



## MODELO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE'S) NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO E GÁS

Recebido: 05/03/2012

Aprovado: 07/05/2012

<sup>1</sup>Amarildo da Cruz Fernandes

<sup>2</sup>Marcelo Cruz dos Santos

### RESUMO

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. 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 (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) 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. O objetivo principal deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma modelagem baseada na linguagem da Dinâmica de Sistemas (DS), de como se processa a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) nas complexas instalações de Exploração e Produção (E&P) de petróleo e gás. Para ilustrar um dos resultados deste processo de modelagem foi realizada uma simulação computacional envolvendo as emissões decorrentes da estimativa de produção para o Piloto do Sistema de Produção e Escoamento da Área de Tupi – Piloto de Tupi (ICF, 2008).

**Palavras-chave:** Gases de Efeito Estufa (GEE); Exploração e Produção (E&P) de petróleo e gás; Dinâmica de Sistemas (DS); Aquecimento global; Piloto de Tupi

<sup>1</sup> Doutor em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil  
Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ  
E-mail: [acruzfe@ig.com.br](mailto:acruzfe@ig.com.br)

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Brasil  
E-mail: [marcelo\\_santos@poli.ufrj.br](mailto:marcelo_santos@poli.ufrj.br)



## MODEL OF EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES (GHG'S) IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

### ABSTRACT

The warming of Earth's atmosphere is a natural phenomenon and necessary to sustain life on the planet, being caused by the balance between the electromagnetic radiation received by the Earth from the Sun and the infrared radiation emitted by the Earth back into space. Since the mid-eighteenth century, with the advent of the Industrial Revolution and the consequent increase in burning fossil fuels, changes in land use and agriculture, the concentrations of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), methane (CH<sub>4</sub>) and nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) has increased significantly. By the year 2010, the concentrations of these three gases showed increments respectively in the order of 39%, 158% and 20% (WMO 2009, 2010 and 2011). Such increases in the concentrations of these gases are changing the Earth's radioactive balance, intensifying the natural

greenhouse effect, which over millions of years has been essential to support life on the planet. The main objective of this paper is to present the development of a model based on the language of System Dynamics (SD), of how the emission of Greenhouse Gases (GHGs) is in complex installations Exploration and Production (E & P) of oil and gas. To illustrate one of the results of this modeling process a computer simulation was performed involving emissions from production estimate for the Pilot Production System and Drainage Area Tupi - Tupi Pilot (ICF, 2008).

**Keywords:** Greenhouse Gas (GHG) Exploration and Production (E&P) of oil and gas; System Dynamics (SD); Global Warming; Tupi Pilot

## MODELO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO Y GAS

### RESÚMEN

El calentamiento de la atmósfera de la Tierra es un fenómeno natural y necesario para mantener la vida en el planeta, causado por el equilibrio entre la radiación electromagnética recibida por la Tierra desde el Sol y la radiación infrarroja emitida por la Tierra hacia el espacio. Desde mediados del siglo XVIII, con el advenimiento de la Revolución Industrial y el consiguiente aumento en la quema de combustibles fósiles, cambios en uso del suelo y la agricultura, las concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se ha incrementado de manera significativa. Para el año 2010, las concentraciones de estos tres gases mostró incrementos, respectivamente, en el orden del 39%, 158% y 20% (OMM 2009, 2010 y 2011). Estos aumentos en las concentraciones de estos gases están cambiando el equilibrio radioactivo de la Tierra, intensificando el efecto invernadero natural, que

durante millones de años ha sido esencial para mantener la vida en el planeta. El objetivo principal de este trabajo es presentar el desarrollo de un modelo basado en el lenguaje de la Dinámica de Sistemas (SD), de cómo es la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en exploración y producción de instalaciones complejas (E & P) de petróleo y gas. Para ilustrar uno de los resultados de este proceso de modelado se realizó una simulación por ordenador que implica emisiones de la producción estimada para el sistema de producción piloto y Drenaje área de Tupi - Piloto de Tupi (ICF, 2008).

**Palabras-clave:** Gases de Efecto Invernadero (GEI) Exploración y Producción (E & P) de petróleo y gas; Dinámica de Sistemas (SD); Calentamiento Global; Pilot Tupi.



## 1 INTRODUÇÃO

Em fevereiro de 2007, o Quarto Relatório de Avaliação das Mudanças Climáticas do Planeta (IPCC-AR4) divulgado pelo IPCC3 alertou para a possibilidade de aumento médio global das temperaturas entre 1,8° C e 4,0° C até o ano de 2100. Com mais de 90% de confiabilidade, o relatório afirma que as atividades antrópicas foram responsáveis pela maior parte do aumento de temperatura nos últimos 50 anos.

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.

Segundo IPCC (1996), a radiação emitida pela Terra na forma de radiação infravermelha oscila em torno de 390 W/m<sup>2</sup>, dos quais cerca de 240 W/m<sup>2</sup> conseguem escapar pelas camadas mais altas da atmosfera e retornam para o espaço exterior. Os demais 150 W/m<sup>2</sup> 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<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). Tal relevância fica evidente se levarmos em consideração que somente estes três gases são responsáveis por quase 90% de todo o forçamento radiativo<sup>4</sup> responsável pelo aquecimento global (NOAA, 2011).

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 à agricultura, as concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) têm aumentado de forma significativa. Até o ano de 2010, as concentrações desses três gases apresentaram incrementos 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.

<sup>3</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change.

<sup>4</sup> 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<sup>2</sup> (Wm<sup>-2</sup>).



As indústrias do petróleo e do gás natural têm um relevante papel nas emissões globais de gases de efeito estufa, e consequentemente 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 Gases de Efeito Estufa (GEE), os quais totalizaram 44,153 x 10<sup>9</sup> t CO<sub>2</sub> eq. Desse montante, cerca de 2,826 x 10<sup>9</sup> t CO<sub>2</sub> 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 x 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub> eq. para 16,512 x 10<sup>6</sup> t CO<sub>2</sub> eq. (PETROBRAS, s.d.)

O objetivo principal deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de uma modelagem baseada na linguagem da Dinâmica de Sistemas (DS), de como se processa a emissão de GEE nas complexas instalações de E&P de petróleo e gás. Para ilustrar um dos resultados deste processo de modelagem foi realizada uma simulação computacional envolvendo as emissões decorrentes da estimativa de produção para o Piloto do Sistema de Produção e Escoamento da Área de Tupi – Piloto de Tupi (ICF, 2008).

O modelo, que está sendo desenvolvido, pretende facilitar a realização de inventários das emissões de GEE oriundas das atividades de E&P, a determinação das alternativas de mitigação e seus correspondentes custos. O modelo permitirá determinar a relevância de cada variável ou conjunto de variáveis (fontes de emissões, estequiometria dos hidrocarbonetos, graus de incerteza, fatores de atividade e de emissão, etc.), 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. Na prática, um dos objetivos mais importantes do modelo é permitir prever os resultados futuros causados por alterações atuais em cada variável presente no projeto.

A proposta de desenvolver uma modelagem para estimar as emissões atmosféricas de GEE é um desafio complexo, tendo em vista a escolha dentre os diferentes protocolos 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 na modelagem.

A pesquisa pelos valores referentes aos fatores de emissão e fatores de atividade a serem utilizados no modelo foi feita a partir do Compêndio (API, 2009). Em alguns casos foi necessária a



conversão de unidades entre o Sistema Internacional (SI) e unidades métricas adotadas por organizações normatizadoras dos EUA, tais como American Society for Testing and Materials (ASTM) e American National Standards Institute (ANSI).

