

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro de Filosofia e Ciências Humanas  
Departamento de Geociências  
Programa de Pós-Graduação em Geografia

**A IMPORTÂNCIA DO HIDRATO DE GÁS COMO FONTE  
DE ENERGIA ALTERNATIVA E COMO POSSÍVEL  
AGENTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Claudia Xavier Machado

Florianópolis  
2009

Claudia Xavier Machado

**A IMPORTÂNCIA DO HIDRATO DE GÁS COMO FONTE  
DE ENERGIA ALTERNATIVA E COMO POSSÍVEL  
AGENTE DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de mestre, junto ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Luiz Fernando Scheibe

Florianópolis  
2009

*Para a minha tia Terezinha (in memoriam).*

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, Luiz Fernando Scheibe por ter me sugerido e confiado um tema tão desafiador, e também pela paciência e espera.

Ao Jorge Alberto Villwock, cujo entusiasmo pelo tema serviu de estímulo desde o início, por ter me fornecido as primeiras referências e por ter estado sempre à disposição quando precisei.

Ao João Marcelo Ketzer, pelo apoio e pelo suporte, principalmente na aquisição de referências internacionais, que foram de grande valor na elaboração desta pesquisa.

Ao Anderson Maraschin, Rogério Lourega e Rodrigo Iglesias, por terem sempre me atendido prontamente e respondido minhas dúvidas.

Ao Alexandre Mussumeci Valim de Freitas, por ter se colocado à disposição para fornecer informações e bibliografias.

Ao Kauã Amodeo Sommer pela criação e edição final de figuras.

Aos amigos Alex, Anderson, Cristian, Déa, Felipe, Gesi, Isabella, Lia, Luli e Marti pelo apoio e torcida, até o final.

Aos meus pais e meus irmãos que representam um modelo para mim, e por quem, muitas vezes, me obrigo a ir adiante.

Ao Pedro, por ser meu companheiro e meu melhor amigo, sempre.



## Resumo

O hidrato de gás metano representa um interessante objeto de pesquisa pelo seu potencial como fonte de energia alternativa, como mecanismo de redução de emissões de gases de efeito estufa, além de seu possível papel como agente de mudanças climáticas. Por meio de levantamento bibliográfico foi identificado que o composto apresenta uma ampla distribuição geográfica, além de ser o maior recurso energético do planeta, quando comparado a outros combustíveis fósseis. Por este motivo, países como Japão, Canadá, Estados Unidos, Índia, etc., mantêm programas de pesquisa e parcerias internacionais focados não apenas na caracterização e quantificação, mas também no desenvolvimento de tecnologias de produção comercial do metano. As informações presentes nesta revisão bibliográfica e os dados dos 15 países com maior produção e consumo de óleo, gás natural e carvão possibilitaram uma discussão sobre uma possível desterritorialização energética decorrente do início da produção comercial do metano do hidrato.

**Palavras chave:** hidrato de gás, metano, clima, fonte de energia, desterritorialização.

## **Abstract**

The methane hydrate is an interesting object of research because of its potential as an alternative energy source, and as a mechanism to reduce greenhouse gases emissions and its possible role as agents of climate change. The literature review identified that the compound presents a wide geographical distribution, and is the largest energy resource in the world, when compared to other fossil fuels. For this reason, countries like Japan, Canada, United States, India, etc., maintain research programs and partnerships not only focused on characterization and quantification, but also in the development of technologies for commercial methane production. The information in this literature review and data from 15 countries with greater production and consumption of oil, natural gas and coal allowed a discussion on a possible energy desterritorialization due to commencement of commercial production of methane hydrate.

**Key words:** gas hydrate, methane, climate, energy source, desterritorialization.

## Lista de Figuras

FIGURA 1 – ESQUEMA DEMONSTRANDO A ESTRUTURA CRISTALINA DO CLATRATO.....	21
FIGURA 2 – À ESQUERDA, HIDRATO DE METANO DURANTE A QUEIMA (STEACIE INSTITUTE FOR MOLECULAR SCIENCES - NATIONAL RESEARCH COUNCIL CANADA).....	21
FIGURA 3 – À DIREITA, AMOSTRA DE SEDIMENTO DO FUNDO DO OCEANO CONTENDO CAMADAS DE HG (MODIFICADO DE CENTRE FOR GAS HYDRATE RESEARCH – HERIOT WATT UNIVERSITY). ....	21
FIGURA 4 – DIAGRAMA MOSTRANDO A CURVA DE ESTABILIDADE DO HG (CLENELL, 2000). ....	23
FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO SÍTIO MALLIK, NO NORDESTE DO CANADÁ. (GEOLOGICAL SURVEY OF CANADÁ).....	26
FIGURA 6 – FIGURA INDICANDO A ÁREA DE OCORRÊNCIA DO HG EM ÁGUAS JAPONESAS (JAPAN PETROLEUM EXPLORATION CO. LTD.).....	27
FIGURA 7 – MAPA DA LOCALIZAÇÃO ESTIMADA DAS RESERVAS DA ÍNDIA. (USGS).....	30
FIGURA 8 – ÁREA ONDE O ODP REALIZOU PERFURAÇÕES EM ÁGUAS CHINESAS (RETÂNGULO MAIOR) (WU <i>ET AL.</i> , 2005). O RETÂNGULO MENOR INDICA A ÁREA, NO TERRITÓRIO DE TAIWAN, AONDE FOI IDENTIFICADA A PRESENÇA DO HG POR MEIOS GEOFÍSICOS (LIU <i>ET AL.</i> , 2004). (GOOGLE EARTH, CONSULTADO EM 13/02/09).....	32
FIGURA 9 – FIGURA INDICANDO A ÁREA DE OCORRÊNCIA DOS DEPÓSITOS DE HG DA CORÉIA DO SUL (GOOGLE EARTH, CONSULTADO EM 16/03/08). ....	33
FIGURA 10 – FORMAÇÃO DE <i>PLUG</i> DE HG EM TUBULAÇÃO DA PETROBRAS USADA NA PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS (CENTRE FOR GAS HYDRATE RESEARCH – HERIOT WATT UNIVERSITY, 2005).....	35
FIGURA 11 – ÁREA DE OCORRÊNCIA DO HG NO BRASIL. MODIFICADO DE TANAKA <i>ET AL.</i> (2003); SAD <i>ET AL.</i> (1998); SAD <i>ET AL.</i> (1997); FONTANA E MUSSUMECI (1994); FONTANA (1989).....	36
FIGURA 12 – INVENTÁRIO GLOBAL DA OCORRÊNCIA DO HG NATURAL (MODIFICADO DE KVENVOLDEN & LORENSON, 2001) .....	39
FIGURA 14 – SEÇÃO SÍSMICA MOSTRANDO O LIMITE DO ASSOALHO OCEÂNICO E O PARALELISMO DO BSR (MODIFICADO DE CENTRE FOR GAS HYDRATE RESEARCH – HERIOT WATT UNIVERSITY, 2005).....	42
FIGURA 15 – À DIREITA, ESQUEMA MOSTRANDO A APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO E QUANTIFICAÇÃO DAS ACUMULAÇÕES DE HG POR MEIO DA AQUISIÇÃO DE DADOS SÍSMICOS E PERFURAÇÃO (MODIFICADO DE OPEN LEARN WEBSITE <i>APUD</i> TOHIDI, & ANDERSON, 2004). ....	43
FIGURA 16 – MAPA INDICANDO A ÁREA DE OCORRÊNCIA DO DESLIZAMENTO SUBMARINO DE STOREGGA. (MODIFICADO DE BEGET & ADDISON, 2007), .....	48

FIGURA 17 – ESQUEMA MOSTRANDO A DISSOCIAÇÃO DOS HIDRATOS DECORRENTE DE TERREMOTO, DESLIZAMENTO SUBMARINO E SUBSEQÜENTE LIBERAÇÃO DE METANO NA ATMOSFERA (MODIFICADO DE OPEN LEARN WEBSITE APUD TOHIDI, & ANDERSON, 2004).....	49
FIGURA 18 – DINÂMICA DE ERUPÇÃO DO METANO: OS RETÂNGULOS REPRESENTAM CRISTAIS DE HIDRATO; CÍRCULOS REPRESENTAM BOLHAS; CÍRCULOS DUPLOS REPRESENTAM BOLHAS REVESTIDAS COM HIDRATO (ZHANG, 2003). ....	53
FIGURA 19 – COLUNA DE ÁGUA GERADA NA ‘DESGASEIFICAÇÃO’ DO LAGO NYOS, EM 2001. (HALBWACHS <i>ET AL.</i> , 2004).....	54
FIGURA 20 – GRÁFICO MOSTRANDO A EVOLUÇÃO DAS DESCOBERTAS E PRODUÇÃO DE PETRÓLEO BASEADAS EM EXXONMOBIL (ROSA, 2006). ....	55
FIGURA 21 – PERCENTUAL DAS RESERVAS DE CARBONO ORGÂNICO NA TERRA. (MODIFICADO DE KVENVOLDEN , 1993 E HYNDMAN & DALLIMORE, 2001). ....	57
FIGURA 22 – EVOLUÇÃO CONCEITUAL DO CUSTO DO GÁS CONVENCIONAL E DO HIDRATO DE GÁS AO LONGO DO TEMPO. (MODIFICADO DE BIL, 2003). ....	58
FIGURA 23 – ESQUEMA ILUSTRANDO A PRODUÇÃO DO CH <sub>4</sub> ASSOCIADA AO ARMAZENAMENTO DE CO <sub>2</sub> (MODIFICADO DE OPEN LEARN WEBSITE APUD TOHIDI, & ANDERSON, 2004). ....	60
FIGURA 24 – ESQUEMA MOSTRANDO OS RISCOS ASSOCIADOS À PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS EM ÁREAS DE OCORRÊNCIA DO HG (MODIFICADO DE CENTRE FOR GAS HYDRATE RESEARCH – HERIOT WATT UNIVERSITY, 2005). ....	62
FIGURA 25 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS 15 PAÍSES COM MAIOR PRODUÇÃO E MAIOR CONSUMO DE ÓLEO NO MUNDO (FONTE: EIA, 2006).....	64
FIGURA 26 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS 15 PAÍSES COM MAIOR PRODUÇÃO E MAIOR CONSUMO DE CARVÃO NO MUNDO (FONTE: EIA, 2007).....	64
FIGURA 27 – GRÁFICO COMPARATIVO ENTRE OS 15 PAÍSES COM MAIOR PRODUÇÃO E MAIOR CONSUMO DE GÁS NATURAL NO MUNDO (FONTE: EIA, 2007).....	65
FIGURA 28 – CICLOS T-D-R E I-D-O (MODIFICADO DE RAFFESTIN, 1987). ....	70
FIGURA 29 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DOS CICLOS T-D-R E I-D-O. ....	71

## **Lista de Siglas**

AIST – Advanced Industrial Science and Technology

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BSR – Bottom-Simulating Reflector

CIE – Carbon Isotope Excursion

CGS – China Geological Survey

CHG – Center for Hydrate & Natural Gas Research

DGH – Directorate General of Hydrocarbons

DOC – Department of Commerce

DOD – Department of Defense

DOE – Department of Energy

DOI – Department of the Interior

ESS – Earth Sciences Sector

GAIL – Gas Authority of India Limited

GFZ – GeoForschungs Zentrum Potsdam

GHSZ – Gas Hydrate Stability Zone

GIEC – Guangzhou Institute of Energy Conversion

GSC – Geological Survey of Canada

HG – Hidrato de Gás

ICDP – International Continental Scientific Drilling Program

ILTP – Integrated Long-Term Program of Cooperation

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

JAPEX – Japan Petroleum Exploration

JNOC – Japan National Oil Corporation

JOGMEC – Japan Oil, Gas and Metals National Corporation

LPTM/PETM – Máximo Térmico do Paleoceno Superior/Máximo Térmico do Paleoceno-Eoceno (do inglês *Late Paleocene Thermal Maximum/Paleocene-Eocene Thermal Maximum*)

MCT – Ministério de Ciência e Tecnologia

MHL – Methane Hydrate Research Laboratory

MMS – Minerals Management Service

MOPNG – Ministry of Petroleum and Natural Gas (India)

NETL – National Energy Technology Laboratory

NGHP – National Gas Hydrate Program

NGRI – National Geophysical Research (India)

NIO – National Institute of Oceanography (India)

NOAA – National Oceanic Atmospheric Administration

NRCan – Natural Resources Canada

NRL – Naval Research Laboratory

ODP – Ocean Drilling Program

OIL – Oil India Limited

ONGC – Oil & Natural Gas Corporation

UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change

USDOE – United States Department of Energy

USGS – United States Geological Survey

## Sumário

<b>RESUMO.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE SIGLAS .....</b>	<b>9</b>
<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>JUSTIFICATIVA .....</b>	<b>16</b>
<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>18</b>
<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>19</b>
<b>1. O QUE SÃO HIDRATOS DE GÁS? .....</b>	<b>20</b>
<b>1.1. PROPRIEDADES DO HIDRATO DE GÁS .....</b>	<b>22</b>
<b>2. O HIDRATO DE GÁS COMO OBJETO DE PESQUISA.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1. A PESQUISA NO BRASIL.....</b>	<b>35</b>
<b>3. RESERVAS DE HIDRATO DE GÁS .....</b>	<b>38</b>

<b>4. CLIMA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS .....</b>	<b>45</b>
4.1. O HIDRATO DE GÁS E O CLIMA DA TERRA.....	46
<b>5. O HIDRATO DE GÁS COMO FONTE DE ENERGIA .....</b>	<b>55</b>
5.1. TÉCNICAS DE PRODUÇÃO.....	59
<b>6. UM NOVO CICLO ENERGÉTICO? .....</b>	<b>63</b>
<b>7. O HG COMO FATOR DE DESTERRITORIALIZAÇÃO MUNDIAL.....</b>	<b>69</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>75</b>
<b>SITES CONSULTADOS .....</b>	<b>81</b>



## Introdução

Até a década de 1990, o hidrato de gás<sup>1</sup> (HG) era um assunto pouco explorado no mundo, quando finalmente passou a ser objeto de pesquisa. As primeiras pesquisas sobre o assunto abordaram os prejuízos que este composto causa ao formar *plugs* em dutos de extração de óleo e gás, e as tentativas de solucionar problemas relacionados a isso.

A possibilidade do metano aprisionado nos hidratos ter sido o precursor de eventos climáticos de escala global, tendo influência, inclusive, em grandes extinções ocorridas ao longo do tempo geológico, diversificou ainda mais as áreas com interesse neste composto. Desde então, hipóteses como a da “Explosão de Metano” foram formuladas relacionando grandes liberações de metano dos hidratos a eventos catastróficos e a episódios de aquecimento global e à sua possível influência no ciclo do carbono.

O potencial do metano como fonte de energia é outro motivo de grande interesse no assunto. O fato de sua queima emitir menos CO<sub>2</sub> e de seu volume representar o maior recurso energético do planeta, quando comparado a outros combustíveis fósseis, tornou o desenvolvimento de pesquisas sobre os HG questão de alta prioridade, principalmente para países com baixa segurança energética. Além destas, outra razão que justifica a tentativa de localizar e caracterizar as ocorrências de HG no mundo é a possibilidade conhecida de se encontrar uma camada de gás livre abaixo da Zona de Estabilidade do Hidrato de Gás – GHSZ (do inglês “*gas hydrate stability zone*”) (SOUZA & MARTINS,

---

<sup>1</sup> Embora hidratos de gás possam ser compostos não apenas por metano (CH<sub>4</sub>), este termo é habitualmente utilizado como um sinônimo de “hidrato de metano” devido à sua abundância em relação a outros tipos de hidrato. Optou-se, nesta pesquisa, por seguir esta convenção e empregar o termo “hidrato de gás” ou “HG” para o hidrato de metano (Kvenvolden, 1993; Clennell, 2000).

2008; CLENNELL, 2000; HOLBROOK *et al.*, 1996).

No Brasil há escassas referências sobre HG disponíveis para consulta sendo, a maioria, artigos publicados em periódicos e anais e algumas poucas dissertações/teses. Entre as pesquisas voltadas para a caracterização, localização e quantificação de ocorrências deste composto realizadas no país, podem ser citadas: “*Evidências geofísicas da presença de hidratos de gás na Bacia de Pelotas – Brasil*” (FONTANA, 1989), “*Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta*” (FIGUEIREDO JR, NITTROUER, COSTA, 1996), “*Hidratos de gás marinhos: A Mega Ocorrência da Bacia de Pelotas/Brasil*” (SAD *et al.*, 1997), “*Marine gas hydrates along the Brazilian Margin*” (SAD *et al.*, 1998), “*Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira*” (CLENNELL, 2000) e *Gas Hydrates on the Amazon Submarine Fan, Foz do Amazonas Basin, Brazil* (TANAKA *et al.*, 2003), “*Hidratos de Metano: um interesse crescente*” (MARTINS, 2003), “*Utilização de Seções Sísmicas 2D na Identificação de Zonas de Escapes de Fluidos*” (ROSA *et al.*, 2006) e *Interpretação sísmo-estratigráfica da porção da bacia de Pelotas que engloba o cone do Rio Grande e a avaliação do seu potencial petrolífero* (Rosa, 2007).

No capítulo 1 desta pesquisa é apresentado um breve histórico sobre a descoberta dos hidratos de gás, definição, caracterização, condições ideais de gênese e estabilidade.

No capítulo 2 são apresentados os programas de pesquisa, instituições e países que se encontram mais avançados no que se refere à produção de conhecimento sobre o assunto, incluindo a pesquisa sobre HG no Brasil.

O capítulo 3 é o resultado de um levantamento sobre as reservas

conhecidas, volume e potencial de exploração no mundo e no Brasil, e métodos de aquisição de dados para quantificação e cálculo de concentração das acumulações de HG.

No capítulo 4, é apresentada uma breve revisão sobre clima e mudanças climáticas, bem como as possíveis alterações advindas de liberações constantes de metano na atmosfera. São, também, discutidas hipóteses que relacionam o HG a episódios de mudanças bruscas do clima.

No capítulo 5, é avaliado o potencial energético que pode representar a exploração do metano aprisionado nos hidratos, as técnicas atualmente consideradas para produção do metano e as possíveis conseqüências de tal atividade na economia e no clima global.

A temática abordada no Capítulo 6 envolve uma discussão acerca da perspectiva do metano do hidrato vir a ser uma fonte de energia economicamente viável. Considerando-se dados sobre os 15 países com maior produção/consumo de combustíveis convencionais, as áreas de ocorrência do hidrato de gás no mundo e o nível de desenvolvimento da pesquisa no que se refere à sua exploração, pretende-se avaliar de que modo a concretização desta perspectiva poderá influenciar o modelo atual baseado em combustíveis fósseis.

O conceito de Território e os ciclos propostos por Raffestin (1987), apresentados no Capítulo 7, contribuem para a discussão da possível reconfiguração geopolítica decorrente de uma reterritorialização energética mundial.

## Justificativa

O hidrato de gás metano representa um interessante objeto de pesquisa para diversas áreas da Ciência, não estando, necessariamente, restrito à Química, à Geologia ou à Geofísica.

Isto se deve ao fato de que, mesmo estando limitado a áreas que ofereçam condições específicas de gênese e de estabilidade – abaixo do assoalho oceânico e no *permafrost* –, este composto pode ter influência na Biosfera, Atmosfera, Hidrosfera e Litosfera, impactando em pequena, média e grande escala.

A liberação do metano contido no HG dos oceanos por dissociação do clatrato<sup>2</sup> pode ocorrer de maneira lenta e constante, ou abrupta e violentamente, desencadeada por alterações ambientais como temperatura e nível dos oceanos, acelerando o efeito estufa. Alguns pesquisadores descrevem diversos cenários catastróficos “possíveis” decorrentes de eventos como estes, como a acidificação dos oceanos, extinções em massa, a alteração no regime de chuvas, etc.

O hidrato de gás não está necessariamente relacionado a eventos climáticos catastróficos. Os veios de HG nos taludes continentais atuam como um ‘cimento’ contribuindo para a estabilização dos sedimentos, e evitando deslizamentos submarinos – como o deslizamento de Storegga, o maior dos últimos 40.000 anos, tendo coberto de entulho uma área de 95km<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup> Do latim *clathratus*, significa “aprimonado pelas barras de uma grade”. Na estrutura do clatrato, as moléculas ficam “aprimonadas” nas cavidades formadas pelo componente “hospedeiro”.

Se por um lado o gás do hidrato representa uma ameaça ao agravamento do efeito estufa – o metano é um gás de efeito estufa vinte vezes mais potente que o dióxido de carbono devido à sua maior capacidade de absorver calor da atmosfera – por outro lado, pode representar uma interessante alternativa como fonte de energia (Environmental Protection Agency).

A produção insuficiente de combustíveis convencionais, a perspectiva de esgotamento destas fontes de energia, o fato das reservas de HG apresentarem grandes volumes de maneira dispersa em todo o mundo e estas conterem um gás cuja queima é mais limpa do que a dos combustíveis convencionais, contribuiu para que diversos países passassem a vê-lo como uma interessante alternativa para o futuro.

