

2

Contextualização, metodologia da pesquisa e estrutura do trabalho

2.1

Contextualização

Gás Natural (GN), contendo primariamente metano (CH_4), vem sendo usado há mais de um século como um combustível essencial na indústria e em residências para aquecimento e outras finalidades.

A primeira planta de processamento de gás para produzir GNL nos Estados Unidos da América (EEUU) foi construída em *West Virginia* em 1912¹, enquanto que a planta comercial de liquefação foi construída em *Cleveland, Ohio*, em 1941 (Sandia, 2004). Em janeiro de 1959, o primeiro navio metaneiro *The Methane Pioneer* transportou GNL de *Lake Charles* na *Louisiana*, nos EEUU, até *Canvey Island* na Inglaterra. Esta viagem demonstrou que grandes quantidades de GNL podiam ser transportadas pelos oceanos.

A exportação americana de GNL teve início em 1969, quando a *Phillips Petroleum* construiu uma planta de liquefação na Península *Kenai*, cerca de 160 km ao sul de *Anchorage*, no *Alaska*. Esta planta continua ativa e é a mais antiga operada continuamente no mundo (Sandia, 2004). Quatro terminais terrestres foram construídos nos EEUU entre 1971 e 1980: *Lake Charles*, na *Louisiana*; *Everett*, em *Massachusetts*; *Elba Island*, na *Georgia* e *Cove Point*, em *Maryland*.

Importações em larga escala vêm sendo feitas continuamente desde 1976 pelos EEUU, e embora tenha alcançado seu pico em 1979, a quantidade importada declinou. Primeiro, pela desregulamentação dos preços do GN nos EEUU, produzindo fornecimentos mais econômicos, depois pela disputa de preços com a Argélia, até então o único fornecedor ao mercado americano. No período entre 1979 e 2001, o único terminal de importação nos EEUU era o de *Everett, Massachusetts*.

Devido à crescente demanda no início dos anos 2000, não somente os terminais da Ilha de Elba, GA, e de *Cove Point*, MD, foram ampliados, como também foram propostos mais de 40 novos terminais de importação e processamento de GNL à autoridade americana *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC).

O transporte de GNL é feito, na maioria dos casos, por navios metaneiros; eles têm dimensões aproximadas de 300 m de comprimento, com casco duplo com capacidades entre 125.000 m³ e 160.000 m³, mas já existe tendência dessa capacidade subir para 250.000 m³, distribuídos em até seis tanques individuais à pressão atmosférica e com a temperatura de 111,66 K.

Em função da grande redução de volume que apresenta ao se liquefazer, a economia no armazenamento permite que consideráveis quantidades de energia, como líquido, sejam transportadas, favorecendo o desenvolvimento da indústria de gás em todo o mundo (Raj, 2007b; Guo e Ghalambor, 2005).

¹ Disponível em: <<http://www.dom.com/about/gas-transmission/covepoint/lgn-history.jsp>>. Acesso em: 10 jan. 2009.

A título ilustrativo, na Figura 2.1 é apresentado exemplo de um terminal de importação de GNL refrigerado na Ilha de Elba, nos Estados Unidos.



Figura 2.1 – Terminal de importação de GNL da *El Paso* e *Southern LNG*, Ilha de Elba, *Georgia*, EEUU

Fonte: Gaul e USDOE (2004). Cortesia: *El Paso Corporation* e *CH-IV International*²

Os questionamentos que atualmente vêm sendo colocados em função, eventualmente, de uma percepção não devidamente esclarecida sobre o que é risco, podem ter como causa raiz o transporte marítimo. Aparentemente, este modal de transporte traz mais vulnerabilidade do que o próprio terminal em si, pois terminais dispõem de robustos tanques de armazenamento de GNL e é cercado de cuidados e rígidas normas de segurança, até por força de lei.

² Disponível em: <<http://ch-iv.com>>. Acesso em: 26 jun. 2009.

