque. As discussões indicaram a necessidade de maiores investimentos que sejam suficientes para neutralizar o aumento das emissões de gases do efeito estufa.

Outro fato importante foi a propositura dos países industrializados de que os países em desenvolvimento assumissem compromissos de redução de suas emissões de gases de efeito estufa.

A.37 COP 14/MOP 4/2008 – Poznan, Polônia

A expectativa de que a conferência daria início às discussões para a elaboração de um novo acordo climático global acabou por ser frustrada em função da falta de consenso em grande parte alimentada pela crise financeira mundial. Essa posição chega a prever o fracasso no estabelecimento de compromissos efetivos pelo controle das alterações climáticas até o final de 2009.

De efetivo, ocorreu apenas a continuidade do processo de conversações para uma nova série de objetivos conforme estabelecido na COP 13 pelo “Mapa do Caminho de Bali” (Bali Road Map), em 2007.

Alimentação e Agricultura (FAO), Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e Organização das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). O Programa REDD suporta os processos de tomadas em cada país, bem como as realizadas por REDD nestes países e promove a participação ativa e instruída de todos os interessados, incluindo os povos indígenas e outras comunidades dependentes das florestas na implementação de REDD+ (abrange também o papel da conservação florestal, do manejo florestal sustentável e do aumento dos estoques de carbono) a nível nacional e internacional (FAO/PNUD/PNUMA, 2011).

A.38 COP 15/MOP 5/2009 – Copenhaguem, Dinamarca

O resultado final da COP 15 limitou-se à apresentação do chamado “Acordo de Copenhaguem”, que além de bastante frágil, não foi aprovado pela totalidade dos 192 países membros da Convenção. O acordo foi obtido após negociação entre Brasil, África do Sul, Índia, China, Estados Unidos e União Européia, mas contou com um Anexo onde fica apresentada a manifestação de desacordo dos demais países. Além disso, o acordo não faz referência a qualquer tratado com valor legal bem como não estipula prazo para tal.

Os resultados alcançados ficaram muito aquém dos objetivos esperados, como um novo acordo que fosse vinculante a todos os signatários. De positivo, pode-se citar o fato de constar do Acordo de Copenhaguem a ratificação do compromisso de limitar o aumento de temperatura em 2° C ainda que de forma não obrigatória (IPEA, 2011).

Houve avanço também no que se refere às diretrizes sobre mecanismo de redução de emissões por desmatamento e degradação (REDD), tendo como foco principal a conservação de estoques de carbono (IPEA, 2011).

O “Acordo de Copenhaguem”, prevê que os países ricos deverão doar US\$ 30 bilhões até 2012 para um fundo contra o aquecimento global, além de comprometer os países desenvolvidos a cortar 20% de suas emissões até 2020 e 80% até 2050, o que é menos do que o recomendado pelo IPCC, que indica a necessidade de redução entre 25% e 40% até 2020.

A.39 COP 16/MOP 6/2010 – Cancún, México

As poucas expectativas para a 16ª Conferência das Partes, fruto dos fracos resultados da COP 15 acabaram por ser levemente superadas em função de alguns avanços verificados. Um deles, a criação do Green Climate Fund (Fundo Climático Verde) prevê o aporte financeiro de US\$ 30 bilhões para o período 2010/2012, e mais US\$ 100 bilhões anuais a partir de 2020 com o objetivo de ajudar os países em desenvolvimento a reduzirem suas emissões e se adaptarem aos efeitos adversos da mudança do clima. Também foi mantida a meta fixada na COP 15 de 2° C de elevação máxima na temperatura em relação aos níveis pré-industriais.

Outro fato importante foi a apresentação feita pelo Brasil de sua Comunicação Nacional de Emissões de Gases de Efeito Estufa e o anúncio da regulamentação de sua Política Nacional sobre Mudança do Clima através do Decreto nº 7390, assinado no dia 09 de dezembro. Isto torna o Brasil a primeira nação a assumir formalmente suas metas de reduções de emissões.

A.40 COP 17/MOP 7/2011 – Durban, África do Sul

Foi apresentada a base para um futuro acordo contra as emissões de gases de efeito estufa, com metas para os Estados Unidos e a China, os dois maiores poluidores do planeta, válido após 2020. Apesar de não apresentar quaisquer propostas em curto prazo, as decisões de Durban são importantes no sentido em que um pequeno texto de uma página e meia, chamado de “Plataforma de Durban”, determina um calendário para criar um instrumento legal em 2015 que possa entrar em vigor até 2020, por meio do qual todos os países do mundo deverão se comprometer a metas obrigatórias de redução de emissões. Na prática, essa decisão representa o fim da cisão entre os países “Anexo I” e “Não Anexo I”, que vinha impedindo a realização de um acordo viável até a COP 15, em Copenhagem.

A.41 RIO + 20, 2012

Passados 20 anos desde a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED), realizada no Rio de Janeiro em 1992, e 10 anos desde a Cúpula Mundial sobre Desenvolvimento Sustentável (WSSD) realizada em Johannesburgo em 2002, foi realizada uma vez mais no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (UNCSD), em conformidade com a Resolução 64/236 da Assembléia Geral da ONU.

A Rio+20 foi a maior Conferência até então realizada pela ONU. Além da presença de representantes de cerca de 190 países, a conferência contou com a participação de lideranças dos setores privado, governo e da sociedade civil. Entre os dias 13 a 22 de junho, cerca de 45 mil pessoas participaram de incontáveis eventos realizados em todo Rio de Janeiro, incluindo os mais de 500 eventos oficiais e paralelos realizados no Centro de Convenções do Riocentro, onde ocorreu a Conferência.

Conforme informava o site oficial do evento, o principal objetivo da Conferência era *“assegurar um comprometimento político renovado para o desenvolvimento sustentável, avaliar o progresso feito até o momento e as lacunas que ainda existem na implementação dos resultados dos principais encontros sobre desenvolvimento sustentável, além de abordar os novos desafios emergentes”*.

No entanto, salvo algumas manifestações isoladas de representantes governamentais, a opinião predominante é que uma vez mais muito foi discutido, mas de fato pouco foi decidido de forma efetiva.

O resultado final da conferência praticamente resumiu-se ao documento “O Futuro que Queremos”, com 283 parágrafos versando sobre temas tão diversos como saúde e população, turismo e transporte sustentáveis, erradicação da pobreza, água e saneamento, energia, estados insulares e países menos desenvolvidos, desertificação e seca, montanhas, mineração, educação, produtos químicos e rejeitos, dentre muitos outros. Ou seja, uma verdadeira “colcha de retalhos” onde foco e profundidade de análise foram deixados de lado.

Sobre mudanças climáticas, o documento limitou-se a 3 curtos parágrafos distribuídos em 40 linhas, onde foi reafirmado o que já é público e notório: que as mudanças climáticas são um dos maiores problemas de nosso tempo, que as emissões de gases de efeito estufa continuam aumentando a nível global, que os países em desenvolvimento são os que mais sofrem seus efeitos danosos, que reconhece o aumento do nível dos mares, da erosão costeira e da acidificação dos oceanos. Outros reconhecimentos e recomendações são feitos, sem no entanto agregar qualquer conhecimento ou compromisso adicional. Em suma, nada de novo.

Por outro lado, um interessante resultado da Rio + 20 foi o conjunto de 705 compromissos voluntários apresentados por governos, ONGs, empresas, indústrias, universidades, dentre outras organizações. Tais compromissos representam a expectativa de investimentos da ordem de US\$ 600 bilhões ao longo dos próximos 10 anos nas áreas de transporte, energia, economia verde, redução de desastres e proteção ambiental, desertificação, mudanças climáticas, dentre outros assuntos relacionados ao desenvolvimento sustentável.

