

# Correlações entre a Capacidade de Estocagem Geológica e Criogênica de Gás Natural e as Características das Indústrias de Gás no Mundo.

## Correlations Between Geological and Cryogenic Natural Gas Storage Capacity and the Characteristics of the Gas Industry in the World.

Mario Jorge Figueira Confort

Escola de Química

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ

*mariojfc@anp.gov.br*

Cheila Gonçalves Mothé

Escola de Química

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ

*cheila@eq.ufrj.br*

**Resumo:** A estocagem de gás natural, em estruturas geológicas ou em tanques criogênicos de terminais de liquefação ou de regaseificação de gás natural liquefeito (GNL), é muito relevante em diversos países onde o gás possui importante papel em suas economias. Para países que ainda não possuem armazenagens, como o Brasil, é fundamental observar a já vasta experiência internacional nessa área, de forma a planejar o desenvolvimento de seus setores de gás. Assim, este trabalho teve como objetivo identificar por meio de regressões lineares as correlações existentes entre a capacidade de estocagem de gás dos países que contam com essa tecnologia e algumas características dos seus setores de gás, tais como volumes de reservas, produção e consumo, dentre outros. Como resultado, identificou-se, para os armazenamentos criogênicos, maior correlação com o nível de reservas provadas em terminais de liquefação de gás natural e maior correlação com os volumes de importação em terminais de regaseificação. Já, para as estocagens geológicas, foram observadas correlações muito altas com o nível de consumo e o grau de desenvolvimento da infraestrutura. Por fim, verificou-se que

Recebido em 29/07/2013 - Aceito em 28/03/2014.

RECEN 15(2) p. 213-237 jul/dez 2013 DOI: 10.5935/RECEN.2013.02.04

há pouca correlação entre capacidade de armazenamento e existência de excesso de gás.

**Palavras-chave:** estocagem criogênica; estocagem geológica ou subterrânea; gás natural; gás natural liquefeito (GNL); regressão linear.

**Abstract:** Natural gas storage in geological structures or in cryogenic tanks of liquefaction or liquefied natural gas (LNG) regasification terminals is very relevant in several countries where gas plays an important role in their economies. For countries without storage facilities like Brazil, it is decisive observing the vast international experience in this area in order to plan the development of their natural gas sectors. Hence, the objective of this work was to identify, through linear regressions, the existing correlations between the gas storage capacity of countries with storage facilities and some of their gas sector's characteristics, like volumes of reserves, production and consumption, among others. The results indicated, for cryogenic storage of LNG, higher correlation with volumes of proved reserves for liquefaction terminals, and higher correlation with volumes of imported gas for regasification terminals. For geological storage capacity, very strong correlations were identified with natural gas consumption and with the stage of development of the gas infrastructure. It was also verified weak correlation between storage capacity and the existence of natural gas in excess within the country.

**Key words:** cryogenic storage; geological or underground storage; linear regression; liquefied natural gas (LNG); natural gas.

## 1 Introdução

O armazenamento tem papel importante nos mais diversos setores da economia, possibilitando o equilíbrio eficiente entre a oferta e a demanda de uma série de produtos. Em algumas indústrias, tal atividade é significativamente mais complexa e custosa e praticamente obriga o consumo concomitante à produção. São exemplos típicos a eletricidade e o gás natural, sendo que o armazenamento da primeira em grandes volu-

mes não conta ainda com uma tecnologia economicamente viável. Apesar de guardar semelhanças com o setor elétrico no que diz respeito à interdependência dos seus sistemas de movimentação, o setor de gás natural já conta com tecnologias viáveis para o armazenamento de grandes volumes. Tais tecnologias, apesar de antigas na América do Norte e na Europa, por exemplo, ainda não são empregadas em diversos países, dentre eles o Brasil.

Figuram-se como técnicas viáveis ao armazenamento de grandes volumes a estocagem de gás em estruturas geológicas naturais ou artificiais e seu acondicionamento a baixíssimas temperaturas ( $-162^{\circ}\text{C}$  à pressão atmosférica), em tanques especialmente projetados para tal. O armazenamento geológico permite o confinamento de enormes quantidades de gás, da ordem de bilhões de  $\text{m}^3$ , possibilitando fornecimento contínuo por meses, mesmo em caso de interrupção total do abastecimento. O armazenamento criogênico em tanques especiais, embora encerre volumes menores (não negligenciáveis), possui uma enorme flexibilidade em termos de localização. Os equipamentos para movimentação e armazenamento de gás natural em sua forma criogênica – o gás natural liquefeito (GNL) – fazem parte da logística do comércio internacional e intercontinental de gás natural, o qual, na forma de GNL, é transportado em navios denominados metaneiros, dos países supridores para os países consumidores. O transporte de GNL e o transporte de gás natural por meio dutoviário são as principais alternativas para a movimentação de gás por longas distâncias. O armazenamento criogênico em terminais de GNL, existente há décadas em uma série de países, assim como a estocagem geológica, também não está estabelecido ainda no Brasil, que conta apenas com pequenos volumes liquefeitos mantidos em plantas terrestres de distribuição<sup>1</sup>. Embora o país conte com dois terminais de GNL, um na Baía de Guanabara (RJ) e o outro no Porto do Pecém (CE), além de um terceiro em fase final de implantação na Baía de Todos os Santos (BA), nenhum deles conta com armazenamento em tanques criogênicos<sup>2</sup> [1-3].

---

<sup>1</sup>No Brasil, existem dois pequenos armazenamentos de GNL em Paulínia (SP), de  $4500 \text{ m}^3$  e um em Belo Horizonte (MG) de  $5 \text{ m}^3$  [1,10].

<sup>2</sup>Os terminais brasileiros de GNL constituem-se, basicamente, em píeres nos quais navios metaneiros e regaseificadores atracam e enviam gás natural trazido de países exportadores à malha brasileira de gasodutos. O armazenamento ocorre nos próprios navios, modalidade que não será considerada como estocagem para fins de análise no presente trabalho, tendo em vista que navios, diferentemente dos

A estocagem geológica ou subterrânea (Figura 1) é realizada, quase na sua totalidade, em campos depletados de petróleo ou gás natural, em aquíferos, modalidades estas consideradas como reservatórios porosos, e em cavernas ou cavidades salinas. Cada uma delas possui características físicas (porosidade, permeabilidade, capacidade de retenção) e econômicas (custos de preparação do sítio, taxas de entrega/retirada, número de ciclos) próprias que determinarão sua sustentabilidade em cada aplicação específica. O armazenamento em reservatórios porosos, capazes de manter grandes volumes, é mais adequado ao atendimento da demanda sazonal, especialmente em países onde o consumo é significativamente maior no inverno. Esses significativos volumes também são considerados estratégicos, sendo utilizados em casos de interrupção do abastecimento por razões técnicas, políticas ou econômicas. Já as cavidades salinas (Figura 1), estruturas semelhantes a vasos de pressão, são comumente empregadas para atendimento a demandas de pico devido a suas altas taxas de entrega [3-5].

