



Lucas Carneiro Luz

**Análise da movimentação da carga
(*sloshing*) de GNL e modelagem de sua
vaporização (*boil-off*) considerando
composição e tipo de tanque de navios
metaneiros (*carrier*)**

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica



Lucas Carneiro Luz

**Análise da movimentação da carga (*sloshing*) de
GNL e modelagem de sua vaporização (*boil-off*)
considerando composição e tipo de tanque de
navios metaneiros (*carrier*)**

Projeto apresentado como requisito para obtenção de
Grau de Bacharel pelo Programa de Graduação em
Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Alan da Silva Esteves

Co-orientador

Laboratório de Refrigeração Condicionamento de Ar Criogenia –
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de Junho de 2016

Agradecimentos

Apenas palavras não são suficientes para agradecer todos envolvidos nessa nova conquista. Aos meus pais, agradeço por tudo, simplesmente tudo! Agradeço por toda educação, carinho, apoio emocional e financeiro que me deram nesses meus 23 anos e meio de vida. MUITO OBRIGADO! AMO VOCÊS! Ao meu irmão, que me ajudou terminar a tempo este projeto, além das diversas palavras de força e apoio durante toda minha vida, meu muito obrigado e estou aqui sempre com você! À toda minha família que sempre se fez presente na minha educação e me apoiou incondicionalmente. Gratidão eterna à minha namorada, Angela Abreu, que, desde que nos conhecemos, sempre se mostrou uma pessoa incrível e me ajudou muito na revisão do texto, além dos incontáveis dias que não pude estar presente quando ela queria ou precisava e ela compreendeu que é uma das etapas mais importantes da minha vida. Obrigado amor, te amo!

Agradeço eternamente aos Mestres que tive o prazer de ser aluno no Colégio Recanto, onde estudei durante 14 anos, e aos da PUC nesses 5 anos e meio. Cada conselho, cada crítica, cada 'puxão de orelha', ajudou a formar a pessoa que sou hoje! MUITO OBRIGADO!

Aos amigos, não preciso dizer nada. Todos foram importantes do seu jeito, no seu tempo. Não vou citar nomes, pois vou esquecer alguém, mas saibam que cada um me ajudou direta ou indiretamente nesta nova conquista!

Agradeço de coração ao Professor Parise e ao Professor Alan Esteves por me acompanharem e darem todos os conselhos, críticas e 'puxões de orelha' necessários para a finalização do projeto. Alan, muito obrigado pelas 'eternas' revisões no meu texto e por todo conhecimento que você me passou. Sou eternamente grato! Muito Obrigado!

Resumo

No presente trabalho são estudados os efeitos da movimentação da carga (*sloshing*) de GNL no interior de três geometrias de tanques de armazenamento (esféricos, de membranas e auto-portantes prismáticos) de navios metaneiros (*carriers*) durante o transporte transoceânico deste energético. É desenvolvida a modelagem matemática da taxa de vaporização do GNL (*Boil-off rate* – BOR) no interior desses três tipos de tanques, variando a composição do GNL de acordo com os seis maiores produtores internacionais, levando-se em conta também o tipo de isolamento térmico adotado na construção desses sistemas de contenção.

Palavras-chave: *Sloshing*, *Boil-off rate* (BOR), Composição de GNL, Tanques de GNL (LNG cargo tanks).

Abstract

This project studies the effect of the LNG cargo movement (sloshing) inside LNG cargo tanks with three different geometries (spherical, membrane, prismatic) during transoceanic transportation of this fuel. It is developed a mathematical model of the boil-off rate inside those tanks, varying the composition of LNG exported by sixes greatest international producers, considering also the thermal isolation of each type of tank geometry.

Keywords: Sloshing, boil-off rate (BOR), LNG composition, LNG cargo tanks.

Sumário

Agradecimentos	3
Resumo.....	4
Abstract	5
Sumário	6
Lista de Siglas	7
Lista de Figuras.....	8
Lista de símbolos	10
Símbolos Gregos.....	13
Introdução.....	14
Contextualização do tema.....	16
Revisão bibliográfica	33
Modelagem da taxa de vaporização (BOR)	36
Aplicação da modelagem desenvolvida	50
Conclusões e trabalhos futuros.....	58
Referências.....	59

Lista de Siglas

ANSYS: *Analysis System*
BIMCO: *International Shipping Association*
BOG: *boil-off gas*
BOR: *boil-off rate*
BWRS: *Benedict Webb Rubin Starling*
CCS: *Cargo Containment System*
CS1: *Combined System Number One*
EUA: *Estados Unidos da América*
GIIGNL: *Groupe International des Importateurs de Gaz Naturel Liquéfié*
GLP: *Gás Liquefeito de Petróleo*
GN: *Gás Natural*
GNL: *Gás Natural Liquefeito*
GT: *Gaz Transport*
HHV: *Higher Heating Value*
IHI: *Ishikawagima Heavy Industries*
IHRDC: *International Human Resources Development*
IMO: *International Maritime Organization*
ISO: *International Organization for Standardization*
KM: *Kværner Moss*
LKP: *Lee-Kesler-Plocker*
MTPA: *Million metric tons per annum*
SPB: *Self-supporting Prismatic Shape Type B*
TG: *Technigaz*
U\$: *símbolo da moeda americana*

Lista de Figuras

Fig. 1 – Cadeia física do GNL	16
Fig. 2 – Representação esquemática e real do tanque de armazenamento.....	17
Fig. 3 - Principais rotas de GNL de acordo com a quantidade comercializada em 2014	19
Fig. 4 - Distribuição da frota por tipo de sistema de contenção em 2015.	21
Fig. 5 - <i>Carrier</i> com 4 tanques esféricos com tecnologia Kværner Moss (KM) e capacidade total de 177.427 m ³ à -163 °C ⁵	22
Fig. 6 - <i>Carrier</i> com 4 tanques prismáticos SPB com tecnologia IHI e capacidade de 89.880 m ³ ⁵	22
Fig. 8 - <i>Carrier</i> com 5 tanques de membrana TG Mark III com tecnologia TG e capacidade de 267.335 m ³	23
Fig. 9 - <i>Carrier</i> com 4 tanques de membrana CS1 com a fusão das TG e GT e capacidade de 154.472 m ³	23
Fig. 10 - Estratificação do GNL ⁶	23
Fig. 11 – <i>Boil-off</i> gerado pela entrada de calor ⁸	25
Fig. 12 – Tanque esférico com tecnologia Kværner Moss.....	28
Fig. 13 – Secções do tanque prismático autoportante.....	28
Fig. 14 – Representação da secção do tanque NO96 da empresa Gaz Transport ¹⁷	30
Fig. 15 - Representação da secção do tanque TG Mark III da empresa Technigaz ²⁰	30
Fig. 16 – Secção do tanque de membrana CS1 ²¹	32
Figura 17 – Representação das áreas de troca de calor.....	37
Fig. 18 – Representação do tanque e suas dimensões principais.....	39
Fig. 19: Principais dimensões e geometria do tanque de membrana	40

Fig. 20: Área da seção reta do tanque de membranas.....	40
Fig. 21: Representação da altura do nível de GNL (75%)	41
Fig. 22 – Vista de seção ilustrando os chanfros	42
Fig. 23 – Vista Lateral	43
Fig. 24 – Chanfro Inferior	43
Fig. 25 – Chanfro Superior.....	44
Fig. 26 – Vista Inferior.....	44
Fig. 27 – Rota Marítima modelada	45
Fig. 28 – Variação diária da temperatura média ambiente no decorrer da viagem	46
Fig. 29 – Volume diário de GNL na fase líquida	51
Fig. 30 – BOR diário	51
Fig. 31 – Volume diário de GNL na fase líquida	52
Fig. 32 – BOR diário	52
Fig. 33 – Volume diário de GNL na fase líquida	53
Fig. 34 – BOR diário	53
Fig. 35 – Volume de GNL na fase líquida.....	54
Fig. 36 – BOR diário	54
Fig. 37 – Volume de GNL na fase líquida.....	55
Fig. 38 – BOR diário	55
Fig. 39 – Volume de GNL na fase líquida.....	56
Fig. 40 – BOR diário	56

Lista de símbolos

Caracter	Descrição	Unidade
a	Distância do centro da esfera à calota	[m]
A_{calota}	Área da calota esférica	[m ²]
A_{chi}	Área do chanfro inferior	[m ²]
A_{chs}	Área do chanfro superior	[m ²]
A_{esf}	Área da esfera	[m ²]
A_{GNLesf}	Área de troca de calor do tanque esférico	[m ²]
A_{GNLmem}	Área de troca do tanque de membranas	[m ²]
$A_{lateralmem}$	Área lateral do tanque de membranas	[m ²]
A_{piso}	Área do piso do navio	[m ²]
A_{secmem}	Área de seção reta do tanque de membranas	[m ²]
$A_{TOTALchi}$	Área total do chanfro inferior	[m ²]
$A_{TOTALchs}$	Área total do chanfro superior	[m ²]
$A_{TOTALlateralmem}$	Área lateral total do tanque de membranas	[m ²]
$A_{TOTALsecmem}$	Área total da seção reta do tanque de membranas	[m ²]
b	Largura do tanque de membrana	[m]
BOR	Porcentagem do volume evaporado por dia	[%/dia]
BOR_i	Taxa de vaporização do dia i	% V/dia
D_{esf}	Diâmetro do tanque esférico	[m]
h	Altura do tanque de membrana	[m]
h_1	Coeficiente de transferência de calor do ar	[W/m ² K]

h_2	Coeficiente de transferência de calor do GNL	$[W/m^2K]$
h_c	Altura da calota	$[m]$
h_L	Altura do chanfro inferior	$[m]$
h_u	Altura do chanfro superior	$[m]$
i	Índice do dia	-
k	Condutividade térmica do isolante	$[W/mK]$
L	Comprimento do tanque de membrana	$[m]$
L_l	Entalpia da fase líquida	$[J/kg]$
L_v	Entalpia da fase vapor	$[J/kg]$
m_L	Massa de líquido de GNL	$[kg]$
m_{total}	Massa do sistema	$[kg]$
m_v	Massa de vapor de GNL	$[kg]$
Q	Taxa de transferência de calor	$[W]$
r	Raio da base da calota	$[m]$
R	Raio do tanque esférico	$[m]$
U	Coeficiente global de troca de calor	$[W/m^2K]$
v	Volume específico	$[m^3/kg]$
V_c	Volume total do <i>carrier</i>	$[m^3]$
V_{esf}	Volume do tanque esférico	$[m^3]$
V_{GNL}	Volume de GNL do tanque	$[m^3]$
V_i	Volume da fase líquida de GNL no dia i	$[m^3]$
V_L	Volume da fase líquida de GNL	$[m^3]$
V_{mem}	Volume do tanque de membranas	$[m^3]$

V_{total}	Volume total do tanque	$[\text{m}^3]$
x	Espessura da parede do tanque	$[\text{m}]$

Símbolos Gregos

Caracter	Descrição	Unidade
α	Fração de vazio	-
ΔL	Calor latente de vaporização	[J/kg]
ΔT	Diferença entre a temperatura do GNL e ambiente	[K]
ρ	Densidade	[kg/m ³]
ρ_{gnl}	Densidade do GNL	[kg/m ³]
ρ_L	Densidade da fase líquida	[kg/m ³]
ρ_m	Densidade média do sistema vapor/líquido	[kg/m ³]
ρ_v	Densidade da fase vapor	[kg/m ³]

1 Introdução

A indústria do petróleo e gás por muitos anos considerou como fracasso a produção de Gás Natural (GN) junto com o óleo, pela inexistência de mercado que consumisse o gás, redundando, invariavelmente, em sua queima. No entanto, ela passou a gerar passivos ambientais que em função de legislações mais rígidas tornou-a impraticável. A partir de então, a utilização do GN como combustível fóssil mais “limpo” passou a ser uma opção viável técnica, econômica e ambientalmente.

Ocorre que transportar o gás produzido para mercados localizados a longas distâncias das fontes produtoras (acima de 2.000 km) por meio de gasodutos, não apresenta atratividade técnico-econômica. Os principais mercados sendo longínquos das fontes produtoras e a redução volumétrica do gás de aproximadamente 600 vezes obtida com o processo de liquefação, fez com que a maneira mais adequada de transportá-lo passasse a ser sob forma de Gás Natural Liquefeito (GNL), por meio de *carriers*. O aumento da demanda internacional e a adoção deste modal de transporte transoceânico, fez com que o mercado de GN se consolidasse.

A indústria do GNL vem experimentando crescimento de 7,5 % ao ano durante os últimos 20 anos e os futuros investimentos sugerem que este crescimento perdurará durante, pelo menos, na próxima década. Este crescimento também pode ser observado pelo avanço da frota de navios deste mercado. Em 2015 foram acrescidos 28 novos *carriers*, totalizando uma frota de 449 unidades. Isso aumentou a capacidade total de transporte da frota em 4,32 milhões de m³ de gás, o que corresponde a um acréscimo aproximadamente 7 % em relação a capacidade existente, totalizando 64,6 milhões de m³.

