

4 Panorama amplo sobre GNL

4.1 Dimensão multidisciplinar, áreas de conhecimento consideradas e delimitação da abrangência do trabalho

Conforme ABS (2004), GNL é transportado e armazenado em temperaturas de -162 °C (ponto de ebulição normal na pressão típica de armazenamento). É composto, fundamentalmente, de 85 a 96% de metano em base volumétrica, sendo o restante composto, em sua maioria, de outros hidrocarbonetos leves, como etano, propano, butano, além de 1% de nitrogênio.

Os riscos principais de interesse para o GNL são: incêndio, explosão confinada ou parcialmente confinada, transição rápida de fase e efeitos relacionados à sua temperatura criogênica de armazenamento, como, por exemplo, queimadura criogênica, asfixia. Comparado ao Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) e ao etileno liquefeito, o GNL é menos perigoso devido à: (i) sua baixa densidade, (ii) sua tendência de não formar nuvem inflamável de vapor nas condições ambientais, (iii) ser relativamente alta sua energia mínima de ignição (*Minimum Ignition Energy—MIE*)¹¹, e (iv) ter menor velocidade fundamental de combustão¹². O GNL não é tóxico, e se evapora rapidamente; conseqüentemente, considerando um longo tempo de vazamento, são insignificantes os impactos ambientais de um derrame acidental, se não houver nenhuma ignição dos vapores formados (ABS, 2006; ABS, 2004; Sandia, 2004).

Basicamente, três são os tipos de incêndio possíveis de ocorrer nas atividades marítimas com GNL: em poça (*pool fire*), em jato (*jet fire*) e em nuvem (*flash fire*). Adotou-se o primeiro tipo por ser, fenomenologicamente falando, o mais provável de ocorrer (Sandia, 2008; Luketa-Hanlin, 2006; Sandia, 2004), quando da punção do casco do navio metaneiro, seguida de derrame e combustão não pré-misturada por difusão turbulenta (este assunto será tratado detalhadamente no Capítulo 6 – Física e formulação matemática do incêndio em poça).

O GNL por ser um líquido criogênico, quando é derramado na terra ou na água, forma uma poça. Ela se vaporiza rapidamente por ebulição devido ao mecanismo de transferência de calor e massa a partir do substrato para o gás liquefeito em contato com a terra, água e ar (em menor escala devido à absorção de calor da atmosfera e do sol) produzindo vapores (Raj, 2007b; ABS, 2006; ABS, 2004; Sandia, 2004). O vapor resultante de GNL é inflamável quando misturado com o ar, em concentrações volumétricas na faixa entre 5% e 15%. Suas propriedades termofísicas relacionadas com incêndios (ponto de fulgor, limites de inflamabilidade, temperatura de auto-ignição, energia mínima de ignição, velocidade fundamental de combustão, densidade relativa) são comparáveis a outros combustíveis de hidrocarbonetos leves como, por exemplo,

¹¹ Quantidade mínima de energia liberada em um dado ponto no interior de uma mistura combustível que causa propagação da chama ao longe desse ponto, em condições especificadas do experimento (ABS, 2004).

¹² Velocidade de combustão de uma chama laminar nas condições do experimento realizado. Quando uma nuvem de vapor inflamável entra em combustão, produtos com menores velocidades fundamentais tendem a gerar menores sobrepressões no ambiente circundante (ABS, 2004).

etileno, gasolina e GLP (propano). Porém, a única diferença significativa em relação a esses hidrocarbonetos, é que a massa molar do GNL (16,043 kg/kmol) é consideravelmente menor do que a do ar (28,964 kg/kmol).

Verifica-se, experimentalmente, que quando o GNL é aquecido em contato com o ar, já acima de -108 °C seu vapor se torna menos denso que este último, e tende a subir e se dispersar mais rapidamente (ABS, 2004). Apesar disso, entretanto, GNL no seu ponto de ebulição normal (-162 °C \approx 111,66 K @ 101,325 kPa na pressão ambiente), muito abaixo da temperatura de -108 °C, ele apresenta densidade de 1,751 kg/m³, sendo 1,49 vezes mais denso do que o ar a 26,7 °C (\approx 299,7 K) que apresenta densidade 1,178 kg/m³. E é por este último motivo que logo no início da liberação de GNL na atmosfera, como está próximo ao seu ponto de ebulição, ele ‘flutua negativamente’ em relação ao ar, formando um ‘colchão’ pairando, inicialmente, na atmosfera reinante acima do nível da água (ou do solo). Com o passar do tempo, há tendência natural de se atingir o equilíbrio térmico. Na temperatura do ar do ambiente (abaixo dos 299,7 K iniciais antes da liberação), quando este equilíbrio é alcançado, o GNL passa a ter densidade menor do que a do ar, com densidade relativa (*vapor specific gravity*)¹³ de 0,55 (menor do que 1,49 acima). Prosseguindo, o GNL vai se dissipando no ar pelos mecanismos de difusão térmica e de massa, continua se aquecendo e se dispersando até que alcance uma concentração volumétrica abaixo de seu limite inferior de inflamabilidade (LII).

Se, por acaso, ocorrer uma ignição imediata durante uma liberação de GNL, a poça de líquido formada pode sustentar um incêndio de chama inicialmente não pré-misturada. Se um gás comprimido ou liquefeito é liberado de tanques de armazenamento ou de um gasoduto, o material que passa pelo furo (ou rasgo, a depender do tamanho) aumentará sua quantidade de movimento linear formando um jato livre turbulento que se misturará com o ar ambiente (Raj, 2007b). Se o inflamável encontrar uma fonte de ignição com energia suficiente, e se ele estiver fisicamente entre os limites de inflamabilidade, fatalmente ocorrerá um incêndio em jato. No caso do GNL armazenado a baixa pressão como líquido, como ocorre em um *carrier* de GNL, este tipo de incêndio será pouco provável de ocorrer.