É uma questão de tempo sabermos se tais compromissos representam uma visão sustentável desses grupos ou se não passa de marketing ambiental.

A.42 COP 18/MOP 8/2012 – Doha, Qatar

A 18ª “Conference of the Parties” – COP 18 e a 8ª “Conference of the Parties serving as the Meeting of the Parties to the Kyoto Protocol” – MOP 8 pouco diferiram das conferências anteriores, no sentido da pobreza do avanço das negociações rumo ao efetivo combate ao aquecimento global.

O que pode ser observado foi a confirmação do que fora até então o tom das conferências anteriores, quando ficou claro existir um grande distanciamento entre ciência e política. Isso fica nítido quando são confrontados os pífios resultados das conferências com novas previsões de emissões apresentados pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Em seu relatório “The Emissions Gap Report 2012” (PNUMA, 2012), lançado poucos dias antes das conferências, um grupo de 55 cientistas e especialistas de 43 grupos científicos originários de 22 países afirmou que *“se nenhuma providência rápida for tomada pelas nações, as emissões podem chegar a 58 gigatoneladas (Gt) dentro de oito anos”*. Tal previsão é baseada na estimativa de que as emissões atuais já teriam chegado a 50,1 gigatoneladas de CO₂ eq., um nível cerca de 14% acima do que era esperado para 2020.

Apesar de tais previsões, os representantes dos 193 países presentes pouco avançaram na construção das soluções para o problema. De efetivo, o que de mais concreto foi decidido foi a adoção de um segundo período para o Protocolo de Quioto e a aprovação de um pacote de emendas a seu texto original. O distanciamento entre a ciência e a política fica uma vez mais cristalino, ao considerarmos que apenas 36 países dentre os 193 presentes aderiram de imediato ao segundo período de compromissos do protocolo de Quioto. Ressalte-se que uma vez mais os EUA não participam, ao menos de imediato do protocolo, como também não foram signatários o Canadá, o Japão, a Rússia e a Nova Zelândia.

Dentre tais emendas, foi incluído na cesta de gases de efeito estufa, listados no Anexo A, o trifluoreto de nitrogênio (NF₃), cuja inclusão vinha sendo recomendada pela comunidade científica há alguns anos.

Por outro lado, temas importantes como a metodologia de arrecadação e aplicação do mecanismo de financiamento que prevê um fundo de US\$ 100 bilhões anuais que as nações ricas deverão proporcionar aos países em desenvolvimento para o combate às mudanças climáticas não passou da fase de discussões, sem a definição de como será criado esse fundo nem como será realizado o financiamento das ações de mitigação e adaptação dos países em desenvolvimento.

O descompasso existente entre a política e a ciência fica ainda mais evidente se levarmos em conta que apenas 6 meses antes fora realizado no México o encontro do G20, cúpula das 20 maiores economias do planeta, durante o qual a diretora-gerente do FMI, Christine Lagarde, afirmou que o encontro garantiu o aporte de US\$ 456 bilhões para o FMI. Desse total, US\$ 75 bilhões são contribuições dos chamados BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul, respectivamente, de acordo com Boden et al. (2011), os 17^o, 4^o, 3^o, 1^o e 10^o maiores emissores mundiais de dióxido de carbono (Figura 99).

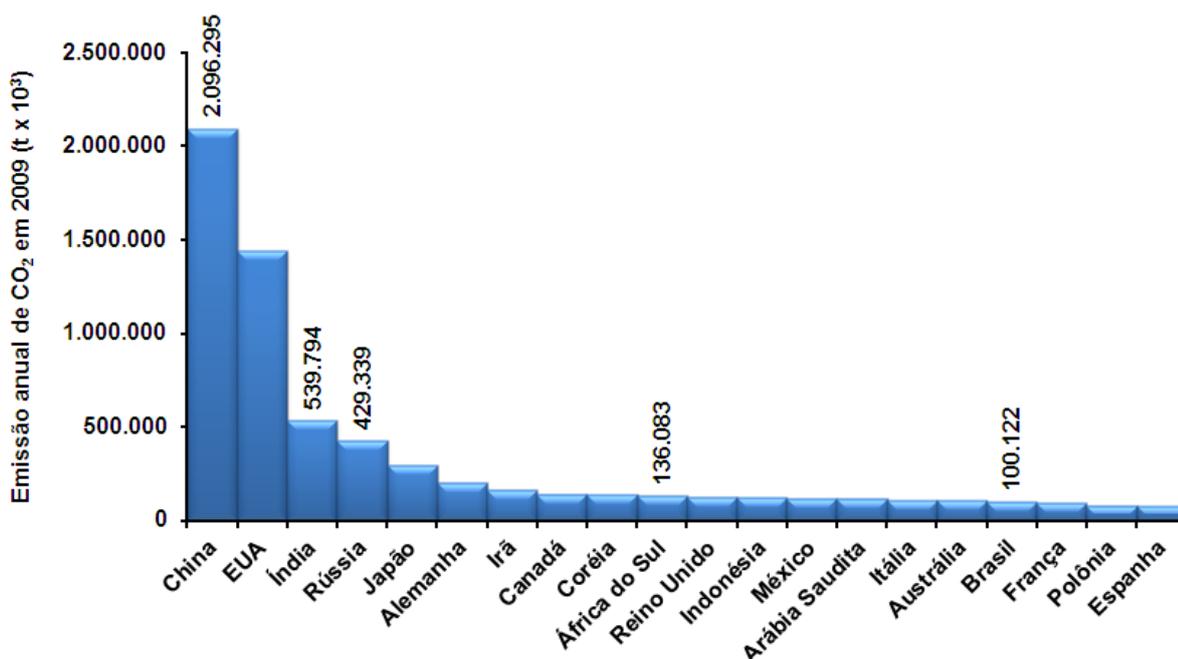


Figura 99: Ranking dos 20 países mais emissores de CO₂ a partir da queima de combustíveis fósseis, da produção de cimento e da queima de gás.

É uma clara demonstração do pouco interesse dedicado pelos políticos às questões ambientais.

A.43 IPCC AR5, 2013/2014

O Quinto Relatório de Avaliação está em andamento e deverá ser concluído em 2014. Da mesma forma que os relatórios anteriores, o AR5 será desenvolvido através de um processo de consulta a especialistas em mudanças climáticas de todas as disciplinas relevantes e aos usuários dos relatórios do IPCC, em particular os representantes dos governos. Como primeiro passo, especialistas, governos e organizações envolvidas no Quarto Relatório de Avaliação foram convidados a apresentar comentários e observações por escrito. Estas observações estão sendo analisados pelos membros do Bureau.

Em comparação com os Relatórios de Avaliação anterior, o AR5 vai colocar maior ênfase na avaliação dos aspectos sócio-econômicos das mudanças climáticas e suas implicações para o desenvolvimento sustentável.

Alguns novos recursos serão:

- um novo conjunto de cenários para a análise de toda a contribuição do Grupo de Trabalho;
- capítulos dedicados a mudança do nível do mar, ciclo do carbono e os fenômenos climáticos como El Niño e monções;
- detalhes regionais sobre impactos das mudanças climáticas, interações entre adaptação e mitigação;
- impactos inter e intra-regionais, e uma síntese multi-setorial;
- gestão de riscos e da formulação de uma resposta de adaptação e mitigação, incluindo informações relevantes referindo-se à estabilização das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera a um nível que evite uma interferência antropogênica perigosa com o sistema climático.