Além disso, com o foco na redução de emissões de gases de efeito estufa, estão sendo desenvolvidas técnicas de substituição do metano ( $\text{CH}_4$ ) no hidrato pelo dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que se mostrou, em pesquisas preliminares, um gás formador de hidratos com maior estabilidade.

Diante da variedade de áreas da ciência relacionadas com o composto, e da escassez de referências sobre o assunto no Brasil, surgiu o interesse em realizar uma revisão bibliográfica, que reunisse as informações existentes sobre o tema, além de trazer a discussão para o campo da Geografia.

## **Objetivo Geral**

Discutir a importância do hidrato de gás no que se refere a seu possível papel como fonte de energia alternativa para o futuro e como agente de mudanças climáticas, com base em levantamento bibliográfico.

## **Objetivos Específicos**

- Caracterizar o hidrato de gás metano, explicando as hipóteses atuais sobre sua gênese, evolução e processos de acumulação;
- Reunir pesquisas e demais fontes de informação acerca do assunto desenvolvidas no Brasil e no mundo;
- Identificar as principais reservas conhecidas de hidrato de gás;
- Apresentar uma revisão sobre o possível papel do hidrato de gás como agente de mudanças climáticas;
- Apresentar o potencial do hidrato de gás de tornar-se fonte de energia, com base nas suas características e técnicas de produção;
- Discutir o cenário atual dos combustíveis convencionais e a perspectiva atual para produção comercial do metano do HG.

## Procedimentos Metodológicos

Por se tratar de uma pesquisa bibliográfica, a metodologia consistiu na busca de fontes de informação sobre o tema de estudo. Foram consultados livros, artigos e *sítes* de programas e centros de pesquisa de todo mundo. Os livros *Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost Environments* (2003) editado por Michael D. Max e *Economic Geology of Natural Gas Hydrate* (2006), de Michael D. Max, Arthur H. Johnson e William P. Dillon, os sites do National Energy Technology Laboratory (NETL), United States Geological Survey (USGS), Ocean Drilling Program (ODP), Geological Survey of Canada (GSC) e artigos publicados em periódicos científicos representam importantes fontes de informação.

O pequeno número de dissertações e teses entre as referências se deve à escassez de pesquisas sobre o assunto no Brasil, principalmente por parte de instituições acadêmicas, concentrando-se principalmente em centros de pesquisa vinculados a empresas petrolíferas.

## 1. O que são hidratos de gás?

Descoberto por Faraday em 1823, o HG foi estudado na década de 1890 por cientistas franceses e redescoberto para a indústria do gás natural por Hammerschmidt em 1934 (KATZ, 1971). Trata-se de um composto formado por moléculas de gás (mais freqüentemente, o metano) encapsuladas em “gaiolas” de água congelada (SUESS *et al.*, 1999:77). Estas moléculas apresentam “*pouca ou nenhuma ligação direta – nem ligações covalentes – entre o ‘hospedeiro’ e o ‘convidado’*” (DESIRAJU, 2001:397). Os hidratos de gás também são conhecidos como clatratos, do latim *clathratus*, que significa “aprisionado pelas barras de uma grade”, ou seja, quando pequenas moléculas são completamente aprisionadas nas cavidades formadas pelo componente hospedeiro. No caso dos hidratos, o componente hospedeiro é a água (DESIRAJU, 2001) e o gás ‘convidado’ é, mais comumente, o metano (CH<sub>4</sub>) (KVENVOLDEN, 1999). Também chamado de ‘gás dos pântanos’ (o metano) é o “produto da decomposição de vegetais em condições anaeróbicas” e também o hidrocarboneto<sup>3</sup> mais simples. (ALLINGER *et al.*, 1976:17)

Os hidratos de gás são sólidos com estrutura cristalina (Figura 1), ou seja, apresentam um arranjo ordenado, resultando em “*superfícies planas e bem definidas, denominadas faces, que têm ângulos definidos em suas bordas*” (JONES, *et al.*, 2000:430).

---

3 Molécula contendo apenas carbono e hidrogênio.



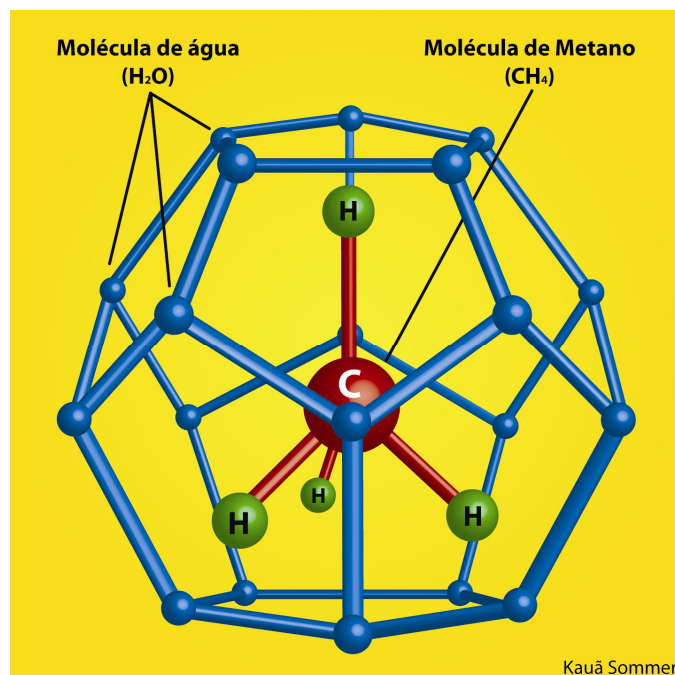


Figura 1 – Esquema demonstrando a estrutura cristalina do clatrato.

Além disso, possuem aparência semelhante à do gelo, motivo pelo qual também são chamados de “gelo que queima”, devido ao metano presente em sua composição (Figuras 2 e 3).



Figura 2 – À esquerda, hidrato de metano durante a queima (Steacie Institute for Molecular Sciences).

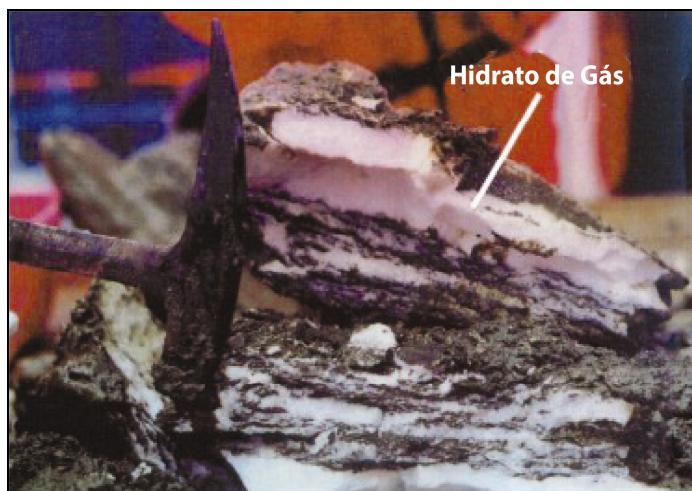


Figura 3 – À direita, amostra de sedimento do fundo do oceano contendo camadas de HG (Modificado de Centre for Gas Hydrate Research – Heriot Watt University).

A capacidade do clatrato de 'armazenar' gases é dada pela sua geometria e, no caso do metano, sob condições normais de temperatura e pressão (CNTP), o HG chega a armazenar 164m<sup>3</sup> de gás para apenas 1m<sup>3</sup> de água, podendo variar de acordo com gradiente geotérmico e com a produção biológica de metano (MAX *et al.*, 2006; National Research Laboratory).

### 1.1. Propriedades do Hidrato de Gás

As condições de formação e estabilidade do HG são determinadas pela relação entre três variáveis: concentração do metano, temperatura e pressão. O composto tende a se formar em locais onde há temperaturas relativamente baixas, pressão relativamente alta e quantidade suficiente de água e gás formador do hidrato. Na Figura 4, Clennell (2000) mostra as condições ideais de estabilidade, além da influência que alguns gases, e os sais, podem ter aumentando ou reduzindo esta estabilidade.

Estas condições podem ser normalmente encontradas a profundidades maiores de 500m, a 300m no mar Ártico e, em menor quantidade, abaixo do *permafrost*, sob condições polares (MAX *et al.*, 2006).

Entretanto, Clennell (2000) lembra que, mesmo não havendo ligações químicas entre a água e o gás, "*a estrutura estável do clatrato permite que o 'gelo' não se derreta até temperaturas bem acima de 0°C, desde que a pressão predominante e a concentração de gases sejam suficientemente altas*" (CLENNELL, 2000:400).

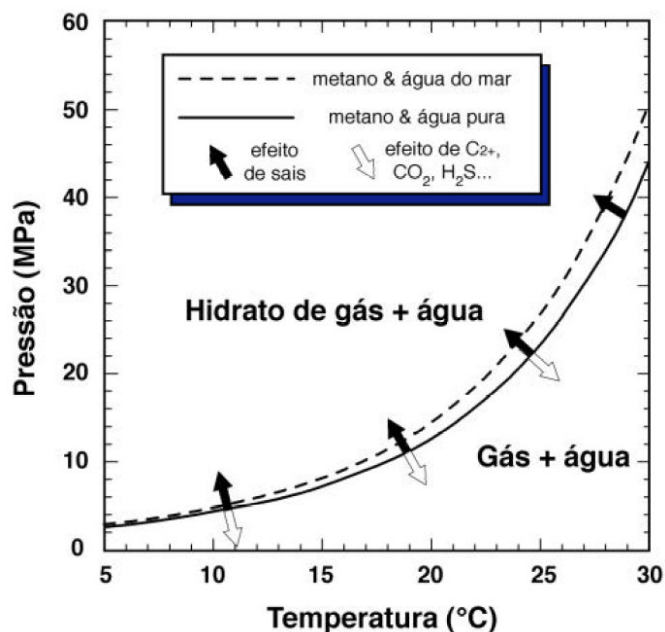


Figura 4 – Diagrama mostrando a curva de estabilidade do HG (CLENNELL, 2000).

Rosa (2007) destaca que sua ocorrência está associada aos mesmos parâmetros que controlam o sistema petrolífero, ou seja, rocha geradora, reservatório e rocha selante.

A formação do HG é explicada por Fontana (1989) como se dando em margens continentais onde há alta taxa de sedimentação, o que garante “*rápido soterramento e preservação da matéria orgânica*”. De acordo com o autor, a metabolização desta matéria orgânica origina duas zonas distintas: a superior, onde ocorrem processos aeróbicos; e a inferior, aonde ocorrem processos anaeróbicos, que também se divide em duas zonas: na superior ocorrem processos de redução dos sulfatos, e na inferior, ocorre a redução dos carbonatos. Este último processo favorece a formação de metano. (FONTANA, 1989:236). O metano presente no HG pode ser biogênico, proveniente da decomposição da matéria orgânica, e termogênico, produzido a 110° C, a partir da matéria orgânica gerada pela fotossíntese. Eles podem ser diferenciados

pelos valores de carbono isotópico (ARCHER, 2007). O principal gás biogênico é o metano podendo, este, apresentar

*“(...) teores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -80‰ e -100‰. Já os gases termogênicos mostram teores de  $\delta^{13}\text{C}$  entre -30‰ e -40‰, e apresentam uma mistura de metano e outros hidrocarbonetos. Enquanto o metano biogênico pode ser produzido na zona de estabilidade dos clatratos, os gases termogênicos migram verticalmente a partir das rochas geradoras até chegar a esta zona”. (CLENNELL, 2000:400)*

Além disso, o HG está, normalmente, associado ao preenchimento de espaços vazios entre camadas sedimentares, funcionando como uma rocha selo, e impedindo a migração vertical de hidrocarbonetos, motivo pelo qual é comum encontrar-se uma zona de gás natural livre abaixo da zona dos hidratos (ROSA, 2007).

## 2. O hidrato de gás como objeto de pesquisa

O HG é objeto de estudo em diversos centros de pesquisa no mundo, tanto pelo seu potencial como fonte de energia, quanto pelos prejuízos que causa na indústria de óleo e gás. Cientistas já o conhecem há quase um século, quando se formava em gasodutos que se estendiam em áreas de clima frio. Nesta época o composto era visto como 'inimigo' pois sua formação nos dutos causava entupimentos interferindo no fluxo do gás. Em 1964, em um campo de gás da Sibéria (Messoyakha), cientistas e engenheiros descobriram uma formação natural de HG, o que desencadeou uma busca por outros depósitos deste tipo no mundo (Government Affairs Program – American Geological Institute, 2000).

Um dos mais importantes centros de pesquisa do mundo é mantido pelo governo do Canadá. O *Natural Resources Canada*, no qual se insere o *Earth Sciences Sector* – ESS, principal centro de ciências da Terra do país. Dele faz parte o *Geological Survey of Canada*, que representa importante fonte de informação e pesquisa geocientífica, incluindo o HG.

Desde 2002, foi firmado um consórcio internacional para pesquisas, em parceria, no sítio Mallik, no delta do rio Mackenzie, no Canadá (Figura 5). Este campo de HG foi descoberto em 1972, tendo sido, a partir da década de 1990, foco de interesse canadense e internacional sob o viés energético e ambiental. As pesquisas foram retomadas no Mallik devido ao interesse do programa de pesquisa em HG do Japão. O projeto Mallik 1998 contou com uma parceria da antiga *Japan National Oil Corporation* (JNOC) e do GSC, para realizar perfuração, testemunhagem e pesquisas geofísicas sobre o HG.

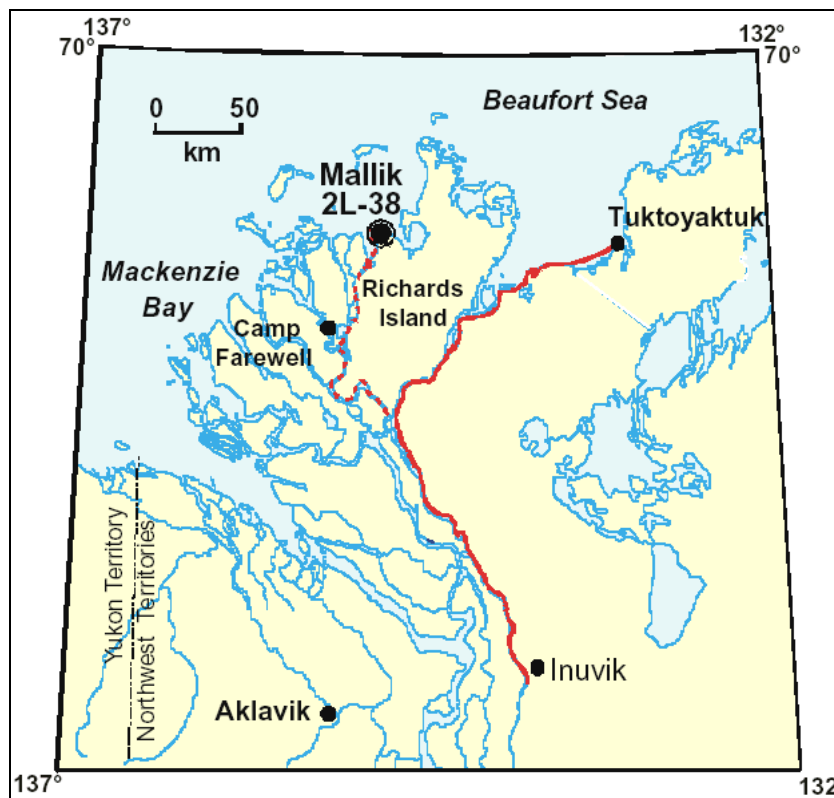


Figura 5 – Mapa de localização do sítio Mallik, no nordeste do Canadá. (Geological Survey of Canadá).

O projeto Mallik 2002 teve como objetivo primário conduzir o primeiro teste de produção de HG, e contou com a parceria de sete instituições: GSC, JNOC, GeoForschungs Zentrum Potsdam (GFZ), United States Geological Survey (USGS), United States Department of Energy (USDOE), Ministry of Petroleum and Natural Gas (MOPNG) da Índia, Gas Authority of India (GAIL) e uma *joint venture* firmada entre as filiais canadenses de empresas petrolíferas multinacionais como a Chevron Canada Resources, BP Canada Energy Company e Burlington Resources Canada Ltd..

Além disso, o projeto foi incluído no International Continental Scientific Drilling Program – ICDP (Programa Internacional de Perfuração Científica Continental) fortalecendo e ampliando os objetivos científicos como, por exemplo, incluindo as pesquisas no campo das mudanças climáticas (Dallimore

*et al.*, 2004).

O National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) do Japão, criou o Methane Hydrate Research Laboratory (MHL), focando o controle das emissões de gases de efeito estufa e a busca por suprimento de energia sustentável e de longo prazo para o Japão. O país foi o pioneiro na criação de um programa de pesquisa na área nos quais, desde então, são realizados: pesquisa e desenvolvimento (P&D) das tecnologias, envolvendo o HG, com sustentabilidade e economia; e desenvolvimento de uma tecnologia voltada para a conservação de energia baseada nos hidratos. As estimativas indicam que as reservas naturais encontradas no entorno da ilha de Hokkaido e na fossa de Nankai, localizados na costa banhada pelo Oceano Pacífico (Figura 6), somam, aproximadamente, 7,4 trilhões de metros cúbicos de gás natural, o que corresponde a cem anos de consumo anual deste gás no país, segundo o Methane Hydrate Research Laboratory.

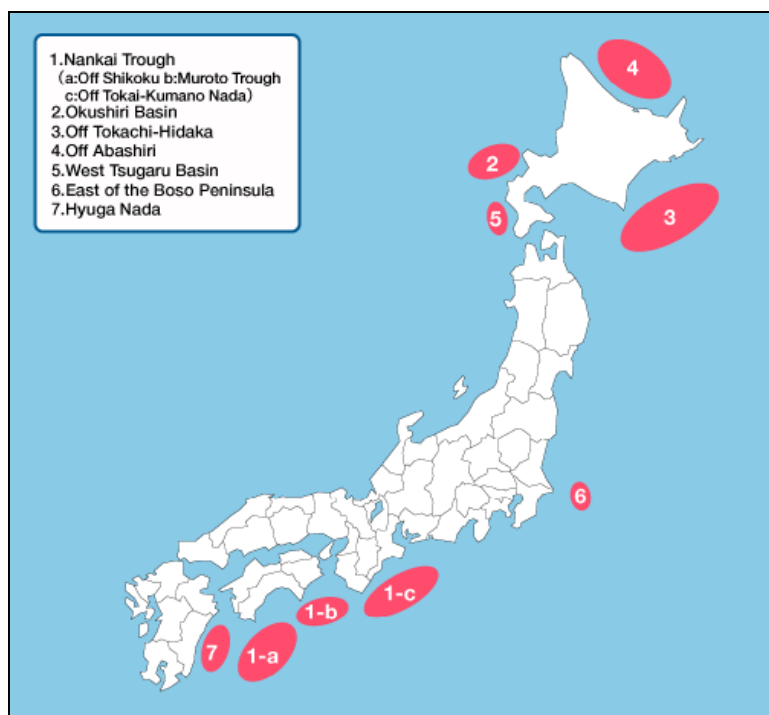


Figura 6 – Figura indicando a área de ocorrência do HG em águas japonesas (Japan Petroleum Exploration Co. Ltd.)

A preocupação em garantir a segurança energética do país levou à criação do principal programa de pesquisa sobre o HG no mundo por meio da parceria firmada entre a *Japan Petroleum Exploration (JAPEX)* e a *Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)*, antiga JNOC. Entre os anos fiscais de 1995 e 1999 foram realizadas pesquisas para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitassem a superação dos desafios que envolvem a recuperação do metano nos hidratos. Em 1999, esta parceria foi pioneira na perfuração e coleta de testemunho de hidrato de metano em águas japonesas. A partir de 2001, organizações públicas e privadas uniram esforços nas pesquisas sobre os possíveis usos para o composto, culminando com o início das perfurações e de estudos detalhados da costa do país em 2004.

A lei pública norte-americana n.º 106-193, aprovada em 2 de maio de 2000, delineou as atividades de P&D sobre hidratos de metano (*Methane Hydrate Research and Development Act of 2000*). Contando com uma média de investimentos anuais da ordem de 9,5 milhões de dólares entre 2001 e 2005, foi estipulada a concessão de auxílio financeiro ou parceria às instituições acadêmicas e industriais que realizassem: (i) pesquisas básicas e aplicadas a fim de avaliar o potencial do hidrato de metano como fonte de energia, e mitigar os impactos ambientais causados pela liberação deste gás (tanto natural quanto associada ao desenvolvimento comercial), meios seguros de transporte e estocagem do metano produzido; (ii) tecnologias para reduzir os riscos na perfuração; (iii) perfurações exploratórias.

Para coordenar as pesquisas foi criado um comitê do qual fazem parte:

(i) Office of Fossil Energy representado pelo Strategic Center for Natural Gas



(Department of Energy – DOE); (ii) National Oceanic Atmospheric Administration (Department of Commerce – DOC); (iii) Naval Research Laboratory (Department of Defense – DOD); (iv) Minerals Management Service e USGS (Department of the Interior – DOI); (v) National Science Foundation.