Jatos de fogo podem acontecer, todavia, em braços de carregamento e mangotes em terminais, durante as operações de descarregamento ou transferência (*offloading*), quando a pressão do jato é aumentada pela carga (*head*) das bombas de descarregamento. Estes incêndios podem causar sérios danos, mas, geralmente, afetam somente as áreas locais onde se manifestam (ABS, 2004; Sandia, 2004).

Se ocorrer a ignição da nuvem de vapor formada na atmosfera durante o tempo em que o líquido estiver ainda evaporando, um incêndio ocorrerá na nuvem de vapor num ponto distante, e se propagará de volta à poça de líquido, resultando em um incêndio em poça. Muito da ignição retardada da nuvem de vapor, se todo o líquido for evaporado, resultará somente em um incêndio em nuvem. Dependendo da geometria e da razão de bloqueio¹⁴ (ou seu complemento, a porosidade) do local e suas obstruções, quando forem envolvidas pela nuvem de vapor durante a dispersão, um incêndio em nuvem poderá ou não acelerar a frente de chama e formar um incêndio do tipo deflagração (*fast deflagration fire*) (Cant et al., 2004). A concentração do vapor na nuvem próxima a obstruções tem um efeito potencialmente devastador na aceleração da frente de chama (Van den Bosh e Weterings, 1997; TNO, 1997).

Os riscos para pessoas e objetos fora da área atingida pelo incêndio em poça, ou em nuvem, advêm, primariamente, da radiação térmica emitida pelo incêndio. A

¹³ Razão entre a massa molar do material e a massa molar do ar, baseada na composição volumétrica supostamente de 79 % v/v de N₂ e 21% v/v de O₂ (ABS, 2004).

¹⁴ Parâmetro usado para descrever o índice de obstrução de um dado ambiente (ou geometria) à passagem de um fluido, tendo como complemento a porosidade.

depende da localização e orientação do indivíduo, tempo de exposição à radiação térmica (dose) e de outros efeitos mitigadores (roupa, suor, etc.), a pele exposta pode sofrer lesões (resposta) acima de um determinado valor da dose tolerável pelo ser humano, podendo ir de queimaduras de primeiro grau até as de segundo e terceiro graus (letais) (De Roos, 1992). E é por este motivo que existe preocupação com o GNL por parte do público e das autoridades reguladoras.

Outros tipos de impactos, danos e lesões também podem ocorrer em um acidente envolvendo GNL, podendo ser citados: (i) asfixia (metano é um gás asfixiante simples), (ii) queimaduras criogênicas e fragilização estrutural, (iii) incêndio em bola de fogo (*fireball*), (iv) detonações pelo aumento da turbulência e abrupto e gigantesco crescimento da velocidade de propagação da frente de chama em ambientes confinados de baixa porosidade (Crowl, 2003) e (v) explosões em espaços confinados de *cofferdams*¹⁵ além de transições rápidas de fase (Sandia, 2004).

Navios metaneiros são projetados para impedir que o GNL entre em contato com cascos internos e externos, mas acidentes podem ocorrer, promovendo este contato. Assim, é possível que um vazamento de GNL dos tanques para o casco interno abaixe a temperatura em determinadas áreas estruturais do casco, que não sejam projetadas para suportar temperaturas criogênicas (ABS, 2004).

Do acima exposto, a abordagem do tema objeto do presente trabalho passa pelo necessário conhecimento de várias áreas interdisciplinares das Termociências, como por exemplo, Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica, Radiação Térmica, Fenômenos de Transporte, Turbulência, Combustão, Cinética Química.

Como o assunto incêndio com GNL é bastante amplo, o presente trabalho tese focaliza, especificamente, incêndios em poça, deixando de ser abordadas outras fenomenologias correlatas, como os incêndios em jato (*jet fires*), em nuvem (*flashfires*), em bola de fogo (*fireballs*), explosões de vapor de líquidos em ebulição [BLEVE's (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosions*)] (ABS, 2004; Jones, 1992). Da mesma forma, o serão BLEVE's seguidos de bolas de fogo (*fireballs*), deflagrações (*deflagrations*), detonações (*detonations*), explosões não confinadas e semi confinadas de nuvens de vapor [UVCE's (*Unconfined Vapor Cloud Explosions*)], explosões confinadas de nuvens de vapor [VCE's (*Confined Vapor Cloud Explosions*)], e transições rápidas de fase [RPT's (*Rapid Phase Transitions*)].

Como justificativas do foco acima adotado para incêndios em poça, formados a partir de derrames através de rasgos no costado de metaneiros, podem ser mencionadas: (i) o armazenamento de GNL em *carriers* é feito a pressões próximas da atmosférica, não devendo ocorrer a hipótese de formar jatos turbulentos; (ii) a ignição que ocorre quando da punção do costado do navio por outra embarcação é, supostamente, não pré-misturada, (iii) não há históricos de haver substanciais acelerações da frente de chama, em águas calmas e abertas de um terminal de GNL, (iv) assume-se não haver confinamento nem obstáculos no cenário do vazamento, (v) o derrame ocorre em direção ao mar, e não na direção do convés ou outra parte do navio, sendo pouco plausível afetar as estruturas do mesmo ou do terminal.

Perigos secundários, por exemplo, queimaduras criogênicas e asfixia, são igualmente circunscritos tipicamente às áreas de transporte e armazenamento de GNL, não serão igualmente contemplados no presente trabalho. A análise da dependência entre risco e camadas de proteção, embora importantes na compreensão da real dimensão dos riscos, da mesma forma, também não serão abordadas neste trabalho, pois são temas que fogem do foco que aqui é apresentado.

¹⁵ Espaços vazios de módulos estruturais construídos nas estruturas de navios graneleiros.