Agências reguladoras e entidades, governamentais ou não, de todos os países estão presentes no processo de regulação, por ser este um assunto estratégico que afeta suas matrizes energéticas. Podem ser citadas, por exemplo, U.S. *Department of Energy* (USDOE), U.S. *Department of Transportation* (USDOT), U.S. *Coast Guard* (USCG), *Comité Européen de Normalisation* (CEN), *The Federal Energy Regulatory Commission* (FERC), *Nova Scotia Department of Energy* (NSDOE), *International Maritime Organization* (IMO), *Oil Companies International Marine Forum* (OCIMF), *Society of International Gas Tanker and Terminal Operators* (SIGTTO), *The California Energy Commission* (CEC), *National Fire Protection Association* (NFPA), dentre outras.

Uma revisão (*review*) detalhada sobre as agências nos EUA que têm jurisdição e autoridade sobre GNL, com base na lei dos portos em águas profundas (*Deep Water Ports Act-DWPA*), e sobre as normas e padrões industriais e regulamentação de conformidade (*regulatory compliance*) pode ser pesquisada nas páginas do *Center for Energy Economics* (CEE) e da *University of Texas*³. Um sobrevôo sobre as principais regulamentações internacionais sobre GNL podem ser encontradas em CEEA/NSDOE (2005), CEN-EN1473 (2005), 4049 CFR Part 193 (2006), FERC (2004), USDOT 49 USC § 60103 (1979), USCG CFR Part 193 (2001), USDOT CFR USC 60103 (1979), USDOT 49 USC § 60103 (1968).

Alguns problemas potenciais da legislação americana sobre locação de terminais são discutidos em Havens e Spicer (2007). Uma exaustiva explanação sobre segurança marítima e requisitos de segurança patrimonial, e normas e códigos de projeto e segurança aplicáveis a projetos de Gás Natural, pode ser encontrada, respectivamente, nos Apêndices C3-2 (*Marine Safety And Security Requirements*) e C3-3 (*Design And Safety Standards Applicable To Natural Gas Projects*) do relatório *BHP Billiton Cabrillo Port Liquefied Natural Gas Deepwater Port - Revised Draft Environmental Impact Report* (3.13.2006)⁴.

O GNL representa uma importante fonte de energia para muitos países, dentre eles o Brasil, nos próximos 30 anos, e contribuirá para a segurança e diversificação no uso de energéticos. No País, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA), órgãos estaduais de controle ambiental, capitânias de portos, encontram-se ativamente envolvidas para garantirem infra-estrutura disponível e segura para a atividade.

2.2 Metodologia da pesquisa

Conforme Richardson (1999), método vem do grego *méthodos* (*meta* = além de, após de + *ódos* = caminho). Portanto, seguindo sua origem, método é o caminho ou a maneira para chegar a determinado fim ou objetivo, distinguindo-se assim, do conceito de metodologia, que deriva também do grego *methodos* (caminho para chegar a um objetivo) + *logos* (conhecimento). Assim, a metodologia são os procedimentos e as regras utilizadas por determinado método. Exemplificando, o método científico é o caminho da ciência para chegar a um objetivo. A metodologia são as regras

³ Disponível em:

<<http://www.beg.utexas.edu/energyecon/>>

<http://www.beg.utexas.edu/energyecon/lng/documents/CEE_LNG_Safety_and_Security.pdf>. Acessos em: 26 jun. 2009.

⁴ Disponível em:

<http://www.slc.ca.gov/division_pages/DEPM/DEPM_Programs_and_Reports/BHP_Deep_Water_Port/BHP_DEIS-R.html>. Acesso em: 10 jun. 2009.

estabelecidas para o método científico, por exemplo: a necessidade de formular hipóteses, de observar, elaborar instrumentos, etc.

Também segundo Richardson (1999, *apud* Esteves, 2004), o método científico fundamenta-se na observação do mundo que nos rodeia. E essa observação, definida em termos amplos, não está restrita apenas ao que é visível; inclui todos os sentidos. As primeiras observações podem ser informações da própria experiência das pessoas ou dados obtidos por meio da leitura de algum texto referencial. O importante é que essas observações devem ser sensíveis, mensuráveis e passíveis de repetição, para que possam ser observadas por outras pessoas.