As pesquisas foram desenvolvidas tanto em ambiente de *permafrost*, como no nordeste do Alaska e do Canadá, quanto marinho, na porção *offshore* de Vancouver, Oregon, Golfo do México e Índia. O USGS ainda firmou parceria com a JOGMEC, GSC e DOE, como parte do consórcio para pesquisas no sítio Mallik.

A lei 109-58 de 8 de agosto de 2005 dá continuidade ao programa de pesquisa em HG, autorizando um fundo de 155 milhões para pesquisas a serem realizadas de 2005 a 2010. Esta lei também inclui o Bureau of Land Management (DOI) ao comitê supracitado.

Conforme o Directorate General of Hydrocarbons (DGH), as reservas estimadas de HG na porção *offshore* da Índia seriam de, aproximadamente, 1.894 trilhões de metros cúbicos (Figura 7), o que equivale a uma quantidade algumas centenas de vezes maior do que a de gás natural convencional, amplamente utilizado no país. Em 1997, foi implantado o National Gas Hydrate Program (NGHP), segundo programa de pesquisa em HG no mundo. Foi, inicialmente formado pelo DGH, Gas Authority of India Limited (GAIL), Oil & Natural Gas Corporation (ONGC), Oil India Limited (OIL), National Geophysical Research (NGRI) e National Institute of Oceanography (NIO). Subordinado ao Ministry of Petroleum & Natural Gas, o programa visa pesquisar: (i) a distribuição e natureza do HG em sedimentos marinhos; (ii) a influência do controle geológico na sua formação e ocorrência; (iii) os processos de

transporte do gás desde a sua fonte até o seu reservatório; (iv) o efeito do HG nas propriedades físicas do sedimento hospedeiro; (v) a microbiologia e geoquímica da formação e dissociação do HG; (vi) calibração de ferramentas preditivas para a presença e concentração do HG (<http://energy.usgs.gov/other/gashydrates/india.html>. Consulta em 14/01/2008).

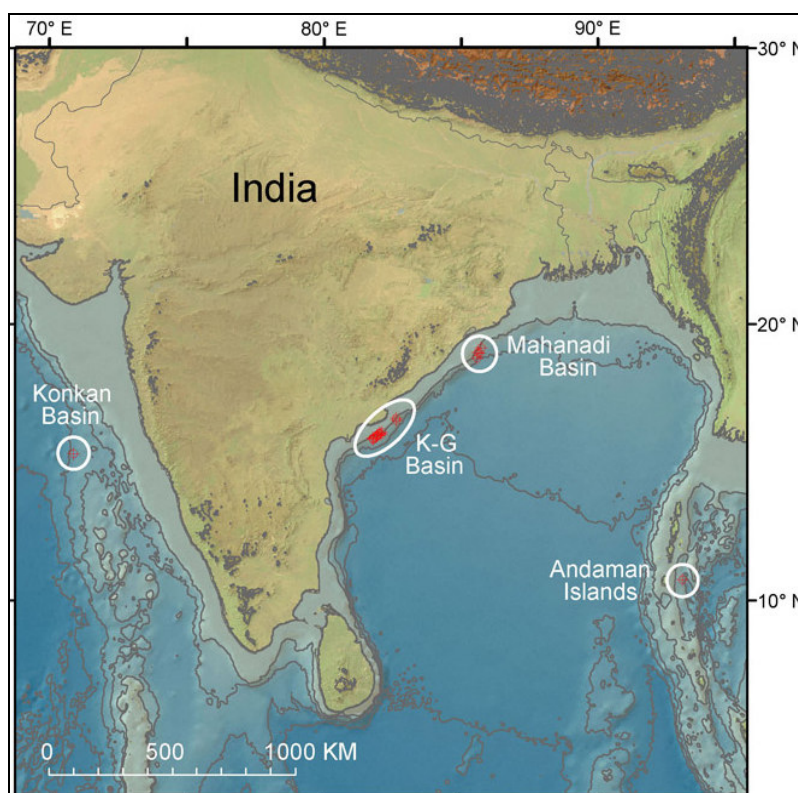


Figura 7 – Mapa da localização estimada das reservas da Índia. (USGS)

A partir de dezembro de 2001, a GAIL e o NGHP tornaram-se membros do consórcio japonês encarregado da produção no delta do rio Mackenzie, no Canadá, e desde 2006 o programa realiza perfuração e testemunhagem de sedimentos no local.

De acordo com um documento publicado no site da embaixada da Índia, no qual é apresentado o programa de cooperação científica e tecnológica (Integrated Long-Term Program of Cooperation - ILTP) entre este país e a Rússia, é mencionado o Indo-Russian Centre for Gas Hydrates. O acordo entre

o Department of Science & Technology (Índia) e o Russian Academy of Sciences resultou na implantação do centro de pesquisa em Chennai, na Índia, em março de 2003.

O Center for Hydrate & Natural Gas Research (CHG) é o maior centro de pesquisa sobre os hidratos de gás na China, e faz parte do Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC) da Chinese Academy of Sciences. Pesquisando sobre hidratos desde 1990, o país produz conhecimento fundamental e aplicado sobre o assunto como: utilização sintética do gás natural, química energética e estocagem térmica, tecnologias relacionadas ao HG, etc. Foi criado também, em 2004, o Gas Hydrate Information System. Trata-se de um sistema de informação que tem o intuito de centralizar e facilitar o compartilhamento de informações sobre pesquisas em todo o país (Figura 8).

O China Geological Survey (CGS), subordinado ao Ministry of Land and Resources (MOLR), realiza estudos sobre os hidratos desde 1999, sendo esta uma das principais linhas de pesquisa da organização. Uma notícia recente, publicada no China Mining Association, em dezembro de 2007, relata o sucesso na coleta de amostras de HG no mar do sul da China, alcançado pelo CGS. A segunda etapa desta pesquisa iniciou em 19 de maio de 2007 e será conduzida na mesma área.

Em Taiwan, a descoberta de ocorrência de HG levou à criação em 2006, de projetos nesta linha no Central Geological Survey subordinado ao Ministério de Assuntos Econômicos deste país. As primeiras investigações no sentido de encontrar áreas de prospecção na porção sudoeste da costa de Taiwan resultaram em indícios de ocorrência não só de hidrato de gás, mas de gás natural e petróleo, inclusive.

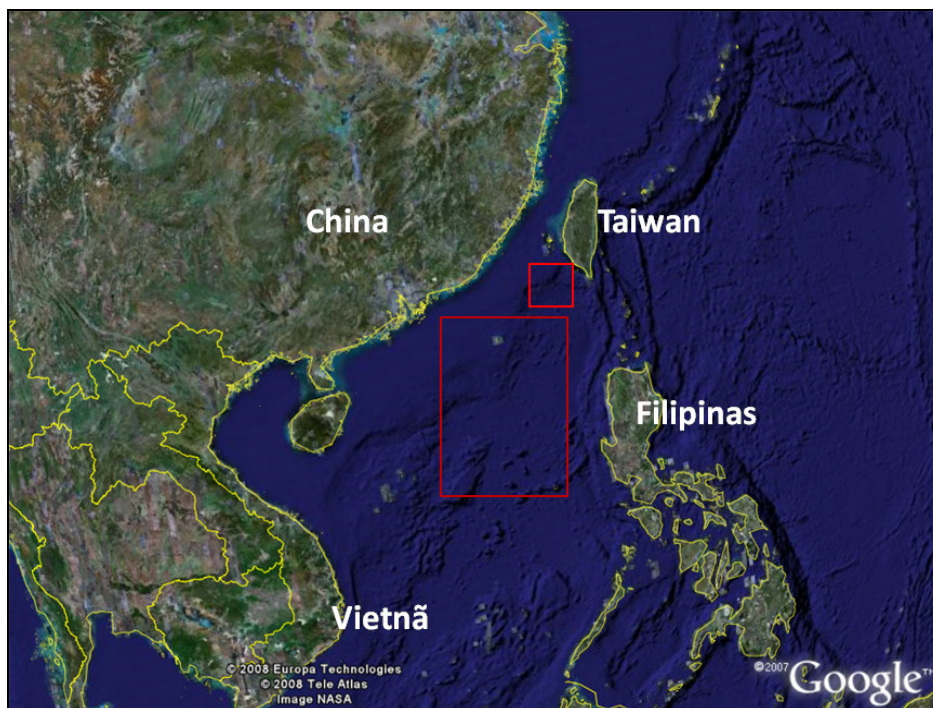


Figura 8 – Área onde o ODP realizou perfurações em águas chinesas (retângulo maior) (Wu *et al.*, 2005). O retângulo menor indica a área, no território de Taiwan, aonde foi identificada a presença do HG por meios geofísicos (Liu *et al.*, 2004). (Google Earth, consultado em 13/02/09)

Na Coreia do Sul, estudos acerca dos hidratos de gás são conduzidos pela Gas Hydrate R&D Organization criada em 19 de junho de 2005 pelo Ministry of Commerce, Industry and Resources, the Korea National Oil Corporation, Korea Gas Corporation e pelo Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources. O centro foi criado com o intuito de alcançar os grandes centros de pesquisa sobre os hidratos de gás no mundo como Estados Unidos, Canadá e Japão. Para isso estão previstas: aquisição de fonte de energia limpa como substituta do petróleo e gás natural, confirmação da distribuição dos depósitos no Mar do Leste, aquisição de tecnologias de base voltadas ao HG, e produção comercial do mesmo, prevista para 2015.

Em notícia publicada no China View em 22 de novembro de 2007, é relatada, pelo Ministério do Comércio da Coreia do Sul a descoberta de um extenso depósito de HG na bacia de Ulleung, em águas sul-coreanas.

Conforme divulgado, o depósito apresenta 130 metros de espessura, superando os já encontrados pelo Japão, Índia e China. Além deste, foram descobertos outros dois depósitos, um com 100 metros de espessura, localizado a nove quilômetros do primeiro sítio, e outro com um metro de espessura, localizado 42 km ao sul do mesmo (Figura 9).

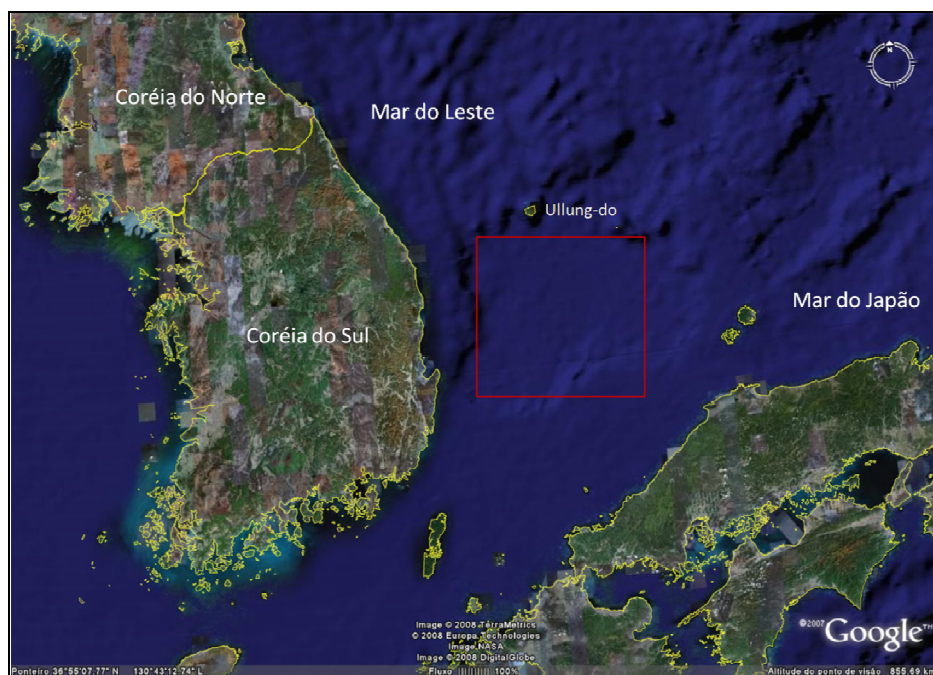


Figura 9 – Figura indicando a área de ocorrência dos depósitos de HG da Coreia do Sul (Google Earth, consultado em 16/03/08).

Estas descobertas aumentam para 600 milhões de toneladas de HG a quantidade que pode ser encontrada no Mar do Leste, o que seria suficiente para suprir as necessidades energéticas do país por 30 anos. Com o foco no potencial destas reservas, a Coreia do Sul investiu entre 2005 e 2007, 71,2 milhões de dólares em pesquisas na área, e planeja investir mais 90,8 milhões de dólares até 2011, a fim de adquirir informações adicionais sobre a localização e potencial dos depósitos, além de desenvolver as tecnologias necessárias para explorá-los.

Em 1997 a União Européia fundou o primeiro projeto de pesquisa em

HG, o HYACE (1998-2001). Em seguida vieram o HYACINTH e o HYDRATECH (2001-2004), e o ANAXIMANDER (2002-2005), cujas análises e coletas de dados se localizaram no Mar Mediterrâneo (Max *et al.*, 2006). Desde então diversos projetos foram iniciados e implementados por meio do Ocean Margin Deep-Water Consortium, organização formada por: (i) University of Tromsø (Noruega); (ii) Istituto di Geologia Marina (Itália); (iii) University of Erlangen (Alemanha); (iv) IFM-GEOMAR e Center for Marine Environmental Sciences (Alemanha); (v) University of Gent (Bélgica); (vi) British Geological Survey (Reino Unido); (vii) University of Birmingham (Reino Unido); (viii) University of Bristol (Reino Unido); (ix) Institut Français de Recherche pour L'Exploitation de la Mer (França); (x) Southampton Oceanographic Centre (Reino Unido).

Além deste consórcio existem, na Europa, instituições independentes que realizam P&D sobre hidratos de gás, como: (i) Centre for Gas Hydrate Research, da Heriot-Watt University (Escócia); (ii) Department of Geology and Geological Mapping do Institute of Geology and Mineral Exploration (Grécia); (iii) School of Earth Science, da University of Birmingham (Reino Unido); (iv) Universidade de Aveiro (Portugal); (v) Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (Itália); (vi) GeoForschungsZentrum Potsdam e Technische Universität Berlin (Alemanha) (Max *et al.*, 2006).

Países da América do Sul, União Européia, Indonésia, México, Noruega, Nova Zelândia, África do Sul, Coréia do Sul, Taiwan, Turquia, Ucrânia e Oeste da África começaram, recentemente (a partir de 2006), a demonstrar interesse no HG (Max *et al.*, 2006).



## 2.1. A pesquisa no Brasil

As pesquisas no Brasil ainda são, primordialmente, voltadas para o desenvolvimento de inibidores de HG a fim de evitar os prejuízos causados pela formação de “*plugs*” (Figura 10) deste composto em dutos de óleo e gás (Martins, 2003).



Figura 10 – Formação de *plug* de HG em tubulação da Petrobras usada na produção de hidrocarbonetos (Centre for Gas Hydrate Research – Heriot Watt University, 2005).

Entretanto, algumas delas, publicadas na forma de artigo em periódicos e anais, já indicaram a existência de reservas no Brasil. Figueiredo *et al.* (1996), Sad *et al.* (1998) e Tanaka *et al.* (2003) registraram a presença do composto na foz do Amazonas, e Fontana (1989; 1994), Sad *et al.* (1997) e Rosa (2007), apresentaram evidências geofísicas do mesmo na Bacia de Pelotas (Figura 11). Em artigo publicado na Revista Brasileira de Geofísica, Clennell (2000) apresenta uma revisão sobre o HG e considera grandes as probabilidades de que seja encontrado nas bacias sedimentares de Campos, Espírito Santo e

Cumuruxatiba (Figura 11). Rosa *et al.* (2006) utilizaram, em seu artigo o método de interpretação de seções sísmicas na identificação de zonas de escape de fluidos, como ocorre em áreas aonde ocorre a desestabilização do hidrato.



Figura 11 – Área de ocorrência do HG no Brasil. Modificado de Tanaka *et al.* (2003); Sad *et al.* (1998); Sad *et al.* (1997); Fontana e Mussumeci (1994); Fontana (1989).

No Banco de Teses da Capes há quatro dissertações/teses nas quais o HG é citado. Em algumas, este é tema central, em outras é apenas mencionado sem muito detalhamento: (i) Freitas (1990) fez um estudo sobre a



formação de hidratos de gás em dutos de óleo e gás; (ii) Rosa (2007) apresenta resultados da utilização de interpretação sísmo-estratigráfica na Bacia de Pelotas, aonde encontrou vestígios da ocorrência de HG; (iii) Povoleri (2007) fez a modelagem e simulação da formação do HG, incluindo uma revisão sobre aspectos físico-químicos do composto e (iv) Tanaka (2003) fez o reconhecimento de ocorrências do HG no Cone do Amazonas.

O atual interesse de uma empresa petrolífera brasileira no sentido de criar um centro de pesquisa que se torne referência em hidratos de gás no país indica que existe uma grande demanda por informações sobre o tema. Embora ainda em fase de planejamento, está prevista para este novo centro de pesquisa a realização de coleta, identificação e caracterização do HG, inicialmente na Bacia de Pelotas, além da definição do tipo e período em que ocorreu a acumulação e formação do composto neste ambiente, simulações da acumulação, reprodução deste ambiente em laboratório, quantificação do volume de gás associado aos hidratos e pesquisas voltadas para utilização do metano como recurso energético.

### 3. Reservas de hidrato de gás

O HG já foi encontrado no *permafrost* ártico, em terra e em águas rasas do oceano e sob o talude de plataformas continentais em todas as latitudes. Apesar de ser mais escasso, o HG ártico é mais concentrado e mais acessível. Por este motivo, segundo Hyndman & Dallimore (2001), estas áreas serão, possivelmente, as primeiras a serem exploradas e são as mais sensíveis às mudanças no clima.

Já foram produzidos alguns mapas apresentando a distribuição destes depósitos no mundo, entretanto muitas destas informações ainda são inferências. De acordo com o inventário global de ocorrência de HG (Figura 12), os locais de onde este foi coletado são as fossas oceânicas da América Central (Costa Rica, México, Guatemala), bacia do Rio Eel, na Califórnia, Bacia Cascadia, no Oregon, ilhas do mar de Okhotsk (Rússia), mar do Japão, fossa oceânica Peru-Chile, Golfo do México, Blake Ridge, vulcão de lama Haakon-Mosby (Noruega), delta do rio Níger (Nigéria), mar Negro, mar Cáspio e lago Baikal na Rússia, Mar Mediterrâneo, delta do rio Mackenzie, no Canadá (Kvenvolden, 1999; Kvenvolden, 2000).