4.2 Principais características do Gás Natural

GNL é GN refrigerado em seu estado líquido à pressão atmosférica a $-162,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Atualmente, o GNL importado tem uma composição média em torno de 95% a 97% em metano, com o restante da composição sendo uma combinação de etano, propano e outros gases mais pesados, com as seguintes características:

- GNL é transportado a pressões ambientes
- Vapor de GNL se liquefaz, o que reduz seu volume a mais de 600 vezes;
- É considerado um líquido criogênico inflamável;
- Vapor é incolor, inodoro, e não tóxico, porém asfixiante simples;
- Tipicamente aparenta uma nuvem branca visível, e devido à sua temperatura criogênica, condensa vapor de água na atmosfera;
- O limite inferior e superior de inflamabilidade do metano são 5,5% e 14% em bases volumétricas, a uma temperatura de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

GN é uma subcategoria do petróleo que ocorre na natureza. É uma mistura complexa de hidrocarbonetos com uma quantidade pequena de compostos inorgânicos e é uma das maiores fontes de energia fóssil sendo utilizada por quase todos os setores da economia mundial, o que o faz ser considerado uma *commodity*.

GN é uma subcategoria do petróleo que ocorre na natureza. É uma mistura complexa de hidrocarbonetos com uma quantidade pequena de compostos inorgânicos e é uma das maiores fontes de energia fóssil sendo utilizada por quase todos os setores da economia mundial, o que o faz ser considerado uma *commodity*.

A Tabela 4.1 apresenta alguns limites de inflamabilidade (Sandia, 2004).

Tabela 4.1 - Limites de Inflamabilidade de alguns combustíveis @ $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Adaptado de Sandia (2004)

Combustível	LII (% v/v em Ar)	LSI (% v/v em Ar)
Metano	5,5	14,0
Butano	1,6	8,4
Propano	2,1	9,6
Etanol	3,3	19,0
Gasolina (100 Octanas)	1,4	7,8
Álcool Isopropílico	2,0	12,7
Éter Etílico	1,9	36,0
Xileno	0,9	7,0
Tolueno	1,0	7,1
Hidrogênio	4,0	75,0
Acetileno	2,5	85,0

Como GN é a parte do petróleo na fase gasosa, ele ocorre sempre acompanhado de óleo e água, que compõem a fase líquida do petróleo. Existem três tipos de gás: não-associado, associado e condensado. Gás não-associado provém de reservatórios que contêm um mínimo de óleo. Gás associado é o gás dissolvido em óleo sob condições naturais no reservatório. Gás condensado refere-se ao gás com alto conteúdo de hidrocarbonetos líquidos, a pressões e temperaturas muito baixas (Guo e Ghalambor, 2005). Contendo basicamente metano (CH_4), tem sido amplamente utilizado como um

combustível industrial e residencial para aquecimento e outras finalidades por quase um século.

Como se verá adiante no capítulo seguinte, quando é resfriado na pressão ambiente de 101,325 kPa (abs) até usa temperatura de ebulição de 111,66 K, ele se liquefaz com uma densidade entre 422,5 e 450 kg/m³, possibilitando uma redução de volume entre 630 e 680 vezes na liquefação, daí a atratividade do transporte transoceânico do GNL. A composição do GNL varia também segundo a origem. Na Tabela 4.2 pode se observar a composição em detalhe de algumas delas.

Tabela 4.2 - Composição do GNL segundo a origem (mol%)
Adaptado de: *Cryogenic Fuels, Inc.* (1991)

Origem	Metano	Etano	Propano	Butano	Nitrogênio
<i>Alaska, EEUU</i>	99,72	0,06	0,0005	0,0005	0,20
<i>Argélia</i>	86,98	9,35	2,33	0,63	0,71
<i>Baltimore, EEUU</i>	93,32	4,65	0,84	0,18	1,01
<i>New Cork, EEUU</i>	98,00	1,40	0,40	0,10	0,10
<i>San Diego, EEUU</i>	92,00	6,00	1,00	-	1,00

4.3

A indústria de Gás Natural atualmente

O Gás Natural, desde sua descoberta nos Estados Unidos em *Fredonia, NY*, em 1821, tem sido usado como combustível em áreas vizinhas aos campos de produção (Ikotu, 1984). Até anos bem recentes, como acontecia, por exemplo, no Polo Arara na Província Petrolífera do Rio Urucu da PETROBRAS, GN produzido junto com óleo cru, ou encontrava mercado ou era consumido cativamente como energético ou, eventualmente, queimado em *flares* no próprio campo de produção¹⁶. O rápido crescimento na demanda de energéticos na Europa Ocidental, Japão e nos Estados Unidos, fez com que não se pudesse mais prescindir da importação de campos mais distantes. Como o GN é, hoje em dia, liquefeito por ciclos de refrigeração, pode ser transportado rápida e eficientemente através dos oceanos por meio de navios metaneiros dotados de tanques isolados termicamente.

Até 2007 existiam somente nos Estados Unidos e em Porto Rico 114 instalações de GNL, incluindo quatro terminais terrestres (*onshore*) de importação, construídos entre 1971 e 1980 (*Lake Charles, LA; Everett, MA; Elba Island, GA e Cove Point, MD*). (Raj, 2007b; FERC, 2004). Esse total inclui também uma instalação marítima (*offshore*), *Gulf Gateway Energy Bridge Deep Water Port of Exceleerate Energy* no *Texas*, comissionada no Golfo do México e operada pela *Exceleerate Inc.*, que entrou em operação em 2006 (Raj, 2007b); além de um terminal de exportação (armazenamento em tanques criogênicos e facilidades de exportação para navios metaneiros) em operação operando por mais de duas décadas em *Kenai, Alaska*.

Devido à baixa oferta projetada de GN para atender à crescente demanda norte-americana, diversos terminais propostos para construção, estão ainda pendentes de aprovação por parte da *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) e da *U.S. Maritime Administration* (MARAD), respectivamente, para facilidades terrestres (*onshore*) e marítimas (*offshore*). Uma visualização geral da cadeia de distribuição de GNL é apresentada na Figura 4.1, do poço de petróleo ao mercado consumidor.

¹⁶ Constatação pessoal do autor, como ex-engenheiro da PETROBRAS.