Esses indicadores apontam, inequivocamente, a importância dessa indústria, pois o GNL é considerado o principal combustível na matriz energética de muitos países, o que veio motivar o presente trabalho.

Sintonizado com essa tendência, essa lacuna de conhecimento é aqui tratada, abordando a modelagem da taxa de vaporização (BOR - *Boil-Off Rate*) do GNL decorrente do *sloshing* da carga no interior dos tanques esféricos, com tecnologia Kvaerner-Moss; de membranas, da Technigaz-GazTransport CS1 e auto-portantes SPB, da Ishikawagima Heavy Industries (IHI).

2 Contextualização do tema

2.1 Geral

As primeiras tentativas de liquefazer o GN começaram no início do século XX, mas apenas em 1959, ocorreu a primeira viagem transportando GNL entre *Lake Charles* na *Louisiana* (EUA) e *Canvey Island* (Inglaterra), por meio do carrier *The Methane Pioneer* (Esteves, 2010), dando início ao transporte transoceânico deste energético. Conforme a Fig.1, a cadeia física do GNL consiste em 7 etapas principais.

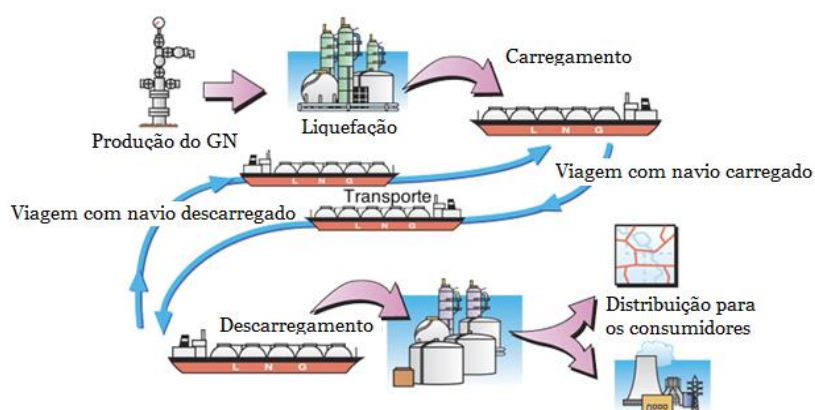


Fig. 1 – Cadeia física do GNL

Adaptado de: *International Human Resources Development Corporation* (IHRDC, 2016)¹

Há dois tipos de gases que são produzidos em campos de petróleo: associado (junto com petróleo) e o não-associado (capa de gás), sendo o primeiro, associado com diversos outros componentes que devem ser retirados antes do processo de liquefação. Podem ser citados, por exemplo, água, dióxido de carbono e hidrocarbonetos pesados. Esta separação se faz necessária para evitar condensação e formação de hidratos nas linhas de transferência com subsequentes problemas operacionais (Esteves, 2016).

¹Disponível em www.ihrdc.com Acesso em: 10 Fev. 2016

Já butano e propano são retirados da corrente principal e comercializados como Gás Liquefeito do Petróleo (GLP) com diversas utilizações na indústria e para consumo doméstico. O processo de liquefação reduz o volume do GN em cerca de 600 vezes para transportar o gás a distâncias acima de 2.000 km oferecendo economia, flexibilidade e segurança em relação ao gás transportado por gasodutos (Mokhatab, 2014).

Se a produção for terrestre, após a liquefação, o GNL é armazenado em um terminal com tanques construídos com teto em forma de domo e dotados de duplo costado cilíndrico concêntrico, por questão de segurança, em caso da ocorrência de vazamento. Se a produção for marítima, após liquefação o criogênico é armazenado em tanques no porão do navio (Mokhatab, 2014). O costado interno é construído com aço níquel 9 %, que apresenta excelente resistência e tenacidade na temperatura de armazenamento de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ ². Já o costado externo e o domo são construídos com concreto armado pré tensionado.

O isolamento térmico do tanque é, usualmente, feito com perlita nas superfícies cilíndricas e no teto, e no fundo é mantido à uma temperatura preestabelecida por meio de aquecedor com água salgada para prevenir o congelamento do solo. O tanque de armazenamento da empresa japonesa Osaka Gas, Fig.2, é isolado com espuma de poliuretano nas superfícies internas do costado externo, operando como barreira térmica para baixas temperaturas, caso ocorra vazamento de GNL.

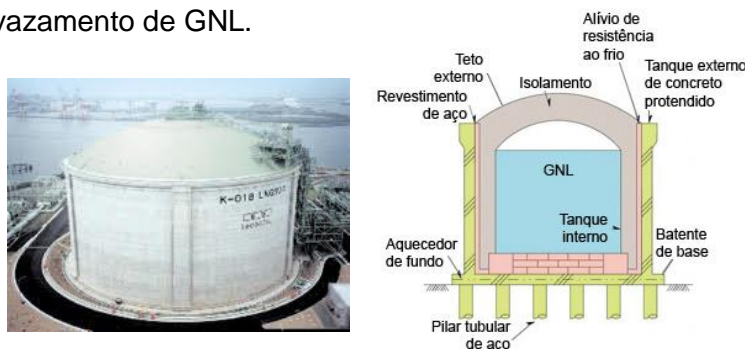


Fig. 2 – Representação esquemática e real do tanque de armazenamento
Adaptado de: Osaka Gas (2016)²

²Disponível em: <https://www.osakagas.co.jp/en/rd/technical/> Acesso em: 18 Fev. 2016

Quando os metaneiros chegam ao terminal de liquefação, seus tanques estão na condição “*gas-free*”, ou seja, sem gás, contendo somente ar. O oxigênio do ar, em contato com GNL a ser carregado pode gerar atmosfera explosiva, além da rápida mudança de temperatura no tanque, causando danos à estrutura.

Para eliminar o risco de explosão, o ambiente do tanque deve permanecer “inerte”. Para isso, óleo diesel é queimado em sistema *onshore* a parte e produz dióxido de carbono (CO_2), um gás inerte, que é bombeado para o interior do tanque, até que a concentração do oxigênio atinja menos que 4 % v/v (Bai, 2015).

No entanto, o tanque ainda não está preparado para receber GNL, pois o CO_2 se liquefaz à $-78,5\text{ }^\circ\text{C}$, e necessita ser retirado antes do resfriamento, para evitar avarias nas bombas dedicadas ao tanque. Parte do GNL é aquecido no terminal até $20\text{ }^\circ\text{C}$, sendo enviado para o interior do tanque. Os hidrocarbonetos são eliminados até atingir 5 % v/v (limite inferior de inflamabilidade do metano) sendo usados no terminal como combustível. O próximo passo é o resfriamento da estrutura do tanque.

Parte do GNL do terminal é bombeado para o *carrier*, e uma vez em contato com as paredes internas do tanque, evapora, começando a resfriar a estrutura. O gás gerado retorna para o terminal para ser reliquefeito. Quando o tanque se resfria a $-140\text{ }^\circ\text{C}$, está pronto para receber toda a carga de GNL (Bai, 2015).

Após carregamento dos tanques, o navio inicia a viagem transoceânica e o foco deste projeto é justamente esta importante etapa da cadeia física do GNL. As viagens, geralmente, são longas e o *carrier* é exposto à elevados gradientes térmicos, já que as rotas marítimas são diversas ao redor do globo, como podem ser observadas na Fig. 3.

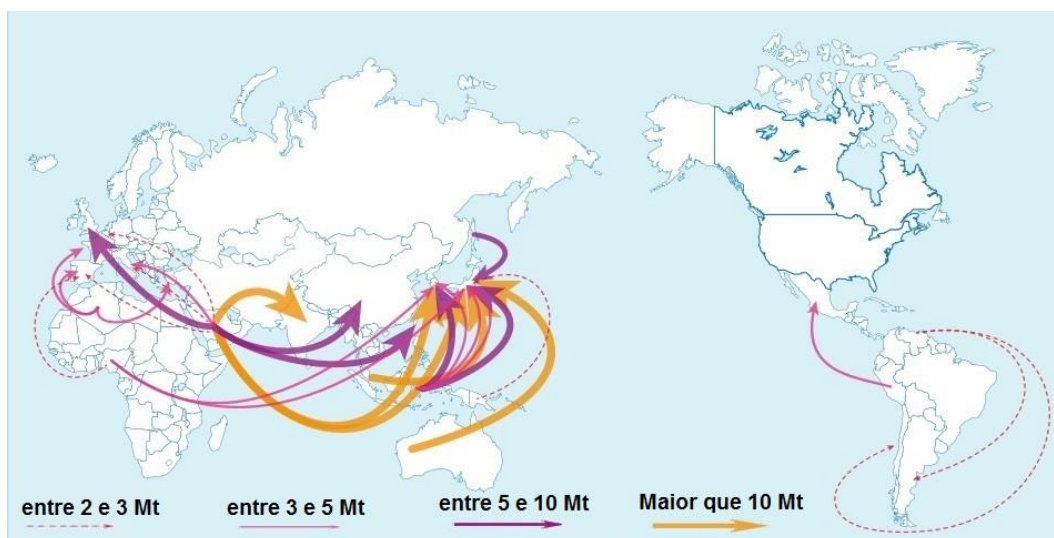


Fig. 3 - Principais rotas de GNL de acordo com a quantidade comercializada em 2014
Adaptado de: GIIGNL, 2015

Ásia é a grande importadora de GNL. O continente representa mais de 70 % da demanda global do energético (GIIGNL, 2016), sendo Japão o maior importador mundial. Em 2015, o país importou 85 milhões de toneladas do energético, o que corresponde a mais do que 34 % de todo GNL importado mundialmente naquele ano.

Na maioria dos terminais de GNL, o descarregamento de um *carrier* de 145.000 m³ dura em torno de 12 horas, à uma vazão média de 12.000 m³/h (Mokhatab, 2014). Enquanto o GNL é descarregado no tanque de armazenamento, vapores de metano gerados pela operação retornam para os tanques de carga, para manter a pressão interna em patamares seguros³.

Após cada descarregamento, pequena quantidade de GNL é mantida nos tanques do navio, sendo denominada de *heel*. Esta carga é utilizada para manter as condições criogênicas do tanque até o próximo terminal de carregamento. Durante o percurso, a vaporização do *heel* serve como parte do combustível para propulsão do navio (Tusiani, 2007).

³ Disponível em: <http://www.pomorskodobro.com/unloading-arms-and-port-operations.html>
Acessado em 19 Dez. 2015

2.2 Propriedades físicas e químicas

O GN à pressão atmosférica e temperatura de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ sofre liquefação, transformando-se em GNL. Sua composição média é de cerca de 95 % v/v em metano, sendo o restante composto por etano, propano, dentre outros gases mais “pesados”, além de pequenas quantidades de nitrogênio, água, compostos de enxofre e dióxido de carbono (Esteves, 2010). O GNL é incolor, inodoro, não-corrosivo, não-tóxico, sendo, porém, asfixiante simples. A densidade do energético varia entre 430 kg/m^3 e 470 kg/m^3 , dependendo da composição do GN utilizado no processo de liquefação (Mokhatab, 2014). Na Tabela 1 são apresentadas algumas características de GNL dos 6 maiores exportadores.