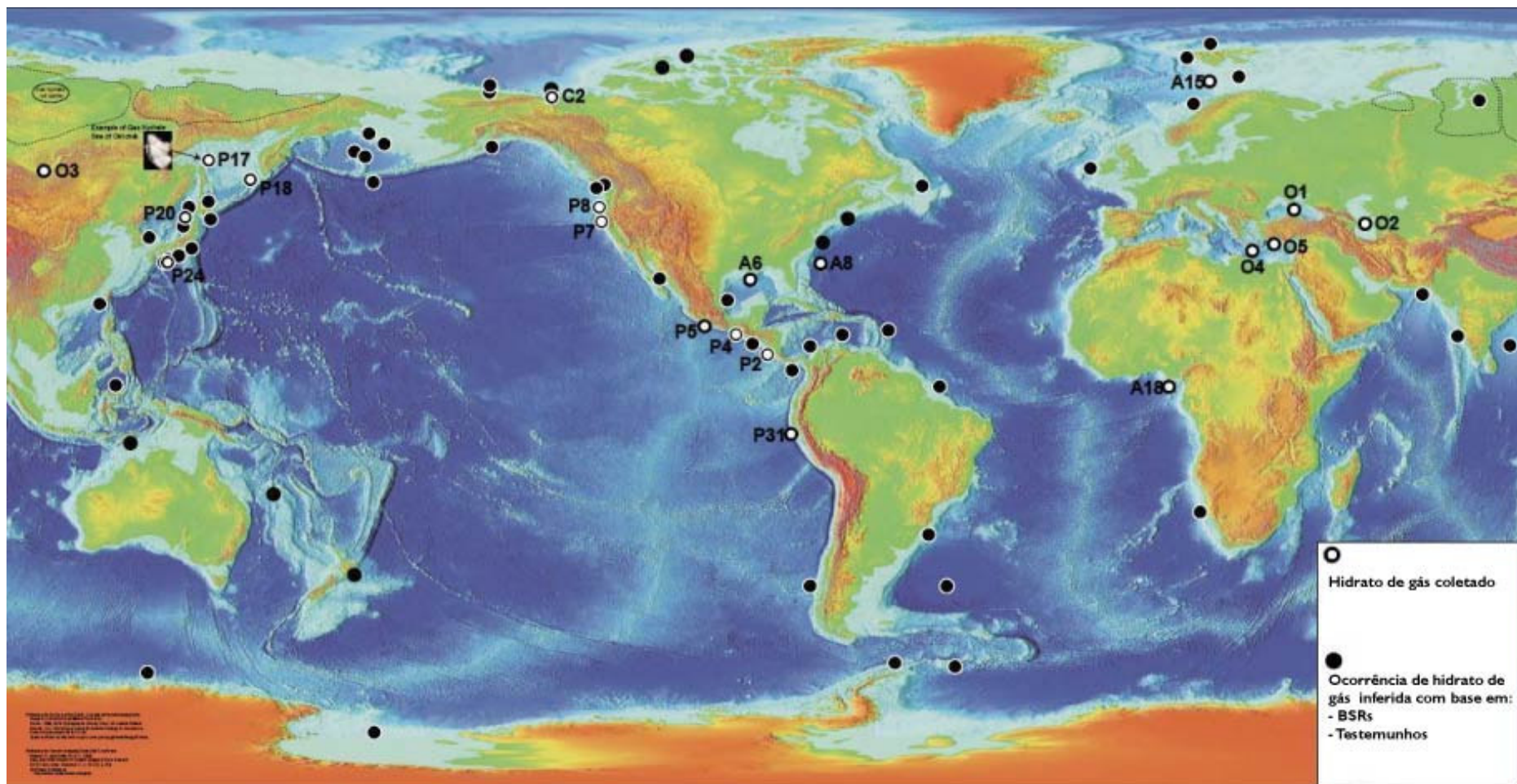


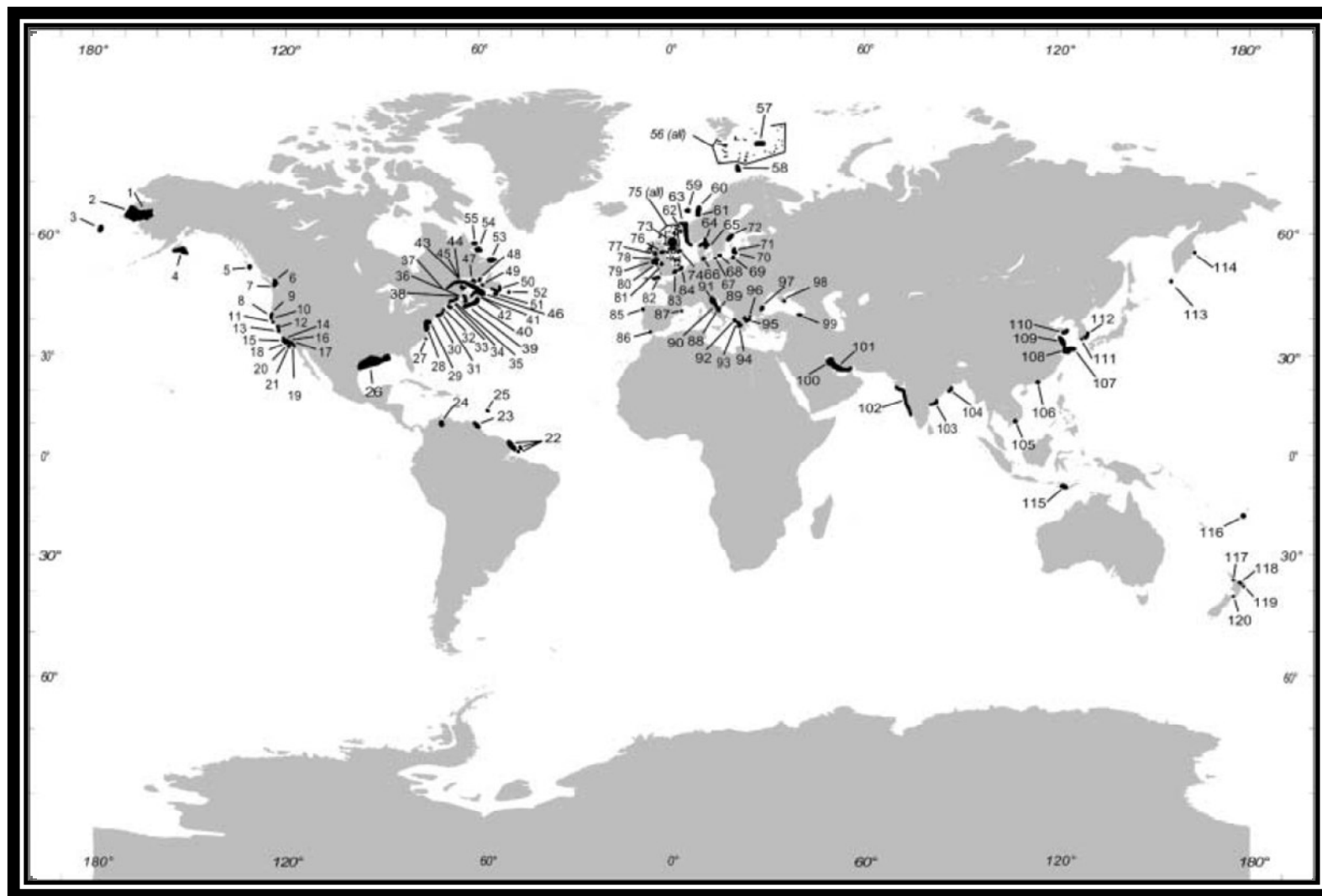
Figura 12 – Inventário Global da Ocorrência do HG natural (Modificado de Kvenvolden & Lorenson, 2001)

Em seu levantamento bibliográfico sobre a distribuição global de hidratos de gás nos sedimentos marinhos, Fleischer *et al.* (2001) produziram um mapa (Figura 13), contendo 120 pontos identificados, correlacionado com uma tabela na qual é apresentada a localização, incluindo coordenadas geográficas, o tipo de ambiente, a origem do gás, o meio de aquisição e a referência dos dados.

De acordo com o mapa de Fleischer *et al.* (2001), no Brasil há evidências do HG apenas na foz da Bacia do Amazonas, o que já foi confirmado por Tanaka *et al.* (2003). Entretanto, além da foz da Bacia do Amazonas, a ocorrência deste composto no Brasil foi constatada também na Bacia de Pelotas, entre 100 e 1.000m na coluna sedimentar (FONTANA, 1989; FONTANA e MUSSUMECI, 1994; SAD *et al.*, 1997; SAD *et al.*, 1998; BIZZI *et al.*, 2003; ROSA *et al.*, 2006).

Na Foz da Bacia do Amazonas, o volume estimado de metano no HG é de 1.415 trilhões  $m^3$  e no cone de Rio Grande na Bacia de Pelotas, o volume calculado a partir de área, espessura e concentração é de 135 bilhões de  $m^3$ . Em superfície o volume de gás seria de 13 trilhões de  $m^3$  de gás no Amazonas e 22 trilhões de  $m^3$  na Bacia de Pelotas. Estes valores colocariam o Brasil entre os países com os maiores depósitos do mundo (FIGUEIREDO, 1996; MONTALVÃO & EIRAS, 2003).

Em seu levantamento sobre o conteúdo de metano nos hidratos de gás, Kvenvolden (1999) constata que, entre as décadas de 80 e 90, pesquisadores apresentaram estimativas variadas do conteúdo de metano nas reservas de hidrato no mundo.



13 – Distribuição do HG nos sedimentos marinhos (Fleischer *et al.*, 2001).

### 3.1. Métodos de aquisição de dados

A técnica mais amplamente utilizada para detecção das acumulações de HG é a de reflexão sísmica (Figura 14), que se baseia no princípio de que ondas sísmicas (elásticas) se propagam em diferentes velocidades de acordo com o tipo de rocha. O método consiste em captar e interpretar o tempo de resposta de ondas sísmicas geradas por um transmissor em diversos pontos de uma dada área. O produto final é uma imagem (seção sísmica) na qual as discontinuidades do assoalho oceânico podem ser observadas e interpretadas (AYRES, 2002).

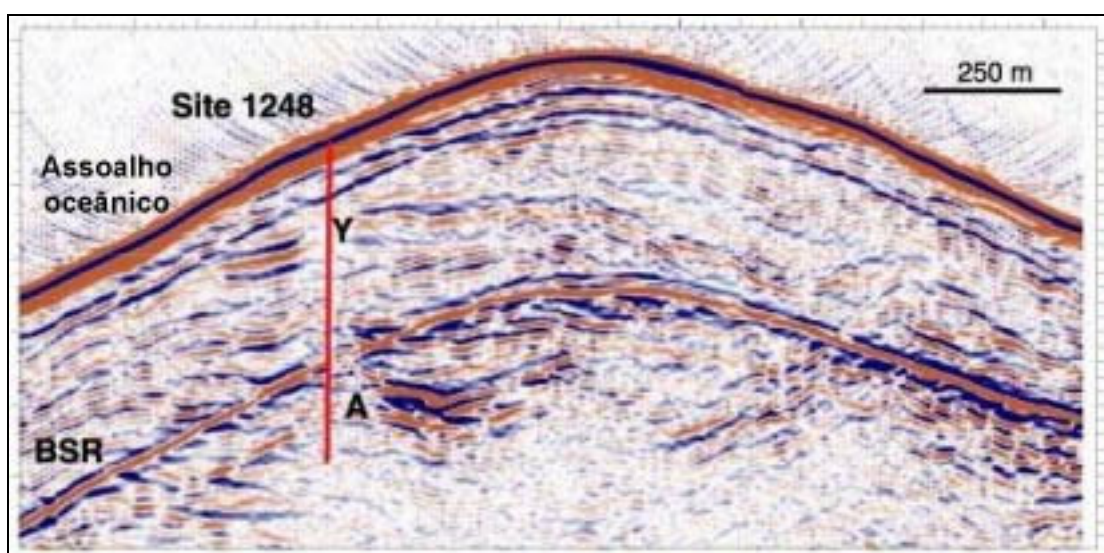


Figura 14 – Seção sísmica mostrando o limite do assoalho oceânico e o paralelismo do BSR (Modificado de Centre for Gas Hydrate Research – Heriot Watt University, 2005).

A reflexão sísmica se aplica na detecção do Bottom-Simulating Reflector (BSR). O BSR é uma zona de baixa velocidade sísmica que “reflete” paralelamente o fundo marinho, e corresponde à camada de sedimentos com gás dentro do espaço poroso (CLENELL, 2000), considerado como indicador da presença do HG. Entretanto, há casos de ocorrências do HG sem BSR



(ROSA, 2007) e do chamado “BSR duplo”. Foucher *et al.* (2002) caracterizam o limite superior do BSR duplo como o BSR ativo do HG e seu limite inferior, como um BSR residual. A ocorrência deste fenômeno indicaria ocorrência da migração vertical da zona de estabilidade do HG, possivelmente causada pelo aquecimento do fundo oceânico ou por atividade tectônica.

A partir do imageamento do BSR é possível identificar o limite entre a zona termodinamicamente estável dos hidratos (HSZ do inglês *Hydrate Stability Zone*) e o gás livre (Figura 15). Montalvão & Eiras (2003) ainda destacam que a simetria entre o aumento da profundidade da camada e o aumento da lâmina de água representa uma importante evidência do HG. A diferença na velocidade de resposta é o indicador da transição entre a HSZ (maior velocidade) para o gás livre (menor velocidade) (MONTALVÃO & EIRAS, 2003; ROSA *et al.*, 2006; WESTBROOK *et al.*, 2008).

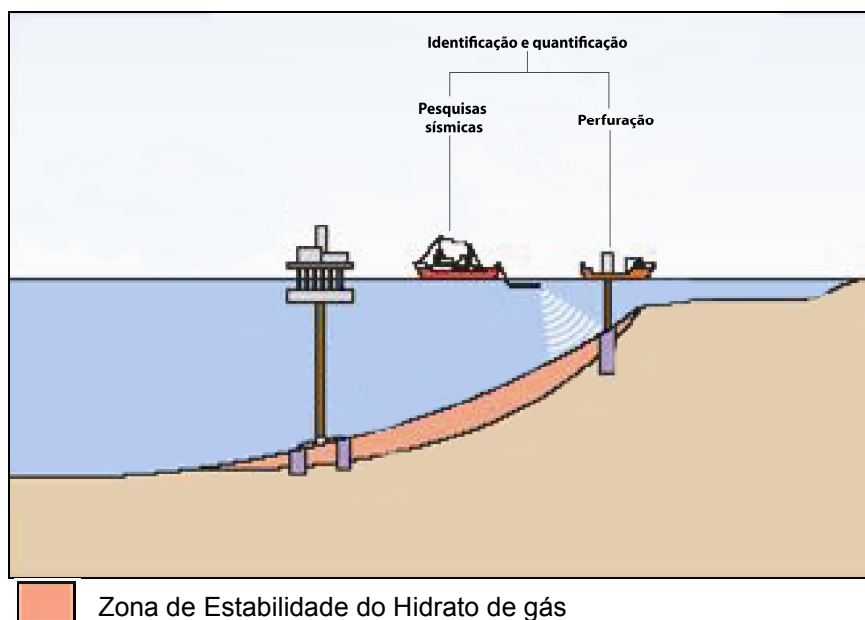


Figura 15 – À direita, esquema mostrando a aplicação de métodos de identificação e quantificação das acumulações de HG por meio da aquisição de dados sísmicos e perfuração (Modificado de Open Learn Website *apud* TOHIDI, & ANDERSON, 2004).

Apesar de possibilitar a identificação da presença de HG, Westbrook *et al.* (2008) afirmam que o BSR não fornece dados que possibilitem estimar a

quantidade e concentração do HG. A aquisição destes dados, segundo os autores, pode ser feita por meio de velocidade de resposta de ondas sísmicas, utilizando-se, por exemplo, modelos dos efeitos do HG em sedimentos. Entretanto, a falta de dados de *background* compromete a confiabilidade deste tipo de levantamento.



## 4. Clima e mudanças climáticas

Clima é, usualmente, definido como “tempo meteorológico médio” ou, mais especificamente, como “a descrição estatística de quantidades relevantes de mudanças de tempo meteorológico em um período de tempo, variando de meses a milhares de anos (...)”, conforme consta no glossário do 3º Relatório do Intergovernmental Panel of Climate Change – IPCC (2001).

Ao longo da história do planeta, ocorreram eventos de mudança do clima que se mostraram cíclicos e desencadeados por causas naturais (IPCC; Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT; United Nations Framework Convention on Climate Change – UNFCCC). Entretanto, as evidências da mudança do clima observadas por cientistas após a Revolução Industrial seriam decorrentes, principalmente, da intensificação da queima de combustíveis fósseis, tendo resultado no aumento na concentração dos “gases de efeito estufa” da atmosfera.

O Efeito Estufa é um fenômeno natural reconhecido por cientistas há mais de cem anos como de fundamental importância para a vida na Terra. Isto se deve aos gases presentes na atmosfera – vapor d’água, dióxido de carbono, metano, etc. – que ajudam a reter parte da radiação emitida pelo sol, mantendo a temperatura média do planeta em torno de 14°C (Met Office Hadley Centre, 2005). Recentemente, a expressão “efeito estufa” passou a ser relacionada, mais frequentemente, às hipóteses de “aquecimento global” que atribuem à atividade humana no planeta o aumento na concentração de gases de efeito estufa.

## 4.1. O hidrato de gás e o clima da Terra

Hipóteses sobre a relação entre o metano aprisionado nos hidratos e alterações ambientais ocorridas ao longo da história da Terra foram formuladas a partir do registro de episódios de aquecimento abrupto como, por exemplo, o LPTM/PETM (do inglês *Late Paleocene Thermal Maximum/Paleocene-Eocene Thermal Maximum*). Trata-se de uma das mais “*proeminentes aberrações climáticas (...) que ocorreu há 55 Ma no limite entre o Paleoceno e o Eoceno (...) e se caracterizou por um aumento de 5° a 6° C na temperatura do fundo dos oceanos* (ZACHOS, 2003: 690).

Este evento climático teria levado à extinção em massa, acidificação dos oceanos, aparecimento e proliferação generalizada de plânctons exóticos nos mares aberto e costeiro, alterações no regime e intensidade de precipitação e migração e dispersão de mamíferos terrestres, além de pronunciada variação de isótopos de carbono (CIE, do inglês *Carbon Isotope Excursion*) em carbonatos marinhos e terrestres e matéria orgânica em um curto período (MOORE, 2008; SMITH, 2007; PAGANI, 2006; SVENSEN *et al.*, 2004; DICKENS, 2004; DICKENS, 2003c, ZACHOS, 2001).

Zachos (2003) completa que a hipótese do

*“efeito estufa induzido pelo metano (do HG) é baseada em duas evidências: uma variação de > 2.5‰ de isótopo de carbono negativo (CIE) de todo o conjunto de carbono exogênico e uma pronunciada dissolução de carbonatos no fundo dos oceanos. Ambas são consistentes com injeções de significativas massas enriquecidas de <sup>12</sup>C no sistema oceano/atmosfera. A fonte primária deste carbono tem sido postulada como sendo a dissociação do hidrato de metano”* (ZACHOS, 2003:1551)

Em 2003, Kennet *et al.* propuseram uma explicação para episódios de aquecimento como o LPTM/PETM. Considerando que a estabilidade do HG

depende de condições específicas de temperatura e pressão, a "*clathrate gun hypothesis*", sugere que o aumento da temperatura dos oceanos, causado por um fator externo como, por exemplo, a erupção de um grande vulcão, teria desencadeado a dissociação dos clatratos dos fundos oceânicos, resultando na liberação de maciças quantidades de CH<sub>4</sub> na atmosfera.

Hinrichs *et al.* (2003) reforçam esta hipótese de grandes liberações de metano e sua oxidação em ambientes bentônicos<sup>4</sup> ou na superfície do oceano. Análises de sedimentos depositados nos intervalos de aquecimento ocorridos durante o último período glacial, coletados na bacia de Santa Bárbara, indicaram alta atividade metanotrófica, o que sugeriu a ocorrência de emissões intensas de metano neste período (De GARIDEL-THORON *et al.*, 2004).

O "*Storegga submarine landslide*", ocorrido na Noruega, que constituiria o maior deslizamento submarino dos últimos 40.000 anos, pode representar mais uma evidência de que a hipótese de Kennet *et al.* (2003) estaria correta (Figura 16). Baseados em registros de variações nas concentrações de metano em amostras de gelo (*ice cores*), Beget & Addison (2007), propõem que o deslizamento, ocorrido na parte oeste da plataforma continental da Noruega no início do Holoceno teria liberado metano suficiente para alterar o clima no planeta.

---

<sup>4</sup> "Referente ao ambiente ou habitat marinho do fundo dos oceanos, onde se fixam corais, algas e outros seres e caminham ou arrastam-se seres diversos como lagosta, camarão, caranguejos, etc...que são seres bentônicos". Fonte: <http://www.unb.br/ig/glossario/>

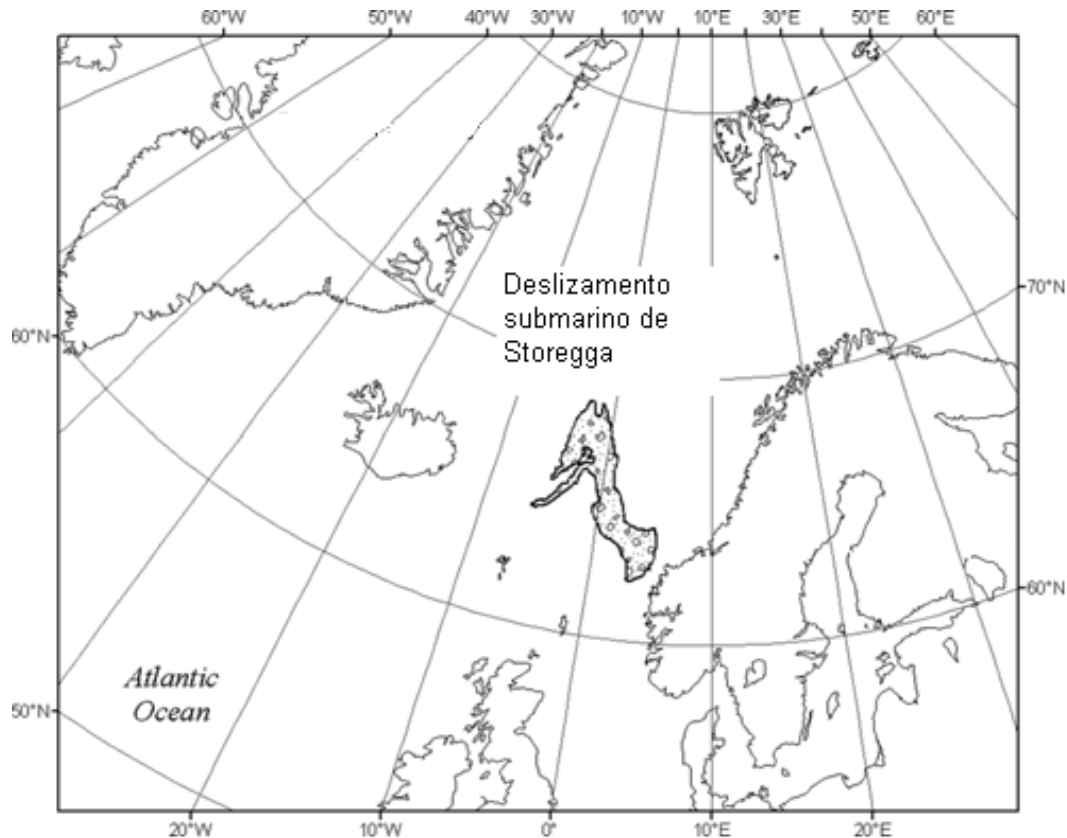


Figura 16 – Mapa indicando a área de ocorrência do deslizamento submarino de Storegga. (Modificado de Beget & Addison, 2007),

De acordo com Mienert *et al.* (2005) o talude oriental que restou após o deslizamento de Storegga atingiu 300m de altura. Uma área de 95km<sup>2</sup> foi coberta com o entulho movimentado pelo deslizamento e este teria gerado um *tsunami* que depositou material a 20m acima do nível do mar, na Escócia e Noruega. Segundo os autores, a área afetada pelo deslizamento era rica em HG que teria dissociado nesta ocasião (Figura 17) (BEGET & ADDISON, 2007).