Figura 4.1 - Cadeia de distribuição de GNL
Adaptado de: *American Bureau of Shipping* (2006)

4.4 A indústria de Gás Natural no futuro

Como visto no item 3 (Definição do tema e sua relevância), só na América do Norte, com os 40 terminais construídos e aprovados, a capacidade total soma 52,2 Bcfd (1.452 MM m³/d) em abril de 2010. Segundo a FERC (2004), em 2004 já era plausível se inferir que este mercado teria chances e crescer cerca de 10 vezes, somente naquele continente.

A combinação da subida dos preços, aumento da demanda e menores custos de produção de GNL, é fator governante do cenário atual de consumo crescente deste combustível pelos anos adiante. Estimativas dão conta que o comércio mundial desta *commodity* crescerá 35% até 2020, e estudos de impacto ambiental nos EEUU, projetam que importações de GNL duplicarão de volume nos próximos vinte anos, requerendo a importação de cerca de 30 vezes o volume de 2002 (Sandia, 2008, 2004). De modo a que os EEUU possam fazer face à demanda crescente de GN, GNL deve se tornar um importante componente na matriz energética americana. Nesse sentido, o relatório do *The National Petroleum Council* de setembro de 2003, estimou que a participação desse energético pudesse vir a crescer de menos do que 2% atuais para 12% no fornecimento de gás até 2025, inclusive com estimativas mais altas (FERC, 2010)¹⁷. Informações mais detalhadas podem ser obtidas também no *Annual Energy Outlook* na Web site da *Energy Information Administration* (EIA) (<www.eia.doe.gov>) e no Relatório *Balancing Natural Gas Policy-Fueling the Demands of a Growing Economy* (<www.npc.org>) produzido pelo *National Petroleum Council* (NPC) para a *Secretary of Energy* dos EEUU, para mapear o mercado e balizar os mercados de GN para o século XXI (Sandia, 2008).

4.5 Atividades marítimas do transporte de GNL

Até 2003, a frota mundial de navios de GNL contava com 146 unidades ao redor de todo o globo (Sandia, 2004), mas a maioria dos navios mais antigos foi considerada de pequeno porte e dedicada a exportações fora do território americano (Bainbridge, 2003), e cerca da metade tinha idade acima de 20 anos. Em 2004, a frota cresceu para 152 navios. Naquele ano, estava previsto serem construídos mais 20 navios, e mais 20 em 2005. Em setembro de 2005 a frota alcançou 185 vasos, com um *overbook* de encomendas a estaleiros de 60% da frota existente (em quantidade de navios de maior capacidade) (Sember, 2005). Em 2008, a frota bateu 250 navios especialmente projetados para transporte de GNL ao redor do mundo (Sandia, 2008).

¹⁷ Disponível em: <<http://www.ferc.gov/industries/lng/gen-info/import.asp>>. Acesso em: 10 mai. 2010.

No que toca aos *carriers*, a indústria hoje em dia, em função da longevidade dos navios, apresenta indicações de tendência para escolher navios de membrana, fundamentalmente, por conta da eficiência na otimização do volume de carga transportada por frete (economia de escala) (Patel, 2008, 2009). Muitos dos navios correntes são construídos para transportarem de 125.000 m³ a 145.000 m³ de GNL com quatro ou cinco tanques, mas, devido ao aumento de demanda, muitos terminais ao redor do mundo estão sendo projetados para operarem com navios de GNL com capacidades até 265.000 m³. Quatro a oito terminais são previstos serem construídos nos próximos quatro a cinco anos e mais de 40 novas locações de terminais estão sendo analisadas (Sandia, 2008). Terminais estão sendo cogitados em áreas com altas demandas de GN, que contemplam as três costas americanas (leste, oeste e a do golfo). A maioria deles planeja receber um ou mais carregamentos de metaneiros por semana. Ao redor do mundo, existiam mais de 20 terminais de exportação (liquefação) e mais de 50 terminais de importação (regasificação). Essas trocas comerciais implicam em mais de 120 milhões de toneladas de GNL a cada ano.

Carriers, frequentemente, navegam em áreas de intenso tráfego marítimo. Por exemplo, em 2000, a Baía de Tóquio alcançou uma média de um carregamento de GNL a cada 20 horas e uma carga por semana era atracada no Porto de *Boston*, MA (Sandia, 2008). Como as estimativas dão conta que o mercado mundial de GNL deverá crescer até 35% até 2020, as maiores áreas que experimentarão crescimento nas importações de GNL serão a Europa, América do Norte e Ásia, adensando ainda mais o tráfego marítimo internacional (USDOE/EIA; USDOE, 2001). Outro aspecto que vem merecendo atenção são as capacidades para atender encomendas no mercado *spot* (demandas localizadas) com cargas parciais de lastro. Os vasos tendem também a instalar unidades de regasificação e reliquefação a bordo, assim como propulsão com vários combustíveis e navegação no gelo, cobrindo assim, praticamente, todo o planeta. Logo, esse perfil aponta para um vigoroso crescimento da atividade.

4.5.1 Sistemas de contenção

Correntemente, existem quatro tipos principais de sistemas de contenção para metaneiros: (i) tanques de parede esférica (esferas) com tecnologia de propriedade da empresa norueguesa *Aker Kværner ASA*, denominada *Kværner Moss*^{®18}, (ii) tanques com sistema de dupla membrana com tecnologia da empresa francesa *Gaz Transport*, denominada *TechniGaz GTT Membrane Systems*[®], com seus variantes *GTT No. 96 System*[®], *GTT Mark III System*[®] e *GTT CS1 System*[®], (iii) tanques com estruturas prismáticas auto-portantes, com tecnologia da empresa japonesa *Ishikawagima Heavy Industries* (IHI), denominada *SPB (Self-supporting Prismatic Shape Type B)*[®] *LNG Tank System*[®], e (iv) tanques independentes auto-portantes, com tecnologia da empresa americana *Ocean LNG Inc.*, denominada *IMO Self-supported Type B Independent Tank*[®]. Mencione-se também que, dentre outros códigos de construção de navios *tankers*, podem ser citados a *Resolution Marine Environment Protection Committee-MEPC (06)37* de setembro de 1995 da *Internacional Maritime Organization-IMO*. Os projetos diferem na concepção, mas as quatro tecnologias têm navios com mais de 135.000 m³ de capacidade, utilizando de 4 a 6 tanques de carga. Vasos mais recentes têm sido construídos com no mínimo 138.000 m³, mas já existe perspectiva da capacidade