Já o armazenamento de GNL (Figura 2) pode ser realizado em terminais de liquefação de gás natural e em terminais de regaseificação de GNL, além de instalações denominadas *peak-shaving* e satélites. Os terminais de liquefação servem para tornar líquido o gás natural das regiões produtoras, preparando-o para o transporte em navios metaneiros, enquanto que os terminais de regaseificação retornam o GNL para o estado gasoso nas regiões consumidoras. As plantas denominadas *peak-shaving* armazenam GNL para atendimento a demandas de pico e as plantas denominadas ‘satélites’ servem como entreposto para o GNL ser conduzido a regiões mais distantes, geralmente por via rodoviária. Os tanques de maior capacidade se encontram, principalmente, nos terminais de liquefação e nos terminais de regaseificação, razão pela qual não serão levadas em conta no presente trabalho, as capacidades das plantas denominadas *peak-shaving* e satélites, cujas instalações são geralmente muito pulverizadas e suas características são pouco disponibilizadas na literatura [6].

Tendo em vista as funções diversas do armazenamento, seja criogênico ou subterrâneo (geológico), é interessante avaliar quais os fatores ou características do setor de gás, tais como volumes de reservas provadas, produção e consumo anual, dentre outros, mais contribuiriam ou tiveram correlação mais importante com o desenvolvi-

---

tanques, não são dedicados exclusivamente para fins de armazenamento.

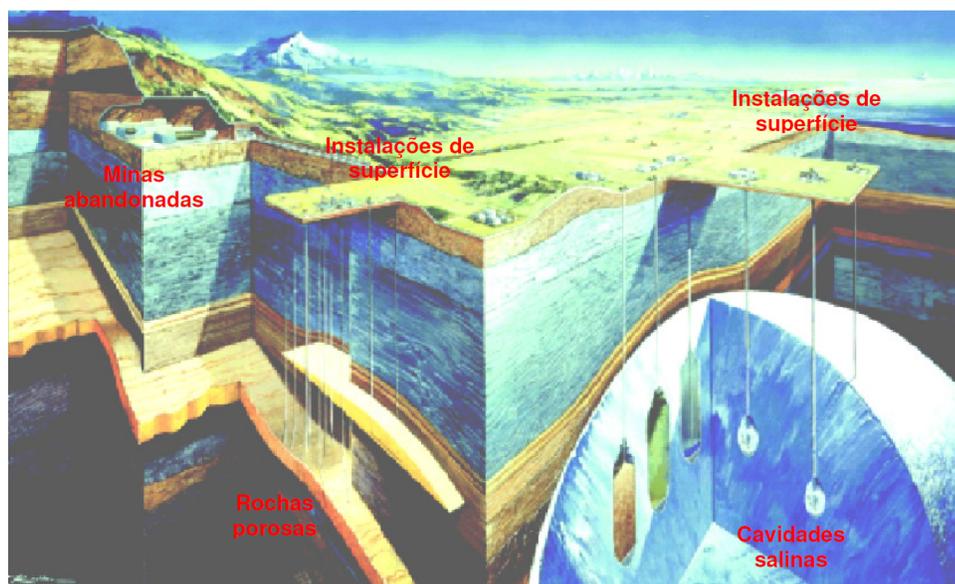


Figura 1. Esquema das modalidades de estocagem geológica evidenciando suas grandes dimensões em relação às instalações de superfície (8,2cm x 13,5cm) [3], adaptado de [7].



Figura 2. Tanques de armazenagem criogênica de gás (GNL) em Sagunto, Espanha, de aproximadamente 55 m de altura e 74 m de diâmetro cada (4,6cm x 10,9cm) [8].

mento dessa técnica nas nações que a empregam.

Essa análise é de grande importância para países ou nações que ainda não contam com armazenagens e que passam ou podem vir a passar por mudanças significativas em suas indústrias gasíferas, caso do Brasil. Nas duas últimas décadas, o consumo e a produção nacionais de gás natural cresceram, respectivamente, 11% e 8,4% ao ano. Além disso, desde 1998, a infraestrutura de transporte de gás natural cresceu de 4600 km para 11700 km, uma taxa de 7% ao ano, enquanto que o Produto Interno Bruto (PIB) do país, no mesmo período, apresentou crescimento anual médio de 3%. Por fim, as reservas brasileiras de gás natural cresceram de 181 bilhões de m<sup>3</sup>, em 1991, para 459 bilhões de m<sup>3</sup>, em 2012 [9-11]. Estudos recentes sugerem que as reservas brasileiras têm potencial para crescer ainda mais intensamente. De acordo com a U.S. *Energy Information Administration* – EIA, o pré-sal pode aumentar as reservas de gás natural em 50%. Um outro estudo da EIA, que inclui o gás não-convencional, em especial o gás de folhelho (*shale gas*), estima que as reservas brasileiras podem chegar a 6400 bilhões de m<sup>3</sup> [12,13].

Além dos citados cenários, diversos outros podem vir a ocorrer no país, a depender dos sucessos exploratórios e da intensificação ou não do consumo de gás natural. Assim sendo, é interessante observar a experiência internacional no setor de estocagem para avaliar quais cenários mais prescindiriam da técnica. Este estudo pode, portanto, vir a ser útil para avaliar em qual grau seria importante a estocagem no Brasil se, por exemplo, as reservas de gás natural crescessem rapidamente ao mesmo tempo em que o consumo nacional sofresse acentuada desaceleração.

Portanto, o objetivo principal do presente trabalho, além do incremento do conhecimento no país acerca do armazenamento de gás, será o de avaliar, por meio de correlações lineares, os fatores que mais influenciaram e influenciam a atividade de estocagem.

## 2 Desenvolvimento

Primeiramente, foram reunidos dados relativos às capacidades de armazenamento de gás natural de países onde há instalações para este fim, segregadas em: (i) capacidade de armazenamento criogênico de gás natural (bilhões de m<sup>3</sup>) em terminais de

liquefação no ano de 2010, de acordo com GIIGNL (2010) [14]; (ii) capacidade de armazenamento criogênico de gás natural (bilhões de  $m^3$ ) em terminais de regaseificação no ano de 2010, também segundo com GIIGNL (2010) [14]; e (iii) capacidade de armazenamento de gás natural (bilhões de  $m^3$ ) em sítios de estocagem geológica no ano de 2011, de acordo com CEDIGAZ (2012) [15].

No caso das estocagens criogênicas – ou de GNL – em terminais de liquefação ou de regaseificação, as capacidades de armazenamento reportadas se referem à soma de todos os tanques existentes em todos os terminais de liquefação ou regaseificação instalados em um determinado país. Para fins de comparação em uma mesma base volumétrica com as estocagens geológicas, as capacidades criogênicas registradas em GIIGNL (2010) [14] como capacidade da tancagem armazenadora de GNL foram multiplicadas por um fator de escala 600, correspondente, segundo ANP (2010) [1], à razão aproximada entre os volumes do gás natural em seu estado gasoso e em seu estado liquefeito (ou GNL).

Para as estocagens subterrâneas ou geológicas, as capacidades de armazenagem existentes na literatura se referem às capacidades de armazenamento útil de todos os sítios de estocagem presentes em um determinado país [15]. A capacidade de gás útil, também denominada simplesmente de “gás útil” ou “gás de trabalho” (*working gas*) corresponde ao volume de gás em uma estocagem geológica que, efetivamente, pode ser movimentado. O restante do gás armazenado, cuja principal função é fornecer a pressão necessária às taxas de entrega desejadas por um determinado mercado, é o “gás de base” ou “gás de colchão” (*cushion gas*). O volume de *cushion gas* somado ao volume de *working gas* corresponde à “capacidade total” de um sítio de armazenamento geológico [3-5].