Tabela 1 - Composição e densidades (GIIGNL, 2016)

Países	Volume comercializado (10^6 m^3)	% CH_4	% C_2H_6	% C_3H_8	% C_4H_{10}	% N_2	Densidade do GNL (líquido)	Densidade do GNL (vapor) ⁴
Catar	172,97	90,91	6,43	1,65	0,74	0,27	453,46	0,79
Austrália	64,46	87,64	9,97	1,96	0,33	0,1	461,05	0,81
Malásia	54,82	91,69	4,64	2,6	0,93	0,14	454,19	0,8
Nigéria	43,15	91,7	5,52	2,17	0,58	0,03	448,39	0,79
Indonésia	40,12	96,91	2,37	0,44	0,15	0,13	431,22	0,74
Trinidad e Tobago	27,39	96,78	2,78	0,37	0,06	0,01	431,03	0,74

⁴Calculado conforme ISO 6976 [$0^{\circ}\text{C}/0^{\circ}\text{C}$, $1,01325\text{ bar}$]

2.3 Sistemas de contenção de carga e fenômenos que ocorrem na cadeia física do GNL

2.3.1 Sistema de contenção de carga (*Cargo Containment System, CCS*)

O CCS é composto essencialmente de:

- 1) Barreira primária, o tanque de carga em si

- 2) Barreira secundária, provendo compartimento reserva em caso de vazamento, prevenindo vazamentos e danos à estrutura do tanque;
- 3) Painéis de isolamento térmico;
- 4) Espaços vazios intermediários (*voids*);
- 5) Estruturas adjacentes para suporte das demais;

No final de 2015, a frota consistia de 449 navios metaneiros (GIIGNL, 2016) composta de cinco diferentes tipos de sistemas de contenção: dois autoportantes e três de membrana (Mokhatab, 2014), distribuídos conforme Fig. 4, sendo:

- Tanque esférico com tecnologia Kværner Moss (KM) da empresa *Moss Maritime*
- Tanque prismático SPB (*Self-supporting Prismatic Shape Type B[®]*) da empresa japonesa *Ishikawagima Heavy Industries* (IHI)
- Tanque de membrana GT NO96 da empresa *Gaz Transport* (GT)
- Tanque de membrana TG Mark III da empresa *Technigaz* (TG)
- Tanque membrana CS1 da GT-TG (CS1)

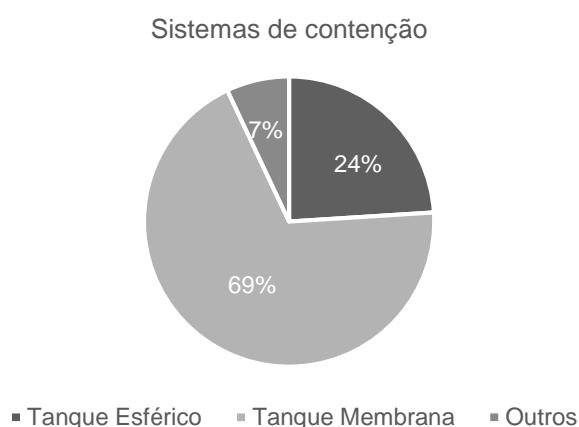


Fig. 4 - Distribuição da frota por tipo de sistema de contenção em 2015.
Adaptado de: GIIGNL, 2016

Nas Figs. 5, 6, 7, 8 e 9 são apresentados os maiores *carriers* da atualidade, para cada tipo de tanque:



Fig. 5 - *Carrier* com 4 tanques esféricos com tecnologia Kværner Moss (KM) e capacidade total de 177.427 m³ à -163 °C ⁵



Fig. 6 - *Carrier* com 4 tanques prismáticos SPB com tecnologia IHI e capacidade de 89.880 m³ ⁵



Figura 7 - *Carrier* com 5 tanques de membrana GT N°96 com tecnologia GT e capacidade de 263.249 m³

⁵Disponível em: www.marinetraffic.com Acessado em: 23 Fev. 2016



Fig. 8 - Carrier com 5 tanques de membrana TG Mark III com tecnologia TG e capacidade de 267.335 m³



Fig. 9 - Carrier com 4 tanques de membrana CS1 com a fusão das TG e GT e capacidade de 154.472 m³

2.3.2 Estratificação e Rollover

A estratificação do GNL ocorre durante o carregamento de energéticos com diferentes densidades, fazendo com que surja uma camada superior menos densa do que a inferior, porém inicialmente estáveis, como mostra a Fig. 10 (Foss, 2012).

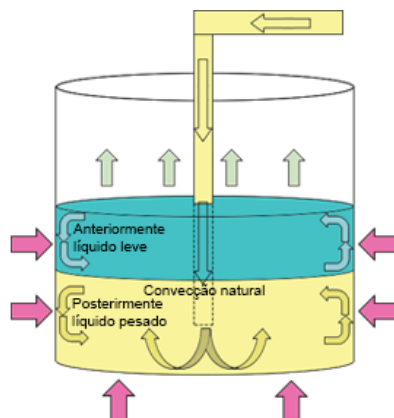


Fig. 10 - Estratificação do GNL⁶

⁶Disponível em <<http://www.liquefiedgascarrier.com/rollover.html>> Acesso: 13 Mar 2016

No entanto, como há entrada de calor durante o transporte transoceânico, as densidades das camadas no decorrer da viagem vão se igualando, desestabilizando o equilíbrio inicial. O processo se intensifica com a rápida mistura das camadas e seus componentes, dando origem ao *rollover*. Redunda numa grande e repentina liberação de vapor (Arjomandnia, 2010), causando sobrepressão no tanque, podendo ocasionar problemas estruturais⁷.

2.3.3 *Sloshing*

Em condições marítimas adversas, a energia cinética das ondas é transferida para o navio e, conseqüentemente, para os tanques de carga, causando um movimento da carga conhecido como *sloshing*. Este movimento causa atrito entre a carga e as paredes do tanque, aumentando a temperatura do GNL e gerando, conseqüentemente, vaporização (Bai, 2015).

O *sloshing* da carga é principalmente afetado pelo sistema de contenção do navio. Sociedades classificadoras recomendaram limites nos níveis de carga para diferentes sistemas. A Tabela 2 apresenta o tipo do sistema e sua regra limitadora do nível da carga:

Tabela 2: Limitação de capacidade. Adaptado de: Foss, 2012

Sistema	Regra
Membrana	Não é permitido transportar o GNL no nível entre 10% e 75% em relação a altura
Esférico	Sem limites devido à geometria
Prismático	Possibilidade de ajustar anteparas para regular o nível

Normalmente, durante a viagem com o navio carregado (*laden voyage*), o nível de carga líquida varia entre 70 % e 98 % em relação à altura do tanque. Já na viagem de retorno (*ballast voyage*), com o navio praticamente vazio, esse nível deve estar abaixo de 10% (Fricke, 2012).

⁷Disponível em: www.pomorskodobro.com/en/operations-carrier Acessado em 12 Mar. 2016

O estudo e controle do *sloshing* é de extrema importância para os navios com carga líquida, em geral, para garantir a integridade dos sistemas de contenção. A escolha do *design* do tanque ideal, suas dimensões e nível de carga, são algumas medidas a serem tomadas previamente para evitar problemas de *sloshing* durante o transporte do energético.

2.3.4 Boil-off gas (BOG)

Tanto os tanques de armazenamento do terminal quanto os tanques de carga do navio são expostos à elevadas taxas de radiação térmica (Michalski, 2011). O calor transferido para o interior do tanque associado ao *sloshing* faz com que a carga evapore, resultando em vapores conhecidos como *boil-off gas* (BOG) (Esteves, 2016) como ilustrado na Fig. 11:

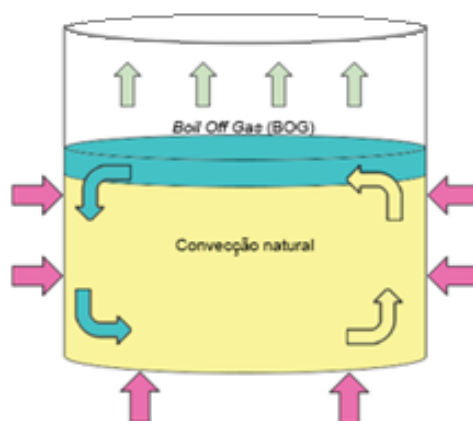


Fig. 11 – Boil-off gerado pela entrada de calor⁸

Nas operações de carregamento, grandes quantidades de GNL são bombeadas para o *carrier* num curto intervalo de tempo causando rápido aumento na pressão do tanque de carga do navio. Esse aumento faz com que haja um atrito elevado nos equipamentos e dutos, aquecendo parte da carga e, conseqüentemente, ocorrendo a liberação de vapor em grandes quantidades. Portanto, para manter a pressão dentro dos limites seguros, o BOG deve ser constantemente removido, retornando para o tanque de armazenamento do terminal (Dobrota, 2013).

⁸Disponível em: www.liquefiedgascarrier.com. Acessad em: 24 Fev. 2016

Já a quantidade de BOG gerado durante a viagem transoceânica depende da temperatura ambiente, temperatura da água do mar e condições climáticas do mar (Gomez et al, 2015). A entrada de calor nos tanques de carga é a principal causa da formação do BOG durante essa etapa da cadeia.

Durante a viagem de volta ou em direção a um novo terminal de carregamento, a vaporização também se faz presente, quando parte do GNL restante (*heel*) é aspergido nas superfícies do tanque no intuito de mantê-las resfriadas e nas condições criogênicas ideais até o novo carregamento⁹.

2.3.5 BOR

BOG é quantificado por uma taxa de vaporização, denominada *boil-off rate* (BOR) e expressa em porcentagem do volume total de GNL evaporado por dia (Esteves, 2016). BOR típico, causado pela entrada de calor, varia entre 0,1 e 0,15 % para *laden voyage* e entre 0,06 e 0,1 % para *ballast voyage* (Dobrota, 2013;Michalski, 2011)

Para ilustrar o impacto da perda em termos de valor econômico devido à essa vaporização, caso não seja reaproveitada, em 2007, por exemplo, 3,3 MTPA¹⁰ do total de 165,3 MTPA comercializado foram perdidos pelo BOG, apenas durante o transporte. Essa perda corresponde a mais de 1,2 bilhões de dólares americanos (Lee et al, 2015).

⁹Unidade mássica utilizada pela indústria do GNL para quantidades comercializadas. *Millon metric tons per annum*.

¹⁰Disponível em: <http://www.liquefiedgascarrier.com/> Acessado em: 11 Mar 2016

2.4 Tipos de tanques de carga dos navios de GNL

2.4.1 Esférico

O tanque esférico foi desenvolvido com tecnologia Kværner Moss®, de propriedade da empresa norueguesa *Moss Maritime* e há mais de 110 navios hoje na frota com esse tipo de tanque (GIIGNL, 2016). A robustez e a simplicidade do formato esférico reduzem, consideravelmente, os problemas operacionais. Desde a introdução deste sistema de contenção no mercado em 1973, nunca houveram vazamentos ou defeitos nos *carriers*¹¹.

O material utilizado na construção do tanque é alumínio com uma espessura de parede entre 28 mm e 32 mm nos polos e 160 mm no anel equatorial¹² e cada tanque é revestido por uma camada de aço que protege contra intempéries climáticas. Como o tanque é isolado externamente, o BOR é facilmente ajustável de acordo com os requisitos do projeto. O material utilizado nesse isolamento térmico é a espuma de poliestireno com 220 mm de espessura¹³.

Devido aos diversos climas e elevados gradientes térmicos que o *carrier* passa durante as longas viagens transoceânicas, o tanque sofre expansão e contração térmicas de até 600 mm. Por conta desse movimento da estrutura, todas as bombas e dutos que fazem o carregamento e descarregamento de GNL são instalados no interior de uma torre central conectada ao polo superior, porém não ao inferior (Bai, 2015). Com isso, a integridade estrutural da esfera é mantida, e toda carga é transferida para uma saia cilíndrica metálica externa que se estende da linha do equador da esfera até a quilha do navio. A Fig. 12 ilustra sistema de contenção da *Moss* em corte.

¹¹Disponível em www.mossw.com. Acessado em: 25 Fev. 2016

¹²Disponível em www.wssc.com. Acessado em: 25 Fev. 2016

¹³Disponível em www.liquefiedgascarrier.com. Acessado em 25 Fev. 2016

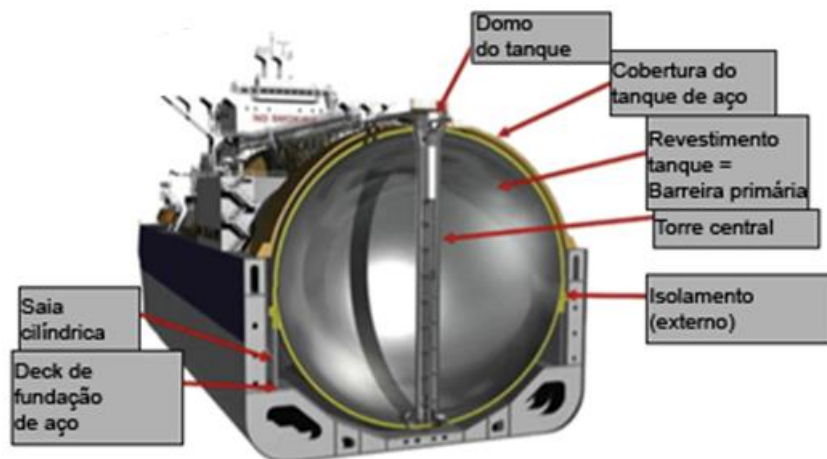


Fig. 12 – Tanque esférico com tecnologia Kværner Moss
Adaptado de: Moss Maritime (2016)

2.4.2 Prismático SPB

O sistema é construído com placas de alumínio ou aço Níquel 9 % e suportado por calços de madeira compensada, especialmente reforçada¹⁴. Internamente, o tanque é subdividido em 4 compartimentos por anteparas como apresentado na Fig. 13.