¹⁸ ® Denota tecnologia proprietária, patenteada e registrada pela empresa que a criou.

alcançar 265.000 m³ (Sandia, 2008). São apresentados sucintamente neste trabalho os três primeiros tipos de contenção por serem os mais adotados pelas frotas metaneiras atuais, embora o quarto tipo venha tendo ascensão nas encomendas aos estaleiros. Os navios das três tecnologias mais comercializada na atualidade (tanques esféricos, tanques de membrana e tanques prismáticos) podem ser observados, respectivamente, nas Figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Desenho esquemático da tecnologia do tanque independente auto-portante é apresentado adiante na Figura 4.10.



Figura 4.2 – Carrier com 5 tanques esféricos. Fonte: ABS (2006) (Cortesia)



Figura 4.3 – Carrier com tanques de membranas duplas GTT N° 96®
Fonte: *Oil&Gas Journal-PennWell Corp.* (2005) (Cortesia)



Figura 4.4 – Carrier com tanques prismáticos tipo SPB®
Fonte: *IHI Marine United Inc.* (2009)¹⁹ (Cortesia)

¹⁹ Disponível: <<http://www.ihico.jp/ihigaikyo/enkaku/photo/photo13-e.html>>. Acesso em: 21 dez.2009.

4.5.1.1 Navios de tanques esféricos

Os tanques esféricos, da tecnologia *Kvaerner Moss*[®], são usualmente construídos com chapas de liga de alumínio 5083, com espessura de parede variando entre 29 e 57 mm. O isolamento térmico é de fibra de vidro reforçada com poliestireno e recoberta com fina película de alumínio, que cobre toda a superfície esférica do tanque, de modo a limitar a vaporização no interior das esferas (*boil-off*) a no máximo 0,2% por dia.

A esfera é dotada de bombas de GNL em seu interior, não havendo conexão alguma no fundo. Ela mantém sua própria integridade estrutural, não necessitando da estrutura do navio para este fim. A carga é transferida para o navio através de uma saia metálica fixa no equador da esfera, e existem múltiplas barreiras entre o ambiente externo e a carga de GNL (Pitblado et al., 2004).

O casco do navio é duplo com estruturas internas, e alguns navios têm uma parede adicional circundando toda a esfera, que é protegida com outra saia externa, provendo suporte e isolamento para o costado da mesma. Visão da construção e *hook-up* (içamento de estruturas semi-acabadas por meio de guindastes) de um tanque esférico é mostrada na Figura 4.5, no lado direito. Outra foto de *hook up* de um tanque esférico em um *carrier* pode ser observada na Figura 4.6.

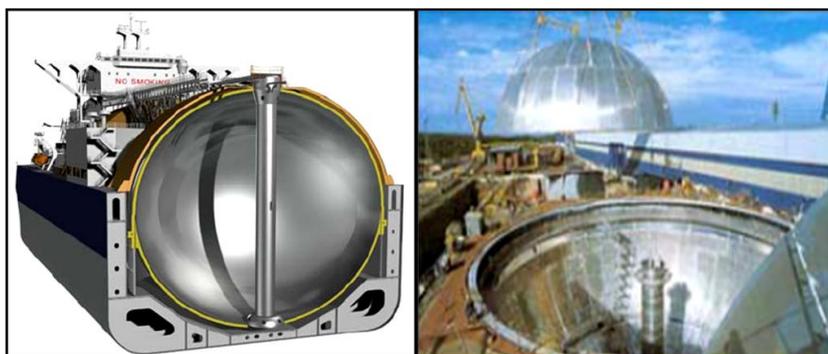


Figura 4.5 – Construção e *hook-up* de tanque esférico *Kvaerner Moss*[®] Tipo B em um *carrier*. Fonte: Sandia (2004) e ABS (2006). (Cortesia)

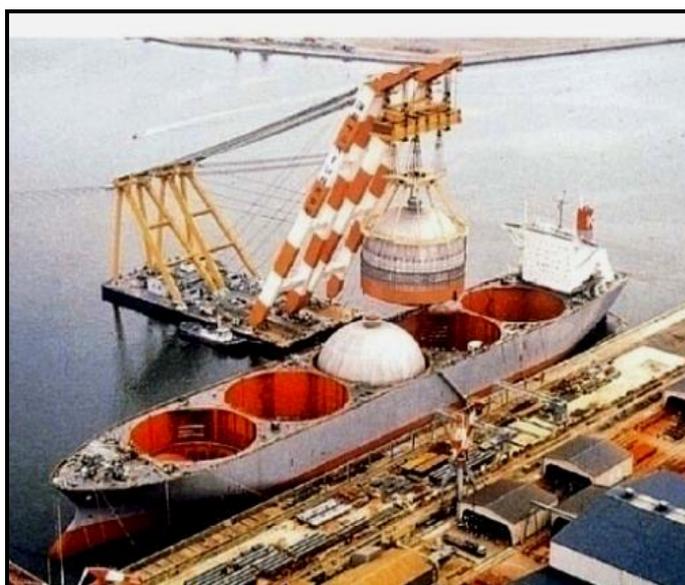


Figura 4.6 – *Hook up* de tanque esférico
Fonte: Sandia (2004) (Cortesia)