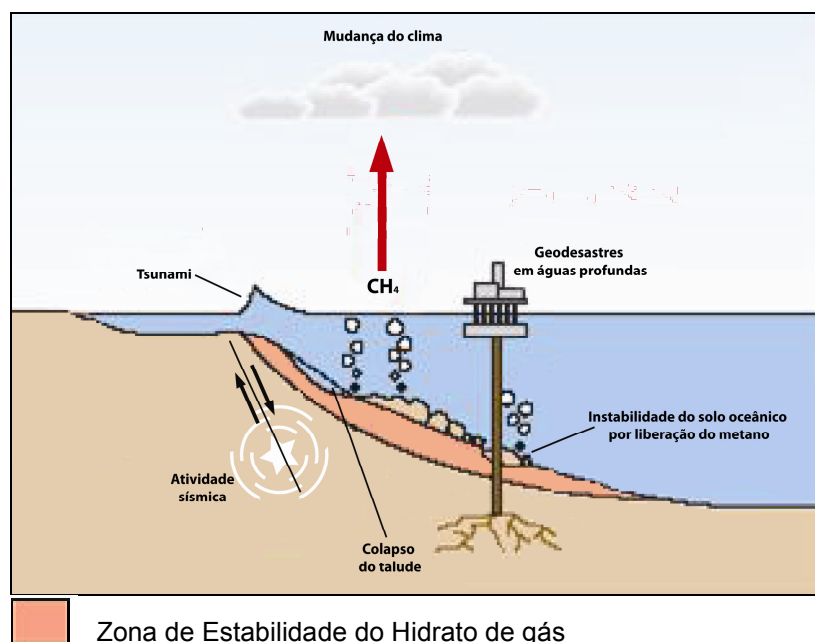


Figura 17 – Esquema mostrando a dissociação dos hidratos decorrente de terremoto, deslizamento submarino e subsequente liberação de metano na atmosfera (Modificado de Open Learn Website *apud* Tohidi, & Anderson, 2004).

Entretanto, para Etiope *et al.* (2008), estas não seriam as únicas fontes de metano que teriam alterado o clima. Escapes de metano *offshore*, vulcões de lama, microvazamentos e fluxo geotérmico (GEM – *geologic emissions of methane*) representam importantes fontes de metano, ficando atrás, apenas, das terras úmidas ou alagadiças, maior fonte natural de metano, atualmente. Ao tentar responder se emissões geológicas de metano tiveram algum papel nas mudanças de clima, os autores concluíram que as fontes *onshore* injetam na atmosfera, predominantemente, metano isotopicamente pesado ( $^{13}\text{C}$  enriquecido) e são controladas, principalmente, por processos endógenos (geodinâmicos), o que teria induzido a grandes variações de fluxo de gás na escala de tempo geológico. Segundo eles, as alterações na concentração de metano na atmosfera não estariam relacionadas apenas a liberações maciças e catastróficas deste gás, conforme proposto pela “*Clathrate Gun Hypothesis*”. Vazamentos de fontes *onshore* explicariam os picos nas concentrações de

metano concomitante com o enriquecimento isotópico deste gás, conforme observado por Etiope *et al.* (2008).

Considerando a hipótese proposta por Kennet *et al.* (2003) como “altamente especulativa”, Dickens (2003a) ressalta a existência de uma lacuna deixada pelos seus autores: a ausência de evidências incontestáveis de que o metano liberado no fundo do oceano atravessou toda a coluna d’água e de que este foi o gatilho para o início dos períodos de aquecimento. Entretanto, Dickens admite que os registros do fundo do oceano de Hinrichs *et al.* (2003) provam que há acertos no modelo de Kennet *et al.* (2003).

A fim de identificar o impacto das forçantes climáticas e antropogênicas nas liberações de metano do HG, Archer e Buffett (2005) simularam as duas situações em uma escala de tempo geológico. Conforme o modelo, sob efeito da forçante climática as reservas oceânicas globais de clatrato liberariam aproximadamente 200 Gt de carbono. Em relação à forçante antropogênica, o modelo mostrou que a liberação seria maciça, da ordem de milhares de gigatoneladas de carbono. Segundo os autores, mudanças climáticas antropogênicas se diferem de deglaciações naturais pelo aquecimento pronunciado do oceano, de magnitude inédita em milhões de anos.

Considerando o metano liberado a partir da dissociação dos hidratos como o principal protagonista em episódios de aquecimento global, o professor do Departamento de Química e Engenharia biológica da Universidade de Northwestern, Gregory Ryskin propôs, em 2003, a ousada hipótese da “Explosão de Metano”, apresentada em um artigo da *Geology*, publicado pela “Geological Society of America” e, mais recentemente, mostrada em um documentário no canal *The History Channel*.

Para Ryskin, a maior extinção em massa da história, ocorrida no Permiano, há 250 milhões de anos, que teria dizimado 95% das espécies existentes, teria sido causada por uma explosão de metano desencadeada por um terremoto, vulcão submarino, correntes de convecção geradas por calor geotérmico ou onda de gravidade interna (RYSKIN, 2003).

O autor relaciona episódios de “explosão de metano” ao longo da história, inclusive com o evento bíblico do Grande Dilúvio. Ele alerta que é um fenômeno periódico e pode acontecer, atualmente, a qualquer momento com conseqüências catastróficas para a vida marinha e terrestre. Uma vez disparado o ‘gatilho’, a área em erupção *“ferve’ ejetando grande quantidade de metano e outros gases na atmosfera, e inundando áreas de terra”* (RYSKIN, 2003).

O metano é menos denso que o ar, entretanto, por conter vapor d’água se tornaria mais pesado, espalhando-se pelos continentes e misturando-se com o ar. Segundo Ryskin, esta seria uma combinação explosiva já que apenas um relâmpago poderia causar a ignição de sucessivas explosões, que produziriam grandes quantidades de fumaça e dióxido de carbono. Esta sucessão de eventos dizimaria grande parte da vida na Terra, conforme o autor.

Dickens (2003b) questiona a hipótese da explosão de metano baseado no fato de que Ryskin não considera a “fase clatrato” deste gás, apenas sua “fase livre”. Para Ryskin, a fração molar de metano dissolvido abaixo de 4km de água pode atingir  $\sim 4.3 \times 10^{-3}$ . Dickens ressalta que o autor ignorou a habilidade do metano e da água de se cristalizarem sob alta pressão e baixa temperatura, o que tornaria pouco provável o cenário “previsto” por ele. Dickens mostra que

o metano nunca poderia se acumular além de  $\sim 1.2 \times 10^{-3}$ , caso contrário, a estrutura do clatrato precipitaria (DICKENS, 2003b).

Um evento análogo ao descrito por Ryskin ocorreu em 21 de agosto de 1986. No Lago Nyos, no Camarões, uma “erupção” de dióxido de carbono e água atingiu 120m de altura e teve duração de quatro horas. A coluna de água gerou uma onda de 25m e o gás liberado, por ser mais denso que o ar, deslocou-se em direção ao vale no qual se situava a vila de Nyos, causando 1800 mortes por asfixia. Dois anos antes, um evento parecido, e muito pouco noticiado, ocorreu no Lago Monoun, próximo ao Nyos. Neste foram 37 vítimas fatais (RYSKIN, 2003; HALBWACHS *et al.*, 2004).

Inicialmente o fenômeno foi atribuído à atividade vulcânica, o que, segundo ZHANG (1996) foi descartado devido a evidências como sedimentos sem sinal de perturbação, que indicaria uma grande erupção. Anos mais tarde, pesquisas mostraram que a descompressão da água saturada em CO<sub>2</sub> poderia causar erupções explosivas (Figura 18) (ZHANG, 1996).

Este novo tipo de desastre natural foi chamado de “erupção límnica<sup>5</sup>”, na Conferência para o desastre do Lago Nyos, da UNESCO, ocorrida em março de 1987. Segundo Halbwachs *et al.* (2004), esta denominação faz analogia às bolhas de gás ascendentes em líquido (magma) das erupções vulcânicas.

---

<sup>5</sup> “Bacia, fácies, biota, sistema deposicional, processo geológico que ocorre ou se desenvolve em ambiente de lago continental de água doce” (Fonte: [www.unb.br/ig/glossario](http://www.unb.br/ig/glossario))



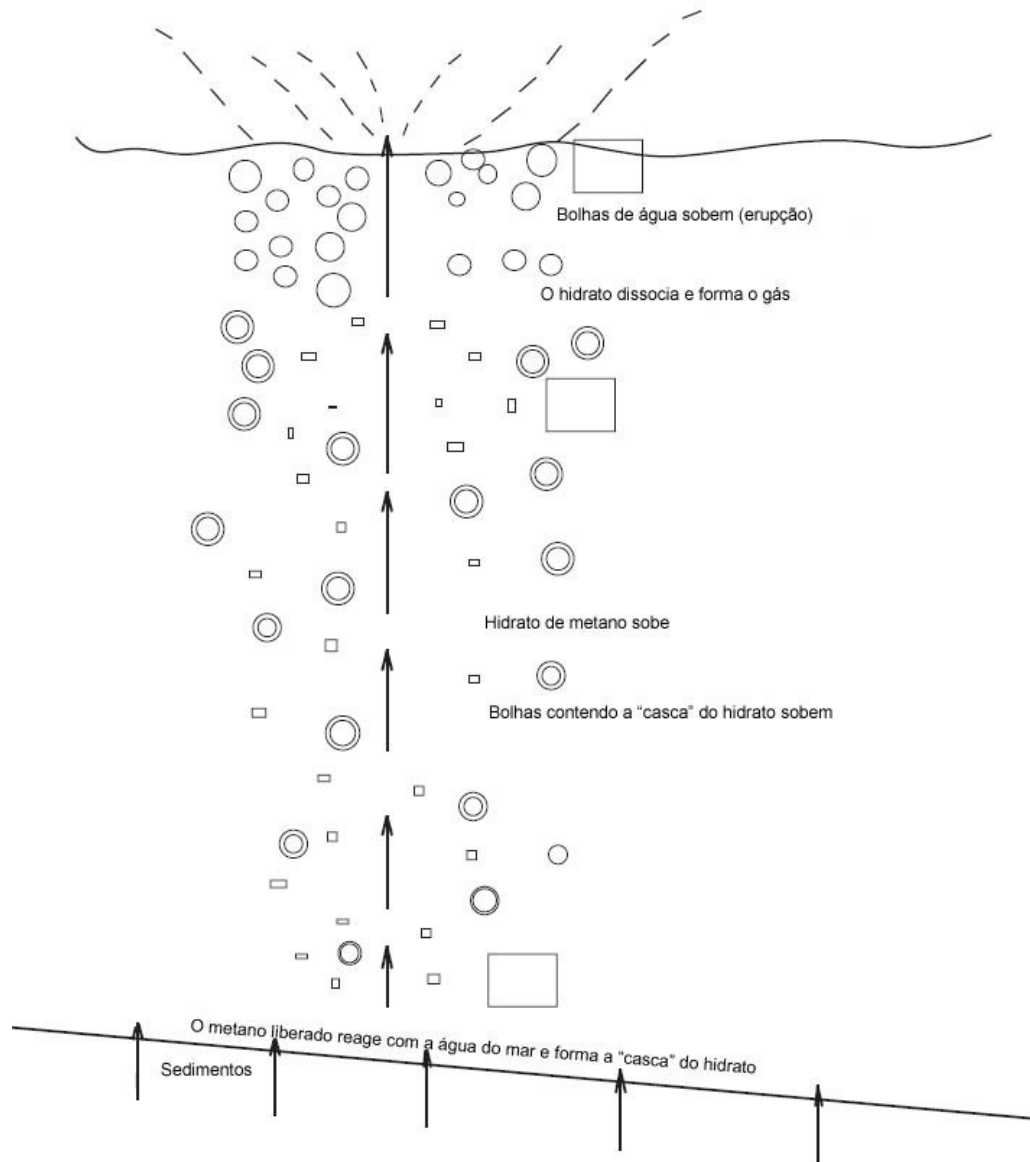


Figura 18 – Dinâmica de erupção do metano: os retângulos representam cristais de hidrato; círculos representam bolhas; círculos duplos representam bolhas revestidas com hidrato (Zhang, 2003).

Como forma de prevenir a recorrência de catástrofes no lago Nyos e Monoun foi implantado um projeto de degaseificação dos mesmos denominado “Degaseificando lagos assassinos” (do inglês “*Degassing ‘killer lakes’*”). Uma erupção límnica “controlada” é gerada por meio de bombeamento de água através de um duto, instalado verticalmente, até o assoalho do lago, que “empurra” para a superfície a água saturada de  $\text{CO}_2$  com pressão suficiente para gerar uma coluna de água de 50m (Figura 19).



Figura 19 – Coluna de água gerada na ‘desgaseificação’ do Lago Nyos, em 2001.  
(HALBWACHS *et al.*, 2004)

## 5. O hidrato de gás como fonte de energia

O desenvolvimento industrial e social ocorrido no século XX desencadeou um aumento na demanda por combustíveis fósseis – óleo<sup>6</sup>, gás e carvão – em todo o mundo. Este aumento não foi acompanhado pelo descobrimento de novas reservas ou novas fontes de energia (Figura 20).

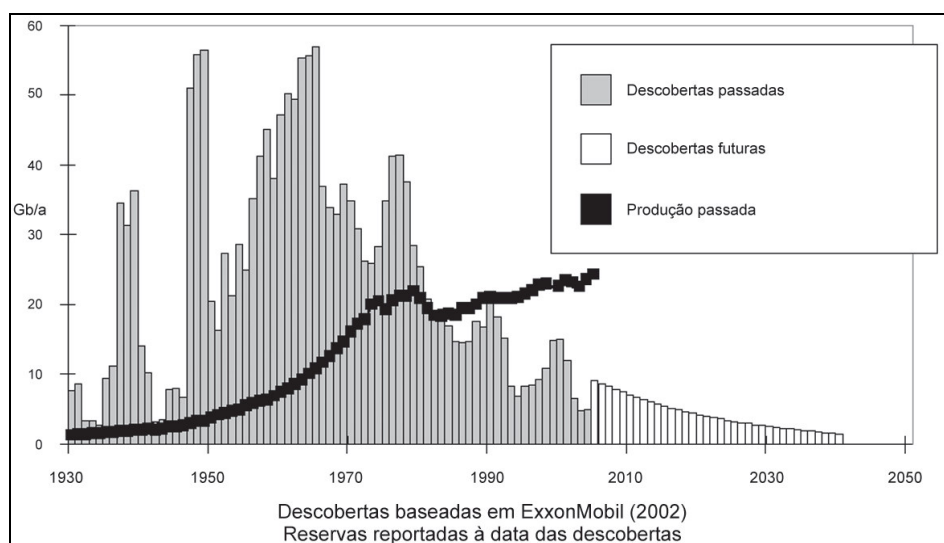


Figura 20 – Gráfico mostrando a evolução das descobertas e produção de petróleo baseadas em ExxonMobil (Rosa, 2006).

Clennell (2000), Desa (2001) e Rosa (2006) concordam que a perspectiva de esgotamento das fontes de energia convencionais impulsionou a uma busca por fontes alternativas e/ou renováveis que possam suprir esta demanda no futuro.

As descobertas recentes de grandes depósitos de HG nas margens continentais e no *permafrost* Ártico voltaram a atenção de cientistas para as

<sup>6</sup> No glossário do Ministério de Minas e Energia (MME) e do Relatório Anual de 2007 da PETROBRAS *petróleo* é caracterizado como um hidrocarboneto que apresenta fase líquida e gasosa, sendo o combustível produzido a partir de sua fase líquida chamado de 'óleo' (<http://www.conpet.gov.br/quito/glossario.php>). Para a Agência Nacional do Petróleo (ANP), "*petróleo é todo e qualquer hidrocarboneto líquido em seu estado natural, a exemplo do óleo cru e condensado*" (<http://www.anp.gov.br/glossario/index.asp?strAlpha=P>). Nesta pesquisa optou-se por utilizar a definição do MME e da ANP que estão de acordo com a definição da EIA, fonte dos dados utilizados por esta pesquisa ([www.eia.doe.gov/glossary/index.html](http://www.eia.doe.gov/glossary/index.html)).

propriedades deste composto, principalmente, seu potencial como fonte de energia. A caracterização, quantificação e avaliação do potencial do metano do hidrato passaram a ser um desafio a ser superado, principalmente para países como Índia e Japão, que possuem recurso primário insuficiente em seu território (CLENELL, 2000; DESA, 2001).

Flannery (2007: 97) explica que

*“quanto mais rico em carbono for o combustível mais perigo representa para o futuro da humanidade (...). Os combustíveis derivados do petróleo são menos ricos em carbono, contendo dois átomos de hidrogênio para cada átomo de carbono em sua estrutura. Como o hidrogênio produz mais calor quando queimado (e ao fazê-lo produz apenas água), queimar petróleo libera menos CO<sub>2</sub> por unidade usada do que carvão. O combustível fóssil com menos teor de carbono é o metano, que tem apenas um átomo de carbono para quatro de hidrogênio”.*

O fato de ser menos poluente que o petróleo e o carvão, de representar o maior recurso energético do planeta, quando comparado a outros combustíveis fósseis (Figura 21), e apresentar ampla distribuição em todo o mundo, proporciona fortes argumentos aos defensores da idéia do metano do hidrato vir a tornar-se uma fonte de energia a ser utilizada em larga escala (KVENVOLDEN, 1999).

Outro motivo que torna o HG interessante é o fato de estar, normalmente, associado a uma zona de gás livre, proveniente da dissociação do clatrato (CLENELL, 2000; MARTINS, 2003). Em 1996, Holbrook *et al.*(1996) já destacavam a importância de melhorar os conhecimentos sobre a interpretação de dados sísmicos para possibilitar uma quantificação mais precisa do volume de gás livre e contido nos hidratos.

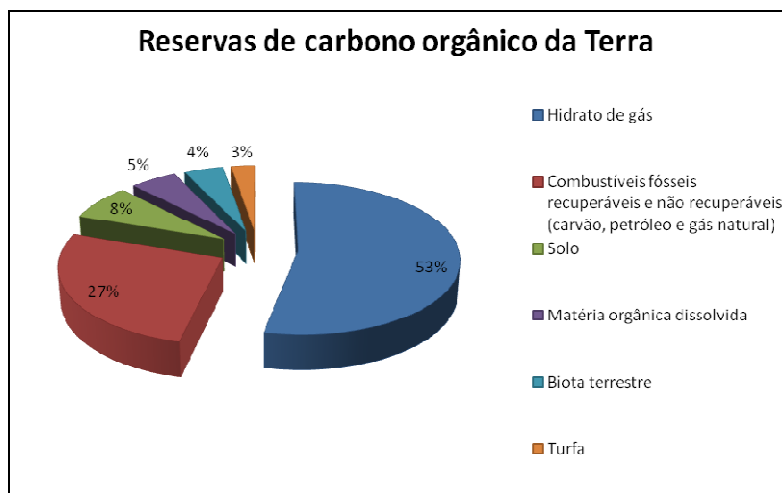


Figura 21 – Percentual das reservas de carbono orgânico na Terra. (Modificado de Kvenvolden , 1993 e Hyndman & Dallimore, 2001).

O volume das reservas e o fato do composto produzir mais energia por molécula de CO<sub>2</sub> gerado do que qualquer outro combustível fóssil justifica o interesse que o mesmo desperta atualmente. De acordo com Bil (2003), o metano representaria a independência energética de países como Japão e Índia e Estados Unidos além de possibilitar o aproveitamento da estrutura da exploração de gás natural já instalada.

Algumas das dificuldades encontradas na exploração do metano estão na localização e caracterização das reservas, na identificação de fluxos de calor e massa na mesma e em questões sobre a estabilidade geomecânica. Embora tecnicamente viável, a produção do metano aprisionado no hidrato, ainda se trataria, em 2003, de uma atividade economicamente inviável (BIL, 2003).

O autor pondera que, antes de pensar em exploração do metano como fonte de energia, deve-se avaliar o gás natural, seu principal concorrente, e suas perspectivas do mercado para o futuro: “*O mundo estará precisando de fontes não-convencionais de gás em 40 anos?*” (BIL, 2003)

Flannery (2007) avalia que “se o século XIX foi do carvão, o século XX foi do petróleo” e a tendência atual indica que, em 2025, este será superado pelo gás natural.