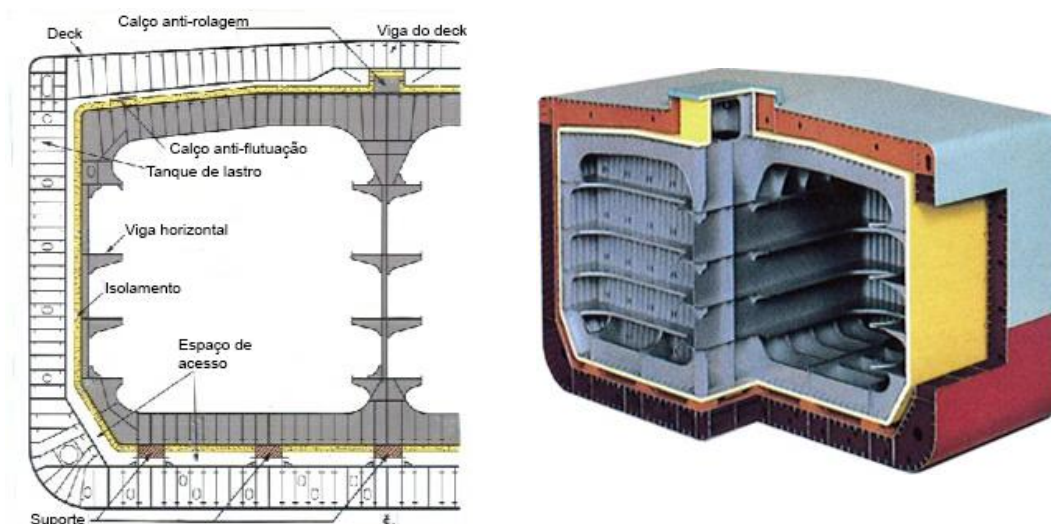


Fig. 13 – Secções do tanque prismático autoportante
Adaptado de: IHI (2016)

¹⁴Disponível em www.ihl.com.jp. Acessado em 26 Fev. 2016.

O *design* minimiza a interferência entre o movimento externo do navio e a frequência do movimento do líquido no interior do tanque, reduzindo os efeitos do *sloshing* e, conseqüentemente, a vaporização da carga (BOG). O isolamento térmico dos tanques da IHI consiste em painéis de espuma de poliuretano¹⁵

2.4.3 Membranas

2.4.3.1 GT Nº96 - Gaz Transport

Este tanque consiste em duas membranas de Invar (Liga com 36 % de Níquel) com espessura de 0,7 mm. Esta liga oferece coeficiente de contração térmico extremamente baixo, o que reduz substancialmente o *stress* térmico do tanque como um todo. A primeira membrana corresponde ao tanque de carga em si. Por sua vez, a segunda membrana garante a segurança do navio caso 100 % da carga vaze pela primeira membrana. As duas camadas de isolamento, descritas a seguir, suportam a segunda membrana¹⁶.

As camadas de isolamento primária e secundária consistem em caixas de compensado de 1 m x 1,2 m preenchidas com perlita expansiva e possuem 230 mm e 300 mm de espessura respectivamente cada isolamento. O espaço entre as camadas de isolamento é preenchido com nitrogênio e a integridade de ambas as camadas é permanentemente monitorada através da detecção de algum hidrocarboneto misturado ao gás¹⁶.

¹⁵Disponível em: <http://www.ihl.co.jp/offshore/whatisspb> Acessado em: 27 Fev. 2016

¹⁶Disponível em: <http://www.gtt.fr/en/technologies-services/our-technologies/no96>. Acessado em: 30 Mai. 2016

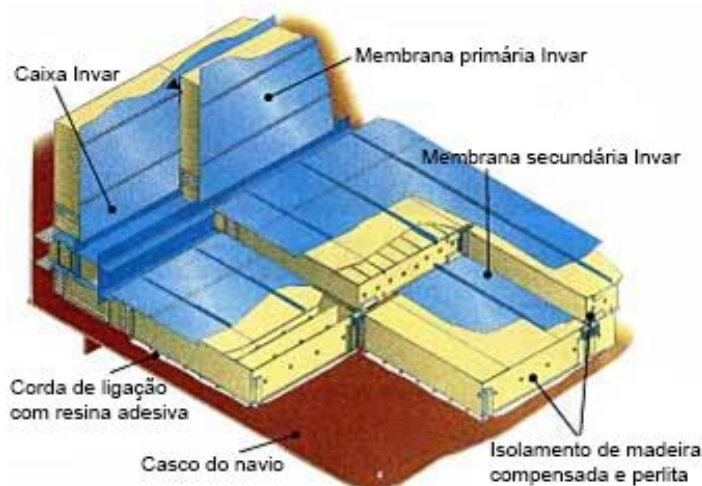


Fig. 14 – Representação da secção do tanque NO96 da empresa Gaz Transport¹⁷

2.4.3.2 TG Mark III – Technigaz

O sistema de contenção é diretamente suportado pelo casco interno do navio. A membrana primária é feita de aço inoxidável 304 L, com espessura de 1,2 mm, corrugado. A mesma membrana está em contato direto com a carga de GNL e é suportada e fixada diretamente no sistema de isolamento. As dimensões padrão para as placas corrugadas são de 3 m x 1 m ¹⁸.

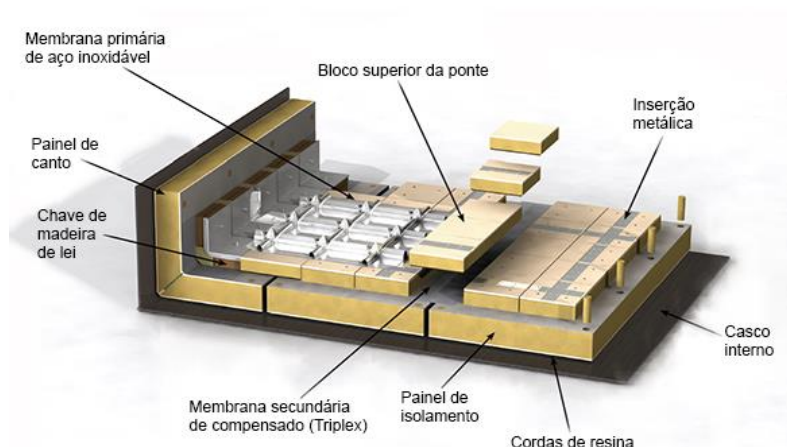


Fig. 15 - Representação da secção do tanque TG Mark III da empresa Technigaz²⁰

¹⁷Disponível em: http://www.twi-global.com/_resources/assets/inline/full/0/12896.jpg. Acessado em: 30 Mai. 2016

¹⁸Disponível em: <http://www.gtt.fr/en/technologies-services/our-technologies/mark-iii> Acessado em 30 Mai. 2016

²⁰Disponível em: <http://www.gtt.fr/en/technologies-services/our-technologies/mark-iii>. Acessado em: 14 jun. 2016

O padrão corrugado e ortogonal garante que a membrana acomode qualquer tipo de *stress* térmico ou deflexão do casco e que o limite do material não seja atingido, promovendo então uma vida extra à estrutura. Por causa do baixo *stress* na camada primária, painéis em L de espuma pré-fabricados podem ser utilizados para fixar a membrana ao casco, minimizando, assim, o fluxo térmico. A segunda membrana, por sua vez, é de *Triplex*, um material compósito laminado formado por uma fina lâmina de alumínio entre duas camadas de fibra de vidro e resina.

O isolamento consiste em painéis pré-fabricados em espumas de poliuretano reforçada incluindo, as camadas de isolamento primária e secundária e a segunda membrana. A espessura total do isolamento é de 270 mm. Os painéis são ligados ao casco interno por meio de 'cordas' de resina que servem também para distribuir homogeneamente as cargas estruturais.

2.4.3.3 CS1 – Gaztransport & Technigaz

O tanque de membrana dupla que adota tecnologia *CS1 System*, consiste na fusão da tecnologia *TGZ Mark III system*, desenvolvida pela *Technigaz* com a da *GT N°96 system*, desenvolvida pela *Gaz Transport*. A referida combinação trouxe redução de custos de construção de 15 %, além da possibilidade de construir navios dotados de maior capacidade de transporte (Gucma, 2013). O sistema por um lado utiliza uma espuma de poliuretano reforçada como isolamento e por outro, duas membranas, sendo a primeira de Invar, aço liga de alto teor de níquel, com espessura de parede de 0.7 mm (Chapot, 2002). Por sua vez, a segunda é constituída por *Triplex*. A Fig. 16 ilustra a secção desse tanque com essa tecnologia.

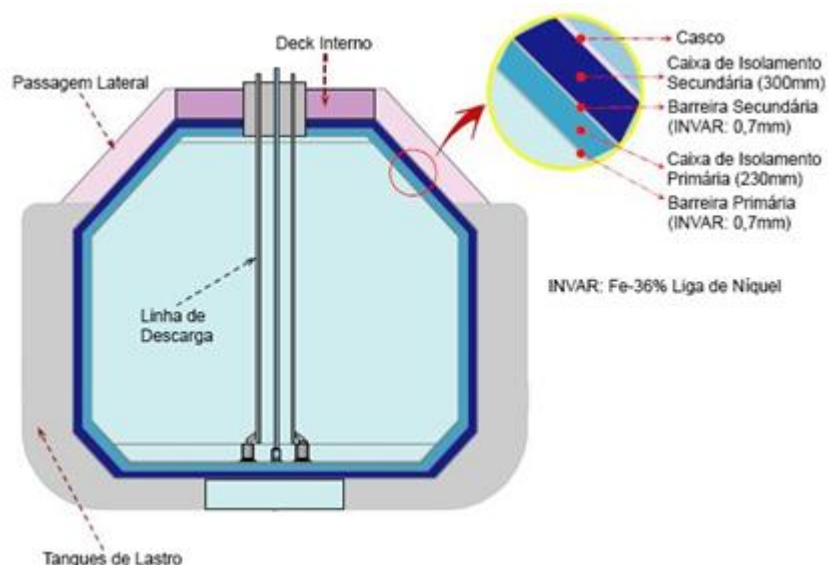


Fig. 16 – Secção do tanque de membrana CS1²¹

Devido a primeira membrana ser de Invar, a montagem do tanque possui ótimo custo benefício. As bordas das placas de Invar são soldadas graças a um robô automático que solda 1,7 m por minuto. Os painéis de isolamento mantêm as dimensões e características do sistema TG Mark III, 3 m x 1 m. Eles possuem alta resistência contra choques e, conseqüentemente, podem suportar o *sloshing* sem se danificar (Chapot, 2002).

2.5 Modelagem do BOR

O *boil-off gas* permeia todas as etapas da cadeia física do GNL, por isso seu estudo e entendimento faz-se necessário. As diversas composições de GN que existem pelo mundo, combinadas com 5 diferentes tipos de sistemas de contenção, nos mostram a quantidade de combinações, benéficas ou não, que podem existir no transporte transoceânico deste energético. Portanto, a seguir serão apresentados alguns modelos de vaporização presentes na literatura que abordam tal tema com diferentes complexidades e aplicabilidades.

²¹Disponível em: <http://www.liquefiedgascarrier.com>. Acessado em 27 Fev. 2016

3

Revisão bibliográfica

O modelo proposto por Zakaria et al (2012) utiliza o *software* ANSYS²² para modelar o tanque de carga com capacidade de 160.000 m³. As temperaturas do ar e do mar foram fixadas em 5 °C e 0 °C, respectivamente, e após a simulação de fluxo de calor utilizando ANSYS, concluiu-se que os dados obtidos estavam de acordo com as especificações da atual frota de navios GNL.

A empresa espanhola ENAGAS AS, juntamente com outras companhias, desenvolveram o MOLAS (2013), um código que permite prever a mudança da composição do GNL durante qualquer etapa da cadeia física. Este código é composto de duas modelagens: modelo físico, que se baseia no balanço de massa e equilíbrio de estado entre as fases líquida e vapor, e outro modelo baseado em redes neurais artificiais, levando-se em conta relações não lineares das variáveis, o que torna esta modelagem complexa para o presente trabalho. O programa MOLAS seria ideal para o melhor entendimento do fenômeno, pois vai ao encontro do que o presente trabalho propõe a apresentar.

Faruque et al (2009) simularam o BOR em 4 etapas da cadeia física: carregamento, viagem com navio carregado (*laden voyage*), descarregamento e viagem com tanques descarregados (*ballast voyage*). Diversos fatores são analisados como, por exemplo, quantidade de nitrogênio, pressão do tanque, temperatura ambiente, tempo de viagem, entre outros. Com os resultados, foi possível encontrar *heels* otimizados para vários cenários da viagem com o navio descarregado, minimizando, assim, pelo menos em teoria, os custos da etapa da cadeia.

²²Software de modelagem computacional de fluido. Disponível em: <http://www.ansys.com/>

Trabalho de Adom et al (2010) expõe como variações da pressão e calor afetam o BOG dos tanques. Os modelos empíricos Lee-Kesler-Plocker (LKP) e Benedict Webb Rubin Starling modificado (BWRS) foram utilizados para simular o fator de compressibilidade, entalpia e variação de calor em várias pressões. Pelo fato da modelagem se apoiar no modelo LKP, que não leva em consideração o efeito dos componentes do GNL, ela não se enquadra na proposta do presente projeto.