Os seguintes problemas foram identificados como sendo importantes para serem tratados de forma consistente ao longo das contribuições dos três Grupos de Trabalho:

- água e sistema terra: mudanças, impactos e respostas;
- ciclo do carbono, incluindo acidificação dos oceanos;
- camadas de gelo e do nível do mar;
- mitigação, adaptação e desenvolvimento sustentável;
- artigo 2º da UNFCCC.

Metodologias a serem apresentadas:

- avaliação consistente de incertezas e riscos;
- custeio e Análise Econômica;
- aspectos Regionais;
- tratamento de Cenários; e métricas de Gases de Efeito Estufa.

ANEXO B

ANEXO B – DESCRIÇÃO DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E DO GÁS NATURAL CONFORME O COMPENDIUM API

B.1 Exploração e produção (E&P)

Este segmento inclui a exploração e a extração de petróleo a partir de reservatórios subterrâneos, localizadas em terra ou no mar. Uma vez que o petróleo e o gás natural podem ser produzidos do mesmo reservatório, o segmento de produção pode incluir equipamentos para manuseio e operações de processamento de gás. Uma lista de verificação das fontes de emissão para este segmento da indústria é fornecida na Tabela 22.

Tabela 22: Fontes potenciais de emissões de GEE no segmento exploração e produção de petróleo e gás.

EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO		CO ₂	N ₂ O	CH ₄
FONTES DE COMBUSTÃO	Equipamentos estacionários			
	Caldeiras / geradores de vapor	x	x	x
	Reaquecedores de desidratação	x	x	x
	Aquecedores / depuradores	x	x	x
	Geradores com motores de combustão interna	x	x	x
	Bombas de incêndio	x	x	x
	Acionadores de compressor alternativo	x	x	x
	Geradores de turbina elétrica	x	x	x
	Acionadores de compressores de centrífugas e turbinas	x	x	x
	Perfuração de poços	x	x	x
	Tochas (Flares)	x	x	x
	Incineradores	x	x	x
	Fontes móveis			
	Equipamentos móveis de perfuração	x	x	x
	Outros veículos da empresa	x	x	x
Aviões e helicópteros	x	x	x	
Barcos de apoio e barcaças	x	x	x	
Preparação, construção e escavação na locação	x	x	x	

FONTES DE VENTILAÇÃO	Ventilação de processo	Processos de desidratação		x
		Bombas de desidratação Kimray		x
		Processos de purificação do gás	x	x
	Outras ventilações	Tanques de armazenamento e vasos de drenagem	x(*)	x
		Perfuração exploratória	x(*)	x
		Completações e testes de poços	x(*)	x
		Dispositivos pneumáticos	x(*)	x
		Bombas de injeção química	x(*)	x
		Análise e amostragem de gás	x(*)	x
		Degaseificação de fluidos de perfuração	x(*)	x
	Manutenção / Parada Total	Revestimentos de poços de baixa pressão de gás	x(*)	x
		Drenagens de compressores	x(*)	x
		Partidas de compressores	x(*)	x
		Coleta de drenagem de oleoduto	x(*)	x
		Drenagem de vasos	x(*)	x
		Completação de Poços	x(*)	x
		Saída e reentrada de poços	x(*)	x
		Supressão de Incêndio		
	Atividades não rotineiras	Parada de emergência (ESD)/ Drenagem de emergência (ESB)	x(*)	x
		Válvulas de alívio de pressão (PRVs)	x(*)	x
		Blowout de poço (quando não há queima em flare)	x(*)	x
		Supressão de Incêndio		
	FONTES FUGITIVAS	Vazamentos de componentes de equipamentos	x(*)	x
Tratamento de água residual		x	x	
Ar condicionado / Refrigeração				
FONTES INDIRETAS	Eletricidade importada	x	x	x
	Aquecimento do processo / importações de vapor	x	x	x
	Cogeração	x	x	x

Fonte: API (2009).

(*) Somente aplicável a fluxos ricos em CO₂. A relevância dessas fontes depende da concentração de CO₂ e da taxa de emissão específica da fonte.

A exploração envolve vários levantamentos geológicos e geofísicos e testes, seguidos de perfuração exploratória em áreas prováveis. As fontes de emissão primária de exploração são os gases de escape de motores de combustão interna (IC) usado em perfurações, a ventilação ou a queima do gás associado com testes de poço ou completações e as emissões de origem móvel associadas com equipamentos utilizados no local do poço e para transporte de pessoal.

Se o gás natural estiver disponível em pressões suficientemente altas, ele pode ser usado como a força motriz para perfurar os poços. Neste caso, CH_4 seria emitido para a atmosfera, semelhante a lançamentos por ventilação resultantes das bombas de diafragma. Gás natural também pode ser usado para limpar os sedimentos que se acumulam durante a perfuração, ou para descarregar a água do poço. Para este uso, gás natural comprimido é forçado através do poço para criar pressão e posteriormente é rapidamente liberado para a superfície através do anular. O gás liberado é mais frequentemente dirigido para um flare (resultando em emissões de CO_2), ou alternativamente exalado para a atmosfera (liberando CH_4).

B.2 Elevação de areias betuminosas e óleos pesados

Este segmento inclui a extração não convencional de petróleo pesado na forma de betume a partir de depósitos de areia e a subsequente conversão de betume em petróleo sintético. Areias oleosas (também chamadas de areias betuminosas) são formadas pela mistura de argila, areia, água e betume. O betume pode ser separado de areias de petróleo através de vários métodos: mineração de superfície e extração ou recuperação *“in situ”*. O betume, em seguida, é melhorado por meio da remoção de carbono e adição de hidrogênio, a fim de produzir petróleo sintético.

B.3 Produção de metano em minas de carvão

O *“Coal Bed Methane (CBM)”*, ou extração de metano de jazidas de carvão, é outro método de produção de CH_4 (gás natural). Por força das elevadas pressões em jazidas de carvão, o CH_4 permanece adsorvido na superfície do carvão ou é preso dentro de suas estruturas porosas. Este CH_4 pode ser recuperado para uso ou venda, assim como o gás associado pode ser recuperado a partir de poços de produção de petróleo.

B.4 Processamento de gás

Este segmento inclui operações de processamento. No processamento do gás, produtos de alto valor líquido são recuperados a partir do fluxo de gás, bem como pode o gás produzido ser tratado para atender às especificações do gasoduto. Saídas de processo de desidratação, adocicação de gás, dispositivos pneumáticos e atividades não rotineiras podem resultar em emissões de CH₄. Emissões fugitivas são também uma fonte de emissões de CH₄. Fontes de combustão, tais como caldeiras, aquecedores, motores e flares resultam em emissões de CO₂, bem como quantidades menores de emissões de N₂O e CH₄.

B.5 Captura e armazenamento geológico de carbono

A captura e armazenamento geológico de CO₂ (Carbon Capture and Geological Storage – CCS, na sigla em inglês) refere-se à cadeia de processos usados para coletar ou capturar um fluxo de CO₂, seu transporte para um local de armazenamento e sua injeção em uma formação geológica para isolamento da atmosfera por longo prazo.