Assumindo-se que a demanda por gás natural irá realmente aumentar, este recurso tenderá a ficar escasso, conseqüentemente, mais caro. Ao mesmo tempo, o preço de produção do metano a partir dos hidratos irá diminuir gradualmente, devido ao desenvolvimento tecnológico. Quando o preço do metano do hidrato alcançar o do gás convencional, ele se tornará comercialmente viável (Figura 22).

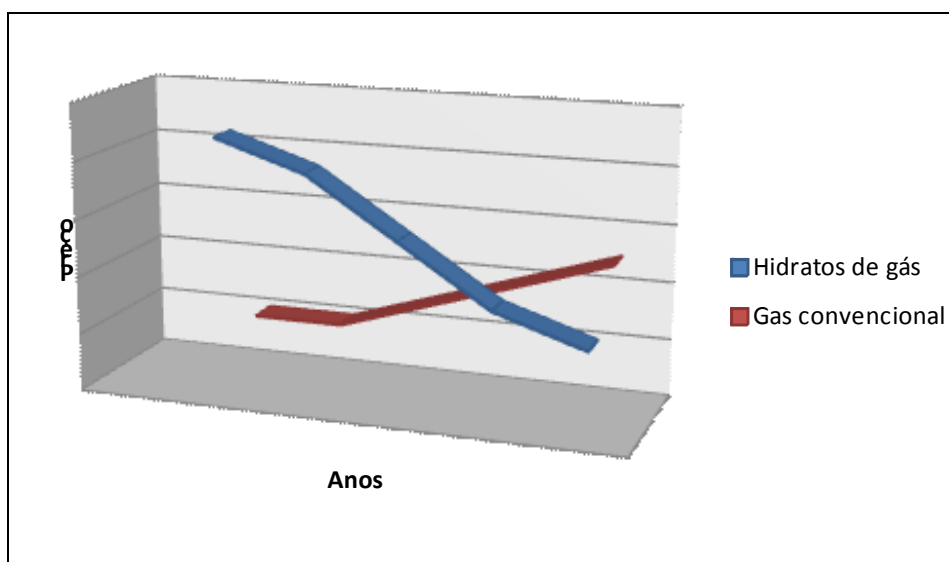


Figura 22 – Evolução conceitual do custo do gás convencional e do hidrato de gás ao longo do tempo. (Modificado de Bil, 2003).

Em países como Índia e Japão, cujas fontes de hidrocarbonetos são pouco significativas, a situação é diferente. Nestes países há volumosos incentivos para desenvolvimento de pesquisa sobre a exploração do metano armazenado nas suas águas.

Sobre a possibilidade de produção, Martini & Antunes (2003), citam o HG como sendo seguro, “ambientalmente amigável” – sua queima produz

apenas CO<sub>2</sub> e água – e uma alternativa para o transporte de gás natural a longas distâncias. “O hidrato de gás ocupa 150-170 vezes menos espaço que o gás correspondente nas condições padrão e pode ser transportado e armazenado a pressões muito mais baixas. (...)” (MARTINI & ANTUNES, 2003:4)

Em seu relatório sobre aspectos econômicos da produção do metano do hidrato Walsh *et al.* (2008) relacionam a perspectiva de viabilidade econômica da exploração com os tipos de acumulações de HG. Para os autores, estas podem ser classificadas em quatro classes distintas: (i) Classe 1: apresenta uma camada de hidrato sobre uma zona contendo duas fases fluidas – gás e água; (ii) Classe 2: os depósitos constituem uma camada de hidrato uma zona de água; (iii) Classe 3: os depósitos são compostos por uma única camada de hidrato, não havendo fluidos móveis sob a mesma; (iv) Classe 4: depósitos dispersos e com baixa saturação ao longo do assoalho oceânico.

Por apresentarem concentrações maiores de HG e/ou gás livre associado, o que aumentaria a taxa de produção de gás da reserva, as Classes 1 e 2 seriam as primeiras a se tornar passíveis de exploração em menos tempo (WALSH *et al.*, 2008).

## **5.1. Técnicas de produção**

Tecnicamente, o gás do hidrato poderia ser produzido por meio de estimulação térmica (possivelmente combinada com despressurização) e também utilizando solução salina aquecida artificialmente ou vapor, ou seja,

métodos baseados na decomposição do hidrato por estimulação externa (OTA *et al.*, 2005; BIL, 2003).

Para Servio *et al.* (2006 *apud* MAKOGON 1981), o método de decomposição térmica é o menos viável economicamente devido à grande energia demandada, sendo a despressurização uma melhor opção na recuperação de gás do hidrato.

Alguns pesquisadores consideram ainda a produção de metano por meio da substituição, no hidrato, do  $\text{CH}_4$  por  $\text{CO}_2$  líquido. Os enormes volumes de metano aprisionado neste tipo de reservatório e o fato de hidratos contendo  $\text{CO}_2$  serem mais estáveis serviram de estímulo para o desenvolvimento de pesquisas sobre a substituição do  $\text{CH}_4$  pelo  $\text{CO}_2$  (OTA *et al.*, 2005; KVAMME *et al.*, 2007)

Se viabilizado, este método possibilitaria a recuperação de hidrocarbonetos, funcionando também como mecanismo de redução de emissão de gases de efeito estufa por meio do armazenamento seguro de dióxido de carbono (Figura 23).

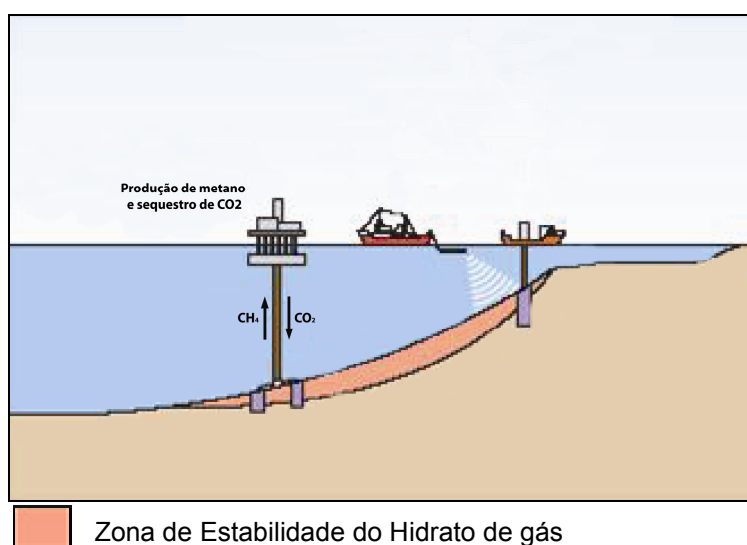


Figura 23 – Esquema ilustrando a produção do  $\text{CH}_4$  associada ao armazenamento de  $\text{CO}_2$  (Modificado de Open Learn Website *apud* Tohidi, & Anderson, 2004).



Souza & Martins (2008) citam a alternativa do “beneficiamento” do HG por meio do processo *gas-to-liquid* (GtL), o que possibilitaria a obtenção de um combustível mais limpo. Neste processo o gás natural é convertido em gás de síntese (hidrogênio + monóxido de carbono), sendo então convertido, em um reator, para um hidrocarboneto líquido ultralimpo (SOUZA & MARTINS, 2008).

Considerando a “fase clatrato” como uma forma eficiente de transportar gás natural, alguns autores propõem a tecnologia denominada *gas-to-solid* (GtS), que envolveria três processos: produção, transporte e regaseificação do metano (MARTINI & ANTUNES, 2003 *apud* BADAKHSHAN e POOLADI-DARVISH, 2000).

Se por um lado o metano do hidrato é considerado uma interessante alternativa como fonte de energia mais limpa<sup>7</sup> do que a do petróleo e do carvão, por outro lado, representa um risco que deve ser considerado pela indústria do petróleo, devido aos prejuízos que pode causar aos equipamentos de exploração e ao meio ambiente. A própria exploração do gás do hidrato envolve riscos como a dissociação dos clatratos, e consequente desestabilização do fundo oceânico, podendo causar grandes deslizamentos submarinos, explosões por brusca desgaseificação, formação de tsunamis e liberação de metano, aumentando a sua concentração na atmosfera (Figura 24) (ROSA, 2007).

---

<sup>7</sup> O gás natural – cujo principal componente é o metano – possui uma queima mais limpa quando comparado a outros combustíveis, pois resulta numa produção menor quantidade de dióxido de carbono e outros poluentes por unidade de energia gerada. (FLANNERY, 2007; CHOUDHARY *et al.*, 2002)

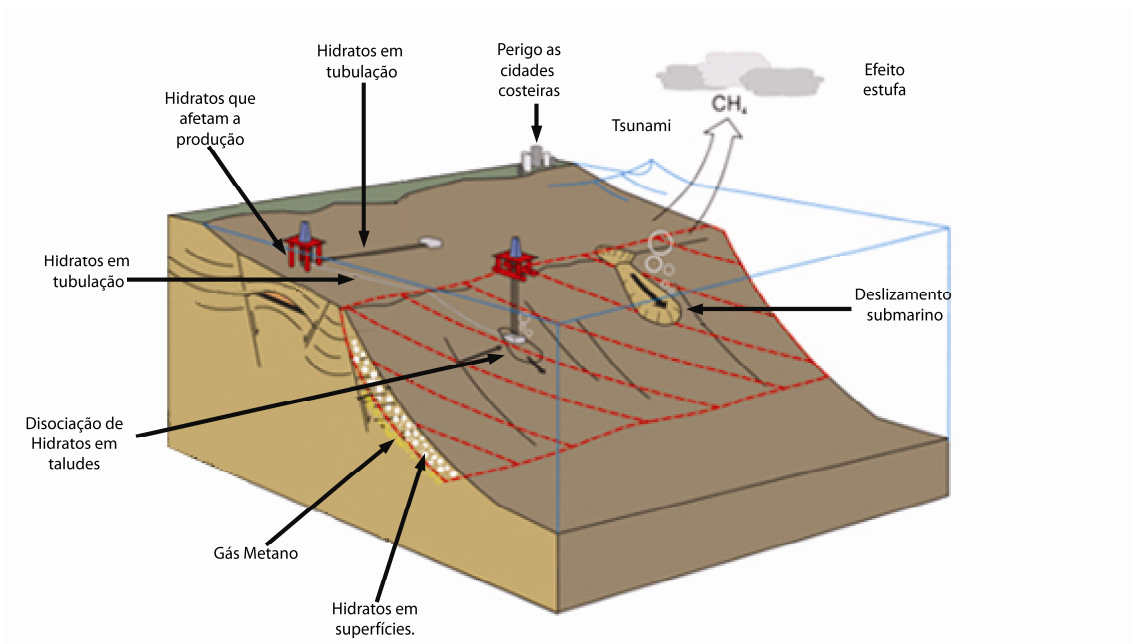


Figura 24 – Esquema mostrando os riscos associados à produção de hidrocarbonetos em áreas de ocorrência do HG (Modificado de Centre for Gas Hydrate Research – Heriot Watt University, 2005).

## 6. Um novo ciclo energético?

A viabilidade econômica da exploração do metano do hidrato está diretamente relacionada ao futuro das fontes de energia convencionais. A perspectiva de esgotamento e/ou de aumento considerável no preço dos mesmos é um estímulo à procura de novas fontes de energia.

*“Em 1995, o homem estava usando 24 bilhões de barris de petróleo por ano, mas apenas 9,6 bilhões de barris haviam sido descobertos. São números como esses que fazem muitos analistas acreditarem que a era do petróleo barato acabou, e com o custo se mantendo acima dos US\$ 40 por barril, o mercado está começando a concordar com eles. Alguns analistas prevêem preços cada vez mais elevados e talvez períodos de escassez já em 2010, o que sugere que algo novo será necessário para impulsionar as economias do século XXI. Este ‘algo novo’ é o gás natural, acreditam muitos na indústria. E o principal componente do gás natural é o metano (em torno de 90%)”* (FLANNERY, 2007:103)

Os dados dos 15 países com maior produção e maior consumo de óleo, carvão e gás natural e das maiores ocorrências de hidrato de gás possibilitaram uma discussão acerca do futuro destes países no que se refere à oferta e demanda de combustíveis.

No ano de 2006, os Estados Unidos, China, Japão, Coreia do Sul, Índia, França, Itália, Alemanha e Reino Unido apresentaram um *déficit* na relação produção-consumo de óleo. Entre estes países, apenas os Estados Unidos e China são produtores e consumidores. O restante não produz óleo em seu território, sendo obrigado a importar para suprir a demanda. O Brasil apresentou um pequeno *déficit*, mostrando-se, praticamente, auto-suficiente em óleo no referido ano (Figura 25).

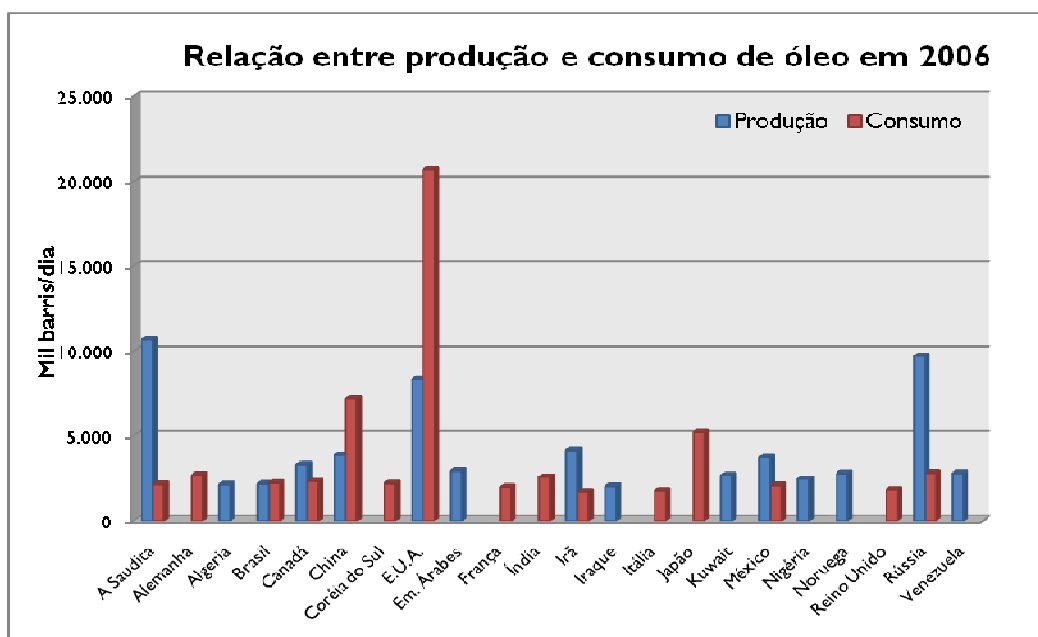


Figura 25 – Gráfico comparativo entre os 15 países com maior produção e maior consumo de óleo no mundo (Fonte: EIA, 2006).

Em relação ao carvão, no ano de 2007 a China se destacou com uma produção quase três vezes maior do que a dos Estados Unidos, segundo maior produtor de carvão do mundo. Os três maiores produtores de carvão em 2007 apresentaram um pequeno *déficit* em relação ao consumo (Figura 26).

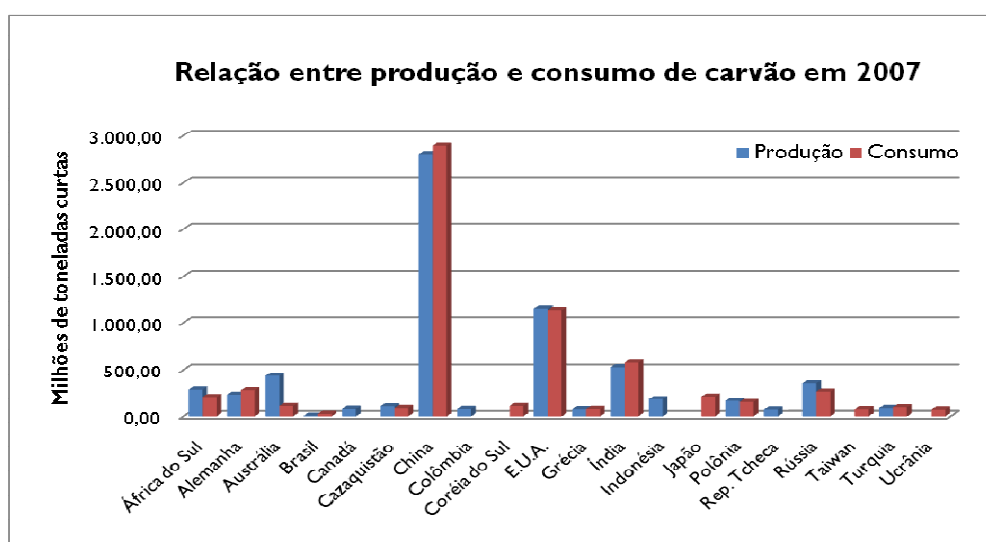


Figura 26 – Gráfico comparativo entre os 15 países com maior produção e maior consumo de carvão no mundo (Fonte: EIA, 2007).

A Rússia se destacou amplamente com a maior produção de gás natural do mundo em 2007, excedendo consideravelmente a demanda nacional. Por outro lado, os Estados Unidos apresentaram um déficit de produção de mais de 100 tmc (Figura 27).

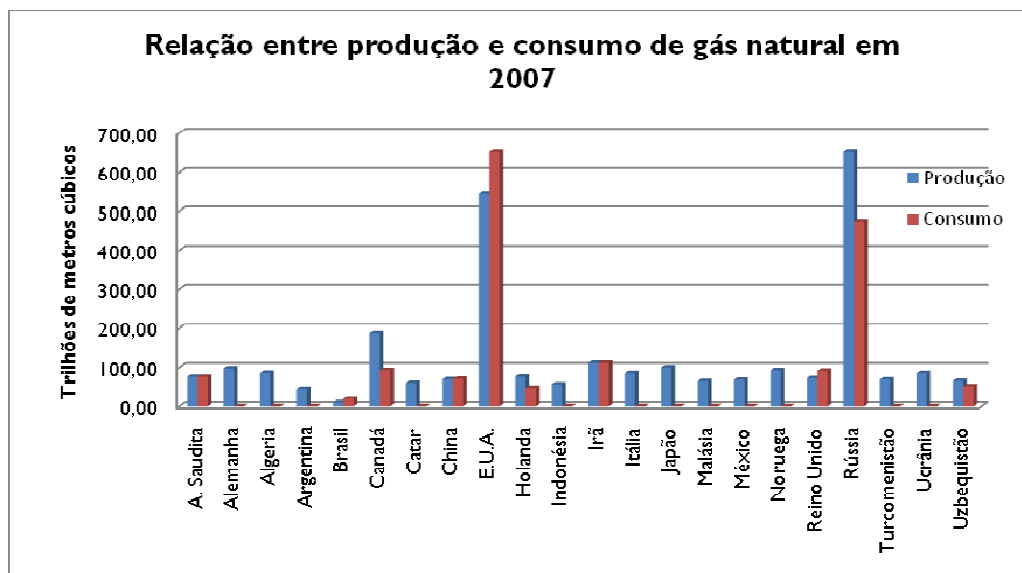


Figura 27 – Gráfico comparativo entre os 15 países com maior produção e maior consumo de gás natural no mundo (Fonte: EIA, 2007).

Nas Figuras 25, 26 e 27 é possível identificar os países cuja produção de combustível é insuficiente e/ou inexistente e, portanto, não suprem a demanda interna. Os Estados Unidos apresentaram, em 2006, um *déficit* de mais de 10.000 barris de óleo por dia. Na China a diferença entre produção e consumo foi de, aproximadamente, 5.000 barris/dia. No que se refere ao carvão e ao gás, a relação entre produção e consumo se apresenta mais equilibrada.

Para países como Coréia do Sul, Alemanha, França, Índia, Itália, Reino Unido, Japão e Taiwan, cuja produção de hidrocarbonetos é insuficiente para suprir a demanda interna, garantir a segurança energética significa encontrar fontes alternativas de energia.

Atualmente a exploração do hidrato de gás é tecnicamente difícil e de alto custo, porém, o composto representa uma alternativa para o futuro de algumas nações. Para Johnson (2008), a produção comercial do metano do hidrato poderá ser viável em menos de uma década. Então, pergunta-se: quem será o primeiro?

Sem dúvida alguma trata-se de informação estratégica que nenhum programa de pesquisa publica em artigo ou página de internet. Pode-se, então, fazer inferências com base no grande volume de dados reunidos ao longo desta pesquisa.

Conforme já citado anteriormente, o Japão foi o primeiro país a criar um programa de pesquisa voltado para o HG, no ano de 1995 (MATSUMOTO, 2000), e a Índia foi o segundo, em 1996 (JAUHARI, 2001). Os dois países enfrentam séria deficiência no suprimento interno de hidrocarbonetos convencionais e apresentam registros de grandes acumulações do HG em seu território. A Coreia do Sul, apesar de ter começado a pesquisar o composto apenas em 2005, planeja o início da produção comercial para 2015, possivelmente estimulada pela descoberta de acumulações mais extensas do que as registradas no Japão e Índia.