Dobrota et al (2013) descreve, de forma semelhante a Faruque (2009), o problema de *boil-off* nas diversas etapas da cadeia física do GNL, além dos métodos de manuseio e utilização do energético desde o carregamento até o descarregamento. Os tipos de GNL foram separados por densidades (Leve, Médio e Pesado) contemplando gama de composições ao redor do mundo e por isso foram utilizadas no modelo proposto. A equação da taxa de vaporização apresentada no *paper* também foi utilizada como base de conteúdo para o presente trabalho.

Dimopoulos e Frangopoulos (2008) desenvolveram modelo dinâmico detalhado, levando em conta, variação do fluxo de massa do BOG, composição e propriedades termodinâmicas durante o transporte. O modelo emprega duas equações termodinâmicas não-lineares de equilíbrio de fase e equações diferenciais de conservação, que descrevem a evolução da quantidade e da composição do GNL no tempo.

Wordu (2013) descreveu técnicas para estimar a geração de *boil-off* nos tanques de refrigeração das plantas de GNL. Foram consideradas trocas de calor nos tubos e bombas de circulação e carregamento, além da análise econômica para calcular a perda energética em cada etapa.

Gedde (2014) elaborou, em sua dissertação de mestrado, análise econômica focada no consumo de combustível. Para diferentes composições de

nitrogênio, ele encontrou variações no HHV (*Higher Heating Value*) que, por sua vez, implicam em mudanças no consumo de combustível e, conseqüentemente, numa redução de gastos. A análise da composição do GNL e do BOG durante o transporte, mostrando como as composições variam, auxiliaria caso fosse assumido mais elementos além de metano e nitrogênio.

Miana et al (2015) simularam o fluxo de calor em modelagens 2D e 3D do sistema de contenção de membranas TG Mark III, variando a espessura do isolamento. Concluiu que, com aumento de 270 mm para 670 mm de espessura, o BOR decresce de 0,0945 %V/dia²³ para 0,0631, diminuindo a formação de BOG e garantindo mais confiabilidade ao sistema.

²³Porcentagem de volume evaporado por dia

4

Modelagem da taxa de vaporização (BOR)

4.1 Abrangência

O objetivo do modelo proposto é simular, durante o período de 30 dias, como a taxa de vaporização varia de acordo com a composição do GNL carregado no *carrier*, e com a geometria do tanque do navio. A equação que fornece o BOR é dada por Dobrota (2013):

$$\text{BOR} = \frac{3600 \dot{Q} 24}{\Delta L V_{\text{GNL}} \rho_{\text{GNL}}} \quad (1)$$

A taxa de transferência de calor utilizada na Eq. (1) corresponde ao calor trocado entre o ambiente e o GNL, que atravessa as laterais e a quilha do navio. Assumiu-se que espaço entre os costados interno e externo corresponde à um sistema global de troca de calor, que é influenciado pela, conseqüentemente, pelo BOR. A taxa de transferência de calor é modelada por:

$$\dot{Q} = U A \Delta T \quad (2)$$

4.2. Premissas e hipóteses simplificadoras

Algumas premissas e hipóteses simplificadoras são utilizadas para delimitar o problema em questão.

- (1) Todo o calor que atravessa as paredes laterais e a quilha do navio é utilizado exclusivamente para aquecer o GNL e, conseqüentemente, provocar o *boil-off*,

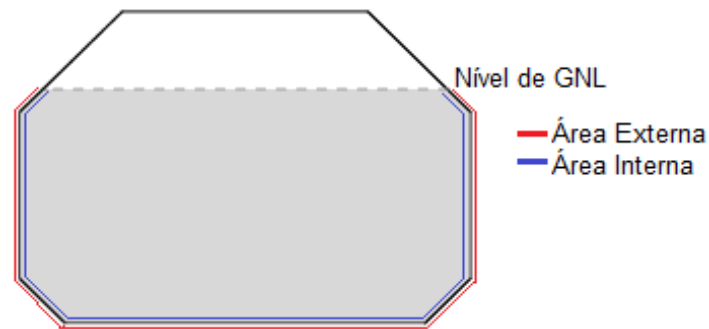


Figura 17 – Representação das áreas de troca de calor

- (2) Foi considerado apenas ar, auxiliando dessa forma o cálculo do coeficiente global de troca de calor, como meio externo ao tanque;
- (3) No que concerne ao ambiente, a temperatura dia a dia durante o transporte da carga foi discretizada por cidades ao longo da rota escolhida;
- (4) A temperatura e a densidade do GNL foram consideradas constantes;
- (5) A temperatura do GNL varia no máximo 3 % em relação à temperatura no início da viagem, o que torna plausível considerá-la como constante, tendo sido considerado o valor de $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (6) A densidade do GNL, foi mantida constante devido à dificuldade de se calcular a parcela de cada elemento que evaporava, o que tornaria o modelo muito mais complexo e mais longo, fugindo ao escopo do presente trabalho;

- (7) Os principais sistemas de contenção considerados no modelo foram o de membranas e o esférico, dado que correspondem a mais do que 90 % do total da frota atual em 2015 de 449 navios metaneiros;
- (8) O navio com sistema de membrana é dotado de 5 tanques e o navio de geometria esférica possui, 4 tanques.

4.3 Cálculo das variáveis do modelo

4.3.1 Volume

No dimensionamento do tanque esférico, foram utilizadas as dimensões presentes no *paper* de Rogers e Cox (1998), a saber:

$$D_{\text{esf}} = 40,1 \text{ m}$$

$$V_c = 135.000 \text{ m}^3$$

Como V_c é o volume total do *carrier* que possui 4 tanques, logo:

$$V_{\text{esf}} = \frac{135.000}{4} = 33.750 \text{ m}^3$$

Nenhum tanque é carregado em sua capacidade máxima em função da vaporização do energético. Este volume vazio é o que garante a integridade estrutural do tanque e do navio como um todo. O tanque esférico devido à sua geometria, permite ocupar até 98 % do volume de GNL em seu interior, tal que o diâmetro da esfera, 40,1 m, corresponde a 100 % do volume.

Para o cálculo do volume real de GNL no início da viagem exclui-se o volume da calota esférica do volume total do tanque. Para isso, precisou-se obter algumas dimensões extras, ilustradas na Fig. 18.

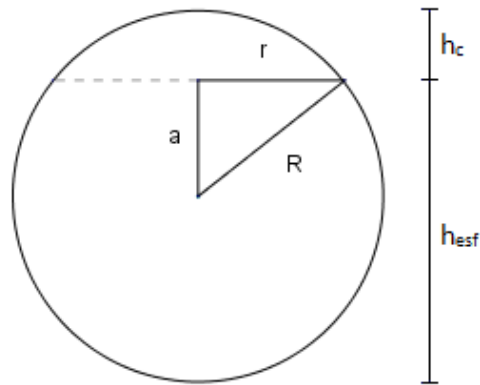


Fig. 18 – Representação do tanque e suas dimensões principais

$$\begin{aligned} h_{\text{esf}} &= 0,98 D_{\text{esf}} \\ h_{\text{esf}} &= 36,7 \text{ m} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} h_c &= D_{\text{esf}} - h_{\text{esf}} \\ h_c &= 3,37 \text{ m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a &= R - h \\ a &= 16,68 \text{ m} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R^2 &= a^2 + r^2 \\ r &= \sqrt{R^2 - a^2} \\ r &= 11,13 \text{ m} \end{aligned} \quad (6)$$

O volume da calota fica:

$$V_{\text{calota}} = \frac{\pi h_c}{6} (3r^2 + h_c^2) \quad (7)$$

$$V_{\text{calota}} = 674,04 \text{ m}^3$$

Logo o volume de GNL inicialmente carregado é:

$$\begin{aligned} V_{\text{GNLesf}} &= V_{\text{tesf}} - V_{\text{calota}} \\ V_{\text{GNLesf}} &= 33.076 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (8)$$

No dimensionamento do tanque de membrana, o volume do navio utilizado para o cálculo é o mesmo apresentado no modelo proposto por Zakaria (2012),

ou seja, 150.000 m³, sendo dividido em 4 tanques com dimensões conforme a Fig. 19:

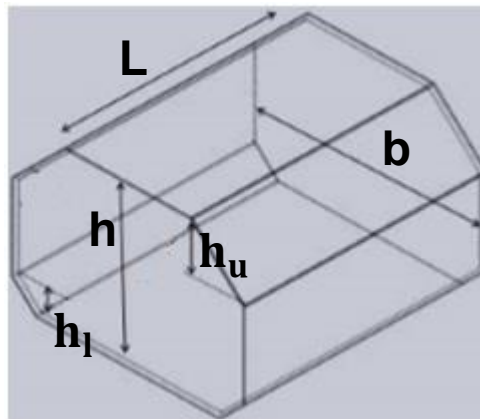


Fig. 19: Principais dimensões e geometria do tanque de membrana
Fonte: Zakaria (2012)

$$\begin{aligned} L &= 43,72 \text{ m} \\ b &= 37,90 \text{ m} \\ h &= 26,75 \text{ m} \\ h_u &= 8,63 \text{ m} \\ h_l &= 3,77 \text{ m} \end{aligned}$$

Para calcular o volume deste tipo de tanque foi necessário dimensionar a área da seção em corte, apresentada na Fig. 20, e então multiplicar pelo comprimento L:

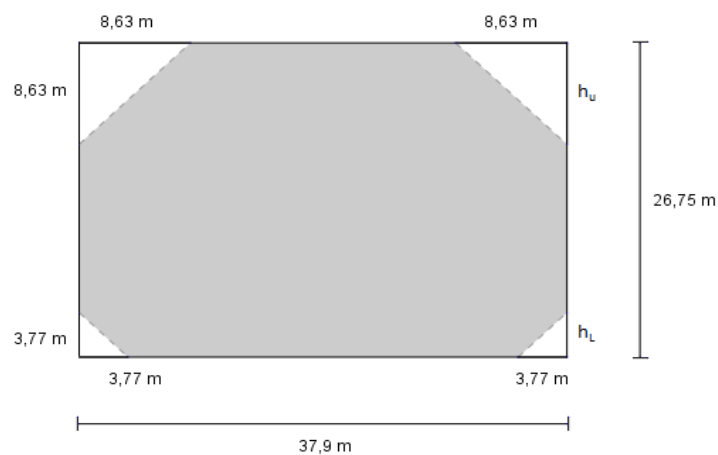


Fig. 20: Área da seção reta do tanque de membranas

$$\begin{aligned} A_{\text{secmem}} &= (h b) - (h_u^2) - (h_l^2) \\ A_{\text{secmem}} &= 925,14 \text{ m}^2 \end{aligned} \tag{9}$$

Multiplicando-se pelo comprimento L, calcula-se o volume total do tanque de membrana:

$$\begin{aligned} V_{\text{mem}} &= A_{\text{secmem}} L \\ V_{\text{mem}} &= 40.447 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (10)$$

No entanto, como ocorre no tanque esférico, há um limite em m³ de GNL a ser transportado por tanque. O nível mínimo para a viagem de ida, ou seja, carregado (*laden*) é 75 % em relação à altura (Foss, 2012). Já durante o transporte de volta, com o navio descarregado (*ballast*), o nível máximo aceitável é 15 %. Modelando-se para a viagem de ida, usa-se 75 % do nível.