Na etapa de captura, o CO₂ é separado de outros produtos gasosos, compactado para facilitar o transporte eficiente e quando necessário, condicionado, para o transporte (por exemplo, por desidratação). O CO₂ capturado é então transportado desde o ponto de captura até o local de armazenamento. Gasodutos são o método mais comum para o transporte de CO₂, embora o transporte a granel por navio, caminhão e ferroviário ocorra em uma escala muito menor. Uma vez no local de armazenamento, o CO₂ pode ser adicionalmente compactado e então injetado no reservatório de armazenamento. Dióxido de carbono é retido em trapas geológicas estruturais e estratigráficas (por exemplo, reservatórios depletados de petróleo e gás natural sem recuperação avançada de hidrocarbonetos).

Emissões provenientes de atividades de CCS podem ocorrer durante cada uma das fases de CCS. As operações associadas com a fase de captura requerem o uso de energia (consumo de combustíveis fósseis e/ou electricidade adquirida), resultando em combustão e/ou emissões indiretas. Emissões fugitivas e por ventilação podem ocorrer a partir de equipamentos usados como parte do processo de captura. Uma pequena quantidade de emissões também pode ser lançada sob a forma de

resíduos não capturados de CO₂ e CH₄. Perdas relacionadas ao processo de transporte podem ocorrer como emissões fugitivas ou perdas por evaporação durante a manutenção, lançamentos de emergência, armazenamento intermediário e carregamento/descarregamento. Combustão ou emissões indiretas também poderão ocorrer a partir de consumo de energia para comprimir e mover-se entre os locais de captura e armazenamento de CO₂. Emissões de armazenamento incluem ventilação, fugitivas, combustão e emissões indiretas de equipamentos e requisitos de energia associados ao local da injeção. Além disso, as emissões podem resultar de vazamentos físicos do local de armazenagem, CO₂ não capturado co-produzido com óleo ou gás e operações avançadas de recuperação de hidrocarbonetos.

Emissões de óxido nitroso (N₂O) e CH₄ também podem ocorrer com a operação de equipamentos movidos a combustão e eletricidade adquirida.

B.6 Armazenamento de gás natural e gás natural liquefeito (LNG)

Instalações de armazenamento de gás natural são usadas para armazenar o gás natural produzido durante períodos de baixa demanda (normalmente verão) para que o gás possa ser entregue durante o pico de demanda. Instalações de armazenamento podem ser abaixo ou acima do solo. Instalações acima do solo liquefazem o gás por super resfriamento e, em seguida, armazenam o GNL em tanques fortemente isolados. Instalações subterrâneas comprimem o gás natural na fase vapor em uma dentre várias formações, que podem ser campos depletados de gás, aquíferos ou cavernas de sal.

B.7 Transporte e distribuição

O segmento de transporte e distribuição consiste na movimentação de gás natural ou derivados de petróleo para os centros de distribuição e mercado. Emissões podem ocorrer a partir da carga e descarga de caminhões tanque, vagões ferroviários e embarcações marítimas, além de perdas durante o transporte por meio rodoviário, naval, ferroviário ou dutoviário. As emissões podem ocorrer como emissões fugitivas ou perdas por evaporação durante as operações de carregamento, descarga e armazenamento.

Em termos de emissões de GEE, apenas as emissões de CH₄ resultam de perdas de produto. O principal potencial de emissões de CH₄ é a manipulação de petróleo bruto que ainda não atingiu a pressão atmosférica, gás produzido e gás natural.

As emissões de CO₂ e quantidades significativamente menores de N₂O ocorrem no transporte e distribuição, devido à combustão de combustíveis nos motores de combustão interna, caldeiras a vapor em navios, turbinas e em compressores de gás. Também é possível ter pequenas quantidades de emissões de CH₄ não queimado quando o gás natural é usado para acionar os motores de combustão interna ou turbinas.

Também podem ocorrer emissões de SF₆, caso este gás seja usado como rastreador para detectar vazamentos em tubulações. Em base de CO₂ equivalente, tais emissões podem ser uma importante fonte de emissões.

B.8 Refino

O segmento de refino é composto por todos os sites de refino que recebem petróleo e produzem produtos acabados, como a gasolina. O processo de refino inclui várias etapas de destilação que separam os hidrocarbonetos de petróleo em faixas de ebulição mais restrita. Há também uma série de processos que reagem os hidrocarbonetos, tais como craqueamento, coqueamento, reformação, alquilação e isomerização de refino. Produtos petroquímicos podem ser fabricados no site da refinaria, tanto por separação e concentração natural de produtos químicos e petróleo quanto por reação para formar novos materiais. Refinarias também podem incluir a fabricação de lubrificantes, óleos especiais e asfalto.

As emissões de GEE no segmento refino ocorrem principalmente da queima de combustíveis para fornecer a energia necessária para os processos de refino. Emissões de dióxido de carbono a partir de caldeiras, aquecedores de processo, turbinas, flares e incineradores são as principais emissões de GEE. Emissões de óxido nitroso também resultam dessas fontes, mas em quantidades muito menores que os de CO₂. Quando essas fontes de combustão são alimentadas com gás natural ou gás combustível de refinaria, também pode haver quantidades residuais de emissões de CH₄ não queimado.

O sistema de gás natural e, potencialmente, o sistema de gás combustível, são o único fluxo de processo com concentrações de CH₄ potencialmente significativas. Emissões fugitivas de CH₄ podem ter origem em tubulações e componentes associados a estes sistemas e o equipamento de combustão acionado por esses combustíveis. Resultados de um estudo da API sobre emissões fugitivas de sistemas de gás de combustível de refinaria indicam que essas emissões aparentam ser insignificantes.

Saídas especializadas de processo também podem contribuir para as emissões de GEE. Alguns potenciais respiradouros de processo incluem o respiradouro de caldeira do regenerador de fluido catalítico do craqueador (FCC), aberturas de planta de hidrogênio e outras regenerações catalíticas. A abertura do FCC é uma fonte de emissões de CO₂, embora possa haver algum CH₄ não queimado se combustível suplementar tiver sido queimado em uma caldeira.

B.9 Petroquímica

Em algumas empresas, as operações para produzir ou manufaturar substâncias químicas baseadas em derivados de petróleo são separadas das operações de refino. As fontes de emissões de GEE do segmento petroquímico são semelhantes às do segmento de refino.

A combustão de combustíveis fósseis é a mais importante fonte de emissões de GEE do segmento petroquímico, resultando principalmente em emissões de CO₂. Quantidades residuais de emissões de N₂O também podem ocorrer. Condições de funcionamento diferentes associadas a unidades encontradas especificamente na indústria petroquímica, tais como as altas temperaturas de funcionamento de unidades de olefinas, podem resultar em emissões de N₂O maiores do que a observada em processos de refino. Emissões residuais de CH₄ também podem ocorrer a partir de equipamentos de combustão, como produto da combustão incompleta do combustível.

Como em refinarias, quando o gás natural ou gás combustível da planta é usado para alimentar os dispositivos de combustão, emissões de CH₄ podem resultar de fontes fugitivas associadas com tubulações do sistema ou os próprios equipamentos

de combustão. Emissões fugitivas e oriundas de ventilação podem ocorrer também onde concentrações significativas de CH₄ estão presentes em outros fluxos de processo.

B.10 Minérios e mineração

Este segmento inclui a operação de Minas e pedreiras principalmente envolvidas na mineração, desenvolvimento de minas e preparação de minerais metálicos e não metálicos, incluindo carvão. O termo "mineração" é usado amplamente para incluir a extração de minério, extração e beneficiamento (por exemplo, trituração, moagem, triagem, lavagem e separação) feitas habitualmente no local da mina.