Em seguida, para cada um dos países onde existem instalações de armazenamento criogênico ou geológico, foram reunidos dados relativos às seguintes características de suas indústrias nacionais de gás natural, predominantemente nos anos de 2010 e 2011 [9,16]: de BP (2012) [9], foram obtidas (i) reservas provadas de gás natural, (ii) produção anual de gás natural, (iii) consumo anual de gás natural, (iii) volume anual de importações de gás natural e (iv) volume anual de exportações de gás natural, todos em bilhões de  $m^3$ . De CIA (2010) [16], foram obtidos dados relativos à (v) infraestrutura

de movimentação de gás natural, em km de gasodutos existentes.

A partir dos dados reunidos, foram avaliadas as relações entre os pares de variáveis elencados na tabela 1, a partir de regressões lineares, obtendo-se o valor dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada uma dessas correlações.

Após a obtenção dos coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para cada uma das relações indicadas na tabela 1 (L.1 a L.6, R.1 a R.6 e G.1 a G.6), as correlações foram classificadas como “muito baixa”, “baixa”, “média”, “alta” e “muito alta”, segundo, respectivamente, os seguintes intervalos:  $0,0 \leq R^2 < 0,20$ ,  $0,20 \leq R^2 < 0,40$ ,  $0,40 \leq R^2 < 0,60$ ,  $0,60 \leq R^2 < 0,80$  e  $0,80 \leq R^2 < 1,00$  [20].

As seguintes considerações foram levadas em conta para a coleta dos dados relativos às estocagens, reservas, produção, consumo, exportações, importações e infraestrutura, segundo a disponibilidade de dados na literatura:

- i. Embora a maior parte dos dados coletados para reservas, produção, consumo, exportação e importação se refiram ao ano de 2011, houve países cujos dados disponíveis estavam atualizados apenas até 2009 ou 2010. No entanto, considerou-se que tais variações não comprometem a análise em tela, uma vez que os projetos de estocagem, sejam de GNL ou geológica, levam um período relativamente longo (entre 5 e 7 anos) para se concretizarem. A dinâmica de desenvolvimento do setor de estocagem permite, portanto, que dados de anos próximos sejam utilizados sem prejuízo dos resultados obtidos [1, 2];
- ii. Para os terminais de liquefação (regressões L.1 a L.6), os dados coletados para os Estados Unidos da América (EUA) e a Rússia levaram em conta a característica regional do setor de gás natural no mundo [21]. Diferentemente do petróleo, o gás natural ainda não pode ser considerado uma *commodity* global, sendo seus preços formados a partir de trocas comerciais entre países de determinadas regiões, tais como o Pacífico, a Europa e a América. Assim sendo, no caso dos EUA e da Rússia, onde os terminais de liquefação desses países se localizam, respectivamente, no Alaska (cidade de Kenai) e na Ilha Sakhalina (ao norte do Japão), envolvidos, portanto, no comércio de gás natural do Oceano Pacífico, foram considerados os dados de reservas e produção, consumo, dentre outros,

Tabela 1. Terminais de Liquefação de Gás Natural (L.1 a L.6), Terminais de Regaseificação de GNL (R.1 a R.6) e Estocagens Geológicas (G.1 a G.6): Relações analisadas por regressão linear.

Regressão	Variáveis envolvidas na Regressão Linear
L.1	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Reservas Provadas de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2010*
L.2	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Produção de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2010*
L.3	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Consumo de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2010*
L.4	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Exportações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2010*
L.5	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Importações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2010*
L.6	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Infraestrutura de movimentação de Gás Natural (km de gasodutos) em 2010**
R.1	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Reservas Provadas de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
R.2	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Produção de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
R.3	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Consumo de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
R.4	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Exportações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
R.5	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Importações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
R.6	Capacidade de tancagem em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Infraestrutura de movimentação de Gás Natural (km de gasodutos) em 2010**
G.1	Capacidade de estocagem de gás natural em 2011 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Reservas Provadas de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
G.2	Capacidade de estocagem de gás natural em 2011 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Produção de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
G.3	Capacidade de estocagem de gás natural em 2011 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Consumo de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
G.4	Capacidade de estocagem de gás natural em 2011 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Exportações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
G.5	Capacidade de estocagem de gás natural em 2011 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Importações de Gás Natural (bilhões de m <sup>3</sup> ) em 2011**
G.6	Capacidade de estocagem de gás natural em 2010 (bilhões de m <sup>3</sup> ) vs. Infraestrutura de movimentação de Gás Natural (km de gasodutos) em 2010**

\* Dados são, em maioria, de 2010, havendo países com dados de 2009 [9, 16-19].

\*\* Dados relativos às características da indústria de gás natural são, em sua maioria, de 2010 e 2011, havendo países cujas informações são de 2009 [9, 16 - 19].

apenas dessas regiões para fins de correlação. No caso dos terminais de regaseificação (regressões R.1 a R.6) e das estocagens geológicas (regressões G.1 a G.6), essa aproximação não se aplica porque tais instalações estão mais distribuídas nos territórios dessas nações;

- iii. Para os dados relativos à infraestrutura obtidos em [16], não foram consideradas as redes de gasodutos de distribuição;
- iv. Todos os dados relativos a estocagens geológicas apenas se referem ao armazenamento de gás natural, não incluindo a estocagem de outros combustíveis fósseis, produtos ou rejeitos, tais como petróleo, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ou gás carbônico (CO<sub>2</sub>);
- v. O armazenamento de gás em gasodutos por aumento de pressão, também denominado empacotamento ou *packing*, não faz parte da análise deste trabalho.

Após a obtenção de todos os R<sup>2</sup>, foram realizadas, também, correlações entre os volumes totais de armazenamento de todos os países – volumes estes correspondentes aos volumes somados de todos os seus terminais de liquefação, de regaseificação e sítios de estocagem geológica – e os aspectos de suas indústrias de gás (reservas, produção, consumo, exportação, importação e infraestrutura, sendo tais correlações identificadas respectivamente por T.1, T.2, T.3, T.4, T.5 e T.6). Para o cálculo da capacidade total<sup>3</sup>, desprezou-se a diferença entre o ano de referência dos dados das capacidades dos terminais de GNL de regaseificação ou liquefação (2010) e o ano de referência dos sítios de estocagem geológica (2011), tendo em vista a já mencionada dinâmica de desenvolvimento do setor de armazenagem.

Os dados reunidos relativos às capacidades de estocagem em terminais de liquefação, terminais de regaseificação e sítios de estocagem geológica (cavernas salinas, aquíferos e campos depletados de óleo ou gás) existentes em um total de 60 países, segundo [14,15,22], encontram-se listados no Anexo 1, dispostos em ordem decrescente de capacidade total de estocagem.

---

<sup>3</sup>O termo “capacidade total” de estocagem de gás é definido, para fins deste trabalho, como a soma da capacidade de armazenamento geológica e a capacidade de armazenamento criogênico de cada país. Não deve este termo ser confundido com a já citada “capacidade total” de estocagens geológicas, definida como a soma entre a capacidade de “gás útil” e de “gás de base” de cada sítio.