A nova altura para o cálculo do volume real de GNL é:

$$\begin{aligned} h_{\text{mem}} &= 0,75 h \\ h_{\text{mem}} &= 20,07 \text{ m} \end{aligned} \quad (11)$$

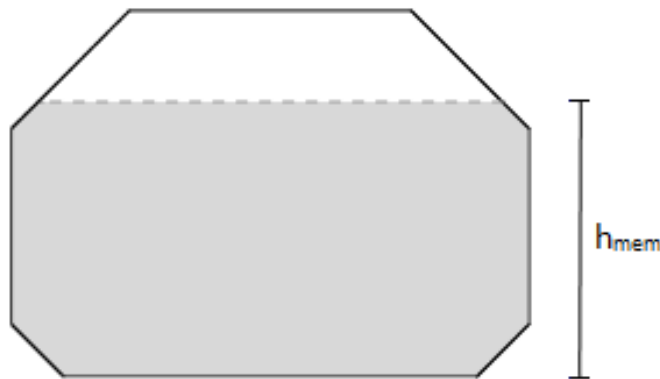


Fig. 21: Representação da altura do nível de GNL (75%)

Com a nova altura, recalcula-se a área de seção reta do tanque:

$$\begin{aligned} A_{\text{secmem}} &= (h_{\text{mem}} b) - (s^2) - (h_L^2) \\ A_{\text{secmem}} &= 742,39 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Multiplicando-se pelo comprimento do tanque, tem-se o volume real de GNL presente no início da viagem:

$$V_{\text{GNLmem}} = 742,39 \cdot 43,72 = 32457,3 \text{ m}^3$$

4.2.2 Áreas de troca de calor

A área onde ocorre a troca de calor entre GNL e ambiente é aquela em que o energético estiver em contato com o costado interno do tanque. Calcula-se a área do tanque esférico com as Eqs. (13) e (14):

$$A_{\text{esf}} = 4 \pi R^2 \quad (13)$$

$$A_{\text{calota}} = 2 \pi R h_c \quad (14)$$

Introduz-se os valores do raio R e da altura h_c , já determinados, nas Eqs 13 e 14, obtendo-se:

$$\begin{aligned} A_{\text{esf}} &= 5051,71 \text{ m}^2 \\ A_{\text{calota}} &= 424,54 \text{ m}^2 \\ A_{\text{GNLesf}} &= A_{\text{esf}} - A_{\text{calota}} \\ A_{\text{GNLesf}} &= 4627,17 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Para o tanque de membrana também deve-se considerar a área que está em contato com o GNL, porém por possuir chanfros tanto na parte superior quanto inferior, os cálculos requerem detalhes adicionais, por meio de vistas de seção reta e lateral, apresentadas abaixo:

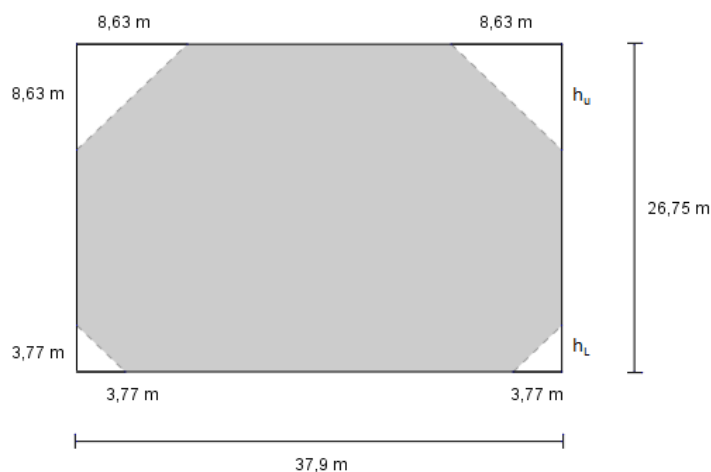


Fig. 22 – Vista de seção ilustrando os chanfros

Como a área frontal já foi calculada, multiplica-se por dois, pois deverão ser consideradas ambas as seções do tanque.

$$A_{\text{TOTALsecmem}} = 2 \cdot 742,39 = 1484,78 \text{ m}^2$$



Fig. 23 – Vista Lateral

$$A_{\text{lateralmem}} = 14,35 \cdot 43,72 = 627,38 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{TOTALlateralmem}} = 2 A_{\text{lateralmem}} = 1254,76 \text{ m}^2$$

A área do GNL em contato com os chanfros, é calculada considerando as hipotenusas do triângulo que chanfros formam, tal que:

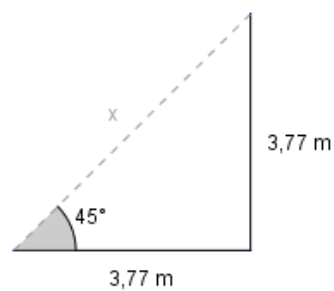


Fig. 24 – Chanfro Inferior

$$\text{sen}45^\circ = \frac{3,77}{x}$$

$$x = \frac{3,77}{0,707} = 5,33 \text{ m}$$

$$A_{\text{chi}} = 5,33 \cdot 43,72 = 233,03 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{TOTALchi}} = 2 A_{\text{chi}} = 466,06 \text{ m}^2$$

Devemos lembrar que a área do chanfro superior é modificada dependendo do nível de GNL, já que a hipotenusa varia. Então, já considerando o nível de GNL de 75 %, temos:

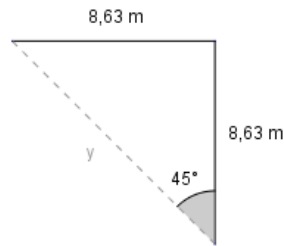


Fig. 25 – Chanfro Superior

$$\begin{aligned}\sin 45^\circ &= \frac{1,9425}{x} \\ x &= \frac{1,9425}{0,707} = 2,74 \text{ m} \\ A_{\text{chs}} &= 2,74 \cdot 43,72 = 119,8 \text{ m}^2 \\ A_{\text{TOTALchs}} &= 2 \cdot A_{\text{chs}} = 239,6 \text{ m}^2\end{aligned}$$

Por fim, o calor também é trocado através do piso do tanque, no entanto nem toda largura b é considerada para o cálculo desta área, já que existem os chanfros inferiores, como pode ser observado na Fig. 26:

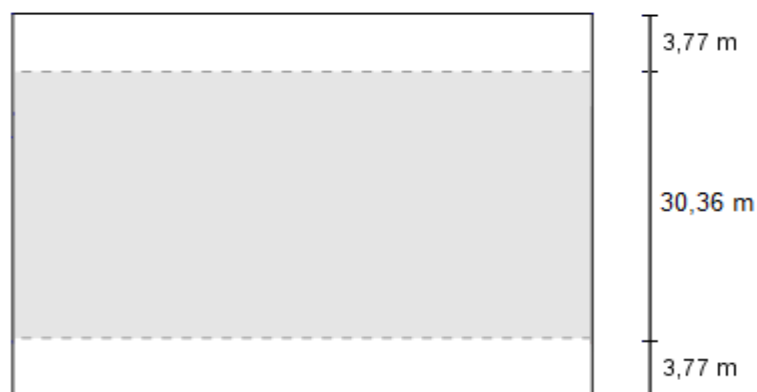


Fig. 26 – Vista Inferior

$$A_{\text{piso}} = (37,9 - (2 \cdot 3,77)) \cdot 43,72 = 1327,34 \text{ m}^2$$

Com todas as áreas de troca de calor do tanque de membrana determinadas, somam-se todas para saber qual a área total que será utilizada no cálculo da vaporização.

$$A_{\text{GNLmem}} = 4772,54 \text{ m}^2$$

4.2.3 Coeficiente Global de Transferência de Calor

O coeficiente global de troca de calor, U , é calculado como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_2} \quad (16)$$

Tabelas 3 e 4 mostram os valores das variáveis que diferenciam os tanques:

Tabela 3 – Tanque de membranas

Variável	Valor	Unidade
h_1 (ar)	20	W/m^2K
h_2 (GNL)	3000	
k	0,0605	W/mK
x	0,53	m
U_m	0,1135	W/m^2K
A_{GNLmem}	4772,54	m^2

Tabela 4 – Tanque Esférico

Variável	Valor	Unidade
h_1 (ar)	20	W/m^2K
h_2 (GNL)	3000	
K^{24}	0,036	W/mK
X^{25}	0,25	m
U_e	0,1430	W/m^2K
A_{GNLesf}	4627,17	m^2

4.2.4 Temperaturas

A temperatura ambiente é fator de extrema importância durante a viagem transoceânica do energético criogênico. Para ilustrar, simulou-se uma viagem de 1 mês desde Doha, Catar até Kagoshima, Japão, passando por 4 portos de regasificação conforme Fig. 27:



Fig. 27 – Rota Marítima modelada

^{24,25} Disponíveis em: www.isgintt.org/files/documents/Chapter_33en_isgintt_062010.pdf Acessado em 20 Jun. 2016 e www.liquefiedgascarrier.com Acessado em: 15 Jun. 2016

Mesmo no trajeto de terminais de regasificação, não houve qualquer carregamento ou descarregamento.

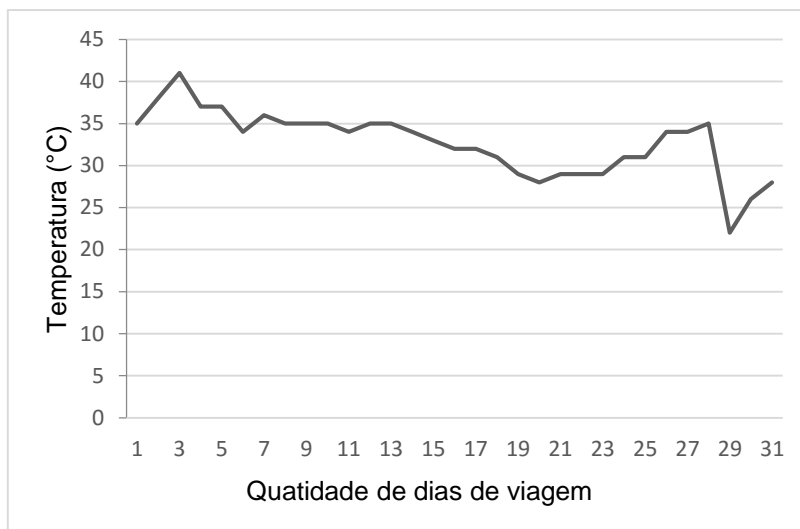


Fig. 28 – Variação diária da temperatura média ambiente no decorrer da viagem

A temperatura da carga de GNL é considerada $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$ e constante durante toda a viagem. Para obter o calor transferido diariamente para o energético, calcula-se a diferença de temperatura (ΔT) entre o GNL²⁶ e o ambiente para cada dia e o resultado aplica-se na Eq. 2, resultando nos valores de calor, conforme Tabela 5:

Tabela 5 – Taxa de transferência de calor de ambos os tanques

Cidade	Dia	Temperatura média ambiente ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT ($^{\circ}\text{C}$)	Calor Trocado Membrana (W)	Calor Trocado Esférico (W)
Doha, Catar	1	35	-198	-107252	-130981
	2	38	-201	-108877	-132965
	3	41	-204	-110502	-134950
	4	37	-200	-108336	-132304
	5	37	-200	-108336	-132304
Cochin, Índia	6	34	-197	-106711	-130319
	7	36	-199	-107794	-131642
	8	35	-198	-107252	-130981
	9	35	-198	-107252	-130981
	10	35	-198	-107252	-130981
	11	34	-197	-106711	-130319
	12	35	-198	-107252	-130981
	13	35	-198	-107252	-130981

²⁶Disponível em: <http://www.accuweather.com/> Acesso 20 Jun. 2016

Tabela 5 – Taxa de transferência de calor de ambos os tanques (cont.)

Malaca, Malásia	14	34	-197	-106711	-130319
	15	33	-196	-106169	-129657
	16	32	-195	-105627	-128996
	17	32	-195	-105627	-128996
	18	31	-194	-105085	-128334
Sanya, China (Hínam)	19	29	-192	-104002	-127011
	20	28	-191	-103460	-126350
	21	29	-192	-104002	-127011
	22	29	-192	-104002	-127011
	23	29	-192	-104002	-127011
Taichung, Taiwan	24	31	-194	-105085	-128334
	25	31	-194	-105085	-128334
	26	34	-197	-106711	-130319
	27	34	-197	-106711	-130319
	28	35	-198	-107252	-130981
Kagoshima, Japão	29	22	-185	-100210	-122381
	30	26	-189	-102377	-125027
	31	28	-191	-103460	-126350

4.2.5 Densidade do GNL

A densidade depende da composição do GN. ... Inicialmente, foi previsto a utilização das composições dos 6 maiores exportadores de GNL para o cálculo da densidade. No entanto, um dos dados de entrada no programa REFPROP²⁹ é a densidade média do sistema simulado, já que existem duas fases em equilíbrio. Como não possível obter na literatura as densidades das fases para o cálculo da densidade média dos tipos de GNL mais exportados, foram selecionadas 3 composições médias (Dobrota, 2013), conforme Tabela 6, que abrangem, de maneira significativa, os valores reais.

²⁹Programa de análise e simulação termodinâmica

Tabela 6 – Tipos de GNL modelados

Composição (% em volume)	GNL “leve”	GNL “Médio”	GNL “Pesado”
Metano	98,0	92,0	87,0
Etano	1,4	6,0	9,5
Propano	0,4	1,0	2,5
Butano	0,1	0,0	0,5
Nitrogênio	0,1	1,0	0,5
Densidade (kg/m ³)	427,74	445,69	464,83

Duas premissas foram utilizadas para obtenção da densidade média de cada GNL:

- $\rho_v \ll \rho_L$
- $m_L \gg m_v$

Dessa forma tem-se,

$$m_{\text{total}} \approx m_L$$

E sabendo que

$$\rho = \frac{1}{v}$$

(17)

$$V_l = V_{\text{total}} (1 - \alpha) \quad (18)$$

$$\rho_l = \frac{m_l}{V_l} \quad (19)$$

Então,

$$\rho_{\text{média}} = \frac{m_{\text{total}}}{V_{\text{total}}} = \frac{m_l}{\frac{V_l}{(1-\alpha)}} = \frac{m_l (1-\alpha)}{V_l} = \rho_l (1-\alpha) \quad (21)$$

Calcula-se com a Eq. (21) a densidade média de cada GNL como pode ser observado na Tabela 7:

Tabela 7 – Densidade média por tipo de GNL

	GNL “leve”	GNL “médio”	GNL “pesado”
Densidade média (kg/m ³)	320	334	348

4.2.6 Entalpia

O valor da entalpia varia com a composição e foi calculada conforme a Eq. (22):

$$\Delta L = L_v - L_l \quad (22)$$

As entalpias da fase líquida e vapor são obtidas pelo REFPROP. Os valores serão apresentados durante a aplicação da modelagem.