Enquanto operações de CBM (Coal Bed Methane) são consideradas como um método de produção de gás natural, o segmento "Minérios e Mineração" consiste em operações de mineração, onde o gás natural arrastado na produção de minerais ou localizado em estratos circundantes não é recuperado.

Uma fonte significativa de emissões de GEE provenientes de mineração são as emissões geradas pela combustão, o que gera CO₂ e quantidades residuais de CH₄ e N₂O. As operações associadas à extração e beneficiamento são principalmente mecânicas e exigem o uso de energia, tanto gerada no local, como importada. Calor também pode ser necessário para alguns processos de mineração. Emissões de combustão também resultam do combustível consumido para operar equipamentos móveis de mineração. Estas fontes existem para qualquer tipo de operação de mineração.

B.11 Varejo e marketing

Emissões por evaporação de hidrocarbonetos podem ocorrer durante a transferência de combustível ou atividades de bombeamento, mas a concentração de CH₄ ou outro GEE é insignificante em produtos refinados. Portanto, geralmente são não significativas as emissões de GHG destas atividades. Emissões de metano podem ocorrer a partir de vazamentos de equipamentos de processo associados com GNL ou comercialização de gás natural comprimido (GNC). As emissões indiretas associadas com o uso de eletricidade no local são uma fonte de emissões de CO₂, N₂O e CH₄.

B.12 Geração de energia

A indústria de petróleo e gás natural é consumidora intensiva de energia, por requerer de forma constante eletricidade e muitas vezes calor de processo, vapor ou resfriamento. Vapor também é usado na recuperação avançada de petróleo ou em operações de CBM (Coal Bed Methane). Uma companhia de petróleo pode possuir e operar instalações de geração de energia para fornecer eletricidade e vapor para essas operações.

Emissões de combustão de CO_2 e em menor medida, N_2O e CH_4 , resultam da queima de combustíveis fósseis para operar as turbinas, caldeiras ou compressores. Onde o gás natural é usado para gerar energia, as emissões de CH_4 podem resultar de respiradouros de processo e de fontes fugitivas, embora essas emissões sejam geralmente pequenas em comparação com as fontes de combustão.

ÍNDICE REMISSIVO

ÍNDICE REMISSIVO

A

Abiogeniaxxiv, 83
 Anexo I 32, 272, 273, 276, 283
 APIxvi, xviii, xxii,
 xxvi, xxviii, 8, 12, 13, 31, 32, 33, 35,
 37, 91, 94, 97, 104, 105, 106, 107,
 118, 120, 121, 165, 167, 168, 169,
 170, 171, 172, 179, 180, 181, 182,
 183, 184, 213, 214, 215, 216, 217,
 223, 233, 291, 292, 297
 Aquecimento globalxxiii, xxvi,
 3, 13, 18, 24, 25, 26, 39, 44, 57, 60,
 63, 69, 233, 237, 251, 259, 263, 264,
 265, 277, 278, 282, 284, 306
 Aristóteles.....xiv, 25, 78
 Atmosfera3, 18, 20, 21, 26, 30,
 31, 33, 35, 37, 43, 44, 45, 49, 61, 63,
 69, 85, 251, 252, 253, 256, 259, 260,
 262, 269, 271, 275, 279, 280, 287,
 293, 294, 306

B

Benjamin Silliman77
 Biogenia82
 BPxvii, 113, 114, 224
 Bromo..... 30, 38

C

CAPP 12, 166, 225
 Catagênese83
 CFC38, 39, 42, 43,
 44, 46, 47, 50, 53, 54, 55, 58, 61,
 264, 268
 CH₄ (ver também metano)....x, xii, xviii,
 xix, xx, xxi, xxiv, xxv, 3, 4, 8, 22, 30,
 31, 32, 34, 44, 46, 50, 53, 54, 55, 58,
 62, 70, 71, 72, 90, 118, 121, 167,
 170, 175, 180, 181, 185, 190, 194,
 195, 197, 198, 199, 200, 202, 203,

207, 216, 245, 246, 291, 293, 294,
 295, 296, 297, 298, 299, 300
 Chevron..... xvi, 104, 113, 225
 Clima18, 20, 24, 25,
 26, 43, 62, 63, 64, 65, 68, 69, 234,
 243, 254, 256, 258, 261, 262, 265,
 267, 269, 271, 275, 282
 Cloro.....30, 38
 Clorofluorcarbonos38, 42
 CO₂ (ver também dióxido de carbono)
x, xi, xii, xiii, xvi, xvii,
 xviii, xix, xx, xxi, xxii, xxiii, xxiv, xxv,
 3, 4, 5, 7, 8, 21, 22, 28, 30, 31, 32,
 33, 37, 40, 43, 44, 46, 48, 50, 53, 54,
 55, 58, 59, 60, 62, 63, 64, 68, 69, 70,
 71, 72, 82, 90, 98, 107, 108, 109,
 112, 114, 115, 116, 117, 118, 119,
 120, 121, 122, 167, 170, 172, 174,
 175, 176, 179, 181, 185, 189, 190,
 194, 196, 197, 198, 201, 202, 203,
 205, 207, 214, 215, 216, 224, 226,
 232, 234, 246, 253, 254, 257, 262,
 263, 264, 269, 275, 278, 285, 286,
 291, 293, 294, 295, 296, 297, 298,
 299, 300
 Combustãoxix, 8, 33, 35, 37,
 96, 98, 118, 119, 120, 121, 157, 170,
 171, 172, 175, 176, 177, 178, 179,
 180, 181, 197, 198, 200, 202, 203,
 291, 293, 294, 295, 296, 297, 298,
 299, 300
 Compendium API 105, 181, 182
 Compostos insaturados93
 Compostos saturados.....92
 Contaminantes96, 100
 COPxxvii, xxviii, 31,
 32, 39, 271, 272, 273, 274, 275, 276,
 277, 280, 281, 282, 283, 284

D

Diagênese82

Dinâmica de Sistemasi, iii, v, x, xi, xviii, xxv, 5, 6, 12, 13, 126, 130, 133, 135, 136, 137, 146, 165, 187, 213, 214, 224, 226, 235

Dióxido de carbono (ver também CO₂)xiv, xv, xxii, 3, 4, 20, 21, 22, 32, 33, 34, 44, 45, 46, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 63, 66, 67, 90, 119, 120, 167, 172, 252, 253, 254, 256, 257, 259, 260, 268, 269, 270, 271, 273, 279, 280, 286, 297, 306

Dmitri Mendeleev xvi, 78

DS x, xii, 5, 6

E

E&Px, xi, xii, xiii, xxv, xxviii, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 31, 114, 117, 118, 119, 121, 166, 181, 214, 223, 291

Edwin Laurentine Drake 77

Efeito estufaxx, 3, 4, 13, 18, 22, 27, 30, 31, 39, 40, 42, 43, 44, 46, 58, 69, 104, 105, 111, 115, 118, 119, 168, 226, 228, 229, 234, 240, 241, 252, 263, 265, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 275, 277, 279, 280, 281, 282, 284, 285, 287, 306

Emissões fugitivas33, 35, 118, 120, 121, 170, 176, 216, 295, 296, 297

Enxofrexxiv, 32, 39, 90, 93, 94, 95, 96, 97, 100

Estequiometria6, 13, 214, 216

Exploração e Produçãoi, iii, v, x, xvi, xvii, 4, 6, 8, 111, 112, 115, 117, 166, 217, 291