### 3 Resultados

Os resultados obtidos para os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) estão elencados na tabela 2 para os terminais de liquefação (L.1 a L.6) e regaseificação (R.1 a R.6), enquanto que a tabela 3 elenca os valores de  $R^2$  para as correlações envolvendo as capacidades de gás útil em estocagens geológicas (G1 a G.6) e as capacidades totais (T.1 a T.6).

*Tabela 2.  $R^2$  de correlações lineares entre as capacidades de estocagem de terminais de liquefação/regaseificação e os aspectos das indústrias de gás natural.*

	$R^2$	Intensidade	$R^2$	Intensidade
Reservas	L.1 0,6863	Alta	R.1 0,0089	Muito baixa
Produção	L.2 0,3840	Baixa	R.2 0,0167	Muito baixa
Consumo	L.3 0,1022	Muito baixa	R.3 0,0741	Muito baixa
Exportação	L.4 0,4247	Média	R.4 0,0007	Muito baixa
Importação	L.5 0,0210	Muito baixa	R.5 0,5295	Média
Infraestrutura	L.6 0,0232	Muito baixa	R.6 0,0247	Muito baixa

*Tabela 3.  $R^2$  de correlações lineares entre as capacidades de estocagem geológica/estocagem total e os aspectos das indústrias de gás natural.*

	$R^2$	Intensidade	$R^2$	Intensidade
Reservas	G.1 0,3099	Baixa	T.1 0,3153	Baixa
Produção	G.2 0,8317	Muito alta	T.2 0,7686	Alta
Consumo	G.3 0,9129	Muito alta	T.3 0,9110	Muito alta
Exportação	G.4 0,2851	Baixa	T.4 0,1679	Muito baixa
Importação	G.5 0,2826	Baixa	T.5 0,3395	Baixa
Infraestrutura	G.6 0,9123	Muito alta	T.6 0,9124	Muito alta

As figuras 3 a 8 apresentam os gráficos das regressões lineares com os valores de  $R^2$  mais altos, com indicação de alguns países importantes no cenário mundial do armazenamento criogênico ou geológico.

A partir dos resultados expostos nas tabelas 3 e 4 e nas figuras 3 a 8, verificou-se, no caso dos terminais de liquefação (regressões L.1 a L.6), que os volumes de reservas provadas ( $R^2=0,6863$ ), seguidos pelos volumes de exportação ( $R^2=0,4247$ ), apresentaram correlações com a capacidade de armazenagem de GNL maiores que as demais

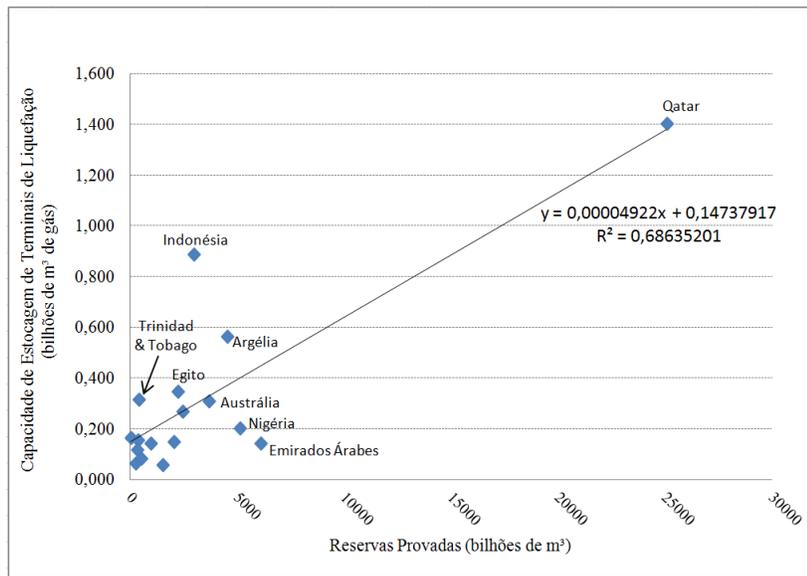


Figura 3. Regressão L.1: Relação linear entre a capacidade de estocagem dos terminais de liquefação de gás dos países (y) e suas reservas provadas (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

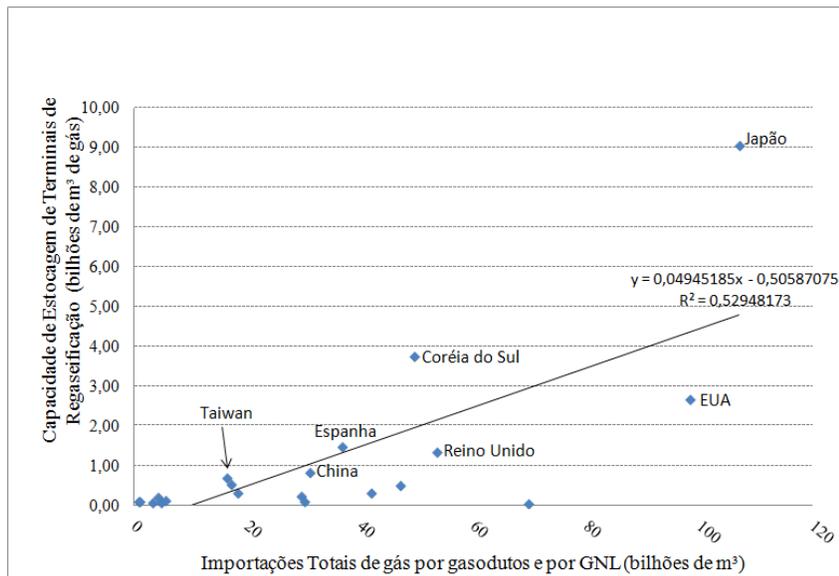


Figura 4. Regressão R.5: Relação linear entre a capacidade de estocagem dos terminais de regaseificação de GNL dos países (y) e seus respectivos volumes de importação de gás por gasodutos e por GNL (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

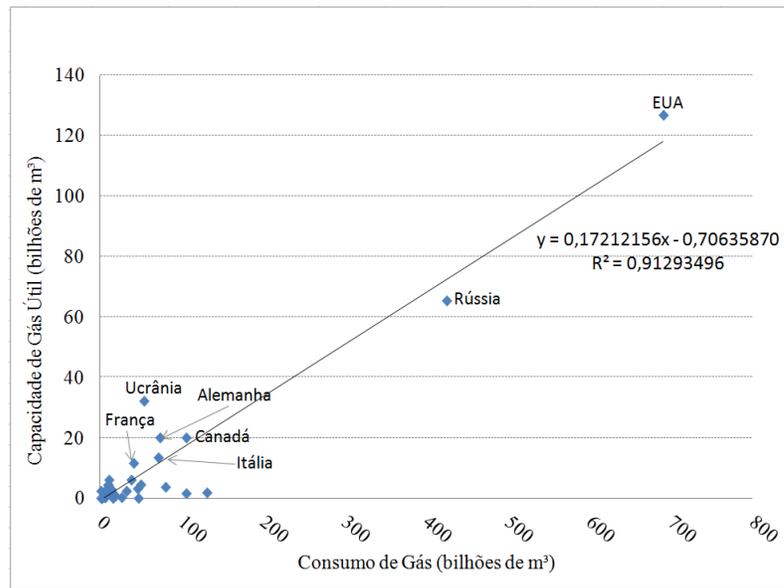


Figura 5. Regressão G.3: Relação linear entre a capacidade útil de estocagem geológica dos países (y) e seus respectivos volumes de consumo de gás (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