4.5.1.2 Navios de tanques de membrana dupla

O projeto da dupla membrana consiste de uma (ou duas) fina camada de aço inoxidável ou aço liga de alto teor de níquel, com espessuras variando entre 0,7 e 1,2 mm. É capaz de conter uma carga hidrostática de 25.000 m³ de GNL, mas se vale do navio para ter suporte estrutural (Pitblado et al. 2004). As duas membranas são separadas por fina camada de perlita, compensado e isolamento de espuma de poliuretano. Os tanques são mantidos a uma pressão positiva muito baixa e o *boil-off* do gás é coletado fornecendo combustível para propulsão dos navios. Não há conexão alguma de fundo para não haver vazamentos ou falhas. As barreiras entre o ambiente exterior e a carga de GNL são: o casco duplo, a estrutura interna do casco, a membrana externa, a caixa de isolamento de compensado e a membrana interna. Os navios são dotados, geralmente, de sistemas de estabilização da carga para evitar efeitos do movimento da carga líquida e do movimento do navio (sólido) (*sloshing*) durante tempestades ou mau tempo. O vão entre a carga e a água é, no mínimo, de 2 m, e frequentemente de 3 a 4 m. Um amplo *cofferdam* separa cada tanque com as respectivas membranas, reduzindo o potencial de um evento indesejável ocorrido num tanque afete seu vizinho. Visão geral da construção de um tanque de membranas e da faina de seu *hook-up* são apresentadas na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Construção e *hook-up* de tanques de membranas GTT nº 96[®] em um *carrier* Fonte: Sandia (2004) (Cortesia)

Na Figura 4.8, é mostrada a geometria interna de um tanque de membrana dupla.

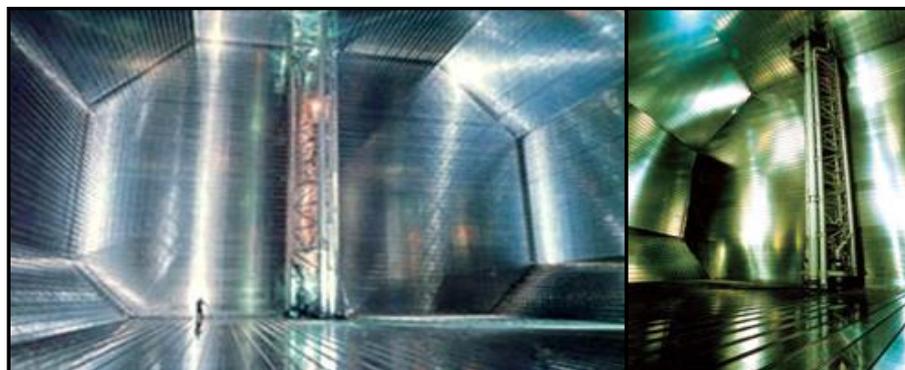


Figura 4.8 - Seção reta de um tanque de membranas duplas GTT nº 96[®]²⁰

²⁰ Disponíveis, lado esquerdo, em: <<http://www.nwssc.com>>, e, lado direito, em: <<http://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/e443/e443002.pdf>>. Acessos em: 29 jun. 2010. (Cortesia)

No lado esquerdo desta figura, pode-se observar o contraste entre as escalas do tanque de membranas e a de um homem em seu interior. Denota-se, também, o acabamento corrugado em todas as paredes, domo e piso do tanque, para evitar a formação de *sloshing*, discutida acima. A estrutura em forma de torre vertical mostrada no lado esquerdo acomoda as bombas verticais de exportação e as linhas de carga e descarga de GNL. Do lado direito, é mostrado o detalhe dessa estrutura.

4.5.1.3 Navios de tanques prismáticos auto-portantes

O tanque prismático é subdividido em 4 compartimentos por anteparas a prova de vazamento de GNL. Dessa forma, segundo a tecnologia, é previsto que a frequência local de movimento do líquido dentro do reservatório não seja afetada pela frequência do movimento do navio. Com isso, espera-se que sejam eliminadas ressonâncias entre o movimento da carga líquida e o movimento do navio (*sloshing*) citado, reduzindo os efeitos na carga devido ao jogo do mar sendo supostamente possível realizar carregamento do navio com qualquer nível do criogênico. Evita-se também, em princípio, problemas de estratificação no fundo dos tanques do navio decorrentes de carregamentos anteriores. Pode acontecer que duas camadas de GNL com diferentes densidades e capacidades térmicas se misturem subitamente, resultando na liberação de grandes quantidades de vapor (*rollover*).

A detentora da tecnologia invoca que esta configuração permite transportar GNL com o metaneiro parcialmente carregado, com descarregamento mais rápido quando atracado, mesmo com unidades FPSO, FSRU, etc. a meia nau. As placas enrijecidas do tanque não são susceptíveis a aumentos internos e externos de pressão no espaço de vapor, sendo desnecessário o controle da pressão diferencial. Este espaço pode ser acessado e usado para manutenção e inspeção. Adicionalmente, segundo a IHI, este *design* tem as seguintes características: menor poço para a sucção da bomba de despacho; menores BOG (*boil-off gaugeing*) (variações de leituras manométricas de *boil-off*) e formação de *spray* do lastro; não necessita de testes de vácuo nem de purga no espaço de vapor com nitrogênio; deque superior plano, de boreste a bombordo, sem truncamentos de prismas ou calotas esféricas. Na Figura 4.9 são mostrados três tanques prismáticos e seu *hook-up* em navios metaneiros.