A epistemologia do trabalho científico utiliza a estratégia de que qualquer pesquisa científica fundamenta-se em uma rede de pressupostos ontológicos e da natureza humana que definem o ponto de vista que o pesquisador tem do mundo que o rodeia. Tais pressupostos proporcionam a base do trabalho científico, fazendo que o pesquisador tenda a ver e interpretar o mundo de uma determinada perspectiva.

O presente trabalho foi desenvolvido baseado no estágio mais atual do conhecimento, de 1950 a 2010, sobre derrame/espalhamento de GNL no mar, seguido de incêndio em poça de difusão turbulenta, possível de ocorrer na indústria desse criogênico.

Em virtude da natureza do problema formulado e do objetivo desta pesquisa, ela pode ser classificada como: aplicada, quantitativa, exploratória e bibliográfica. Considerando sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada, pois objetiva produzir conhecimento para aplicação prática, dirigido à solução de problemas específicos na atividade industrial, relativos ao transporte marítimo de GNL.

Da perspectiva da abordagem do problema, é uma pesquisa quantitativa, visto consistir da análise e interpretação de referenciais técnicos e normativos e de dados e de informações disponíveis na literatura, requerendo, para tanto, o uso de formulações matemáticas, métodos e técnicas estatísticas.

Sob o ângulo de seus objetivos, é uma pesquisa exploratória, na medida em que não tem como foco verificar teorias, e sim conferir maior familiaridade com a problemática, com o fito de torná-la explícita. Como é elaborada praticamente consubstanciada em material já publicado, constituído principalmente por artigos, normas de caráter abrangente, melhores práticas, compêndios, trabalhos e estudos técnicos, trata-se também de uma pesquisa bibliográfica.

O método dedutivo empregado no presente trabalho tem por objetivo confirmar hipóteses (teses) a partir da interpretação e observação de dados disponíveis nos aludidos referenciais e em sua leitura, atribuindo-lhes um detalhamento operacional e cotejando-os com a realidade das diretrizes e práticas recomendadas na indústria GNL.

Por outro viés, o método indutivo, também empregado para formular suas conclusões e recomendações, permitiu a inferência de dados e informações gerais advindos da constatação de que os códigos computacionais dedicados desenvolvidos com presente trabalho geraram resultados estruturados consistentes, com denominadores comuns, possibilitando a extrapolação para uma perspectiva de sentido amplo.

Por se tratar de um típico estudo quantitativo, a identificação sistemática das informações foi precedida da imersão do autor no contexto a ser estudado. A leitura da bibliografia disponível, a reflexão, experiências profissionais e a familiarização com o tema, permitiram focalizar o problema a ser investigado e formular mais facilmente, a partir do mesmo, as hipóteses a serem trabalhadas.

Essa leitura possibilitou a colocação do autor do presente trabalho no campo operacional, com imersão no contexto do problema, por fazer parte da atividade profissional cotidiana do mesmo. Como profissional da área de petróleo e gás natural da

PETROBRAS (hoje aposentado), vem dedicando sua experiência profissional e científica nos campos da engenharia de processamento de petróleo, engenharia mecânica, gás natural, e no campo da engenharia de segurança, com foco na segurança de processo e garantia de *performance*.

A obtenção das informações exigiu, destarte, ação específica previamente planejada; elas foram oriundas da observação natural e estruturada de fatos e cenários, principalmente na indústria brasileira de petróleo e gás natural, cujas instalações são operadas em diversos estados do Brasil.

Como sustentáculo formador da percepção do autor, na área científica, contou com a sólida orientação e observações de professores das Termociências, de modo a coadunar, de forma estruturada, os ensinamentos adquiridos com as necessidades da indústria. Essa percepção foi complementada por meio de entrevistas semi-estruturadas encetadas com atores diretamente relacionados com o projeto e operação das instalações que operam na atividade de produção de petróleo e gás, bem como com os que atuam nas áreas de classificação de navios, embarcações e terminais de GNL, assim como da prestação de serviços de engenharia e de consultoria técnica.

As fontes principais dos dados e informações foram os referenciais técnicos relacionados com o tema, normas, artigos e compêndios de autores de notório saber desse ramo de conhecimento, além de matérias pertinentes de revistas especializadas.