No que se refere à segurança energética, Estados Unidos e Canadá não apresentam a mesma urgência que os países citados acima. Entretanto, os prognósticos de esgotamento das reservas, a necessidade de substituição de matriz energética por combustíveis menos poluentes e mais eficientes, além do fato de se tratar de uma questão estratégica são, provavelmente, alguns dos motivos que levaram os dois países a se colocarem entre os mais avançados na área.

Conforme visto anteriormente, no Brasil há artigos e trabalhos acadêmicos abordando temas como a localização, identificação e caracterização do HG. Contudo, são iniciativas ainda pontuais, possivelmente uma consequência da tradição brasileira em produção de óleo e gás. Aliado a este fenômeno, temos as recentes descobertas de megacampos de óleo nas formações do pré-sal que, se confirmadas, colocam o país como o detentor de uma das maiores reservas de petróleo do planeta (PETROBRAS, 2007), podendo se tornar, além de auto-suficiente, um exportador deste produto no futuro. Conforme notícia publicada no *site* G1, no dia 1º de maio de 2009 foi anunciado pela Petrobras o início da exploração no campo de Tupi, para fins de testes. *“Se o reservatório confirmar as expectativas neste período de testes, em 2020 pode dobrar a reserva nacional de Petróleo que hoje soma 14 bilhões de barris”* (G1, 01/05/2009).

A preocupação atual na adoção de combustíveis menos poluentes pode ser umas das razões pelas quais se tenha começado a demonstrar interesse também pelas áreas de ocorrência do HG no Brasil. Os resultados das rodadas de licitação 5 (2002-2003) e 6 (2003-2004) da ANP, nas quais foram arrematados, pela PETROBRAS, os blocos exploratórios das bacias de Pelotas e Foz do Amazonas (ANP, 2002; 2003) podem ser um indicativo deste interesse.

A Rússia, apesar da experiência e de projetos de pesquisa pontuais, não se destaca na área, embora alguns pesquisadores acreditem que parte do gás natural produzido no campo do Messoyakha seja fruto da dissociação do HG (BIL, 2003).

Para países nos quais não há registro de ocorrência significativa de hidrato de gás, como França, Itália, Alemanha e Reino Unido, a existência de projetos, programas de pesquisa e convênios voltados exclusivamente para o assunto e seu avançado posicionamento tecnológico representam a possibilidade de venda de tecnologia “madura” para países que não acompanharam o desenvolvimento desta área de conhecimento.



## 7. O HG como fator de desterritorialização mundial

Em um cenário no qual países importadores tornam-se auto-suficientes no suprimento de sua demanda por energia, de que forma a ‘organização espacial’ mundial vigente poderia ser impactada? Estaríamos diante de uma *desterritorialização* energética em escala global?

Estas questões remetem ao conceito de *território* que, para Raffestin (1993), se forma a partir do espaço e é

“(...) o resultado de uma ação conduzida por um ator sintagmático (ator que realiza um programa) em qualquer nível. Ao se apropriar de um espaço, concreta ou abstratamente [...] o ator ‘territorializa’ o espaço” (1993:143).

Souza (1995) questiona a noção de Raffestin (1993) do *território* como o “*substrato, o espaço social em si*” (SOUZA, 1995:97). Para aquele autor o *território* se define a partir de dois elementos: espaço e poder resultando em um “*campo de forças*”: um “*espaço definido e delimitado por e a partir de relações de poder*” (SOUZA, 1995:78).

Neste caso, *territorialização* seria interpretada como a concretização/materialização do *território*, ou seja, a sua manifestação, e estaria inserida no ciclo proposto por Raffestin (1987). O ciclo “*territorialização-desterritorialização-reterritorialização*” (T-D-R) descreveria as etapas da organização/reorganização espacial, por meio da construção do território, desconstrução deste, e construção de um novo território. O autor propôs ainda o ciclo da informação ou “*inovação-difusão-obsolescência*” (I-D-O) inscrito no ciclo T-D-R (Figura 28), convergindo, desta forma, um processo territorial a um informacional.

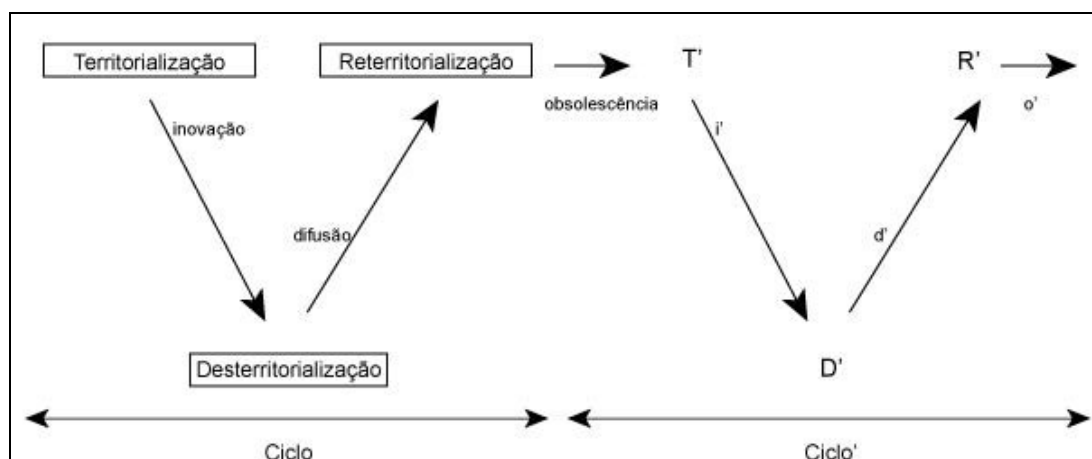


Figura 28 – Ciclos T-D-R e I-D-O (Modificado de Raffestin, 1987).

Sendo assim, seria razoável inferir que o início da produção comercial do metano do hidrato em países, até então, importadores de petróleo, poderia desencadear um novo ciclo energético, ou seja, um ciclo T-D-R/I-D-O?

Para Haesbaert (1995:181), o processo de desterritorialização pode ser não apenas simbólico – “com a destruição de símbolos, marcos históricos, identidades” – mas também “político e/ou econômico, pela destruição de antigos laços/fronteiras econômico-políticas de integração”.

Neste sentido, conforme já citado anteriormente, Flannery (2007:103) menciona as previsões de analistas de que o petróleo atingiria “preços cada vez mais elevados”, podendo haver períodos de escassez já em 2010, e sugere que “algo novo será necessário para impulsionar as economias do século XXI”, e que este ‘algo novo’ seria o gás natural.

Logo, poder-se-ia supor que a busca atual por fontes de energia mais eficientes e menos poluentes representaria uma transição entre o período de territorialização e de inovação, conforme proposto por Raffestin (1987). O surgimento de uma fonte de energia que venha a substituir o petróleo, por exemplo, causaria um grande impacto nas relações econômicas, ou a

*destruição de laços econômicos e políticos*, principalmente entre países exportadores e importadores.

Sendo bem sucedida, esta inovação daria início à produção comercial do combustível em questão, e desencadearia uma reorganização do espaço, ou seja, marcaria o início do período de *desterritorialização*.

Conforme o modelo de Raffestin, futuramente o “amadurecimento” destas tecnologias levaria a uma queda nos preços e a conseqüente *difusão* entre países com desenvolvimento tecnológico mais atrasado. A posterior *reterritorialização* seria a consolidação deste novo ciclo energético. Após um período de “estabilização”, este tenderia a tornar-se obsoleto, sendo superado por novas tecnologias e fontes de energia mais eficientes, dando início a um novo ciclo T-D-R (Figura 29).



Figura 29 – Exemplo de aplicação dos ciclos T-D-R e I-D-O.

## Considerações finais

As informações reunidas nesta pesquisa acerca da caracterização dos hidratos de metano, além de dados sobre programas de pesquisa, volume e localização das ocorrências, possível relação com alterações climáticas e, potencial como fonte de energia possibilitaram à autora concluir que:

- ✓ O aumento na demanda por combustíveis, atrelado à perspectiva de esgotamento das reservas de óleo, gás e carvão, tem levado à busca por fontes de energia alternativas. Além disso, a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa orientou esta busca para combustíveis mais eficientes e menos poluidores.
- ✓ O metano do hidrato representa uma interessante alternativa para países sem produção de hidrocarbonetos ou, nos quais a produção não supre a demanda interna.
- ✓ Pelo fato de grande parte dos programas de pesquisa focados nos hidratos de gás estar inserido em grandes convênios e parcerias internacionais e, possivelmente, por se tratar de informação estratégica, é difícil determinar com certeza o grau de desenvolvimento tecnológico de cada país.
- ✓ É possível afirmar que o Japão e a Índia, que mantêm os mais antigos programas de pesquisa sobre o HG (1995 e 1996, respectivamente), são

alguns dos mais avançados em termos de tecnologias voltadas para produção do metano do hidrato. O fato da Coréia do Sul, que iniciou suas pesquisas apenas em 2005, prever o início da produção comercial para 2015, pode ser um indício de que outros países podem começar a produzi-lo antes disso.

✓ Além de possuir uma queima mais limpa do que a dos combustíveis convencionais, a perspectiva de se realizar a substituição do  $\text{CH}_4$  aprisionado no hidrato por  $\text{CO}_2$  pode tornar o HG, não só uma possível fonte de energia, mas um mecanismo de redução de emissões de gases de efeito estufa. O risco de ocorrer grandes liberações do metano pela dissociação do hidrato, revertendo seu papel para um “intensificador” do efeito estufa é, possivelmente, um dos grandes desafios envolvidos na sua produção.

✓ A elaboração desta pesquisa possibilitou à autora evidenciar o hidrato de gás como um objeto de pesquisa, não apenas da Geologia ou Química, mas também da Geografia.

\*\*\*\*\*

Esta pesquisa não teve a pretensão de esgotar o tema proposto e sim dar um panorama das pesquisas na área. Com certeza, há ainda muitas vertentes a serem exploradas por outros pesquisadores como, por exemplo, o papel do metano do hidrato no ciclo do carbono. Um desdobramento da

discussão sobre a desterritorialização energética que instigou a autora seria o impacto que o suprimento de água desigual no mundo poderia ter influência no ciclo energético. Em 2000, Vorosmarty *et al*, publicaram resultados baseados em modelos matemáticos que indicaram quais populações do globo estariam vivendo sob stress hídrico o que levou os autores a concluir que os próximos 25 anos serão marcados por migrações em massa para as áreas do planeta “ricas em água”, entre as quais o Brasil estaria incluído. PORTO-GONÇALVES (2006) faz uma relação direta entre demanda de água e de energia, o que poderia levar a crer que a água poderia, também, vir a desencadear um novo ciclo T-D-R.

## Referências

ALLINGER, N. L.; CAVA, M. P.; JONGH, D. G.; LEBEL, N. A.; STEVENS. 1976. **Química orgânica**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 961 p.

ARCHER, D. 2007. **Methane hydrate stability and anthropogenic climate change**. *Biogeosciences*, 4:521-544.

ARCHER, D., BUFFETT, B. 2005. **Time-dependent response of the global ocean clathrate reservoir to climatic and anthropogenic forcing**. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, vol. 6, Q03002, doi:10.1029/2004GC000854.

AYRES NETO, A. 2002. **Uso da Sísmica de Reflexão de alta resolução e da Sonografia na Exploração Mineral Submarina**. *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 18:241-256.

BEGET, J. E., ADDISON, J. A. 2007. **Methane gas release from the Storegga submarine landslide linked to early-Holocene climate change: a speculative hypothesis**. *The Holocene*, 17:291.

BIL, K. J. 2003. **Economic Perspective of Methane from Hydrate In: Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost environments**. Kluwer Academic Publishers, London, Boston, Dordrecht, 414 p.

BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M. e GONÇALVES, J. H. (orgs). 2003. **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil**. Brasília: texto, mapas & SIG. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 692 p.

CLENNELL, M. B. 2000. **Hidrato de gás submarino: natureza, ocorrência e perspectivas para exploração na margem continental brasileira**. *Brazilian Journal of Geophysics*, vol. 18(3):397-410.

CHOUDHARY, T.V.; BANERJEE, S.; CHOUDHARY, V.R., **Catalysts for combustion of methane and lowers alkanes**. *Applied Catalysis A*, 234, 1-23, 2002. (doi:10.1016/S0926-860X(02)00231-4)

DALLIMORE, S. R., COLLETT, T. S., UCHIDA, T., WEBER, M., CHANDRA, A., MROZ, T. H., CADDEL, E. M., INOUE, T., TAKAHASHI, H., TAYLOR, A. E., and the Mallik Gas hydrate Research Team. 2004. **The Mallik gas hydrate field: Lessons learned from 30 years of gas hydrate investigation**. American Association of Petroleum Geologists Hedberg Research Conference. Sept. 12–16. Vancouver, B.C. Abstract.

De BIEVRE, P., GALLET, M., HOLDEN, N. E., BARNES, I. L. 1984. **Isotopic Abundances and Atomic Weights of the Elements**. *J. Physical and Chemical Reference Data* 13:809-891.

DESA, E. 2001. **Submarine methane hydrates-potential fuel resource of the 21st Century**. In: Proceedings of Andra Pradesh Akademi of Sciences, vol.5(2):101-114.

DE GARIDEL-THORON, T. BEAUFORT, L., BASSINOT, F., HENRY, P. 2004, **Evidence for large methane releases to the atmosphere from deep-sea gas-hydrate dissociation during the last glacial episode**. PNAS, 101:9187-9192.

DESIRAJU, G. R. 2001. **Chemistry Beyond the Molecule**. Nature, 412:397.

DICKENS, G. R. 2004. **Hydrocarbon-driven warming**. Nature 429:513-515.

DICKENS, G. R. 2003a. **A methane trigger for rapid warming**. Science, 299:1017.

DICKENS, G. R. 2003b. **Methane-driven oceanic eruptions and mass extinctions: comment and reply**. Geology, 31: e43.

DICKENS, G. R. 2003c. **Rethinking the global carbon cycle with a large, dynamic and microbially mediated gas hydrate capacitor**. Earth Planet. Science. Letters., 213(3-4):169-183.

ETIOPE, G., MILKOV, A. V., DERBYSHIRE, E. 2008. **Did geologic emissions of methane play any role in Quaternary climate change?** In: Global and Planetary Change. Elsevier. Series/Report n°.: 1-2 / 61.

FERREIRA, D. B. 2007. **Os Hidratos de Metano; fonte energética do futuro ou fonte de risco ambiental?** In: Finisterra, XLII, 83:79-90.

FIGUEIREDO Jr., A. G., NITTROUER, C. A., COSTA, E. A. 1996. **Gas-charged sediments in the Amazon submarine delta**. Geo-Marine Letters, 16:31-35.

FLANNERY, T. 2007. **Os Senhores do Clima**. Editora Record Ltda. Rio de Janeiro.

FLEISCHER, P., ORSI, T. H., RICHARDSON, M. D., ANDERSON, A. L. 2001. **Distribution of free gas in marine sediments: a global overview**. Geo-Marine Letters, 21:103-122.

FONTANA, R. L. 1989. **Evidências geofísicas da presença de hidratos de gás na Bacia de Pelotas – Brasil**. Primeiro Congresso Brasileiro de Geofísica. Rio de Janeiro/RJ, 1:234-248.

FONTANA, R. L., MUSSUMECI, A. 1994. **Hydrates Offshore Brazil**. International Conference on Natural Gas Hydrate, Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 175:106-113.

FOUCHER, J. P., NOUZÉ, H., HENRY, P. 2002. **Observation and tentative**



**interpretation of a double BSR on the Nankai slope.** Marine Geology, 187:161-175.

FREITAS, A. V. 1990. **Estudo da Formação de Hidratos de Gás.** Dissertação de Mestrado pela Universidade do Estado do Rio De Janeiro, Engenharia Química, 1 vol. 122 p.

HAESBAERT, R. Desterritorialização: entre as redes e os aglomerados de exclusão. In: **Geografia: Conceitos e Temas.** Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1995, 165-205.

HALBWACHS, M., SABROUX, J., GRANGEON, J., KAYSER, G., TOCHON-DANGUY, J., FELIX, A., BÉARD, J., VILLEVIEILLE, A., VITTER, G., RICHON, P., WÜEST, A., HELL, J. 004. Degassing the "Killer Lakes" Nyos and Monoun, Cameroon In: **Eos, Transactions,** American Geophysical Union, vol. 85, nº 30, 27 July.

HINRICHS K. U., HMELO L. R., SYLVA, S. P. 2003. **Molecular fossil record of elevated methane levels in late Pleistocene coastal waters,** Science, 299:1214-1217.

HOLBROOK, W. S., HOSKINS, H., WOOD, W. T., STEPHEN, R.A., LIZARRALDE, D. e LEG 164 Scientific Party. 1996. **Methane hydrate and free gas on the Blake Ridge from vertical seismic profiling.** Science, vol. 273:1840-1843.

HYNDMAN, R. D., DALLIMORE, S. R. 2001. **Natural Gas Hydrate Studies in Canada, CSEG (Canadian Society of Exploration Geophysicists) Recorder.** Maio, 11-20.

JAUHARI, P. 2001. **Methane hydrates in marine sediments - Untapped source of energy.** Journal of Indian Ocean Studies, vol. 9(1):111-119.

JOHNSON, A. H. 2008. **The Development Path for the Hydrate Natural Gas.** Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia, Canadá.

JONES, L., ATKINS, P. 2000. **Chemistry: Molecules, Matter, and Change.** 4th edition, New York: W. H. Freeman.

KATZ, D. L. 1971. Depths to Which Frozen Gas Fields (Gas Hydrates) May Be Expected. In: **Journal of Petroleum Technology,** vol. 23, nº 4:419-423.

KENNETT J. P., CANNARIATO K. G., HENDY I. L. & BEHL R. J. 2003. **Methane Hydrates in Quaternary Climate Change: The Clathrate Gun Hypothesis.** American Geophysical Union, Special Publication, 54.

KVAMME, B, GRAUE, A., KUZNETSOVA, T., BUANES, T., ERSLAND, G., 2007. **Storage of CO<sub>2</sub> in natural gas hydrate reservoirs and the effect of**

**hydrate as an extra sealing in cold aquifers.** International Journal of Greenhouse Gas Control, vol. 1/2:236-246.

KVENVOLDEN, K. A. 1999. **Potential effects of gas hydrate on human welfare**, Proceedings of the National Academy of Sciences. USA, 96:3420-3426.

KVENVOLDEN, K. A. 1993. **Gas hydrates: geological perspective and global change.** Reviews of Geophysics, 31:173-187.

LIU, C.-S., P. SCHNURLE, T.-H. HSIUAN, T. YANG, S. LIN, Y. WANG, and S.-H. CHUNG. 2004. **Gas hydrate distribution offshore southwestern Taiwan and its geophysical and geochemical characteristics.** AAPG Hedberg Gas Hydrate Conference, Sept. 12-16, Vancouver, B.C., Canada.

MARENGO, J. A. 2001. **Mudanças climáticas globais e regionais: avaliação do clima atual do Brasil e projeções de cenários climáticos do futuro.** Revista Brasileira De Meteorologia, vol.16, nº 1:1-18.

MARTINI, A. A. M. G., ANTUNES, A. M. S. 2003. **Análise da Cadeia Produtiva da Indústria Petrolífera Brasileira.** 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Rio de Janeiro, 56-66.

MATSUMOTO, R. 2000. **A prospect of gas hydrate science in sedimentology-Paradigm for understanding of the earth environments.** Journal of the Sedimentological Society of Japan. Japão, nº 58:45-56.

MAX, M. D. (org). 2003. **Natural Gas Hydrate in Oceanic and Permafrost environments.** Kluwer Academic Publishers, Londres, Dordrecht, 414 p.

MAX, M. D., JOHNSON, A. DILLON, W. P. 2006. **Economic Geology of Natural Gas Hydrate.** Springer, Berlim, Dordrecht, 341 p.

MIENERT, J., VANNESTE, M., BÜNZ, S., ANDREASSEN, K., HAFLIDASON, H, SEJRUP, H. P. 2005. **Ocean warming and gas hydrate stability on the mid-Norwegian margin at Storegga Slide.** Marine and Petroleum Geology, vol. 22:233-244.

MONTALVÃO, L. V., EIRAS, J. F. 2003. **Estudo Comparativo das Possibilidades de Aproveitamento de Gás de Hidratos no Brasil.** 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás, Rio de Janeiro.

MOORE, E. A., KURTZ, A. C. 2008. **Black carbon in Paleocene–Eocene boundary sediments: A test of biomass combustion as the PETM trigger.** Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 267:147-152

OTA, M., MOROHASHI, K., ABE, Y., WATANABE, M., SMITH, R. L., INOMATA, H. 2005. **Replacement of CH<sub>4</sub> in the hydrate by use of liquid CO<sub>2</sub>.** Energy Conversion and Management 46 (2005)1680-1691.

PAGANI, M., CALDEIRA, K., ARCHER, D., ZACHOS, J. C., 2006. **An ancient carbon mystery**. *Science*, 314:1556-1557.