## **2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Os inventários de emissões de GEE seguem metodologias propostas por diversos protocolos e normas disponíveis para a realização de inventários desta natureza, como por exemplo, as normas ISO 14064-1, 14064-2, 14064-3 e 14065, o GHG Corporate Protocol do World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) e World Resources Institute (WRI), o Verification Protocol da International Emissions Trading Association (IETA) dentre outros.

Na área de Petróleo e Gás, um reconhecido protocolo em uso é o “Compendium of Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for the Oil and Natural Gas Industry” do American Petroleum Institute (API), cuja versão de 2009 (atual) foi utilizada para determinação das fontes de emissão de GEE’s, fatores de atividade e metodologia de cálculo.

Por outro lado, a utilização da Dinâmica de Sistemas (DS) para abordagem do problema segue uma sequência de etapas que permite a escolha de ações que vão desde a definição e compreensão do problema, até a tomada de decisões quanto a alterações que o modelo gerado tenha indicado como necessárias:

- Definição do problema;
- Identificação das variáveis que interagem dentro do sistema e dos efeitos gerados por cada variável;
- Identificação das causas do problema em estudo e avaliação da informação gerada de forma a possibilitar a tomada de decisão quanto a novas ações;
- Construção de um modelo matemático das políticas de decisão, fontes de informação, e interações dos componentes do sistema;
- Simulação do comportamento do sistema através do tempo na forma como foi descrito pelo modelo;
- Comparação dos resultados gerados pelo modelo com outros resultados disponíveis em outros estudos;
- Revisão do modelo procurando torná-lo o mais próximo possível da realidade;



- Redesenho, dentro do modelo, dos relacionamentos organizacionais e políticas que possam ser modificadas no sistema atual para achar as mudanças que melhorem o comportamento do sistema;
- Proposição das alterações no sistema real de acordo com as informações que o modelo indicou que provocarão a melhoria de desempenho.

### **3 O COMPENDIUM API**

O Compendium API é uma compilação de fatores de emissão e técnicas de estimativas reconhecidas aplicáveis às operações da indústria de petróleo e gás. As fases preliminares do Compendium API incluíram a revisão e comparação das estimativas de emissões de EE's apresentados pelos seguintes relatórios (API, 2004):

- American Petroleum Institute (API). Methane and Carbon Dioxide Emission Estimates from U.S. Petroleum Sources, 1997.
- Canadian Association of Petroleum Producers (CAPP). Global Climate Change Voluntary Challenge Guide, 2000.
- E&P Forum [mais recentemente denominado Offshore Gas Producers (OGP)]. Methods for Estimating Atmospheric Emissions from E&P Operations, setembro 1994.
- Emission Inventory Improvement Program (EIIP). Guidance for Emissions Inventory Development, 1999.
- US Environmental Protection Agency (EPA). Methane Emissions from the U.S. Petroleum Industry, 1999.
- Gas Research Institute (GRI) and EPA. Methane Emissions from the Natural Gas Industry, junho 1996.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Greenhouse Gas Inventory Reference Manual: IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3, 1997.
- Canadian Petroleum Association (CPA). A Detailed Inventory of CH<sub>4</sub> and VOC Emissions from Upstream Oil and Gas Operations in Alberta, Volumes I-III, 1992.
- US Department of Energy (DOE). Instructions for Form EIA 1605 Voluntary Reporting of Greenhouse Gases, 1997.



- US Environmental Protection Agency. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, AP-42, (GPO 055-000-005-001), 2000.

A versão 2009 do Compendium API, adotada no presente trabalho, é a terceira versão do documento. Os fatores de emissão e metodologias apresentadas representam as últimas informações disponíveis no momento em que o documento foi publicado (agosto de 2009).

As metodologias apresentadas permitem a estimativa das seis espécies de GEE ou famílias de gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFC, PFC, e SF<sub>6</sub>) oriundos das operações da indústria de petróleo e gás natural. A modelagem proposta pelo presente trabalho tem seu escopo limitado às atividades de E&P, nas quais os GEE significativos são apenas o CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e em menor grau de importância, o N<sub>2</sub>O.

#### **4 MODELAGEM COM DINÂMICA DE SISTEMAS**

A Dinâmica de Sistemas é uma metodologia de modelagem desenvolvida por Forrester (1961) no Massachusetts Institute of Technology (MIT) na década de 1950. Seu principal objetivo é possibilitar a compreensão e discussão do comportamento de sistemas complexos, que estão em constante transformação. A compreensão dos padrões de comportamento do sistema como um todo parte da análise de inter-relações entre suas diversas partes, oferecendo uma mudança de perspectiva ao mostrar de que maneira a própria estrutura do sistema ocasiona seus sucessos e falhas.

Em Dinâmica de Sistemas duas formas de modelagem são empregadas para caracterizar um sistema: a abordagem soft e hard. A maioria dos profissionais reconhece que ambas as técnicas não são excludentes, uma vez que um modelo qualitativo pode ser utilizado na fase inicial de conceitualização e definição de um problema, enquanto outro modelo quantitativo pode ser empregado nos estágios posteriores.

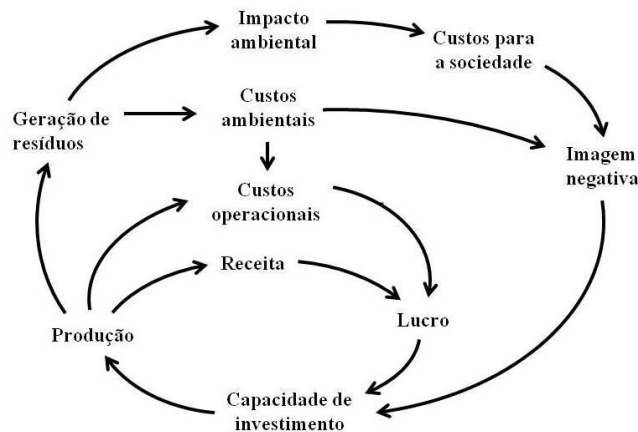
##### **4.1 A MODELAGEM SOFT E HARD DA DINÂMICA DE SISTEMAS**

Uma das aplicações resultantes da modelagem soft da DS é a possibilidade de visualização de qualquer sistema humano, através da identificação das suas características estruturais, das



relações causa-efeito-causa e das estruturas de feedback. Tal tarefa utiliza a técnica dos chamados diagramas de Enlace Causal (causal loop diagrams), como visto na Figura 1. Tais diagramas, de natureza qualitativa, são utilizados para produzir uma descrição dos principais elementos que determinam o comportamento de um sistema, sendo particularmente úteis para o desenvolvimento de um entendimento compartilhado da dinâmica relacional do sistema, ou mesmo para comunicar alguma descoberta.