4.2.7 Metodologia da modelagem

O cálculo se inicia selecionando tipo de tanque e GNL que se deseja simular. Introduzindo a densidade média do GNL e ajustando pressão atmosférica, obtêm-se as entalpias da fase líquida e vapor necessárias para Eq. (1). A taxa de transferência de calor é obtida a partir da Eq (2), e o volume inicial e densidade da fase líquida também já são variáveis conhecidas, com isso:

$$BOR_i = \frac{Q_i}{\Delta L V_i \rho_L}$$

$$V_{i+1} = V_i \left(1 - \frac{BOR_i}{100}\right)$$

Variando o i de 1 a 31, obtêm-se as taxas de vaporização diárias e, conseqüentemente, BOR médio para cada combinação de tanque e GNL.

5

Aplicação da modelagem desenvolvida

São considerados 2 navios: um com 4 tanques esféricos de 33.750 m³ cada, e outro com 5 tanques de membrana com capacidade individual de 37.500 m³. Os tipos de GNL variam de acordo com a densidade média. O GNL “leve” possui 426,1 kg/m³, o “médio” 437,99 kg/m³ e o “pesado” com 442,78 kg/m³.

No REFPROP, foram criadas misturas com as mesmas composições de cada GNL. Em sequência, foram selecionadas uma delas para iniciar a simulação. Foram definidas também a pressão atmosférica, 0,1MPa e a densidade média relativa ao GNL escolhido. Com isso, criou-se planilhas para cada caso e foram gerados os gráficos.

Além do BOR, foi analisado o quanto se perde em US\$ em relação ao volume de GNL evaporado por dia, supondo a não reutilização desse energético. A última cotação do preço de importação do GNL no Japão foi US\$ 7²⁷ por 1 MMBtu²⁸ e cada tonelada de GNL corresponde, em termos energéticos, a 52MMBtu.

²⁷Disponível em: https://ycharts.com/indicators/japan_liquefied_natural_gas_import_price_. Acessado em 19 Jun. 2016

²⁸Disponível em: <http://www.lngplants.com/conversiontables.html> Acessado em 19 Jun. 2016

5.1 Tanque de Membrana com GNL “leve”

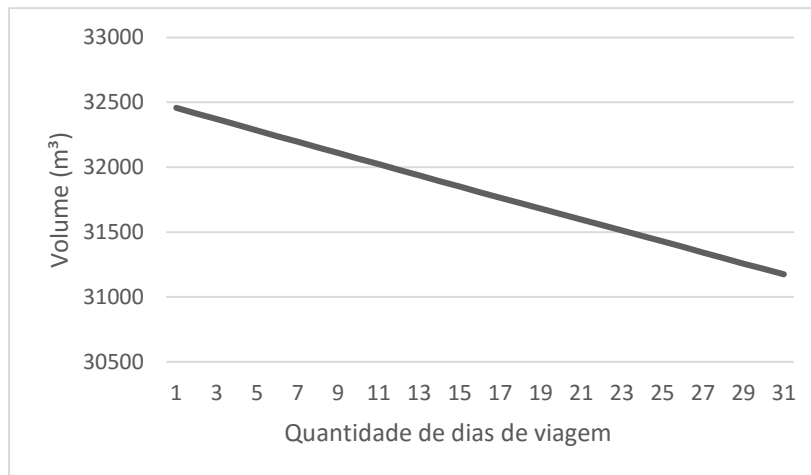


Fig. 29 – Volume diário de GNL na fase líquida

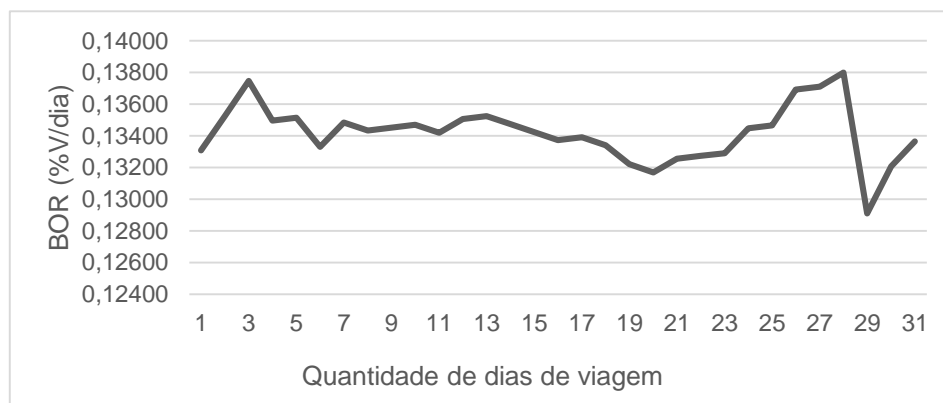


Fig. 30 – BOR diário

O volume de GNL evaporado por tanque foi de 1.281 m³, ou seja, o volume inicialmente carregado no porto de origem subtraído do volume final ao chegar no porto destino. O volume evaporado corresponde a 545,8 t que, em termos econômicos, caso não seja reaproveitado como combustível, por exemplo, pode gerar um prejuízo de cerca de U\$ 200,000.00. Considerando os 5 tanques do navio, o valor total é de cerca de U\$ 1,000,000.00. Já o BOR médio da viagem foi de 0,1342 %V/dia, sendo coerente com o intervalo de 0,10 até 0,15 %V/dia previsto por Dobrota (2013).

A taxa de vaporização é diretamente proporcional à diferença de temperatura do meio externo e do GNL. Assim, como o navio viaja do Oriente Médio, região com temperaturas mais elevadas, para o Japão, onde as

temperaturas são amenas, essa taxa, como pode ser observado nas demais simulações, é decrescente. Os picos e vales mais acentuados condizem, respectivamente, com temperaturas mais e menos elevadas do que o habitual da amostra.

5.2 Tanque de Membrana com GNL “médio”

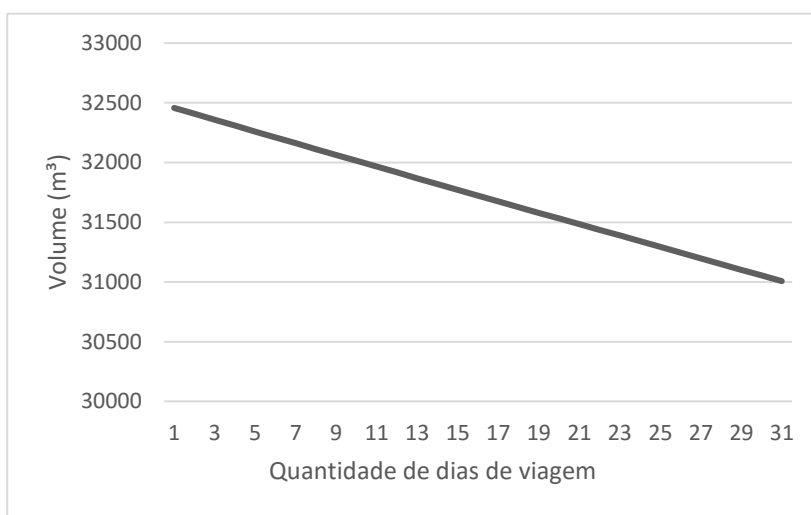


Fig. 31 – Volume diário de GNL na fase líquida



Fig. 32 – BOR diário

Nessa segunda simulação, o volume de GNL evaporado corresponde a 1.449 m³, o que representa em termos econômicos, cerca de U\$ 231,000.00 por tanque e um valor total por navio de U\$ 1,155,000.00. O BOR médio foi de 0,1522 %V/dia e condiz com o intervalo de 0,1 até 0,15 %V/dia previsto por Dobrota (2013).

5.3 Tanque de Membrana com GNL “pesado”

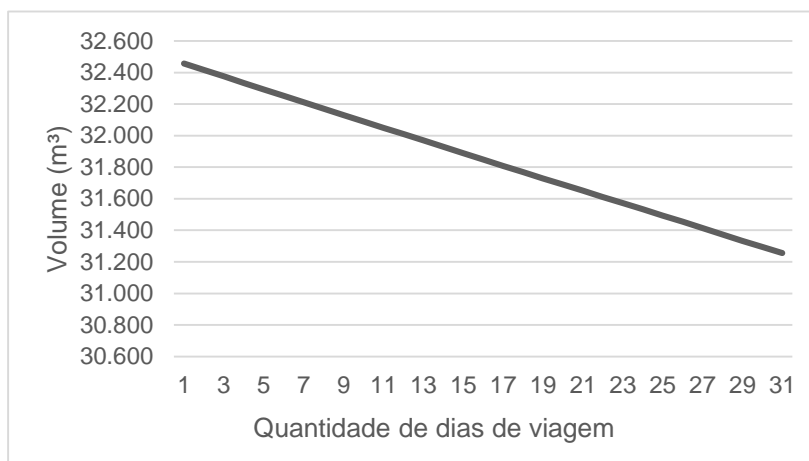


Fig. 33 – Volume diário de GNL na fase líquida



Fig. 34 – BOR diário

O volume evaporado nesta terceira simulação foi de 1.201 m³, em termos econômicos corresponde aproximadamente a U\$ 194,000.00 por tanque. Como são 5 tanques no navio, o valor totaliza cerca de U\$ 970,000.00. O BOR médio foi o mais baixo dos 3 tipos de GNL, para o tanque de membranas, tendo um valor de 0,1256 %V/dia.

5.4 Tanque esférico com GNL “leve”

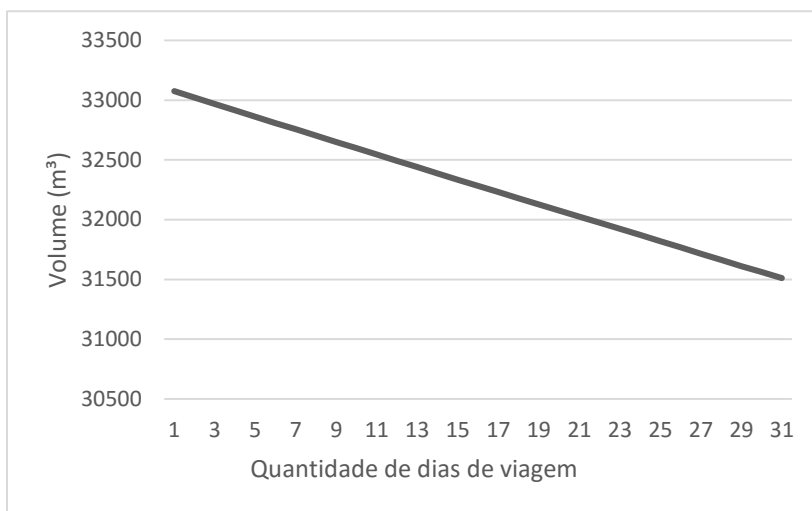


Fig. 35 – Volume de GNL na fase líquida

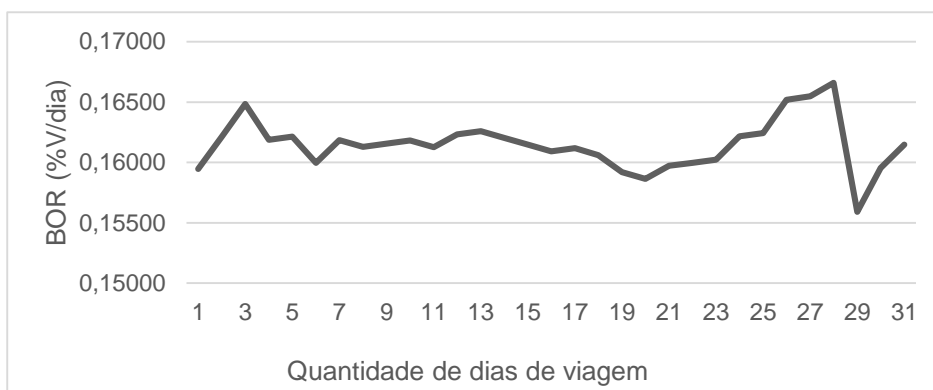


Fig. 36 – BOR diário

Na primeira simulação do tanque esférico, o volume evaporado foi de 1.565 m³, o que corresponde em termos econômicos, cerca de U\$ 242,700.00 cada tanque. Como são 4 tanques esféricos no navio simulado, o valor total do energético evaporado é cerca de U\$ 970,800.00. O BOR médio ficou próximo do intervalo esperado, com um valor de 0,1615 %V/dia.