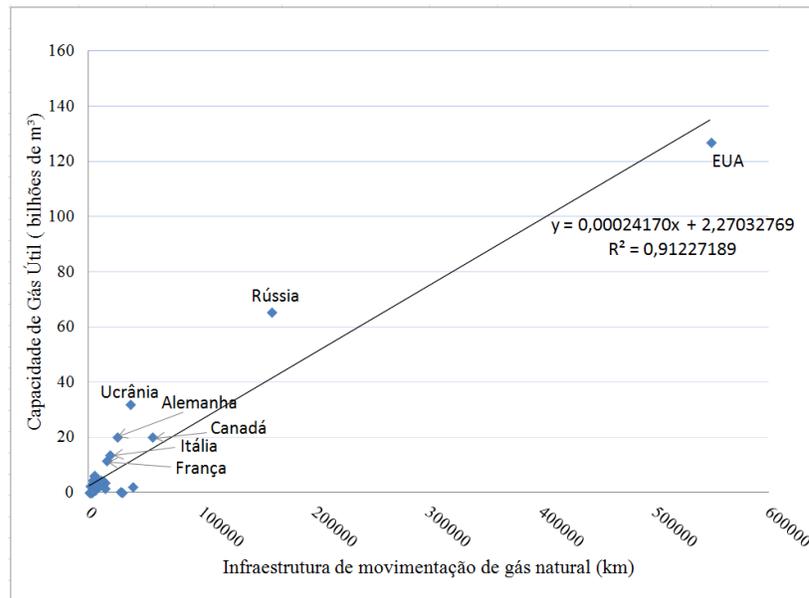


Figura 6. Regressão G.6: Relação linear entre a capacidade útil de estocagem geológica dos países (y) e suas respectivas infraestruturas de gasodutos (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

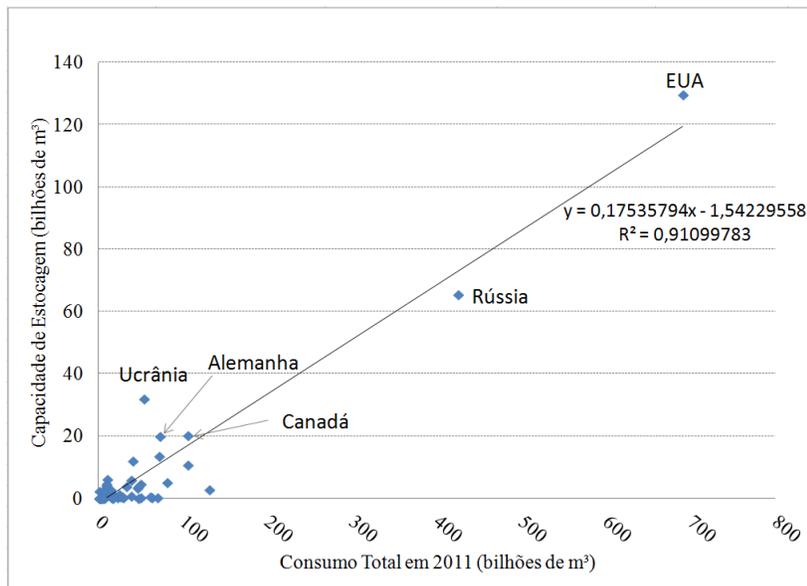


Figura 7. Regressão T.3: Relação linear entre a capacidade de estocagem total (geológica e criogênica) de gás natural dos países (y) e seus consumos de gás (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

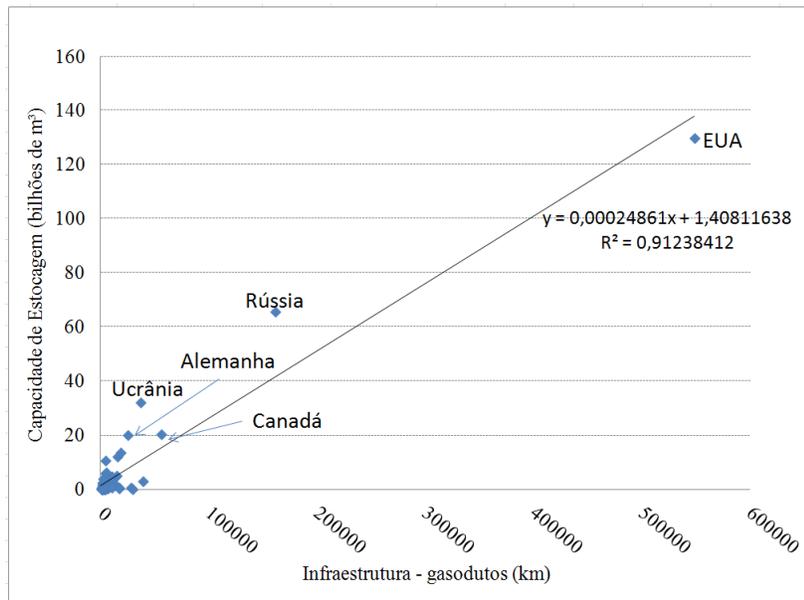


Figura 8. Regressão T.6: Relação linear entre capacidades de estocagem totais (geológica e criogênica) de gás dos países (y) e suas infraestruturas de gasodutos (x) (8,1 cm x 11,5 cm).

características. No caso dos terminais de regaseificação (regressões R.1 a R.6), a importação de gás natural foi a característica com a maior correlação ( $R^2=0,5295$ ), em relação à capacidade de armazenamento. Para a capacidade de armazenamento criogênico em terminais de regaseificação, todas as demais características do setor de gás natural apresentaram correlação muito baixa.

Em relação às estocagens geológicas (regressões G.1 a G.6), verificou-se que o consumo ( $R^2=0,9129$ ) e a infraestrutura ( $R^2=0,9123$ ), seguidos pelos níveis de produção ( $R^2=0,8317$ ), mostraram-se as características dos setores de gás que possuem correlação classificada como “muito alta” com o nível de capacidade de estocagem geológica. Os outros parâmetros (reservas, importações e exportações) demonstraram correlação “baixa” com os níveis de capacidade de armazenagem.

Note-se que houve pouca variação entre os valores de  $R^2$  das regressões G.1 a G.6 e os valores das regressões T.1 a T.6, o que se explica em grande parte pela capacidade significativamente maior de armazenagem de gás das estocagens geológicas, principalmente a dos sítios de estocagem desenvolvidos em reservatórios porosos, em relação aos armazenamentos criogênicos em terminais de GNL.

#### 4 Análise dos resultados

Para os terminais de liquefação e de regaseificação, os valores de  $R^2$  mais elevados encontram fundamento nos objetivos claros pelos quais tais instalações são implantadas, quais sejam, respectivamente, exportação e importação de gás natural. No entanto, como boa parte das exportações e importações de gás ocorre, também, por meio de gasodutos, os valores das correlações encontrados foram de média intensidade.