Exxon Mobil xvi, 111

F

Forçamento radiativoxv, xx, xxiv, 3, 27, 33, 35, 37, 42, 43, 45, 46, 49, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 63, 72, 265, 280, 306

Forçante radiativo 26, 27

Forçantes climáticas 26

G

Gás naturalxvi, xx, xxv, xxviii, 4, 13, 33, 34, 35, 37, 81, 82, 85, 89, 90, 104, 105, 106, 107, 118, 119, 120, 121, 167, 175, 177, 178, 189, 233, 234, 242, 291, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300

Gases de Efeito Estufai, iii, v, x, xxiv, xxv, 3, 30, 31, 42, 43, 118, 175, 213, 225, 237, 244, 266, 282, 288

GEEx, xi, xv, xvi, xvii, xviii, xix, xx, xxi, xxii, xxiii, xxiv, xxv, xxvi, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 28, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 105, 106, 107, 108, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 117, 118, 119, 152, 154, 155, 156, 157, 165, 167, 168, 169, 170, 172, 173, 174, 175, 176, 178, 179, 181, 182, 183, 184, 188, 189, 197, 198, 202, 204, 208, 213, 214, 215, 240, 260, 266, 269, 291, 296, 297, 298, 299

George Henry Bissel 77

Georgius Agricola xvi, 76

H

H₂O (ver também vapor d'água) 30, 82, 90

Halocarbonos 30, 38

HCFC 38, 42, 47, 58, 264

Hexafluoreto de Enxofre (ver também SF₆) 31

HFCxxiv, 31, 32, 38, 42, 47, 58, 70, 71

Hidrocarbonetos xxiv, 91, 93

Hidroclorofluorcarbonos38, 42, 47, 264

Hidrofluorcarbonetos 31

Hidrofluorcarbonosxxiv, 32, 38,
42, 47
Hipócrates xiv, 25
Horizonte de tempo39, 46, 60,
62, 63, 65, 69, 72, 306

I

Intergovernmental Pannel of Climate
Change (ver também IPCC).....3
IPCC (ver também Integovernmental
Pannel of Climate Change) xvi,
xviii, xx, xxii, xxvii, xxviii, 3, 12, 27,
33, 34, 37, 38, 39, 43, 44, 45, 46, 48,
49, 50, 58, 59, 61, 64, 65, 107, 108,
154, 155, 157, 166, 169, 171, 172,
180, 181, 182, 183, 184, 185, 216,
224, 229, 230, 231, 255, 263, 266,
267, 268, 269, 271, 272,275, 278,
282, 286, 287, 306
IPIECA12, 31, 32, 107,
155, 157, 172, 182, 231, 267

J

Jonathan Greenleaf Eveleth77

M

Matéria orgânica..... 80, 82, 83, 98
Metagênese.....83
Metais..... 84, 88, 96, 99, 100, 246
Metano (ver também CH₄)xv, xviii,
xxviii, 3, 4, 20, 21, 22, 32, 34, 35, 36,
44, 54, 55, 56, 57, 58, 63, 68, 69, 70,
84, 86, 87, 88, 89, 121, 167, 177,
226, 238, 252, 268, 279, 280, 294,
299
Metodologiasx, xxvi, 13,
61, 62, 104, 132, 154, 165, 166, 167,
173, 181, 182, 183, 213, 215, 217,
233, 273
Modelagemx, xviii, xxvi, 5, 6,
7, 126, 134, 142, 143, 145, 146, 164,
165, 168, 187, 195, 213, 214, 240

Modelox, xi, xviii, xix,
xxvi, 5, 6, 7, 8, 66, 68, 72, 88, 127,
150, 156, 161, 162, 163, 164, 170,
174, 179, 181, 183, 184, 185, 186,
187, 188, 189, 190, 191, 192, 193,
194, 196, 197, 203, 204, 208, 213,
214, 215, 216, 217, 235, 243, 253
Mudanças climáticasxxiii, xxvi,
12, 13, 18, 24, 25, 26, 32, 57, 65,
172, 237, 251, 262, 263, 265, 266,
269, 271, 278, 284, 285, 286, 287

N

N₂O (ver também óxido nitroso) xii,
xx, xxiv, xxv, 3, 4, 8, 22, 30, 31, 32,
37, 44, 46, 50, 53, 54, 55, 58, 70, 71,
72, 118, 121, 122, 175, 181, 226,
236, 291, 294, 295, 296, 298, 299,
300
NF₃ (ver também trifluoreto de
nitrogênio)xxiv, 32, 39, 41,
119, 238, 285
Nitrogênio37, 42, 90, 93,
94, 96, 97, 98, 100, 121

O

OGP12, 172
Organização Marítima Internacional
.. (ver também WMO)23
Óxido nitroso (ver também N₂O) xv,
3, 4, 22, 32, 37, 38, 44, 46, 58, 121,
268, 279, 280, 295, 297
Oxigênio37, 82, 86,
91, 93, 94, 96, 98, 99, 121

P

PAG (ver também Potencial de
aquecimento global)xvi, xx,
xxii, xxiv, 31, 33, 37, 39, 40, 43, 45,
46, 48, 49, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66,
68, 69, 70, 71, 72, 155, 185, 198,
306
Pennsylvania Rock Oil Company77

Pensamento sistêmico12,
13, 126, 232

Perfluorcarbonos xxiv, 32, 39

Perfluorocarbonetos 31

Petrobrasxvii, xviii, xx, 5,
31, 32, 97, 114, 115, 116, 117, 119,
122, 178, 181, 185, 186, 228, 229,
233, 237, 248

Petróleox, xi, xvi, xxi,
xxiv, xxv, 4, 5, 6, 7, 8, 12, 13, 22, 31,
33, 35, 37, 76, 77, 78, 80, 81, 82, 83,
84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 93, 94,
95, 96, 97, 98, 99, 100, 104, 105,
106, 107, 108, 111, 112, 113, 114,
117, 118, 119, 121, 126, 128, 157,
166, 167, 175, 176, 177, 178, 182,
213, 214, 233, 234, 235, 236, 237,
240, 244, 246, 253, 291, 293, 294,
295, 296, 297, 298, 300

PFC..... xxiv, 32, 39, 40, 68

Pierre Marcelin Berthelot xvi, 83

Potencial de Aquecimento Global (ver
também PAG)xx, xxii, xxiv,
30, 31, 43, 45, 46, 48, 155, 185

Potencial de Depleção do Ozônio... 43,
62

Potencial de Temperatura Global (ver
também PTG).... xxii, xxiv, 64, 66, 67

Pré-sal xvii, 33, 120, 223, 233, 235

Protocolo de Montreal...xxvii,
30, 38, 43, 46, 69, 238, 264, 265

Protocolo de Quioto xxiv,
3, 31, 32, 39, 62, 64, 72, 181, 265,
272, 273, 274, 275, 276, 277, 278,
285, 306

PTG (ver também Potencial de
Temperatura Global)xvi, xx,
xxiv, 64, 65, 67, 68, 69, 70, 71

R

Radiação eletromagnética 3

Radiação infravermelha3, 30, 44,
45, 252, 253, 306

Regulamento CFRxi, xix,
6, 208, 214

Revolução Industrial .. 4, 20, 22, 26, 33

S

SF₆ (ver também Hexafluoreto de
enxofre)xxiv, 31,
32, 39, 40, 42, 48, 58, 70, 71, 296