**Figura 1: Diagrama de enlace causal.**

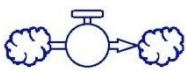


Fonte: Elaborado pelos autores

Na perspectiva hard da DS, qualquer sistema pode ser descrito através de uma linguagem composta de quatro elementos, conforme descrito a seguir e apresentado pela Figura 2:



Estoques (níveis), os quais representam o estado de um recurso, como por exemplo, pedidos em carteira, trabalhadores, inventários ou capital intelectual;



Fluxos, que são atividades que produzem crescimento ou redução dos estoques;



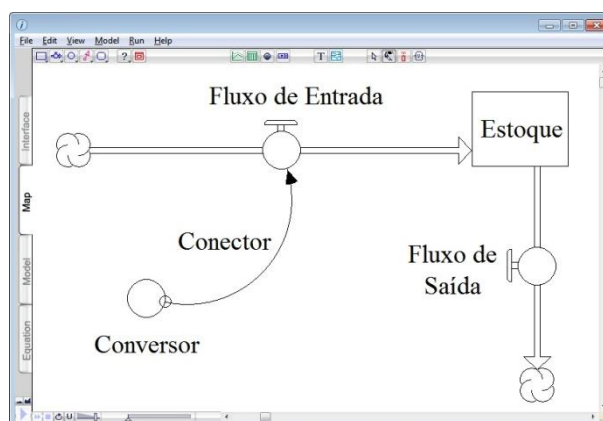
Conversores, os quais processam informações a respeito dos estoques e fluxos, ou representam fontes de informação externa ao sistema;







Figura 2: Elementos “hard” da DS



Fonte: Elaborado pelos autores

Neste modo de operação quantitativa da DS são utilizadas as características estruturais do diagrama de Enlace Causal para desenvolver um modelo de simulação do sistema, usando a linguagem dos Fluxos e Estoques. Os modelos de simulação podem ser usados para investigar e compreender por que certo sistema se comporta daquela maneira, permitindo desta forma encontrar melhores formas de operá-lo, uma vez que se pode conhecer de antemão as consequências que certos eventos desencadearão no sistema.

Em resumo, o emprego da modelagem da DS, consiste na explicitação dos modelos mentais coletivos acerca do entendimento de uma situação, que posteriormente serão empregados para suportar qualquer processo onde seja importante compreender ou antever comportamentos sistêmicos.

Para o desenvolvimento do modelo, foi utilizado o Ambiente de Modelagem Computacional *iThink*, uma poderosa ferramenta para identificar as interdependências entre processos e problemas. A criação de modelos por meio de *iThink* permite a simulação de processos de negócios e cenários futuros, indicando os impactos de novos procedimentos ou políticas, possibilitando a prévia correção de resultados indesejáveis.

## 5 FONTES DE EMISSÃO

Segundo API (2009), as emissões de GEE's na indústria de petróleo e gás tipicamente ocorrem dentre uma ou mais das seguintes classes de fontes:



- **Fontes de emissões de combustão:** A combustão de combustíveis com teor de carbono em equipamentos estacionários, como motores, queimadores, aquecedores, caldeiras, flares e incineradores resultam na formação de CO<sub>2</sub> devido à oxidação do carbono. Podem ser formadas quantidades muito pequenas de N<sub>2</sub>O durante combustão de combustível pela reação entre nitrogênio e oxigênio. Metano também pode ser emitido em gases de exaustão como resultado de combustão incompleta.
- **Fontes de emissões de ventilação:** Emissões por Ventilação ocorrem como liberações que são o resultado de operações normais e de manutenção, bem como de emergências e outros eventos não rotineiros. Incluem-se fontes como óleo cru, condensado, óleo, tanques de estocagem de gás, gás oriundo de água produzida ou tanques de armazenamento químicos, e equipamentos como bombas de injeção química e, dispositivos pneumáticos que libertam GEE's (CH<sub>4</sub> e potencialmente CO<sub>2</sub>) como parte de sua operação.
- **Fontes de emissões fugitivas:** Emissões fugitivas são liberações normalmente de baixo volume e não intencionais de componentes aquecidos e vazamentos de equipamentos lacrados, como também de vazamentos de oleodutos subterrâneos. Normalmente é consequência do desgaste pelo uso de juntas mecânicas, selos, e superfícies giratórias. Tipos de fonte de emissões fugitivas específicas incluem vários componentes e ajustes como válvulas, flanges, juntas de bombas e compressores ou conexões.
- **Fontes de emissões indiretas:** Emissões indiretas são emissões que são consequentes das atividades da empresa, as quais resultam de fontes de propriedade ou controladas por outra empresa. Esta categoria inclui emissões oriundas da queima de combustíveis para gerar eletricidade, calor, vapor, ou resfriamento, sendo esta energia importada ou comprada.

Alguns tipos de equipamentos como compressores, podem emitir em mais de uma classe de fonte. Quando pressurizados, podem emitir emissões fugitivas, quando não pressurizados para manutenção podem emitir por ventilação, e quando em operação normal, podem emitir como fonte de combustão.

O segmento “Exploração e Produção Convencional”, conforme consta no Compendium API, inclui as atividades de exploração e extração de petróleo de reservatórios subterrâneos, localizados tanto em áreas “onshore” como “offshore”. No segmento “Exploração e Produção Convencional”, o Compendio API lista as seguintes fontes potenciais de GEE (API, 2009):



Tabela 1: Fontes potenciais de emissões de GEE no segmento exploração e produção de petróleo e gás.

EXPLORAÇÃO E PRODUÇÃO		CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	
FONTES DE COMBUSTÃO	Equipamentos estacionários	Caldeiras / geradores de vapor	x	x	x
		Reaquecedores	x	x	x
		Aquecedores / depuradores	x	x	x
		Geradores com motores	x	x	x
		Bombas de incêndio	x	x	x
		Acionadores de	x	x	x
		Geradores de turbina elétrica	x	x	x
		Acionadores de compressores	x	x	x
		Perfuração de poços	x	x	x
		Tochas (Flares)	x	x	x
	Incineradores	x	x	x	
	Fontes móveis	Equipamentos móveis	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 conservação na locação		x	x	x	
FONTES DE VENTILAÇÃO	Ventilação de processo	Processos de desidratação		x	
		Bombas de desidratação		x	
	Outras ventilações	Processos de purificação do	x		x
		Tanques de armazenamento	x(*)		x
		Perfuração exploratória	x(*)		x
		Completações e testes de poços	x(*)		x
		Dispositivos pneumáticos	x(*)		x
		Bombas de injeção química	x(*)		x
Manutenção	Análise e amostragem de gás	x(*)		x	
	Degaseificação de	x(*)		x	



<b>/Turnaround</b>	Revestimentos de poços	x(*)		x
	Drenagens de compressores	x(*)		x
	Partidas de compressores	x(*)		x
	Drenagem de coleta de gás	x(*)		x
	Drenagem de vasos	x(*)		x
	Completação de Poços	x(*)		x
	Saída de poço e reentrada	x(*)		x
<b>Atividades não rotineiras</b>	Parada de emergência (ESD)/ Segurança de emergência	x(*)		x
	Válvulas de alívio de	x(*)		x
	Blowout de poço (quando	x(*)		x
	Supressão de Incêndio			
	<b>FONTES FUGITIVAS</b>	Vazamentos de componentes	x(*)	
	Tratamento de água residual	x		x
	Ar condicionado / Refrigeração			
<b>FONTES INDIRETAS</b>	Eletricidade importada	x	x	x
	Aquecimento do processo / importações de vapor	x	x	x
	Cogeração	x	x	x

(\*): A estimativa de emissões é apresentada, mas somente é aplicável em fluxos de produção ricos em CO<sub>2</sub>. A significância dessas fontes depende da concentração de CO<sub>2</sub> e taxa de emissão das fontes específicas. Fonte: (API, 2009).

Fonte: Elaborado pelos autores

## 6 EMISSÕES DE GEE'S NO SEGMENTO DE E&P DE PETRÓLEO E GÁS

De acordo com a API (2009) e IPIECA (2003) no que se refere às emissões atmosféricas de GEE's na indústria de petróleo e gás, o CO<sub>2</sub> e o CH<sub>4</sub> são os gases que apresentam volumes de emissões relevantes para o segmento de exploração e produção. Apesar do grande Potencial de Aquecimento Global (PAG), o N<sub>2</sub>O não é uma emissão significativa nas atividades de E&P de petróleo e gás. Ainda assim, ao menos na atual versão do modelo proposto, o N<sub>2</sub>O foi incluído como forma de obter uma melhor concepção geral.