Sua análise e interpretação se fizeram através de um processo continuado, em que se buscou desvendar seus significados e alcance. À medida que as informações e aspectos relevantes foram sendo coletados e identificados nas fontes de informação selecionadas inicialmente, novas questões emergiram, tornando necessário incluir outras fontes na pesquisa.

O autor procurou construir interpretações que geraram novas indagações, o que, por seu turno, o levou a buscar novos dados e respostas, num processo iterativo que culminou com a análise final, com material bastante para confirmar suas percepções e hipóteses. A interrupção da inclusão de novas fontes se deu quando se tornou mais rarefeita a aquisição de novas informações, e as então obtidas foram consideradas suficientes para abordar o problema.

2.3

Questões abordadas no presente trabalho

As experiências de sucesso obtidas no campo da gestão de empresas de processamento indicam que muitas práticas recomendadas e padrões industriais internacionais estabelecem um mínimo de requisitos frequentemente excedidos pelas corporações, que reconhecem a necessidade de se ir pró ativamente mais além no gerenciamento dos riscos, como pano de fundo para alavancar a obtenção de vantagem empresarial competitiva.

Dessa forma, é de vital importância a qualquer empresa que atue no segmento de GNL, prever consequências de potenciais acidentes, envolvendo navios metaneiros no transporte marítimo, falhas intencionais ou não que envolvem vazamentos de energia e/ou matéria, com consequências potencialmente catastróficas.

Tal preocupação existe não somente pelas ações de comando-controle, que por força de diplomas legais são encetadas pelos Órgãos e entidades regulatórias, mas também e, principalmente, por conta da nova postura que as grandes empresas passaram a adotar perante a sociedade, da qual fazem parte, em conduzir seus negócios de forma transparente, ética e com responsabilidade social corporativa.

Daí ser fundamental abordar os seguintes aspectos:

- Iniciando-se pelo derrame/espalhamento da poça, analisar as consequências de um derramamento de GNL na água envolvendo (Hissong, 2007):
 - Predizer a taxa de liberação de GNL de um navio vs. tempo;
 - Predizer o diâmetro da poça de líquido, com ou sem ignição, vs. tempo, e
- Focalizando a ocorrência de ignição (Luketa-Hanlin, 2006):
 - Predizer as características dos incêndios, a saber, geometria, dimensões físicas e campos de emissão de radiação térmica, tanto na magnitude como na distribuição axial e através da superfície emissora da pluma térmica do incêndio de difusão turbulenta;
 - Estimar parâmetros da radiação emitida, atenuação da intensidade da radiação devido à absorção e espalhamento pela fuligem e fumaça no interior da pluma térmica transmitindo para a atmosfera, de modo a possibilitar posterior avaliação subsequente dos impactos baseados nos níveis de radiação em distâncias de interesse e a duração de possíveis exposições;

Isso demonstra a importância de se dispor de modelos de simulação que sejam confiáveis e robustos refletindo, da forma mais fiel possível, a fenomenologia e a física do acidente.

2.4

Resultados obtidos com o trabalho

A tomada de decisões sobre a viabilidade da instalação de um terminal, do ponto de vista das potenciais consequências de acidentes catastróficos no transporte marinho de GNL, envolve considerações de três naturezas:

- Fornecer predições as mais confiáveis possíveis dos campos de radiação térmica emitidos em incêndios em poça de difusão turbulenta, para se avaliar distâncias seguras aos recursos vulneráveis no entorno de terminais de GNL, que não inviabilizem o empreendimento;
- Avaliar a atenuação da intensidade da radiação emitida, considerando a absorção e espalhamento na atmosfera participante e completa absorção e/ou reflexão em objetos intervenientes, e
- Estabelecer características do receptor, no que concerne à absorção da radiação e sua resposta, de modo a mapear e definir critérios de locação de recursos vulneráveis.