5.5 Tanque esférico com GNL “médio”

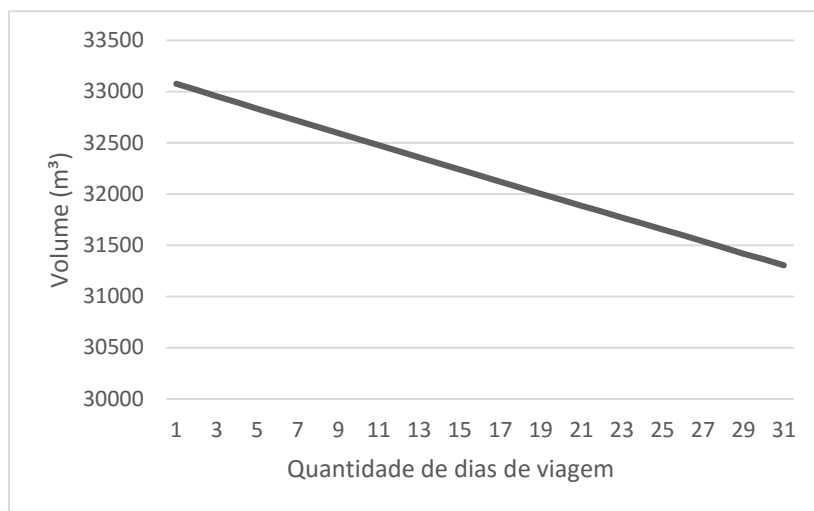


Fig. 37 – Volume de GNL na fase líquida

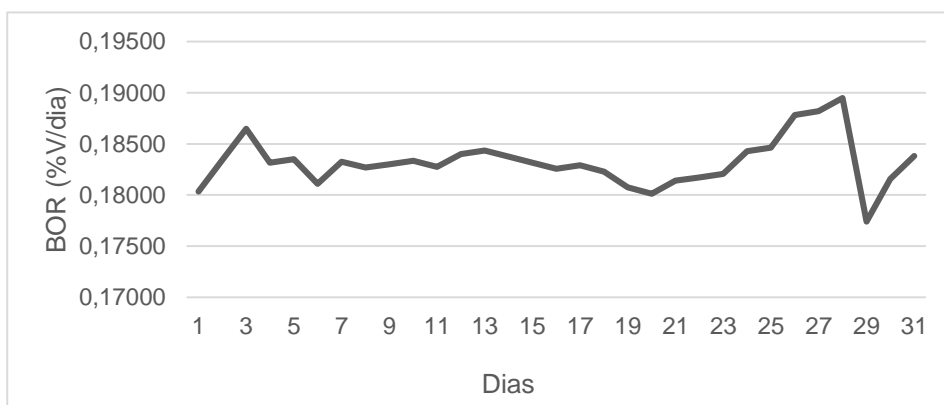


Fig. 38 – BOR diário

A evaporação da segunda simulação foi a maior dentre as seis, gerando volume do BOG igual a 1.770 m³. Isso corresponde, em termos econômicos, cerca de U\$ 282,200.00 por tanque. Já considerando o navio, o valor total é de cerca de U\$ 1,130,000.00. A taxa de vaporização, consequentemente, foi a mais elevada, chegando ao valor médio de 0,1832 %V/dia.

5.6 Tanque esférico com GNL “pesado”

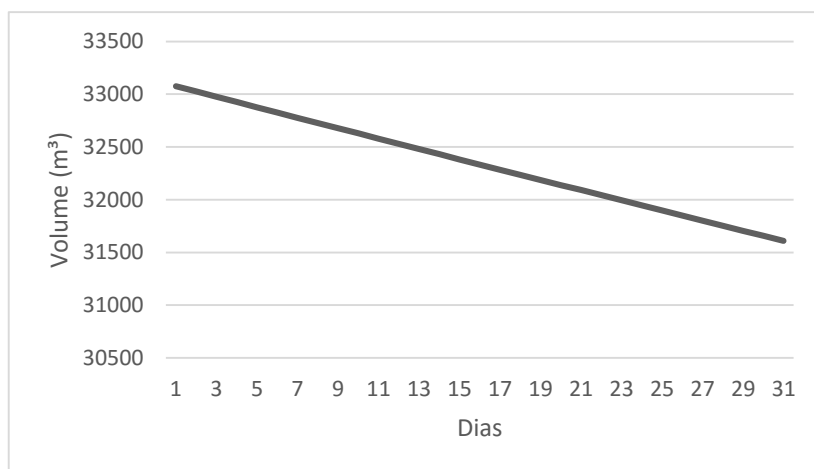


Fig. 39 – Volume de GNL na fase líquida

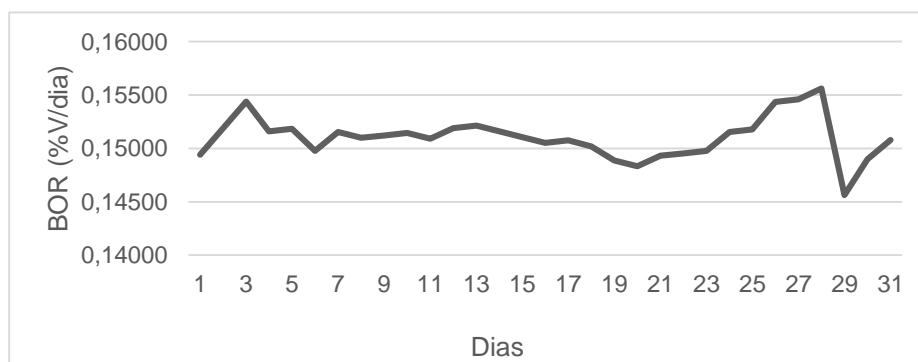


Fig. 40 – BOR diário

O volume evaporado durante a última simulação foi de 1.466 m³ e isso corresponde a aproximadamente U\$ 236,300.00 por tanque e U\$ 945,200.00 por navio. O BOR médio ficou bem próximo do intervalo previsto, com o valor de 0,1510 %V/dia.

5.7 Consolidação dos resultados

Tabela 8 – BOR e Valor do volume evaporado

Simulações	BOR (%V/dia)	Valor do GNL evaporado por navio (em U\$)
Tanque de membranas com GNL “leve”	0,1342	1,000,000.00
Tanque de membranas com GNL “médio”	0,1522	1,155,000.00
Tanque de membranas com GNL “pesado”	0,1256	970,000.00
Tanque esférico com GNL “leve”	0,1615	970,800.00
Tanque esférico com GNL “médio”	0,1832	1,130,000.00
Tanque esférico com GNL “pesado”	0,1510	945,200.00

Os resultados mostram que as taxas de vaporização encontradas estão coerentes com o intervalo de 0,1 a 0,15 %V/dia (Dobrota, 2013). O GNL “médio” requer maior cuidado, pois gera o maior prejuízo em ambos os tanques. A utilização de navios com isolamento melhores é crucial para transportá-lo. O transporte do GNL “pesado” deve prevalecer em tanques de membranas, pois a taxa de vaporização é a menor, mesmo que o valor do evaporado seja ligeiramente maior. Os valores expressivos do prejuízo que se pode ter, caso não haja controle deste gás, mostram a importância de estudos sobre tema. Simulando esta viagem para toda frota atual (2015) de metaneiros, que é de 449, obtêm-se, aproximadamente, U\$ 470,000,000.00 de prejuízo, caso o volume evaporado não seja reaproveitado, por exemplo, como combustível para propulsão do *carrier* ou reliquefação do inventário evaporado.

6

Conclusões e trabalhos futuros

Os resultados obtidos foram satisfatórios visto que estão próximos dos obtidos na literatura. Além disso, o elevado valor econômico médio do volume evaporado, supondo que toda frota tenha feito a viagem simulada e a não reutilização do BOG, de quase meio bilhão de dólares americanos nos faz refletir sobre a importância dos estudos a respeito do *boil-off*. Não é sem motivo que o GIIGNL e a maior associação de transporte marítimo, BIMCO³⁰ (*International Shipping Association*), se associaram em 2016 para discutir sobre como lidar com o *boil-off* durante a viagem transocêânica.

Para trabalhos futuros, é interessante considerar a geometria do tanque SPB prismático IHI, utilizar valores reais de composições, ao invés de valores médios obtidos na literatura para diminuir então as incertezas, além de obter valores da entalpia a partir do diagrama de fase P-h pelo programa REFPROP. Outra vertente, é utilizar mais rotas marítimas, como as polares, ao invés da rota subtropical proposta no presente trabalho.

³⁰Disponível em: https://www.bimco.org/News/2016/04/06_LNGVOY_launched Acessado em: 27 Jun. 2016

7

Referências

18th International Ship and Offshore Structures Congress (ISSC 2012) - W. Fricke, R. Bronsart (Eds.) © 2012 Schiffbautechnische Gesellschaft, Hamburg, ISBN 978-3-87700-131-{5,8}

ADOM, Ebenezer et al. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. **International Journal Of Engineering And Technology**. Aberdeen, p. 292-296. jun. 2010.

Arjomandnia, Pooya. **Simulation of rollover in stratified LNG storage tanks**. 2010

BAI, Yong; JIN, Wei-liang. **Marine Structural Design**. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2015.

CHAPOT, M.K. **CS1 New Containment System for LNG carriers**. GASTECH, Brest, França, 2002.

DIMOPOULOS, George G.; FRANGOPOULOS, Christos A.. A Dynamic Model for Liquefied Natural Gas Evaporation During Marine Transportation. **Int. J. Of Thermodynamics**. Atenas, p. 123-131. set. 2008.

DOBROTA, Đ.; LALIĆ, B.; KOMAR, I. Problem of Boil-Off in LNG Supply Chain. *Transactions on Maritime Science*, Split, Croácia, v.2, n.1, out. 2013.

Esteves, A.S. **Modelagem Matemática de Derrames Criogênicos e de Incêndios em Poça no Transporte Marítimo de Gás Natural Liquefeito (GNL)**. Rio de Janeiro, 2010, 59 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do rio de Janeiro.

Esteves, A.S.; Parise, J.A.R.. Transporte Transoceânico de GNL: Revisão Atual e Inovações Tecnológicas. 2016. Disponível em http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=25944@1

Foss M. M. LNG safety and security. CEE - Energy Economics Research. The University of Texas at Austin, 2012

GEDDE, S. T. Contractual and Economical Consequences of LNG Boil-Off Quality. Master Thesis em Marine Technology na Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Noruega, jun. 2014.

GÓMEZ, J.romero. Analysis and efficiency enhancement of a boil-ff gas reliquefaction system with cascade cycle on board LNG carriers. **Energy Conversion And Management**. Coruna, p. 261-274. fev. 2015.

GROUPE INTERNATIONAL DES IMPORTATEURS DE GAZ NATUREL LIQUÉFIÉ, 2014, Neuilly Sur Seine. **The LNG Industry**. Neuilly Sur Seine: França, 2014.

GUCMA, L. **LNG terminals design and operation: Navigational safet aspects**. Editado por L. Gucma. Marine Traffic Engineering. Szczecin. 2013

HASAN, M. M. Faruque. Minimizing Boil-Off Losses in Liquefied Natural Gas Transportation. **Ind. Eng. Chem. Res.** Cingapura, p. 9571-9580. jan. 2009.

International Gas Union. **World LNG Report**, 2015. França, 2015.

MIANA, Mario. Calculation of Boil-Off Rate of Liquefied Natural Gas in Mark III tanks of ship carriers by numerical analysis. **Applied Thermal Engineering**. Espanha, p. 279-296. out. 2015.

MICHALSKI, Ryszard. Problems with determination of evaporation rate and properties of boil-off gas on board LNG carriers. **Journal of Polish CIMAC**, Gdansk, v. 6, n. 1, p. 133-140.

MOKHATAB, S. et al. **Handbook of Liquefied Natural Gas**. 1.ed. Oxford: Elsevier, 2014. 501p.

TUSIANI, Michael; SHEARER, Gordon. **LNG A Nontechnical Guide**. Oklahoma: Pennwell, 2007. 400 p

VAN WYLEN, G., SONNTAG, R.E., BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. John Wiley & Sons, Inc., 2009, 461 p., Nova York.

WORDU, A. A.. Estimation of Boil-off-Gas BOG from Refrigerated Vessels in Liquefied Natural Gas Plant. **International Journal Of Engineering And Technology**. Port Harcourt, p. 44-49. jan. 2013.

ZAKARIA, Mohamad Shukri. Boil-Off Gas Formation inside Large Scale Liquefied Natural Gas (LNG) Tank Based on Specific Parameters. **Applied Mechanics And Materials**. Suíça, p. 690-694. fev. 2012.