## 7 CARACTERÍSTICAS DOS GEE'S ABORDADOS NO ESTUDO

- **CO<sub>2</sub> – Dióxido de Carbono:** Gás que existe espontaneamente na atmosfera e também como subproduto da queima de combustíveis fósseis procedentes de depósitos de carbono de origem fóssil, como o petróleo, o gás natural ou o carvão, da queima de biomassa, ou das mudanças de uso da terra ou outros processos industriais. É o gás de efeito estufa de origem antropogênica que mais afeta o equilíbrio radiativo da Terra. É também o gás de referência para a medição dos outros gases de efeito estufa, e, por conseguinte, seu Potencial de Aquecimento Global (PAG) ou Global Warming Potential (PAG), em inglês, é igual a 1 (IPCC, 2007).
- **CH<sub>4</sub> – Metano:** É o principal componente do gás natural, e está associado a todos os hidrocarbonetos utilizados como combustíveis, à criação de gado e à agricultura. O Metano é liberado para a atmosfera pela decomposição anaeróbia de resíduos, pela digestão animal, produção e distribuição de gás natural e petróleo, produção de carvão e combustão incompleta de combustíveis fósseis (IPCC, 2006).
- **N<sub>2</sub>O – Óxido Nitroso:** A fonte antropogênica principal do Óxido Nitroso é a agricultura (gestão do solo e adubos), embora também existam aportes importantes provenientes do tratamento de águas residuais, da queima dos combustíveis fósseis e de processos industriais químicos. O Óxido Nitroso também é produzido por diversas fontes biológicas, como os oceanos, florestas tropicais e também por bactérias existentes nos solos (IPCC, 2007).

## 8 CÁLCULO DO PAG (POTENCIAL DE AQUECIMENTO GLOBAL - GLOBAL WARMING POTENTIAL, EM INGLÊS) DO CH<sub>4</sub>, DO CO<sub>2</sub> E DO N<sub>2</sub>O

Segundo API (2009) e IPCC (1997), as emissões de cada GEE para uma fonte específica são calculadas como o produto do fator de emissão<sup>5</sup> (FE) e o fator de atividade<sup>6</sup> (FA) dessa mesma

<sup>5</sup> O fator de emissão é uma expressão da emissão associada a uma unidade de atividade da fonte. Os fatores de emissão reportam a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por unidade de atividade. Assim, expressam o quão intensiva é uma dada atividade em emissão de gases de efeito estufa, ou seja, é uma medida da taxa de emissão.



fonte e GEE. O inventário de cada GEE é a soma de todas as suas emissões em um estabelecimento, empresa ou instalação, de acordo com a Equação 1.

$$\text{Inventário de emissões} = \sum_{i=1}^{\# \text{ de fontes}} FE_i \times FA_i$$

**Equação 1: Inventário de emissões Segundo API (2009).**

O IPCC utiliza como metodologia para calcular as emissões de GEE, o conceito de Potencial de Aquecimento Global (PAG – GWP, na sigla em inglês).

Segundo o Primeiro Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 1990), diversas tentativas de estabelecer um conceito de potencial de aquecimento global (Lashof e Ahuja 1990, Hough e Derwent 1990), 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<sup>-3</sup> e 10<sup>-6</sup> menores 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 necessária a criação de um índice comparativo entre as diversas contribuições dos gases de efeito estufa ao aquecimento global. Este procedimento tem o propósito 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.

---

<sup>6</sup> O fator de atividade é uma medida que expressa a intensidade de uma determinada fonte emissora, como por exemplo, a distância percorrida por caminhões, o consumo de combustível em uma frota de ônibus, o consumo de óleo diesel em geradores de energia elétrica, o número de horas de trabalho de uma bomba d'água, a quantidade de resíduos orgânicos gerados, e assim por diante. Na medida de atividade, não se leva em consideração a qualidade de combustíveis, insumos, matérias-primas, mas apenas a quantidade consumida, percorrida ou produzida.



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):

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

**Equação 2: Cálculo do Potencial de Aquecimento Global (PAG).**

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, “ai” representa o forçamento radiativo causado pelo acréscimo de 1 kg do GEE “i” medido em W.m-2, “ci” 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 pressupõem sua emissão no momento t=0, com seus efeitos sendo avaliados em períodos de 20, 100 e 500 anos (IPCC, 2007).

As diferentes concentrações e tempos de residência atmosféricos e os diferentes forçamentos radiativos entre o CO2 e demais GEEs 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 descrito. 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.), utiliza os fatores PAG para converter os GEE's não-CO2 para uma massa equivalente, chamada de CO2 eq. (dióxido de carbono equivalente), a qual representa a massa de CO2 correspondente à massa emitida do GEE não-CO2, 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 conforme a Equação 3. Caso esteja sendo avaliada uma mistura de diversos GEEs, a emissão total de CO2 eq. será o somatório das emissões já convertidas para CO2 eq. de cada GEE, conforme Equação 4.



O conceito de PAG é adotado pelo IPCC como metodologia de quantificação do total de emissões de cada GEE, utilizando-se como unidade a tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq.), conforme a Equação 3.

$$GEE_i (\text{CO}_2 \text{eq.}) = \left( \sum_{i=1}^{\# \text{ de fontes}} FE_i \times FA_i \right) \times PAG_i$$

**Equação 3: Cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente.**

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

**Equação 4: Somatório das emissões de cada GEE já convertidas para CO<sub>2</sub> eq.**

De acordo com API (2009), o PAG é uma medida da capacidade de determinado composto em absorver calor durante certo tempo na atmosfera, comparativamente aos efeitos da mesma massa de CO<sub>2</sub> liberada no mesmo período de tempo. Emissões expressas em condições equivalentes realçam a contribuição dos vários gases ao inventário global. Dessa forma, o PAG é uma ferramenta estatística útil para comparação do potencial de absorção de calor de vários gases.

A UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) atualiza os valores de PAG periodicamente com as novas informações disponíveis. O IPCC publicou o Terceiro Relatório de Avaliação em 2001 (IPCC, 2001), e o Quarto Relatório de avaliação (AR4) em 2007 (IPCC, 2007). Ambos os relatórios apresentam valores de PAG aplicáveis para o segundo período de compromissos (depois de 2012) baseados em cálculos melhorados do forçamento radiativo. Os valores de PAG citados, os quais são adotados pelo Compendium API (API 2009), são apresentados na

Tabela 2.

**Tabela 2: PAG do CO<sub>2</sub>, do CH<sub>4</sub> e do N<sub>2</sub>O. Fontes: (UNFCCC, 2002) e (IPCC, 2007).**

GEE	PAG aplicável até 2012 (UNFCCC, 2002)	PAG aplicável após 2012 (IPCC, 2007)
CO <sub>2</sub>	1	1
CH <sub>4</sub>	21	25
N <sub>2</sub> O	310	298

Fonte: Elaborado pelos autores





## 9 MODELO PROPOSTO

A utilização do Compêndio API permite a utilização de uma metodologia suficientemente aceita pelo mercado, bem como uma definição clara das diversas fontes de emissões existentes no segmento exploração & produção, objeto do modelo ora proposto. Conforme apresentado na Tabela 1, o Compêndio API relaciona para o segmento de Exploração e Produção 43 fontes de emissões distribuídas dentre os quatro grandes grupos de fontes de emissões: combustão, ventilação, emissões fugitivas e fontes indiretas.

Conforme a Equação 1, 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). Dessa forma, um inventário corresponde à soma de todas as emissões de uma instalação ou companhia.

Para a realização do inventário seguindo essa metodologia, cada uma das fontes incluídas no inventário deverá ter seu FE e seu FA determinados, de forma a possibilitar a realização do inventário de emissões, seguindo as convenções adotadas pelo Compêndio API.