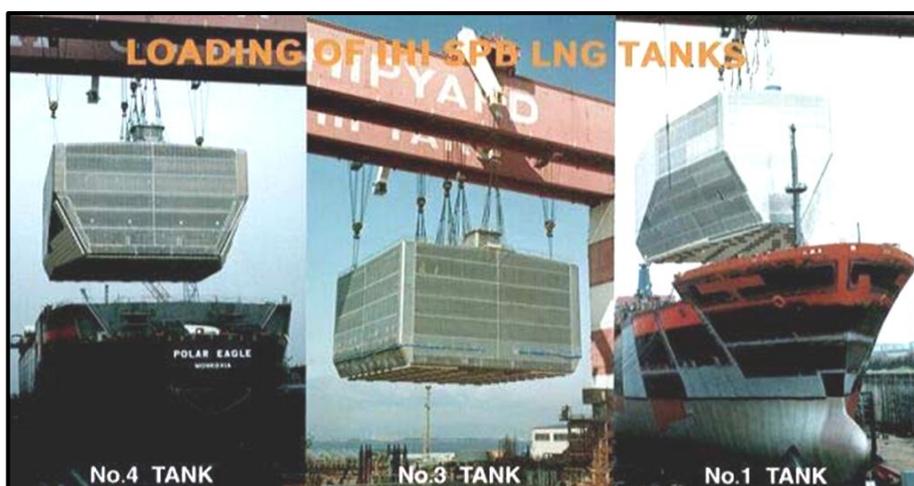


Figura 4.9 – *Hook-up* de um tanque prismático tipo SPB® (Cortesia)
Disponível em: <<http://www.ihi.co.jp/ihi/ihtopics/topics/2004/0317-1e.html>>.
Acesso em: 15 dez. 2009

4.5.1.4 Navios de tanques independentes auto-portantes

No final de 2004 a empresa americana *Ocean LNG, Inc.*, de *Houston, TX*, obteve de sociedade classificadora, a aprovação *Approval In Principle (AIP)* de um novo tipo de tanque cilíndrico com calotas esféricas côncavas em ambas as extremidades (*dished ends*) com capacidade de 180.000 m³, 36 m de diâmetro e 40 m de altura cilíndrica, tendo cada tanque capacidade de 36.000 m³ de GNL. Comparado com o tanque esférico, o sistema *Ocean System*, segundo a empresa, pode aumentar a capacidade da carga dentro do mesmo casco em 25%. Esta configuração proporcionaria, ainda conforme a empresa, acesso total para inspeções do isolamento e estrutura.

Um aspecto considerado na movimentação oceânica é a habilidade de o tanque suportar as cargas dinâmicas do jogo do mar (*sloshing*) quando o tanque está parcialmente cheio. Sistemas de membranas, por exemplo, são sensíveis a essas cargas. Os tanques deste vaso seriam projetados de acordo com o *Type B[®]* da IMO para tanques independentes, baseado no conceito de 'vazar antes da falha'. Os tanques são projetados para minimizar as limitações de enchimento devido aos efeitos do *sloshing*. Tais efeitos acarretam problemas à estrutura do reservatório e ao *turret* da bomba de descarga de GNL. Na Figura 4.10 apresenta-se o *carrier* de tanque independente tipo B da *Ocean LNG, Inc.* No lado direito da figura, a geometria (sem escala) do tanque independente.

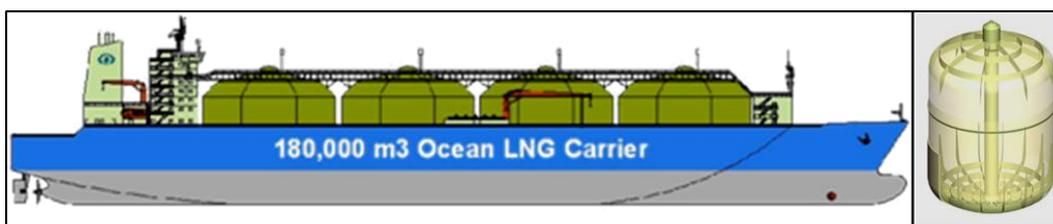


Figura 4.10 – Desenho esquemático de um *carrier* com tanque independente tipo B[®]. Disponível em <<http://www.marinelog.com/DOCS/PRINTMMV/MMVFebLNG2.html>>. Acesso em 23 dez. 2009. (Cortesia)

4.5.2 Comparação entre as tecnologias *Kværner Moss[®]* Tipo B, *Tecnigaz GTT[®]* e *IHI SPB[®]* Tipo B

As três são concebidas de modo a proporcionarem barreiras físicas extras entre a carga e o ambiente externo, se comparadas ao duplo casco de petroleiros. Devido a seu formato, a esfera fica, na sua maior parte, separada do ambiente externo, além de ser dotada de barreiras estruturais adicionais. Os riscos de acidente com uma ou outra tecnologia são considerados equivalentes (Sandia, 2008). Por isso, a atividade de transporte marítimo de GNL é internacionalmente reconhecida como sendo um exemplo de segurança em termos de carga. Haja vista seu reduzido número de acidentes ocorridos até a presente data (ABS, 2006, 2004). Para maiores detalhes, consultar o item 5.1 (Introdução). De modo análogo, como as tecnologias de membrana e de tanque prismático auto-portante utilizam seu volume interno de forma mais eficiente, não existem amplos espaços vazios, mas apresenta menos área de alívio. A Tabela 4.3 apresenta as principais características construtivas que diferenciam as 3 principais tecnologias.

Tabela 4.3 – Comparação entre tecnologias de construção de tanques de navios metaneiros. Adaptado de: Patel (2008)

Características construtivas dos tanques		
Esféricos	Membranas	Prismáticos
<ul style="list-style-type: none"> • Independe da estrutura do costado 	<ul style="list-style-type: none"> • Reaje à estrutura do costado 	<ul style="list-style-type: none"> • Independe da estrutura do costado
<ul style="list-style-type: none"> • Sem limitação para enchimento parcial 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação para enchimento parcial 	<ul style="list-style-type: none"> • Sem limitação para enchimento parcial
<ul style="list-style-type: none"> • Opera em qualquer condição climática 	<ul style="list-style-type: none"> • Opera em condições extremas (clima polar) 	<ul style="list-style-type: none"> • Opera em qualquer condição climática
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Main deck</i> com calotas²¹ 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Main deck</i> chanfrado 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Main deck</i> plano
<ul style="list-style-type: none"> • Estrutura do <i>deck</i> não é parte total do tanque 	<ul style="list-style-type: none"> • Estrutura do <i>deck</i> provê suporte para o tanque 	<ul style="list-style-type: none"> • Estrutura do <i>deck</i> independente do tanque
<ul style="list-style-type: none"> • Não subdivisível 	<ul style="list-style-type: none"> • Difícil de subdividir 	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de subdividir transversal e longitudinalmente
<ul style="list-style-type: none"> • Integração com o <i>topside</i> do FPSO 	-	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil integração com <i>topside</i> do FPSO²²
<ul style="list-style-type: none"> • <i>Turret</i> da bomba do navio rigidamente chumbado²³ 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Turret</i> da bomba do navio é suportado 	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Turret</i> da bomba rigidamente chumbado
<ul style="list-style-type: none"> • Montagem em paralelo à construção do costado 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem após a construção do costado 	<ul style="list-style-type: none"> • Montagem em paralelo à construção do costado