O nível de reservas provadas apresentou a correlação mais significativa com a capacidade de estocagem em terminais de liquefação, uma vez que boa parte dos países detentores das maiores reservas de gás, tais como o Qatar, a Indonésia e a Austrália, fazem uso dessas instalações para enviar gás na forma liquefeita a centros consumidores distantes por meio de navios metaneiros, monetizando, assim, seus campos de gás natural.

Apesar de alguns grandes consumidores de gás concentrarem quantidade signifi-

cativa de terminais de regaseificação de GNL, como o Japão e a Espanha, a ausência desse tipo de armazenamento na Rússia e a prevalência de importações por meio de gasodutos nos EUA e na Alemanha, por exemplo, são razões pelas quais a correlação R.3 apresentou um valor tão baixo ( $R^2=0,0741$ ). Caso fossem considerados apenas os volumes importados por GNL, o valor de  $R^2$  iria a 0,9252 para a correlação entre a capacidade de armazenagem criogênica em terminais de GNL e os níveis de consumo de gás.

Outros fatores, tais como os altos níveis de produção em países fortemente consumidores, como a própria Rússia, os EUA e o Canadá, diminuem a necessidade de armazenagens criogênicas em instalações próprias à importação, como os terminais de regaseificação. Nos EUA, adicionalmente, o fenômeno do súbito aumento da produção do gás natural dito não convencional, em especial o gás de folhelho (*shale gas*), diminuíram substancialmente a necessidade de importação de gás natural, estancando o desenvolvimento de projetos de GNL [1,24].

As correlações realizadas entre as capacidades de estocagem criogênicas (liquefação/regaseificação) poderiam ser mais precisas caso tivessem sido levados em conta capacidades de plantas de *peak-shaving* ou satélites. Apesar de pulverizadas e de menor capacidade individual, conforme já destacado, em conjunto, elas podem elevar significativamente a capacidade de estocagem criogênica de um país, como o caso dos EUA, onde tais instalações respondiam por 80% da capacidade total de estocagem de GNL. Restam aos terminais de regaseificação e ao terminal de liquefação do Alaska (único nos EUA), respectivamente, 18% e 2% da capacidade total de tancagem [25]. No entanto, toda a capacidade de armazenamento criogênico corresponde a, aproximadamente, 2% da capacidade de armazenagem geológica, o que traz pouco impacto aos resultados obtidos quando se considera o armazenamento como um todo (criogênico mais geológico). De fato, conforme já destacado, as correlações G.1 a G.6, correspondentes ao armazenamento geológicos, diferiram pouco das correlações T.1 a T.6, relativas aos armazenamentos totais.

Para estocagens geológicas, as correlações, cujos coeficientes de determinação estiveram mais próximos a 1,00, foram aquelas relacionadas primordialmente ao consumo e à infraestrutura, seguidas pela produção. A estocagem de gás natural é muito

mais relevante em países consumidores, tais como a Alemanha, Itália, França e Ucrânia, que em países que possuem excesso de gás. A alta correlação dos níveis de capacidade de estocagem geológica com os níveis de consumo, bem como com o grau de desenvolvimento da infraestrutura, têm relação com um dos principais objetivos pelos quais a atividade de armazenamento é desenvolvida, qual seja, o de servir como reforço à garantia do abastecimento ou aumento da confiabilidade do sistema de movimentação e entrega de gás contra interrupções de ordem técnica (falha de gasodutos), econômica (diminuição da produção interna) ou política (crises diplomáticas ou contratuais entre países supridores e consumidores). Tais armazenamentos são capazes de fornecer grandes volumes de gás natural por meses [2-5,9].

A estocagem geológica possui, também, a importante função de tornar a operação dos campos de produção mais constante, suavizando suas flutuações, bem como a de otimizar o dimensionamento da infraestrutura de movimentação de gás. Assim, em diversos países com altos níveis de produção, há importantes sítios de armazenamento associados às regiões produtoras. Estocagens desenvolvidas no Estado do Texas, nos EUA, nas províncias de Alberta, Saskatchewan e Colúmbia Britânica, no Canadá, e na região dos Urais, na Rússia, são os exemplos mais importantes desse grupo de países. Assim sendo, tais sítios de armazenamento contribuíram para tornar alta a correlação entre capacidade de estocagem e nível de produção.

É válido destacar que, apesar de ter sido considerada alta a correlação entre armazenagem geológica e os níveis de produção, todos os países com as maiores capacidades de estocagem geológica (acima de 10 bilhões de m<sup>3</sup> de gás útil) e, simultaneamente, com os maiores níveis de produção (acima de 70 bilhões de m<sup>3</sup> por ano) são, ao mesmo tempo, grandes consumidores de gás natural (EUA, Rússia e Canadá), reforçando a tese de que o consumo de gás é a característica da indústria de gás mais importante a ser observada para o desenvolvimento de capacidade de armazenamento.

Em relação ao grau de desenvolvimento da infraestrutura, em termos de km de gasodutos, a alta correlação observada entre essa característica e a capacidade de estocagem geológica está, também, ligada à necessidade de se otimizar o dimensionamento da infraestrutura de movimentação de gás natural, tanto na produção como no consumo, bem como a de reforçar a confiabilidade do sistema gasífero como um todo,

aumentando a segurança do abastecimento [3-5].

É interessante observar que a estocagem geológica está presente praticamente em todos os grandes países consumidores de gás, conforme destaca a tabela 4. Dos 10 maiores consumidores de gás em 2011, havia sítios de armazenagem subterrânea em 8 deles, enquanto que, dentre os 10 maiores produtores, essa atividade estava presente em 4, reforçando mais uma vez a tese de que o consumo é a característica que pode ser considerada o vetor principal do desenvolvimento de capacidade de estocagem, capacidade esta fundamental para a garantia da continuidade do abastecimento.

*Tabela 4. Destaque dos Países com Estocagem Geológica entre os 10 maiores Consumidores e os 10 Produtores de Gás Natural (Capacidade, Consumo e Produção em bilhões de m<sup>3</sup>).*

Países Consumidores de Gás Natural	Consumo de Gás em 2011	Capacidade de Estocagem Geológica em 2011	Países Produtores de Gás Natural	Produção de Gás em 2011	Capacidade de Estocagem Geológica em 2011
1º EUA	690,1	126,96	1º EUA	651,3	126,96
2º Rússia	424,6	65,5	2º Rússia	607,0	65,5
3º Irã*	153,3	0	3º Canadá	160,5	20,1
4º China	130,7	2	4º Irã*	151,8	0
5º Japão	105,5	1,7	5º Qatar	146,8	0
6º Canadá	104,8	20,1	6º China	102,5	2
7º Arábia Saudita	99,2	0	7º Noruega	101,4	0
8º Reino Unido	80,2	3,7	8º Arábia Saudita	99,2	0
9º Alemanha	72,5	20,06	9º Argélia	78,0	0
10º Itália	71,3	13,6	10º Indonésia	75,6	0

\* Embora não contasse com estocagens geológicas em 2011, o Irã inaugurou, em 2013, o primeiro sítio de estocagem subterrânea do Oriente Médio, no campo depletado de Serajeh, com capacidade inicial de 1,5 bilhões de m<sup>3</sup> [25,26]. Fontes: Adaptado de [9] e [15].