Como já apresentado, 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.

Por outro lado, a definição dos fatores de atividade, embora mais simples, também depende do conhecimento das instalações e das atividades da empresa a ser inventariada. O IPCC utiliza como metodologia para cálculo da emissão de diversos GEE, o conceito de PAG. A aplicação de tal conceito decorre da quantificação das emissões atmosféricas dos GEE utilizando-se como unidade a tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub> eq.).

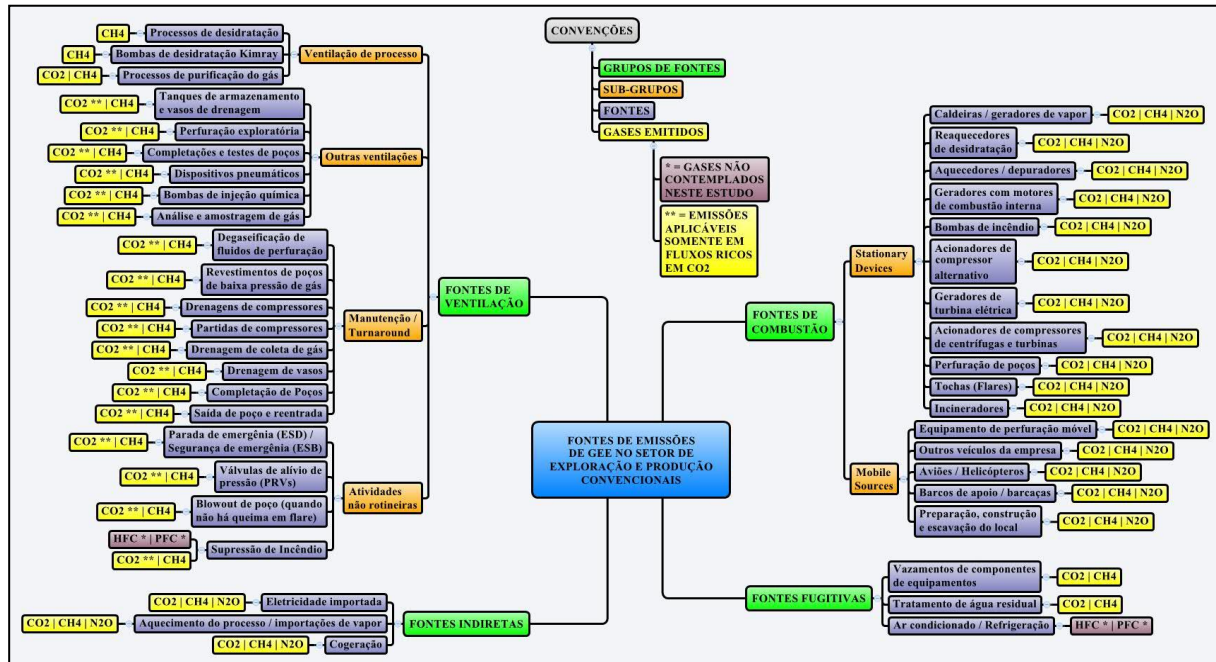
Tendo em vista a elevada complexidade na escolha dos fatores de emissão e fatores de atividade das 43 fontes de emissão relatadas na

Tabela 1 foram utilizadas na modelagem somente uma parte do diagrama apresentado na Figura 3, a seguir. Em versões posteriores, quando o modelo for ampliado, serão empregados todos os fatores de emissão e atividade relevantes para a quantificação total das emissões atmosféricas de GEE. Com base na

Tabela 1, foi montada a representação esquemática de todas as emissões atmosféricas de GEE's do segmento exploração e produção, conforme API (2009), representada Figura 3:



Figura 3: Representação esquemática das emissões atmosféricas de GEE's do segmento exploração e produção, adaptado de API (2009)



Fonte: Elaborado pelos autores

Em face à complexidade das fontes de emissão, o modelo foi subdividido nas emissões totais dos GEE inventariados, conforme as Figuras

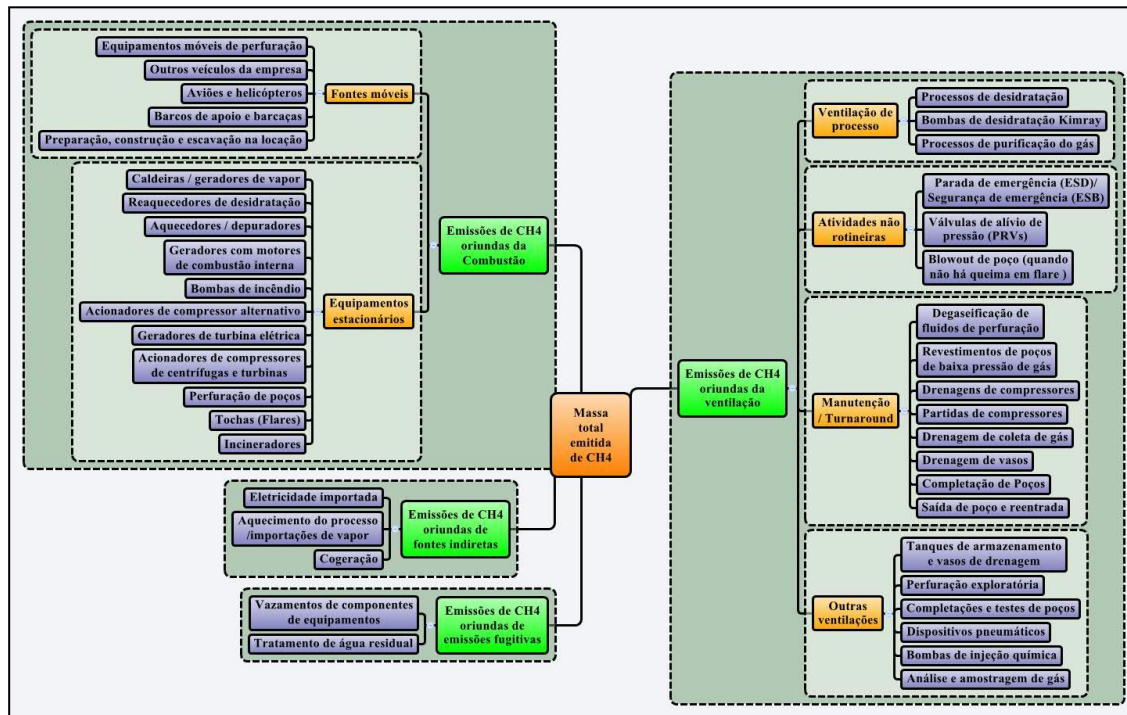
Figura 4, Figura 5 e

Figura 6.

Após a quantificação da massa emitida por cada um dos GEE, o produto de sua massa por seu correspondente PAG fornece a sua massa em CO<sub>2</sub> eq. (Equação 3). Por último, para quantificação do volume total das emissões atmosféricas em CO<sub>2</sub> eq. do sistema em estudo, deverão ser somadas as emissões totais já convertidas para CO<sub>2</sub> eq. calculadas na etapa anterior (Equação 4).