PORTO-GONÇALVES, C. W. 2006. Água não se nega a ninguém. In: **Políticas Públicas Ambientais Latino-Americanas**, 1ª ed. Brasília: Flacso-Brasil-Editorial Abaré, v. 1:115-144.

POVOLERI, F. B. 2007. **Modelagem e Simulação da Formação de Hidratos de Metano: Um Estudo do Equilíbrio Termodinâmico Sólido-Líquido-Vapor**. Dissertação de Mestrado pela Universidade do Estado do Rio De Janeiro - Modelagem Computacional, 1 vol. 87 p.

RAFFESTIN, C. 1993. **Por uma Geografia do poder**. Tradução de Maria Cecília França. São Paulo, Ática.

RAFFESTIN, C. 1987. **Repères pour une théorie de la territorialité humaine**. *Cahier du Groupe Réseaux*, nº 07:263-279.

ROSA, A. P. 2007. **Interpretação Sismo-estratigráfica da Porção da Bacia de Pelotas que engloba o Cone do Rio Grande e a Avaliação do seu Potencial Petrolífero**. Tese de Doutorado pela Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - Engenharia de Reservatório e de Exploração, 1 vol. 283 p.

ROSA, M. L. C. C., AYUP-ZOUAIN, R. N., BARBOZA, E. G. 2006. **Utilização de Seções Sísmicas 2D na Identificação de Zonas de Escapes de Fluidos**. *Gravel* (periódico em CD, CECO/UFRGS) 4 (1):109-118.

RYSKIN, G. 2003, **Methane-driven oceanic eruptions and mass extinctions**. *Geology*, vol. 31:741–744.

SAD, E. A. R., SILVEIRA, D. P., MACHADO, M. A. P. 1997. **Hidratos de gás Marinhos: A Mega Ocorrência da Bacia de Pelotas/Brasil**. 5º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica vol.1.

SAD, E. A. R., SILVEIRA, D. P., SILVA, S. R. P., MACIEL, R. R., MACHADO, M. A. P. 1998. **Marine gas Hydrates along the Brazilian Margin** (AAPG International Conference & Exhibition. Rio de Janeiro, Brasil, 146-147.

SERVIO, P., EATON, M., MAHAJAN, D., WINTERS, W. 2005. **Fundamental Challenges to Methane Recovery from Gas Hydrates**. *Topics in Catalysis*. 32 (3-4):101-08.

SMITH, F. A., WING, S. L., FREEMAN, K. H. 2007. **How large was the “true” carbon isotope excursion at the PETM?** 23<sup>rd</sup> International Meeting on Organic Geochemistry (Torquay, England).

SOUZA, K. G., MARTINS, L. R. 2008. **Recursos Minerais Marinhos: Pesquisa, Lavra e Beneficiamento**. *Gravel*, Porto Alegre, vol. 6, nº 1:99-124.

SOUZA, J. M. L. O Território: sobre espaço e poder, autonomia e desenvolvimento. In: **Geografia - Conceitos e Temas**. Rio de Janeiro: Bertrand do Brasil, 1995, 77-116.

SUESS, E., BOHRMAN, G., GREINERT, J., LAUSCH, E. 1999. **Flammable Ice**. Scientific American, 281 (5):761-83,

SVENSEN, H., PLANKE, S., MALTHE-SØRENSEN, A., JAMTVEIT, B., MYKLEBUST, R., EIDEM, T., REY, S. S. 2004. **Release of methane from a volcanic basin as a mechanism for initial Eocene global warming**. Nature, 429:542-545.

TANAKA, M. D. 2003. **Reconhecimento das Ocorrências de Hidratos de Gás no Cone do Amazonas**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal Fluminense - Geologia e Geofísica Marinha, 1 vol. 100 p.

TANAKA, M. D., SILVA, C. G, CLENNELL, B. M. 2003. **Gas Hydrates on the Amazon Submarine Fan, Foz do Amazonas Basin, Brazil**. Proceedings of the American Association of Petroleum Geologists, Annual Meeting. Salt Lake City: AAPG. vol. 1:10-10.

VÖRÖSMARTY, C. J., GREEN, P., SALISBURY, J. LAMMERS, R. 2000a. **Global water resources: Vulnerability from climate change and population growth**. Science, 289:284-288.

WALSH, M.; HANCOCK, S. H.; WILSON, S.; PATIL, S.; MORIDIS, G.; BOSWELL, R.; COLLETT, T.; KOH, C. A.; SLOAN, E. D. 2008. **Preliminary Report on the Economics of Gas Production from Natural Gas Hydrates**. Proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates (ICGH 2008), Vancouver, British Columbia, Canadá.

WALSH, T., STOKES, P. PANDA, M., MORAHAN, T., GREET, D. 2007. **Characterization and Quantification of the Methane Hydrate Resource Potential Associated with the Barrow Gas Fields**. U.S. DOE-NETL Fire in the Ice Newsletter, Spring/Summer 2007.

WESTBROOK, G. K., CHAND, S., ROSSI, G., Long, C., BÜNZ, S., CAMERLENGHI, A., CARCIONE, J. M., DEAN, S., FOUCHER, J.- P, FLUEH, E., GEI, D., HAACKE, R. R., MADRUSSANI, G., MIENERT, J., MINSHULL, T. A., NOUZÉ, H., PEACOCK, S., RESTON, T. J., VANNESTE, M., ZILLMER, M. 2008. **Estimation of gas-hydrate concentration from multi-component seismic data at sites on the continental margins of NW Svalbard and the Storegga region of Norway**. Marine and Petroleum Geology, vol. 25:744-758.

WU, S., ZHANG, G., HUANG, Y., LIANG, J., WONG, H. K. 2005. **Gas hydrate occurrence on the continental slope of the northern South China Sea**. Marine and Petroleum Geol., 22(3):403-412.

ZACHOS, J., PAGANI, M., SLOAN, L., THOMAS, E., BILLUPS, K. 2001. **Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present**,

Science 292 (5517):686-693.

ZACHOS, J., WARREN, M. W., BOHATY, S., DELANEY, M. L., PETRIZZO, M. R., BRILL, A., BRALOWER, T. J., PREMOLI-SILVA, I. 2003. **A transient rise in tropical sea surface temperature during the Paleocene–Eocene Thermal Maximum.** Science 302 (5650):1551-1554.

ZHANG, Y. 2003. **Methane escape from gas hydrate systems in marine environment, and methane-driven oceanic eruptions.** Geophysical Research Letters, 30(7):51-1 a 51-4.

ZHANG, Y. 1996. **Dynamics of CO<sub>2</sub>-driven lake eruptions.** Nature, 379:57-59.

## **Sites Consultados**

Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) – Licitações de petróleo e gás.

Disponível em: [www.brasil-rounds.gov.br/](http://www.brasil-rounds.gov.br/)

Acesso em 12/03/2009

BP Canada Energy Company

Disponível em:

[www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=182&contentId=2000599](http://www.bp.com/sectiongenericarticle.do?categoryId=182&contentId=2000599)

Acesso em 14/01/2008.

Bureau of Land Management

Disponível em [www.blm.gov/wo/st/en.html](http://www.blm.gov/wo/st/en.html)

Acesso em 06/03/2008.

Burlington Resources Canada Energy Ltd.

Disponível em:

[www.conocophillips.com/about/who\\_we\\_are/history/burlington/index.htm](http://www.conocophillips.com/about/who_we_are/history/burlington/index.htm)

Acesso em 14/01/2008.

Center for Hydrate & Natural Gas Research (CHG)

Disponível em: [www.giec.ac.cn/giec/giec\\_english/division/hydrate/index.htm](http://www.giec.ac.cn/giec/giec_english/division/hydrate/index.htm)

Acesso em 10/03/2008.

Center for Marine Environmental Sciences – Alemanha

Disponível em: [www.marum.de/en/index.html](http://www.marum.de/en/index.html)

Acesso em: 08/03/2009.

Center of Hydrate Research

Disponível em: [www.mines.edu/research/chs/](http://www.mines.edu/research/chs/)

Acesso em 10/01/2008.

Central Geological Survey – Taiwan.

Disponível em: [www.moeacgs.gov.tw/english2/project/project\\_basic\\_01.jsp](http://www.moeacgs.gov.tw/english2/project/project_basic_01.jsp)

Acesso em 15/02/2009.

Centre for Gas Hydrate Research – Heriot Watt University – Escócia

Disponível em: [www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/index.htm](http://www.pet.hw.ac.uk/research/hydrate/index.htm)

Acesso em 21/02/2008.

Chevron Texaco Canada, Ltd.

Disponível em: [www.chevron.ca/](http://www.chevron.ca/)

Acesso em 14/01/2008.

China Mining – China successfully drills natural gas hydrate

Disponível em: [www.chinamining.org/News/2007-06-12/1181630358d5559.html](http://www.chinamining.org/News/2007-06-12/1181630358d5559.html)

Acesso em 16/04/2008

China News - S Korea discovers large gas hydrate deposits

Disponível em: [news.xinhuanet.com/english/2007-11/22/content\\_7129057.htm](http://news.xinhuanet.com/english/2007-11/22/content_7129057.htm)

Acesso em 10/03/2008.

Committee on Data for Science and Technology

Disponível em: [www.codata.org/about/who.html](http://www.codata.org/about/who.html)

Acesso em 06/03/2008.

Department of Oceanography

Disponível em: [www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/sassen.html](http://www-ocean.tamu.edu/Quarterdeck/QD5.3/sassen.html)

Acesso em 10/01/2008.

Der Spiegel - China and India Exploit Icy Energy Reserves

Disponível em: [www.spiegel.de/international/world/0,1518,523178,00.html](http://www.spiegel.de/international/world/0,1518,523178,00.html)

Acesso em 08/03/2008.

Directorate General of Hydrocarbons - Índia

Disponível em: [www.dghindia.org/site/dgh\\_gas\\_hydrates.aspx](http://www.dghindia.org/site/dgh_gas_hydrates.aspx)

Acesso em 07/03/2008.

Earth Sciences Sector (ESS) – Canadá

Disponível em: [ess.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://ess.nrcan.gc.ca/index_e.php)

Acesso em 14/01/2008.

Energy Information Administration (EIA). Disponível em:

[tonto.eia.doe.gov/country/index.cfm](http://tonto.eia.doe.gov/country/index.cfm).

Acesso em 10/01/2009.

Environmental Protection Agency – Estados Unidos

Disponível em: <http://epa.gov/methane/>

Acesso em: 24/04/2009.

European Environment Agency – Glossary definitions

Disponível em:

[www.eea.europa.eu/themes/water/wise-help-centre/glossary-definitions](http://www.eea.europa.eu/themes/water/wise-help-centre/glossary-definitions)

Acesso em 05/04/2009.

Freitas, A. M. V. Hidratos de Gás: problema e solução na indústria de energia.

Disponível em:

[www.redesergipe.se.gov.br/reserv/arquivos/Alexandre\\_Alexandre\\_Mussumeci\\_Valim\\_de\\_Freitas.pdf](http://www.redesergipe.se.gov.br/reserv/arquivos/Alexandre_Alexandre_Mussumeci_Valim_de_Freitas.pdf)

Acesso em: 13/02/2008.

G1. Começa a extração de petróleo na camada de pré-sal.

Disponível em: [g1.globo.com/jornaldaglobo/0,,MUL1106198-16021,00-](http://g1.globo.com/jornaldaglobo/0,,MUL1106198-16021,00-COMECA+A+EXTRACAO+DE+PETROLEO+NA+CAMADA+DE+PRESAL.)

[COMECA+A+EXTRACAO+DE+PETROLEO+NA+CAMADA+DE+PRESAL.](http://g1.globo.com/jornaldaglobo/0,,MUL1106198-16021,00-COMECA+A+EXTRACAO+DE+PETROLEO+NA+CAMADA+DE+PRESAL.)

Acesso em 01/05/2009.

Gas Authority of India Ltd. (GAIL)

Disponível em: [gail.nic.in/gailnewsite/index.html](http://gail.nic.in/gailnewsite/index.html)

Acesso em 14/01/2008.

Gas Hydrate R&D Organization – Coréia do Sul

Disponível em: [www.gashydrate.or.kr/english/e\\_main.htm](http://www.gashydrate.or.kr/english/e_main.htm)

Acesso em 10/03/2008.

GeoForschungs Zentrum – Alemanha

Disponível em: [www.gfz-potsdam.de/html/index-en.html](http://www.gfz-potsdam.de/html/index-en.html)

Acesso em 14/02/2008.

Geological Survey of Canada

Disponível em: [gsc.nrcan.gc.ca/index\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/index_e.php)

Acesso em 13/02/2008.

GEOMAR Research Center – Alemanha

Disponível em: [www.ifm-geomar.de/index.php?id=home&L=1](http://www.ifm-geomar.de/index.php?id=home&L=1)

Acesso em 18/02/2008.

Glossário Geológico Ilustrado da Universidade de Brasília (UnB)

Disponível em: [www.unb.br/ig/glossario/](http://www.unb.br/ig/glossario/)

Acesso em 15/09/2008.

Government Affairs Program – American Geological Institute

Disponível em: [www.agiweb.org/gap/legis106/ch4106.html](http://www.agiweb.org/gap/legis106/ch4106.html)

Acesso em 21/01/2008.

Guangzhou Institute of Energy Conversion

Disponível em: [www.giec.ac.cn/giec/giec\\_english/index.htm](http://www.giec.ac.cn/giec/giec_english/index.htm)

Acesso em 10/03/2008.

Hydratech – Techniques for the Quantification of Methane Hydrate in European Continental Margins – Reino Unido

Disponível em: [www.hydratech.bham.ac.uk/](http://www.hydratech.bham.ac.uk/)  
Acesso em: 13/02/2008.

Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer – França  
Disponível em: [www.ifremer.fr/francais/index.php](http://www.ifremer.fr/francais/index.php)  
Acesso em 28/02/2008.

Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) – Third Assessment Report  
– Climate Change 2001  
Disponível em: [www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-en.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/glossary/tar-ipcc-terms-en.pdf)  
Acesso em 28/11/2008.

International Continental Drilling Program (ICDP)  
Disponível em: [www.icdp-online.org/](http://www.icdp-online.org/)  
Acesso em 14/01/2008.

International Council for Science  
Disponível em [www.icsu.org/index.php](http://www.icsu.org/index.php).  
Acesso em 07/03/2008.

Japan Oil, Gas and Metals National Corporation (JOGMEC)  
Disponível em: [www.jogmec.go.jp/english/index.html](http://www.jogmec.go.jp/english/index.html)  
Acesso em 13/02/2008.

Japan Petroleum Exploration (JAPEX)  
Disponível em: [www.japex.co.jp/english/technology/methane.html](http://www.japex.co.jp/english/technology/methane.html)  
Acesso em 18/02/2008.

KVENVOLDEN, K. A., LORENSON, T. D. 2001. A global inventory of natural gas hydrate occurrence. USGS Special Maps.  
Disponível em: <http://walrus.wr.usgs.gov/globalhydrate/browse.pdf>.  
Acesso em: 22/08/2008.

Mallik 2002 – Geological Survey of Canada  
Disponível em: [gsc.nrcan.gc.ca/gashydrates/mallik2002/index\\_e.php](http://gsc.nrcan.gc.ca/gashydrates/mallik2002/index_e.php)  
Acesso em 14/02/2008.

Met Office Hadley Centre (2005): Climate change and the greenhouse effect.  
Disponível em:  
[www.metoffice.gov.uk/publications/brochures/2005/climate\\_greenhouse.pdf](http://www.metoffice.gov.uk/publications/brochures/2005/climate_greenhouse.pdf)  
Acesso em 03/03/2009.

Methane Hydrate R&D Program (DOE)  
Disponível em: <http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/Hydrates/pdf/MHBibliography.pdf>  
Acesso em 05/03/2008

Methane Hydrate Research and Development. Act of 2000 (Public Law 106-193)  
Disponível em: [www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/hydrates/pl106-193.pdf](http://www.fossil.energy.gov/programs/oilgas/hydrates/pl106-193.pdf)



Acesso em 14/02/2008.

Methane Hydrate Research Laboratory (MHL)  
Disponível em: [unit.aist.go.jp/mhlabo/index-e.htm](http://unit.aist.go.jp/mhlabo/index-e.htm)  
Acesso em 13/02/2008.

Minerals Management Service – Department of Interior  
Disponível em: [www.mms.gov/](http://www.mms.gov/)  
Acesso em 06/03/2008.

Ministério de Minas e Energia (MME)  
Disponível em: [www.conpet.gov.br/quioto/glossario.php](http://www.conpet.gov.br/quioto/glossario.php).  
Acesso em 08/03/2009.

National Energy Technology Laboratory (NETL)  
Disponível em:  
[www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/maincontent.htm](http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/FutureSupply/MethaneHydrates/maincontent.htm)  
Acesso em 10/01/2008.

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)  
Disponível em: [www.aist.go.jp/index\\_en.html](http://www.aist.go.jp/index_en.html)  
Acesso em 13/02/2008.

National Institute of Oceanography  
Disponível em: [www.nio.org/jsp/indexNew.jsp](http://www.nio.org/jsp/indexNew.jsp)  
Acesso em 06/03/2008.

National Oceanic Atmospheric Administration – Department of Commerce  
Disponível em: [www.noaa.gov/](http://www.noaa.gov/)  
Acesso em 06/03/2008.

National Science Foundation  
Disponível em: [www.nsf.gov/](http://www.nsf.gov/)  
Acesso em 06/03/2008.

Natural Resources Canada (NRCan)  
Disponível em: [www.nrcan.gc.ca/com/index-eng.php](http://www.nrcan.gc.ca/com/index-eng.php)  
Acesso em 14/01/2008.

Naval Research Laboratory – Department of Defense  
Disponível em: [www.nrl.navy.mil/](http://www.nrl.navy.mil/)  
Acesso em: 06/03/2008.

Ocean floor methane gas hydrate exploration – National Research Laboratory  
Disponível em: [www.nrl.navy.mil/content.php?P=02REVIEW112](http://www.nrl.navy.mil/content.php?P=02REVIEW112)  
Acesso em: 15/09/2008

Ocean Margin Deep-Water Research Consortium  
Disponível em: [www.ig.uit.no/omarc/index.htm](http://www.ig.uit.no/omarc/index.htm)

Acesso em 17/03/2008.

Ocean Drilling Program (ODP)  
Disponível em: [www-odp.tamu.edu/](http://www-odp.tamu.edu/)  
Acesso em 17/03/2008.

Office of Fossil Energy – Department of Energy  
Disponível em: [www.fossil.energy.gov/index.html](http://www.fossil.energy.gov/index.html)  
Acesso em 06/03/2008.

Oil and Natural Gas Company Ltd. (ONGC).  
Disponível em: [www.ongc.net/](http://www.ongc.net/)  
Acesso em 14/01/2008.

Open Learn Website.  
Disponível em: [openlearn.open.ac.uk/](http://openlearn.open.ac.uk/)  
Acesso em 1/10/2008.

PETROBRAS, 2007. Relatório Anual 2007.  
Disponível em:  
[www2.petrobras.com.br/ri/port/ConhecaPetrobras/RelatorioAnual/pdf/RelatorioAnual\\_2007.pdf](http://www2.petrobras.com.br/ri/port/ConhecaPetrobras/RelatorioAnual/pdf/RelatorioAnual_2007.pdf).  
Acesso em: 20/01/2009.

ROSA, R. N. 2006. Os combustíveis fósseis: o problema do Peak Oil Gazeta de Física.  
Disponível em: [nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/29\\_1-2/vol29\\_1\\_2\\_Art03.pdf](http://nautilus.fis.uc.pt/gazeta/revistas/29_1-2/vol29_1_2_Art03.pdf).  
Acesso em: 15/05/2008.

Steacie Institute for Molecular Sciences - National Research Council Canada  
Disponível em: [steacie.nrc-cnrc.gc.ca/overview/newsroom/spring2004\\_e.html](http://steacie.nrc-cnrc.gc.ca/overview/newsroom/spring2004_e.html).  
Acesso em 06/05/2008.

Techniques for the quantification of Methane Hydrate in European Continental Margins – Hydratech  
Disponível em: [www.hydratech.bham.ac.uk/index.htm](http://www.hydratech.bham.ac.uk/index.htm).  
Acesso em 14/03/2008.

The Gas Hydrate Information System.  
Disponível em: [www.gashydrate.csdb.cn/gasen/](http://www.gashydrate.csdb.cn/gasen/).  
Acesso em 25/02/2008.

United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)  
Disponível em: [unfccc.int/2860.php](http://unfccc.int/2860.php)  
Acesso em 20/02/2009.

United States Department of Energy (DOE)  
Disponível em: [home.doe.gov](http://home.doe.gov)  
Acesso em 14/01/2008.

United States Geological Survey (USGS) - Department of Interior  
Disponível em: [www.usgs.gov/](http://www.usgs.gov/)  
Acesso em 14/01/2008.

Woods Hole Oceanographic Institute  
Disponível em: [www.whoi.edu/](http://www.whoi.edu/)  
Acesso em 03/11/2008.