## 5 Conclusões

Pode-se afirmar que a baixa correlação entre reservas provadas e armazenagem geológica (G.1 e T.1,  $R^2=0,3099$  e  $R^2=0,3153$ , respectivamente), aliada à alta correlação verificada para o consumo (G.3 e T.3) é uma evidência importante de que a capacidade de estocagem não está relacionada com a disponibilidade extra de gás em um determinado mercado nacional. Na realidade, o desenvolvimento da estocagem surge com a necessidade de se criarem reservas estratégicas tanto para períodos de falta de suprimento como para perfis sazonais de consumo, comuns em países de zonas temperadas, os quais, predominantemente, consomem altos volumes de gás du-

rante o inverno, especialmente para calefação. Altos consumos, por sua vez, estão associados, na maioria das nações, com infraestruturas dutoviárias bem estabelecidas, o que também gerou alta correlação entre esta característica da indústria de gás e a capacidade de estocagem.

Em relação ao futuro da atividade de armazenamento de gás no Brasil, conforme os resultados obtidos para as regressões lineares realizadas e seus respectivos coeficientes de determinação, é possível tecer algumas conclusões de ordem qualitativa:

- i. Primeiramente, caso houvesse crescimento significativo das reservas brasileiras de gás em áreas como o pré-sal, por exemplo, provavelmente o mercado demandaria implantação de novos terminais de liquefação, com suas respectivas capacidades de estocagem criogênica, para aproveitamento dessas reservas.
- ii. No entanto, caso ocorra um crescimento significativo do consumo de gás natural, é possível afirmar que seria imperiosa a implementação de sítios de estocagem geológica, independentemente do nível de reservas provadas do Brasil.
- iii. Caso o consumo, no Brasil, aumentasse, a implementação de novos terminais de regaseificação viria com a necessidade de se diversificarem as fontes de suprimento. Porém, como as próprias regressões R.1 a R.6 e seus baixos valores de  $R^2$  sugerem, não é possível garantir, pelas características da indústria do gás consideradas, que novos terminais de regaseificação incrementariam a capacidade de estocagem criogênica, uma vez que, recentemente, novos terminais de GNL têm sido implantados, no próprio Brasil e na Argentina, sem tanques de armazenamento, funcionando quase que somente como pontos adicionais de entrada de gás importado no país, além do gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol). O incremento de importações tampouco garantiria novas capacidades de armazenagem criogênica, pois tais volumes poderiam vir de países vizinhos por via dutoviária [1].

Como sugestão para estudos futuros, para fins de análises mais precisas que permitam inclusive estimar quantitativamente os volumes de estocagem necessários ao Brasil ou a qualquer outra nação ainda sem instalações de armazenagem, podem ser

avaliados outros conjuntos de aspectos do setor de gás, tais como as características geológicas, origem – *offshore* ou *onshore* – das reservas e produção de gás natural, importações e exportações segregadas entre dutos e GNL, participação do gás natural na matriz energética dos países, usos e aplicações do gás natural em cada uma das nações consideradas, grau de maturidade da indústria de gás, dentre outros. Adicionalmente, para fins de análises mais acuradas, podem ser utilizadas outras ferramentas estatísticas, tais como testes de hipóteses e regressões não lineares.

## Referências

- [1] ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. O Gás Natural Liquefeito no Brasil: experiência da ANP na implantação dos projetos de importação de GNL, Séries Temáticas ANP nº 4. Rio de Janeiro. 2010.
- [2] APPI, C. J.; GORAIEB, C. L.; IYOMASA, W. S. Estocagem subterrânea de gás natural: tecnologia para suporte ao crescimento do setor de gás natural no Brasil. 1ª. ed. São Paulo: Páginas e Letras Editora Ltda, 2005.
- [3] CONFORT, M. J. F. Estocagem Geológica de Gás Natural e seus Aspectos Técnicos e Regulatórios Internacionais. Dissertação de Mestrado. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ. 2006.
- [4] EIA - U.S. Energy Information Administration. The Value of Underground Storage in Today's Natural Gas Industry. Washington DC, 1995. Disponível em: <<ftp://ftp.eia.doe.gov/natgas/059195.pdf>>. Acesso em: jun/2012.
- [5] FERC - U.S. Federal Energy Regulatory Commission. Current State of and Issues Concerning Underground Natural Gas Storage. 2004. Disponível em: <<http://www.ferc.gov/EventCalendar/Files/20041020081349-final-gs-report.pdf>>. Acesso em: mar/2014.
- [6] TIRATSOO, E. N. Natural Gas, a Study. 2. ed., Beaconsfield, Scientific Press Ltd. 1972.

- [7] SLB - SCHLUMBERGER. Storing Natural Gas Underground. 2002. Disponível em: <[http://www.slb.com/ /media/Files/resources/oilfield\\_review/ors02/s um02/p2\\_17.ashx](http://www.slb.com/media/Files/resources/oilfield_review/ors02/s um02/p2_17.ashx)>. Acesso em: mar/2014.
- [8] ANP. Relatório de Viagem a Serviço: Visitas Técnicas aos Terminais de GNL de Barcelona e Sagunto e reuniões com a Comissão Nacional de Energia (CNE), Gestor Técnico do Sistema Gasífero (ENAGAS) e GAS NATURAL S.A. Rio de Janeiro. 2008. Disponível em: [www.anp.gov.br/?dw=2541](http://www.anp.gov.br/?dw=2541). Acesso em: mar/2014.
- [9] BP. British Petroleum Statistical Review of World Energy 2012. Londres, 2012. Disponível em: <[http://www.bp.com/assets/bp\\_internet/globalbp/globalbp\\_uk\\_english/reports\\_and\\_publications/statistical\\_energy\\_review\\_2011/STAGING/local\\_assets/pdf/statistical\\_review\\_of\\_world\\_energy\\_full\\_report\\_2012.pdf](http://www.bp.com/assets/bp_internet/globalbp/globalbp_uk_english/reports_and_publications/statistical_energy_review_2011/STAGING/local_assets/pdf/statistical_review_of_world_energy_full_report_2012.pdf)>. Acesso em: mar/2014.
- [10] ANP. Anuário Estatístico, de 2001 a 2013. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?id=548>>. Acesso em: mar/2014.
- [11] WB - World Bank. Gross Domestic Product Growth in Brazil (1961 a 2012). Disponível em: <<http://data.worldbank.org/country/brazil>>. Acesso em: mar/2014.
- [12] EIA. World Shale Gas Resources: An Initial Assessment of 14 Regions Outside the United States. Washington DC, 2011. Disponível em: <<http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/archive/2011/pdf/full-report.pdf>>. Acesso em: mar/2014.
- [13] EIA. Brazil: Analysis. Disponível em: <<http://205.254.135.7/countries/cab.cfm?fips=BR>>. Acesso em: mar/2014.
- [14] GIIGNL - Group International des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié (International Group of Liquefied Natural Gas Importers).