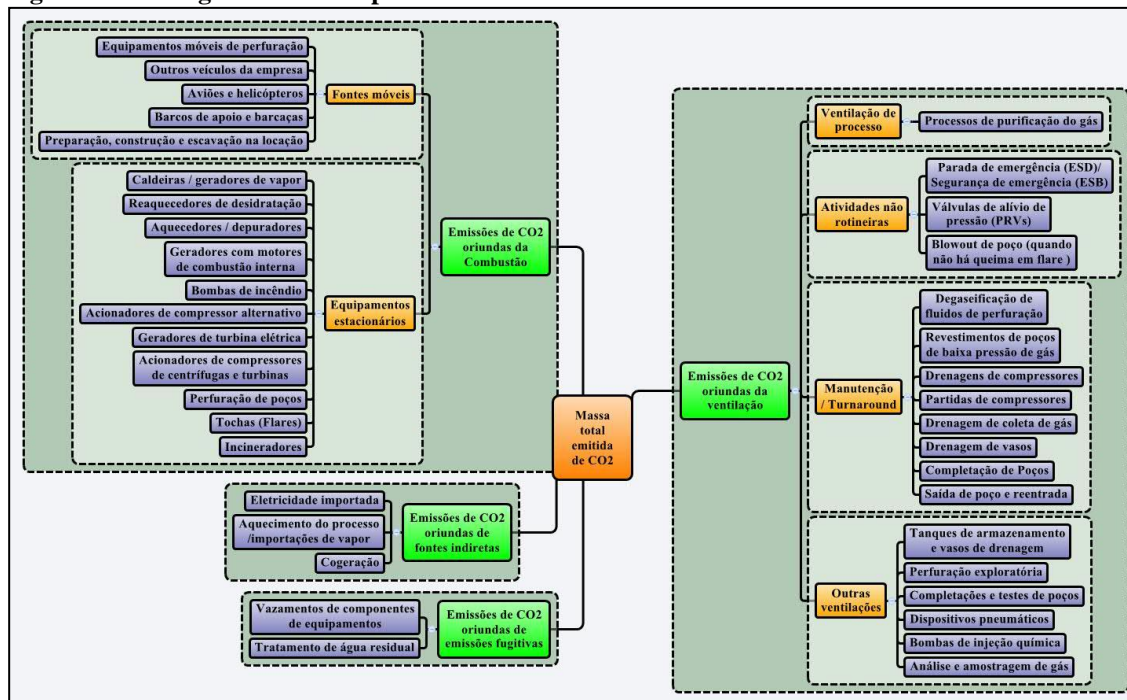


Figura 4: Massa gasosa emitida pelo CH4.



Fonte: Elaborado pelos autores.

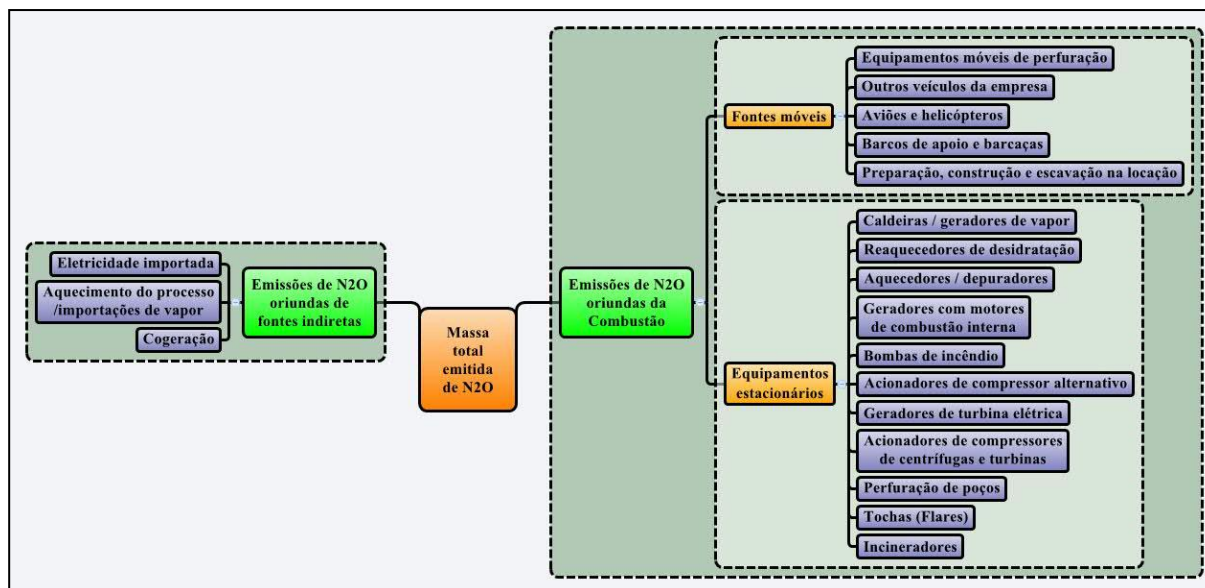
Figura 5: Massa gasosa emitida pelo CO2



Fonte: Elaborado pelos autores.



Figura 6: Massa gasosa emitida pelo N2O.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para cálculo das emissões, foi utilizada a estimativa de produção para o Piloto do Sistema de Produção e Escoamento da área de Tupi – Piloto de Tupi (ICF, 2008) apresentada na

Tabela 3:

Tabela 3: Estimativa de produção de gás para o Piloto de Tupi.

Mês/ano	m <sup>3</sup> /mês	Mês/ano	m <sup>3</sup> /mês
dez/10	3.040.890	jan/12	70.749.420
jan/11	22.101.900	fev/12	70.777.080
fev/11	36.936.990	mar/12	70.770.990
mar/11	54.726.240	abr/12	88.154.130
abr/11	53.737.410	mai/12	93.979.110
mai/11	70.754.220	jun/12	103.947.240
jun/11	72.359.820	jul/12	103.947.210
jul/11	71.518.080	ago/12	103.947.270
ago/11	70.938.270	set/12	103.947.187
set/11	70.684.650	out/12	103.947.240
out/11	70.614.720	nov/12	103.947.270
nov/11	70.570.230	dez/12	103.947.270
dez/11	70.673.850	jan/13	103.947.150

Fonte: adaptado de ICF (2008).



Para desenvolver o modelo, foi utilizado o ambiente de modelagem computacional iThink, uma poderosa ferramenta para identificar as interdependências entre os processos e problemas. A criação de modelos usando iThink permite a simulação de processos de negócios e cenários futuros, indicando o impacto de novas políticas ou procedimentos, permitindo a correção de melhorias anteriores e resultados indesejáveis.

De acordo com IPIECA (2011), as fontes de emissões de GEE's concentram-se em três principais categorias:

- Combustão;
- Ventilação;
- Fugitivas.

Com base nessa premissa, o modelo foi desenvolvido limitando-se a essas categorias.

Para cada uma das 43 fontes de emissões foram inseridos seus respectivos FE e FA, possibilitando o cálculo das emissões específicas de cada uma das fontes.

Considerando que dentre as 43 fontes encontram-se fontes específicas da Exploração, específicas da Produção e comuns a ambas as atividades, foram instalados comandos “switch” no modelo, os quais permitem conectar ou desconectar cada fonte específica do modelo global, permitindo que um único modelo atenda às necessidades específicas de uma unidade de perfuração ou produção.