4.6

Contribuição do trabalho para o estado da arte: uma abordagem simplificada

A crescente demanda para permissão de terminais nos EEUU resultou na adoção de novos requisitos e metodologias de licenciamento, passando a contemplar tomada de decisão baseada em risco (*risk-based decision making*), com comunicação dos riscos de segurança ao público (AIChE, 1989). A FERC requer que os projetos dos terminais terrestres cumpram ou excedam todas as exigências de Códigos de Segurança do GNL, incluindo as distâncias da zona de exclusão, que devem ser projetadas de modo que os efeitos decorrentes de acidentes fiquem circunscritos dentro dos limites do próprio terminal, e que o risco ao público possa ser aceito pelos órgãos reguladores.

Modelagens de grandes liberações de GNL que até então não eram requeridas, passaram a ser requisito obrigatório de regulamentação, efetuado em estudos independentes de análise de riscos. No Canadá, União Européia, México, as empresas são obrigadas a realizar estudos de segurança e risco de acordo com metodologias prescritas, por exemplo, a *Canadian Environmental Assessment Act-CEEA* (2005), *Comité Européen de Normalisation-CEN* (2005), e submetê-los a agências reguladoras para aprovação. A regulação americana não prescreve metodologias para avaliação formal de riscos, embora o risco seja avaliado pela entidade reguladora e pelo empreendedor. Se, por um lado, existe por parte das autoridades zelo quanto ao risco, por outro, esbarra-se, ainda, em muitas dificuldades na modelagem matemática para se descrever com a maior exatidão possível o tamanho físico do incêndio, suas características físicas e geometria, quanto da radiação térmica emitida pela superfície da chama é atenuada pelo ‘efeito escudo térmico’ gerado pela fumaça, etc. Além, naturalmente, de toda a complexidade de se descrever que danos uma dada radiação térmica e sua intensidade em vários comprimentos de onda, podem trazer a seres humanos e objetos.

²¹ Deque principal do navio.

²² Deque principal da unidade FPSO (navio), onde se localizam os equipamentos principais da planta de processamento primário do petróleo.

²³ Estrutura da plataforma para apoio dos chumbadores da bomba de exportação (ou despacho).

Como serão discutidos ao longo do presente trabalho, os modelos atuais de avaliação de zonas de segurança potencial são simplificados, mesmo usando-se diferentes abordagens para descreverem emissões do incêndio e absorção pela atmosfera. Eles partem do pressuposto do ‘campo aberto’, não contemplando detalhes cruciais dos efeitos provocados por objetos existentes na direção e sentido da propagação da energia térmica, como, por exemplo, edifícios, abrigos, anteparas, etc., e que se interpõem entre o incêndio e os objetos-alvo, o que é uma simplificação. Como esses efeitos não são considerados, a radiação térmica emitida não é absorvida por ‘anteparas’ do percurso, fazendo-se sentir, por conseguinte, em distâncias seguras cada vez maiores. Logo, essas simplificações, em nome de proporcionarem estimativas mais conservativas, podem redundar, entretanto, em valores de zonas de exclusão superestimados, da ordem do dobro ou triplo da ordem da grandeza real.

A radiação térmica (calor) é um fenômeno que depende do percurso, de sorte que qualquer interrupção ou desvio do calor irradiado pela pluma do incêndio deve, necessariamente, ser levado em consideração. Destarte, o meio interveniente e tais objetos são de suma importância no estabelecimento das zonas de exclusão em áreas urbanas, industriais e residenciais, pois serão elas que governarão os investimentos em medidas mitigadoras, ou até mesmo, se for o caso, inviabilizar atividades da cadeia produtiva de GNL.

E no Brasil? O que existe? Não há evidências, ainda, de que se disponha de critérios específicos para GNL, uma vez que não existe, até o início de 2010, nenhuma instalação nacional que opere com GNL.

De uma maneira bastante ampla, o que por ora se coloca, é a contribuição que este trabalho traz, qual seja, o acoplamento da modelagem do escoamento e espalhamento de GNL derramado de um navio metaneiro formando uma poça no mar. Com a determinação de sua área (e diâmetro) é possível fazer o acoplamento direto, usando o diâmetro da poça formada como dado de entrada para simular a modelagem de sua subsequente ignição, gerando uma pluma de incêndio de chama não pré-misturada de difusão turbulenta.

O modelo da pluma térmica contempla ainda o cálculo do poder emissivo da superfície da chama de corpo cilíndrico emitindo radiação variável com a altura ao longo do eixo da pluma visível, atenuada fora da mesma pela da atmosfera participante.

Da bibliografia visitada desde a década de '50 até os dias atuais, conforme item 5 (Revisão bibliográfica do estado da arte), não foram encontradas evidências de que esses temas, espalhamento de um criogênico no mar e incêndio da poça tivessem sido tratados num único trabalho. Esta lacuna foi detectada, e, assim, além de unificar esses dois assuntos quanto aos conceitos físicos, compatibiliza terminologias, informações e formulações matemáticas, de modo a tentar descrever a fenomenologia dos dois problemas.

A apresentação consolidada das contribuições do presente trabalho será consolidada, no entanto, no capítulo 7 (Aplicação ampliada das modelagens do derrame/espalhamento, incêndio de difusão turbulenta e do acoplamento entre ambas).