- The LNG Industry in 2010, World Energy Situation. Disponível em: <[http://www.gignl.org/fileadmin/user\\_upload/pdf/A\\_PUBLIC\\_INFORMATION/Publications/GNL\\_2010.pdf](http://www.gignl.org/fileadmin/user_upload/pdf/A_PUBLIC_INFORMATION/Publications/GNL_2010.pdf)>. Acesso em: jul/2013.
- [15] CEDIGAZ – Centre International d’Information sur le Gaz Naturel et tous Hydrocarbures Gazeux. Number of UGS facilities in operation. Disponível em: <<http://www.cedigaz.org/Fichiers/CIstor2011/Statplanet.html>>. Acesso em: ago/2012.
- [16] CIA – U. S. Central Intelligence Agency. CIA’s The World Factbook: Pipelines, 2010. Disponível em <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2117.html>>. Acesso em: abr/2013.
- [17] CIA. The World Factbook: Natural Gas Proved Reserves, 2011. Disponível em: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2179rank.html>>. Acesso em: abr/2013.
- [18] CIA. The World Factbook: Natural Gas Production, 2010 to 2012. Disponível em <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2249rank.html>>. Acesso em: abr/2013.
- [19] CIA. The World Factbook: Natural Gas Consumption, 2010. Disponível em <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2181rank.html>>. Acesso em: abr/2013.
- [20] ZENTGRAF, R. Estatística Objetiva. 3. ed. Rio de Janeiro: ZTG Editora, 2007.
- [21] MATHIAS, M. C. P. P. A formação da indústria global de gás natural: definição, condicionantes e desafios. Tese de Doutorado. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. RJ. 2008.
- [22] GIE – Gas Infrastructure Europe. GSE – Gas Storage Europe: Storage Map 2012. Disponível em: <<http://www.gie.eu/index.php/maps-data/gse-storage-map>>. Acesso: jul/2013.

- [23] MANSSON, L.; MARION, P.; JOHANSSON, J. Demonstration of the LRC Gas Storage Concept in Sweden. In. 23<sup>rd</sup> World Gas Conference. Proceedings & Committee Reports, IGU. Amsterdã, 2006.
- [24] EIA. Annual Energy Outlook 2013 with Projections to 2040. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/0383(2013).pdf)>. Acesso em: jul/2013.
- [25] DELANO, F. Overview of LNG Industry in the US. UH - IELE. University of Houston Law Center. Institute for Energy, Law and Enterprise. Houston, 2002. Disponível em: <[http://www.beg.utexas.edu/energyecon/energy-inc/members/Course\\_Modules/Module\\_IV\\_A\\_Gas/Overview%20of%20U.-S.%20LNG%20Industry.ppt](http://www.beg.utexas.edu/energyecon/energy-inc/members/Course_Modules/Module_IV_A_Gas/Overview%20of%20U.-S.%20LNG%20Industry.ppt)>. Acesso em: mar/2014.
- [26] ICOFC - Iranian Central Oil Fields Company. Serajeh Gas Storage Site Launched on Trial Basis. Disponível em: <<http://www.icofc.ir/index.aspx?siteid=79&pageid=419&newsview=4963>>. Acesso em: jul/2013.
- [27] LGNWN - LGN World News. Iranian President Inaugurates Serajeh Gas Storage Facility. Disponível em: <<http://www.lngworldnews.com/iranian-president-inaugurates-serajeh-gas-storage-facility/>>. Acesso em: jul/2013.

## Anexo 1 - Capacidades de estocagem

Capacidades de estocagem em terminais de liquefação, terminais de regaseificação e sítios de estocagem geológica (cavernas salinas, aquíferos e campos depletados de óleo ou gás) existentes em um total de 60 países.

Tabela A1. Capacidade de estocagem de gás natural por país.

País	Capacidade de estocagem (bilhões de m <sup>3</sup> )*			
	Terminais de liquefação	Terminais de regaseificação	Estocagens geológicas	Total
EUA	0,0651	2,6824	126,96	129,71
Rússia	0,1200	-	65,500	65,620

Capacidade de estocagem (bilhões de m <sup>3</sup> )*				
País	Terminais de liquefação	Terminais de regaseificação	Estocagens geológicas	Total
Ucrânia	-	-	32,100	32,100
Canadá	-	0,0960	20,100	20,196
Alemanha	-	-	20,060	20,060
Itália	-	0,0600	13,600	13,660
França	-	0,5040	11,640	12,144
Japão	-	9,0559	1,7000	10,756
Hungria	-	-	6,1300	6,1300
Holanda	-	-	6,1000	6,1000
Reino Unido	-	1,3398	3,7000	5,0400
Uzbequistão	-	-	4,6000	4,6000
Áustria	-	-	4,5000	4,5000
Cazaquistão	-	-	4,2000	4,2000
Espanha	-	1,4922	2,4000	3,8920
Coréia do Sul	-	3,7710	-	3,7710
Turquia	-	0,3210	3,1000	3,4210
Romênia	-	-	2,9000	2,9000
Rep. Tcheca	-	-	2,8900	2,8900
Eslováquia	-	-	2,8000	2,8000
China	-	0,8940	2,0000	2,8940
Letônia	-	-	2,3000	2,3000
Azerbaijão	-	-	2,0000	2,0000
Polônia	-	-	1,6000	1,6000
Qatar	1,4040	-	-	1,4040
Indonésia	0,8873	-	-	0,8873
Bélgica	-	0,2280	0,6500	0,8780
Dinamarca	-	-	0,8200	0,8200
Belarus	-	-	0,8000	0,8000
Taiwan	-	0,7020	0,0100	0,7120
Argélia	0,5646	-	-	0,5646
Croácia	-	-	0,5580	0,5580
Austrália	0,3078	-	0,3078	0,5480

Capacidade de estocagem (bilhões de m <sup>3</sup> )*				
País	Terminais de liquefação	Terminais de regaseificação	Estocagens geológicas	Total
Índia	-	0,5472	-	0,5472
Bulgária	-	-	0,5000	0,5000
Egito	0,3480	-	-	0,3480
Portugal	-	0,144	0,180	0,3240
Trinidad & Tobago	0,3144	-	-	0,3144
México	-	0,3120	-	0,3120
Sérvia	-	-	0,3000	0,3000
Malásia	0,2670	-	-	0,2670
Irlanda	0,2100	-	-	0,2100
Chile	-	0,2064	-	0,2064
Nigéria	0,2021	-	-	0,2021
Guiné Equatorial	0,1632	-	-	0,1632
Peru	0,1560	-	-	0,1560
Noruega	0,1500	-	-	0,1500
Emirados Árabes	0,1440	-	-	0,1440
Omã	0,1440	-	-	0,1440
Brunei	0,1170	-	-	0,1170
Armênia	-	-	0,1100	0,1100
Argentina	-	-	0,1000	0,1000
Rep. Dominicana	-	0,0960	-	0,0960
Porto Rico	-	0,0960	-	0,0960
Kuwait	-	0,0900	-	0,0900
Iêmen	0,08400	-	-	0,0840
Grécia	-	0,0780	-	0,0780
Quirquistão	-	-	0,0600	0,0600
Líbia	0,0576	-	-	0,0576
Suécia	-	-	0,0100**	0,0100

\* Dados de 2010 para os terminais de liquefação e regaseificação e de 2011 para as capacidades úteis das estocagens geológicas.

\*\* Diferentemente das estocagens geológicas tradicionais, a estocagem sueca foi construída em cavernas de rochas rígidas revestidas com aço, modalidade única e ainda em estágio de protótipo [23].

Fonte: Adaptado de [14,15,22, 23].

## **Referências**