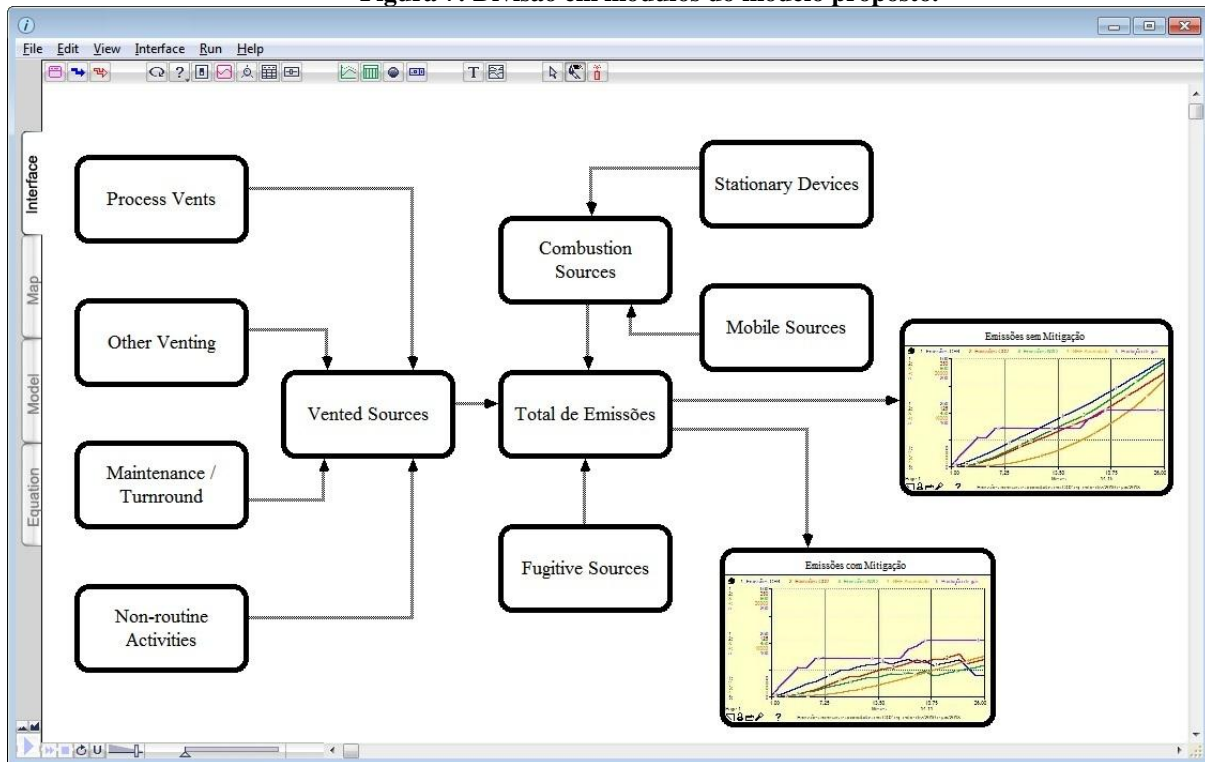
Baseado no mesmo princípio, o acionamento dos comandos “switch” permite a avaliação do volume de emissões de grupos, subgrupos ou mesmo de fontes específicas, determinando sua exata participação diante das emissões globais do sistema em estudo.

Tendo em vista a complexidade do modelo, e objetivando a simplificação de sua apresentação, foi feita sua divisão em módulos, conforme representado pela

**Figura 7.**



Figura 7: Divisão em módulos do modelo proposto.



Fonte: Elaborado pelos autores

Cada módulo apresentado na

Figura 7 representa um conjunto de maior ou menor complexidade, de acordo com o número de fontes por ele representado. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** representa o background de um módulo exemplo, onde foram incluídas as fontes e respectivos GEEs relacionados na Tabela 4:

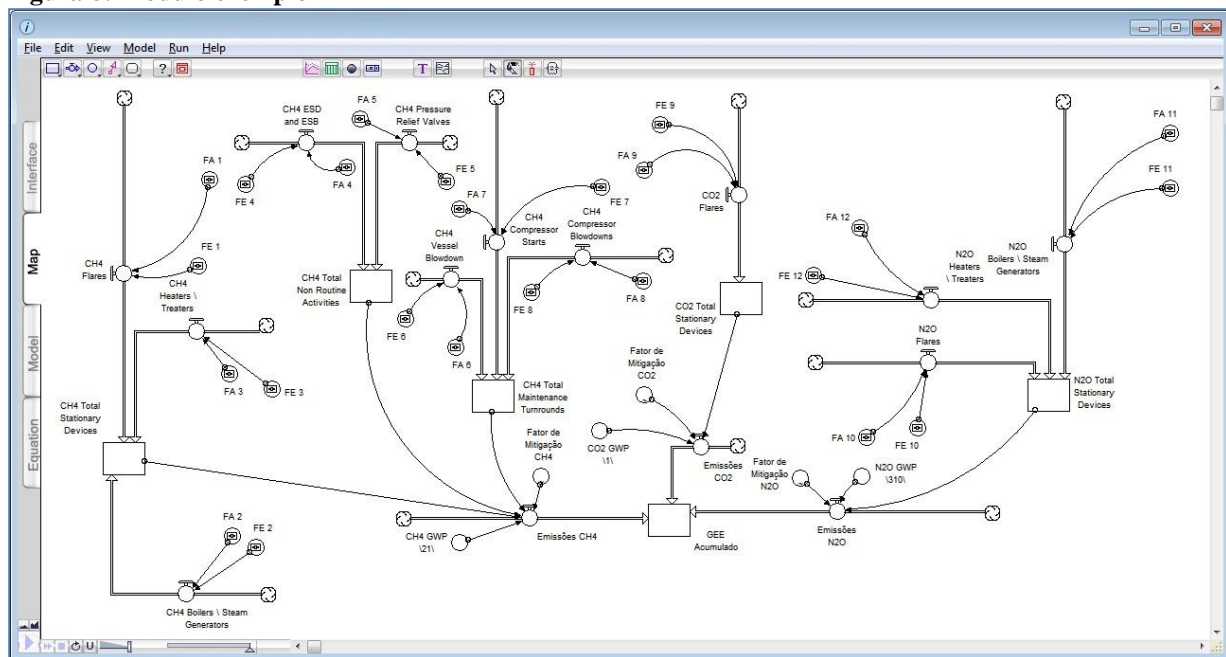


Tabela 4: Fontes e GEE do módulo exemplo.

FONTE	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Tochas (Flares)	X	X	X
Caldeiras / geradores de vapor		X	X
Aquecedores / depuradores		X	X
Parada de emergência (ESD) / Segurança de emergência (ESB)		X	
Válvulas de alívio de pressão		X	
Drenagem de vasos		X	
Drenagem de compressores		X	
Partidas de compressores		X	

Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 8: Módulo exemplo

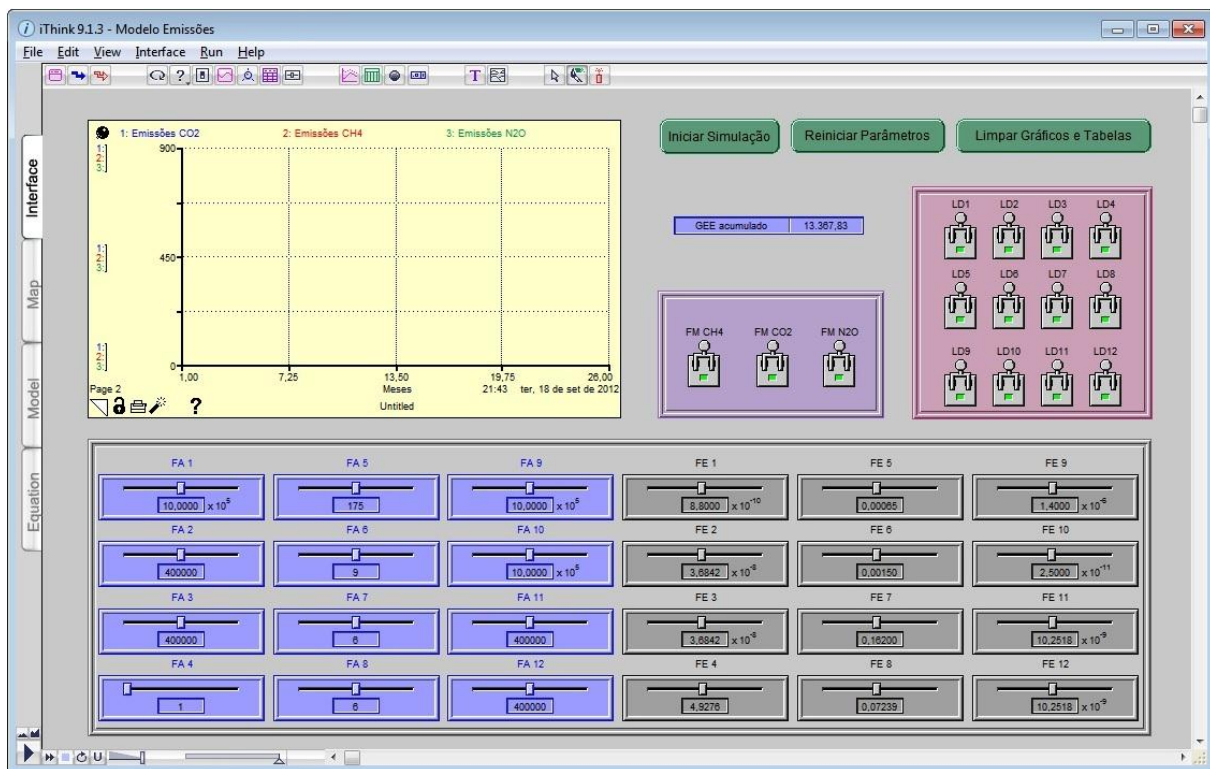


Fonte: Elaborado pelos autores

O “Painel de Controle” representado pela ilustra uma pequena parte do modelo ora em desenvolvimento, por meio do qual é possível manipular 12 fontes distintas bem como seus respectivos FA, FE e fatores de mitigação. As Figuras Figura 10 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.** exemplificam o resultado das emissões ao longo do período estudado (26 meses), respectivamente sem ações de mitigação e com ações de mitigação.



**Figura 9: Painel de controle do módulo exemplo**

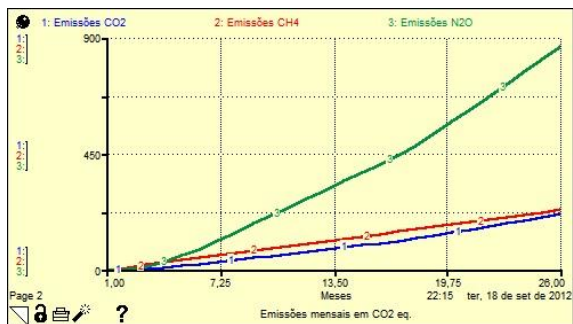


Fonte: Elaborado pelos autores

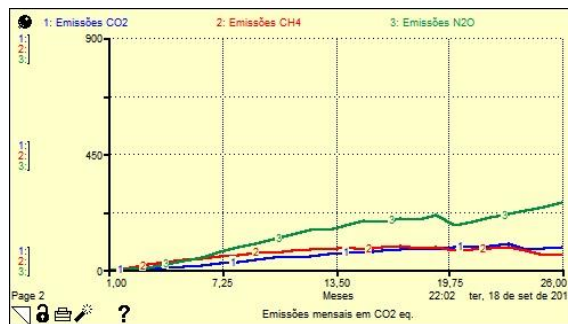
**Figura 10: Sem ações de mitigação**

**Figura 11: Com ações de mitigação**





Fonte: Elaborado pelos autores



Fonte: Elaborado pelos autores

## 10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi apresentar o desenvolvimento de uma modelagem baseada na linguagem da Dinâmica de Sistemas (DS), de como se processa a emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) nas complexas instalações de Exploração e Produção (E&P) de petróleo e gás.

A utilização da Dinâmica de Sistemas na modelagem de inventários de emissões atmosféricas de Gases de Efeito Estufa (GEE's) possibilita a manipulação de todas as variáveis isoladamente ou em conjunto, gerando inúmeras informações de saída distintas.

Tal prática permitiu identificar a importância de cada variável ou conjunto de variáveis, de tal forma que a tomada de decisões quanto a mudanças poderá revestir-se de maior qualidade.

Dessa forma, considerando cada fonte de emissões de GEE's como uma variável, a definição da relevância de cada uma delas no cômputo geral de emissões permitirá o direcionamento das atenções e recursos nos pontos específicos das instalações de exploração e produção de petróleo e gás mais problemáticos em termos de emissões.

Por outro lado, a determinação das fontes mais relevantes dentre aquelas listadas no Compêndio API possibilitará uma melhor definição das estratégias de mitigação e seus respectivos custos.

O desenvolvimento e aprimoramento do modelo incluirão 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, dentre outros.



Assim sendo, considerando os elevados custos que quaisquer alterações nas instalações petrolíferas possam representar para as empresas, tais como instalação de filtros, troca de equipamentos, alterações nas rotinas de manutenções e 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.

## REFERÊNCIAS

- API - American Petroleum Institute. (2004). Compendium of Greenhouse Gas Emissions Estimation Methodologies for the Oil and Gas Industry Appendix A – Protocol Comparison Summary. Washington. 24 p.
- API - American Petroleum Institute. (2009). Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for the Oil and Gas Industry. Washington. 807 p.
- Forrester, J. W. (1961). Industrial Dynamics. Cambridge, MIT Press
- Herzog, T. (2009). World Greenhouse Gas Emissions in 2005. WRI Working Paper. World Resources Institute.
- Hough, A. M. & Derwent, R. G. (1990). Changes in the global concentration of tropospheric ozone due to human activities. Nature 344, 645 - 648.
- ICF International (2008). Estudo de Impacto Ambiental – EIA Piloto do Sistema de Produção e Escoamento de Óleo e Gás na Área de Tupi, Bloco BM-S-11, Bacia de Santos. Revisão 00. Setembro



IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1990). The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1996). Climate Change 1995: The Science of Climate Change, Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 572 pp

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (1997). Scientific Basis Report, Genebra, Suíça

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change (2001). Third Assessment Report - Climate Change 2001: Synthesis Report, A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Watson, R.T. and the Core Writing Team (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change (2006). Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan

IPCC- Intergovernmental Panel on Climate Change (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 p.

IPIECA – International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (2003). Petroleum Industry Guidelines for Reporting Greenhouse Gas Emissions. Report of the Joint industry Task Force (IPIECA, API and OGP), 81 p.

IPIECA – International Petroleum Industry Environmental Conservation Association (2011). Petroleum Industry Guidelines for Reporting Greenhouse Gas Emissions. Climate Change 2011 – Second Edition (IPIECA, API and OGP). 84 p.



Lashof, D. A. & Ahuja, D. R. (1990). Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming. *Nature*, vol. 344, 5 april.

NOAA – The NOAA Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) (2011). NOAA Earth System Research Laboratory

PETROBRAS (2002). Gestão de Emissões Atmosféricas. Relatório de Desempenho. s.d.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Report of the Conference of the Parties on its eighth session, held at New Delhi from 23 October to 1 November 2002. Guidelines for the Preparation of National Communications by Parties Included in Annex I to the Convention, part I: UNFCCC Reporting Guidelines on Annual Inventories. Decision /CP.8

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change (2008). Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amount. ISBN 92-9219-055-5

WMO - World Meteorological Organization (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° 5: 23 de noviembre

WMO - World Meteorological Organization (2010). 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° 6: 24 de noviembre.

WMO - World Meteorological Organization (2011). Boletín sobre los gases de efecto invernadero - Estado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera según las observaciones mundiales realizadas en 2011. N° 7: 21 de noviembre