A metodologia para quantificação do derrame/espalhamento do criogênico seguidos de combustão não pré-misturada será então detalhada, sendo alvo de trabalho de pesquisa estabelecer os modelos matemáticos que descrevam os fenômenos e mecanismos envolvidos nesses dois eventos indesejáveis. Em seguida aplicam-se os modelos, acoplando os códigos computacionais em geometrias conhecidas e atuais de navios metaneiros (*carriers*) e de rasgos nos seus costados existentes nos referenciais pesquisados, de modo a quantificar, fundamentalmente, tamanhos de poças de GNL derramado no mar e campos de radiação térmica emitida por plumas de incêndios em poça.

Comprovados os resultados das modelagens acima, estes produzirão um cabedal de conhecimentos, formando uma memória técnica e uma base de conteúdo consolidada, de modo a poder utilizá-los em embarcações e terminais de GNL.

2.5

Estrutura do trabalho

Este trabalho apresentou no capítulo 1 inicial, Introdução, seus objetivos principais, e neste capítulo 2, Contextualização, metodologia da pesquisa e estrutura do trabalho, sintoniza o tema na realidade do GNL e no contexto existente hoje.

O Capítulo 3, Definição do tema e sua relevância, apresenta um sobrevôo sobre o porquê estudar o problema e a dimensão do mercado produtor de GNL e como o potencial aumento de terminais terrestres desse criogênico pode acarretar em termos de riscos às pessoas, ativos de produção e aos negócios.

No capítulo 4, é apresentado um Panorama amplo sobre o GNL. Nele são mostradas a dimensão multidisciplinar, áreas de conhecimento abrangidas, abrangência do tema, principais características e os perigos que o GNL acarreta, a indústria atual e as perspectivas futuras para o GN, atividades marítimas no transporte de GNL, e qual a contribuição que este trabalho está trazendo ao tema.

O quinto capítulo revela uma Revisão bibliográfica do estado da arte. Nele, é trazido à baila praticamente todo o trabalho teórico e experimental realizado por mais de 50 anos, desde 1950 até os dias atuais, de modo a compreender a problemática do espalhamento da poça de GNL no mar e sua posterior combustão, emissão de radiação térmica e como realizar seu modelamento.

O capítulo 6 apresenta a proposta de modelo matemático para a pluma térmica, discutindo premissas e hipóteses simplificadoras e a quantificação de escoamentos turbulentos com reação química e emissão radiativa de calor.

O sétimo capítulo aplica o modelo de incêndio em poças circulares, e os resultados quantitativos são comparados com a literatura. Discute-se também esses resultados, com vistas a sustentar sua adequação, pertinência e aderência à literatura e trabalhos já produzidos. Apresenta estudo de caso completo do acoplamento de dois códigos computacionais, o de derrame/espalhamento de GNL e o de incêndio de difusão turbulenta formada no mar, aplicados a duas geometrias de navio metaneiro contemplando duas velocidades de vaporização da poça. Desenvolve também análise das incertezas em relação a trabalhos publicados na literatura reportando dados experimentais, permitindo se verificar, quantitativamente, a aderência dos resultados encontrados em relação a requisitos consagrados adotados na validação de modelos de derrame/espalhamento de GNL, e de posterior incêndio em poça com difusão turbulenta.

O capítulo oitavo traz as conclusões dos trabalhos e apresenta sugestões para trabalhos vindouros em lacunas existentes.

No Apêndice A, fez-se necessário desenvolver uma padronização e unificação das diversas nomenclaturas, simbologias e notações praticadas nas áreas de conhecimento das Termociências, de modo a usá-las de forma consistente no presente trabalho.

No Apêndice B, é apresentado um sobrevôo de tópicos da propagação e atenuação radiativa em meios participantes, desenvolvidas e apresentadas as principais equações e correlações a serem usadas no trabalho. São desenvolvidas também adequações nas equações fundamentais de conservação, de modo a serem aplicadas com formato específico do presente trabalho, além de uma breve resenha dos aspectos das grandezas radiativas arroladas.

No Apêndice C são desenvolvidos os modelos gravitacional-inercial do derrame/espalhamento de poças semicirculares, e o de combustão não pré-misturada do incêndio de difusão turbulenta de poças circulares, com aplicações dos códigos computacionais correspondes, encerrando, desta feita, o presente trabalho.