Shell..... 104, 111

Subpart Wxi, xix, 6, 174,
175, 189, 196, 197, 203, 204, 208,
214, 245

T

TEMperature Proxy Index .. xxiv, 71, 72

Tempo de residênciaxvi, xx,
39, 40, 45, 49, 61, 62, 63, 68, 71

Teoria Russo-Ucraniano 86

Termoclina 35

Terra3, 4, 18, 20,
26, 30, 33, 37, 49, 81, 85, 86, 87,
129, 130, 234, 251, 252, 253, 265,
268, 270, 271, 276, 280, 281

Thomas Goldxvi, 86

Trifluoreto de nitrogênio (ver também
NF₃)xv, 32, 39,
40, 41, 42, 119, 285

Troposfera..... 34, 40, 61, 62

U

UNFCCC3, 244, 267,
270, 271, 272, 276, 287

Upstreamxvi, 5, 111, 112, 178

USEPAxi, xiii, xv, xviii, xix, 6,
12, 36, 85, 174, 175, 176, 177, 181,
189, 196, 203, 204, 208, 214, 244

V

Vapor d'água..... 30

Vladimir Ivanovich Vernadskyxvi, 86

W	
WMO (ver também Organização Marítima Internacional)	4, 23,
	34, 36, 37, 39, 43, 50, 247, 258, 263, 264, 266, 269
WRI	12, 166, 173, 180, 181, 182, 229, 247

NOTAS DE FIM

ⁱ Um índice, com base em propriedades radiativas de gases de estufa bem misturados, medindo o forçamento radiativo de uma unidade de massa de um determinado gás de efeito estufa bem misturado na atmosfera atual integrada ao longo de um horizonte de tempo escolhido, em relação à mesma massa de dióxido de carbono. O PAG representa o efeito combinado dos diferentes tempos que estes gases permanecem na atmosfera e a sua eficácia relativa em absorver a radiação infravermelha térmica de saída. O Protocolo de Quioto baseia-se nos PAG de pulsos de emissões durante um período de 100 anos.

ⁱⁱ A probabilidade de uma ocorrência ou de um resultado, quando puder ser estimada probabilisticamente, é expressa pelo IPCC usando a seguinte terminologia padrão (IPCC, 2007):

- virtualmente certo > 99% de probabilidade de ocorrer;
- extremamente provável > 95% de probabilidade;
- muito provável > 90% de probabilidade;
- provável > 66% de probabilidade;
- mais provável que improvável > 50% de probabilidade;
- aproximadamente tão provável quanto improvável > 33% e < 66% de probabilidade;
- improvável < 33% de probabilidade;
- muito improvável < 10% de probabilidade;
- excepcionalmente improvável < 1% de probabilidade.

ⁱⁱⁱ Deve ser enfatizado que não existe uma metodologia universalmente aceita para combinar todos os fatores relevantes para um potencial de aquecimento global único para as emissões de gases de efeito estufa. Na verdade, pode haver uma abordagem única que representará todas as necessidades dos decisores políticos. Uma abordagem simples foi adotada aqui para ilustrar as dificuldades inerentes ao conceito, para ilustrar a importância de algumas das lacunas existentes na compreensão e para demonstrar a gama atual de incertezas. No entanto, por causa da importância do potencial de aquecimento do efeito estufa, uma avaliação preliminar é feita.

^{iv} Segundo IPCC (2007a), o CO₂ não tem um tempo de vida específico, como ocorre com GEE com tempo de vida longo em torno de um século, como o N₂O, ou tempos de vida curtos em torno de uma década, tais como o CH₄ e alguns halocarbonos. O comportamento do CO₂ é completamente diferente dos gases residuais com tempos de vida bem definidos. Ainda que as emissões de CO₂ fossem limitadas aos níveis atuais, sua concentração atmosférica continuaria crescendo ao longo do século 21. Apenas uma hipotética eliminação total de suas emissões poderia tornar constante sua concentração atmosférica. Todos os cenários de moderadas reduções de emissões de CO₂ indicam concentrações crescentes em função dos processos de troca característicos associados ao ciclo do carbono no sistema climático.

Solomon et al. (2007), acrescentam que essa característica do CO₂ é devida ao ciclo do carbono, permanentemente cambiado entre os estoques da atmosfera, dos oceanos e da biota. Além disso, seus processos de remoção ocorreriam em distintas escalas de tempo. Os autores estimam que dos volumes de CO₂ lançados na atmosfera desde 1750, cerca de 45% permaneceriam na atmosfera, 30% teriam sido absorvidos pelos oceanos e os demais 25% pela biosfera. Quanto aos processos de remoção, os autores estimam que cerca de 50% do CO₂ atmosférico seriam removidos 30 anos após seu lançamento, 20% seriam removidos em alguns séculos e os demais 20% permaneceriam na atmosfera por milhares de anos.

Os processos de troca e remoção citados por IPCC (2007a) e Solomon et al. (2007), são novamente citados por Meehl et al. (2007). Os autores justificam as diferentes escalas de tempo dos processos de remoção de CO₂ pelo fato de que sua taxa de concentração atmosférica dependeria da resultante entre a taxa de emissão e as taxas de remoção devidas aos diversos processos disponíveis. Citam a transferência gasosa e química entre atmosfera e oceanos pelo processo do intemperismo, e processos biológicos como a fotossíntese, os quais ocorrem em diferentes ritmos.

USEPA (2011) cita como tempo de vida do CO₂ atmosférico o intervalo de tempo 50-200 anos, justificando para tal as já citadas diferentes taxas de absorção por processos de remoção distintos.

^v Ao abordar-se o estudo do petróleo, a primeira questão que se coloca é o da sua origem. Onde, quando e como os materiais desta substância útil ocorreram, e como contribuíram para sua formação? Estes vários problemas que surgiram foram sucessivamente resolvidos para um número de espécies minerais na composição da crosta, mas até agora não recebeu uma solução satisfatória no que diz respeito ao petróleo.

É geralmente aceito que o óleo tem uma origem orgânica, como resultado da decomposição de organismos primitivos, animais e plantas. Esta opinião baseia-se em que o petróleo é composto exclusivamente de hidrocarbonetos e uma pequena proporção de oxigênio e nitrogênio. Sabemos, de fato, que estes compostos podem surgir de diversos materiais orgânicos submetidos à ação de calor, na ausência de ar. Mas sabemos também que o calor não é absolutamente necessário e que compostos similares são formados no longo prazo sem a sua intervenção. Exemplo: turfa, carvão, lignita.

Também foi observado que frequentemente há alguma relação entre as fontes do petróleo e a vizinhança de vulcões, razão principal que atribuímos à formação do óleo mineral pela ação de forças vulcânicas sobre remanescentes do material existente. Mas sem entrar em detalhes, limito-me apenas a afirmar o fato de que os cientistas, como eu disse, tem em sua maior parte, atribuído ao petróleo uma origem orgânica.

No entanto, considerando todo o conhecimento adquirido sobre a substância em questão, parece-me difícil aceitar tal opinião. Isto é o que pretendo demonstrar, antes de delinear as minhas opiniões pessoais sobre o assunto.

Em primeiro lugar, somos forçados a admitir que o óleo foi formado tanto na superfície da terra quanto sob as águas, porque, no primeiro caso, teria evaporado deixando um resíduo alcatrão, e, no segundo caso, em virtude da sua baixa densidade, que viria a superfície das águas para fazer contacto com a atmosfera e, portanto, seria ainda evaporou-se.

Além disso, as propriedades do óleo indicam suficientemente que sua formação não ocorre da mesma forma como a da maioria dos outros minerais. Forma-se à curta distância de seus depósitos atuais. Mas o mesmo não se pode dizer o mesmo de muitos outros materiais, tais como calcário, argila, sal-rocha, etc. Podemos supor que todos estes corpos foram formados a uma grande distância dos lugares onde eles são encontrados. Seu transporte foi realizado tanto pela água do mar como pela água de rios ou pelo gelo flutuante a partir da idade do gelo cujo âmbito tem sido muito prolongado. Foram feitas análises encontrados na Rússia Central da fronteira noroeste do país; o sal de Wieliczka vem talvez de todos os mares do globo; o gesso de Volga foi depositado por águas do oceano.

No entanto, se o petróleo teve uma origem orgânica e se ele realmente foi formado nos depósitos onde atua hoje, devem reunir-se em depósitos uma enorme quantidade de detritos orgânicos. Mas isso é precisamente o que não acontece, ninguém informou ainda nos restos de areias oleosas em questão, que ainda não podia desaparecer se o óleo mineral não foi formado na superfície mas nas profundezas do solo.

Eu acho que o melhor é olhar para o lugar de formação de petróleo em camadas mais profundas do que aquelas em que ele ocorre. Eis a razão.

^{vi} Não é demais dizer que estudo deste problema agora nos permite prever com confiabilidade a natureza de um petróleo bruto que pode ser esperado quando se perfura a várias profundidades em acumulações com estratos de diferentes eras geológicas. Se é conhecida antecipadamente a profundidade de um reservatório produtor particular é de se esperar que possamos estar razoavelmente certos do tipo de petróleo bruto que será encontrado.

^{vii} Pela queima de combustíveis o homem adicionou cerca de 150.000 milhões de toneladas de dióxido de carbono para a atmosfera durante a segunda metade do século passado. O autor estima a partir dos melhores dados disponíveis, que aproximadamente três quartos deste volume mantêm-se na atmosfera.

Os coeficientes de absorção de radiação de dióxido de carbono e vapor de água são usados para mostrar o efeito do dióxido de carbono na "radiação celeste". A partir deste aumento da temperatura média devido à produção artificial de dióxido de carbono, estima-se a taxa de $0,003^{\circ}\text{C}$ por ano, no momento presente.

As observações de temperatura em 200 estações meteorológicas são usadas para mostrar que as temperaturas mundiais na verdade, aumentaram a uma taxa média de $0,005^{\circ}\text{C}$ por ano durante o último meio século.

Examinei 21 conjuntos muito precisos de observações, tomados por volta do ano 1900, sobre a quantidade de dióxido de carbono no ar livre, em relação aos mapas de tempo do período. A partir deles eu concluí que a quantidade de dióxido de carbono no ar livre da região do Atlântico Norte, no início deste século, foi de $2,74 \pm 0,05$ partes em 10.000, em volume de ar seco.

^{viii} ...Tem sido extremamente difícil por este meio evitar a conclusão de que as tendências de aquecimento [até 1940] para o mundo como um todo, e para o Hemisfério Norte, em particular, são verdadeiramente com dimensões planetárias. Por outro lado, não pode ainda ser demonstrada desta forma além de uma dúvida razoável que o resfriamento líquido desde a década de 1940 foi igualmente no âmbito planetário. Que este arrefecimento é de tal natureza, no entanto, parece razoável e isso deve ser verificável se o resfriamento nas áreas de dados continuarão por mais uma década ou duas, no futuro.

^{ix} De acordo com os dados e estimativas nos capítulos 4 e 10, um pouco menos da metade do dióxido de carbono liberado pelo homem desde a revolução industrial manteve-se na atmosfera. Durante esse tempo, um aumento de cerca de 13 por cento da concentração atmosférica de dióxido de carbono tomou lugar. A maioria do remanescente é inferida como tendo sido absorvida pelos oceanos e pela biosfera terrestre. Pode-se estimar a quantidade de dióxido de carbono que pode ser introduzida através da metade do século seguinte e, através da utilização de modelos do ciclo de carbono, a quantidade que pode ser esperada para permanecer na atmosfera. Não é improvável que o pico de concentração atmosférica ocorra entre 2150 e 2200 podendo ser de quatro a oito vezes o nível pré-industrial. Além disso, concentrações muito mais elevadas do que hoje poderão persistir durante muitos séculos.

^x Os efeitos climáticos da liberação de dióxido de carbono podem ser o principal fator limitante na produção de energia a partir de combustíveis fósseis ao longo dos próximos séculos. A perspectiva de mudanças climáticas prejudiciais pode, assim, ser o estímulo de maiores esforços de conservação e uma transição mais rápida para fontes alternativas de energia que se justifica por meras considerações econômicas.

^{xi} O potencial efeito do dióxido de carbono sobre o clima pode ser exacerbado por fluorocarbonos, óxido nitroso e outros gases industriais. A variabilidade natural do clima pode aumentar ou reduzir o impacto de tais efeitos artificiais.

^{xii} Existem incertezas profundas relativas ao ciclo do carbono, o clima, e sua interdependência. Estas incertezas podem ser resolvidas apenas por um esforço bem coordenado de caráter extremamente interdisciplinar. O foco para tal esforço não é fornecido por nenhum dos mecanismos institucionais existentes.

^{xiii} Há evidências consideráveis de que, entre os anos de 1940 e cerca de 1970, as mudanças climáticas da primeira parte deste século tenderam a sofrer uma inversão. As temperaturas na maior parte haviam diminuído, principalmente no Ártico e do Atlântico sub-Ártico, onde o gelo do mar tem aumentado. A circulação do hemisfério norte parece ter mudado de forma sugestiva de uma amplitude cada vez maior das ondas planetárias e de maiores extremos de condições meteorológicas em muitas áreas do mundo (a situação no hemisfério sul não tem sido tão bem documentada). Estes eventos culminaram, em momentos nos últimos anos, no surgimento de condições anômalas no cinturão de monções dos trópicos e na seca generalizada na zona do Sahel na África e no noroeste da Índia. Até que ponto esses eventos calamitosos recentes estão relacionados uns aos outros como manifestações de uma flutuação globalmente coerente do clima não é claro. Em qualquer caso, eles dramatizam o fato de que a variabilidade climática, seja globalmente coerente ou não, é de se

esperar não menos em escalas de tempo de meses e anos do que em escalas de tempo de séculos e milênios. Uma evidência vacilante dessas tendências do clima apenas nos últimos cinco ou dez anos, atesta também a natureza efêmera de todas as tendências climáticas. Essa é a natureza do clima e as variações climáticas.

^{xiv} Uma grande parte da nossa dificuldade na tentativa de avaliar os possíveis efeitos do homem deriva do fato de que temos uma base de dados pobres que ainda não compreende adequadamente fenômenos naturais climáticos. Para responder às questões levantadas no presente volume, precisamos entender a dinâmica do clima. O objetivo deste trabalho é explicar a necessidade de monitoramento do clima e definir uma maneira de realizar tal monitoramento. Os mecanismos que produzem e controlam o clima da Terra são extremamente complexos. O clima geralmente é considerado como um fenômeno principalmente atmosférico, mas é a interação da atmosfera com o oceano, a terra, e massas de gelo, junto com o sol e espaço, que controla o comportamento da atmosfera. Se formos avaliar a possível influência do homem sobre o clima e prever o que suas atividades podem fazer para o nosso clima, devemos primeiro entender os mecanismos básicos de física do clima bem o suficiente para modelá-lo. Isto está além de nosso alcance no momento.