

AVALIAÇÃO TÉCNICA-ECONÔMICA DO ARMAZENAMENTO, TRANSPORTE E REGASEIFICAÇÃO DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO.

Érica Cristina de Carvalho

E-mail: erica.cristina.carvalho@gmail.com

José Roberto Simões Moreira

Email: jrsimoes@usp.br

Resumo: *Esse projeto trata da avaliação técnica-econômica de sistemas de armazenamento, transporte e regaseificação do gás natural liquefeito, sendo dividido em duas etapas principais, a avaliação de cada sistema e um estudo de caso. A partir do levantamento bibliográfico, foram caracterizados diversos tipos de sistemas que podem ser utilizados para o GNL, sendo necessária a escolha de que alternativas seriam mais viáveis para uma aplicação escolhida, de pequeno porte. A escolha de se utilizar um posto de GNL e a produção de gelo como sistema associado foi realizada com base em pesquisas de mercado sobre o uso do GNL como combustível e de usos de processos de refrigeração. Esse estudo de caso foi possível com a avaliação dos sistemas levantados com relação ao seu custo em relação à sua capacidade, já que a aplicação em questão é de pequeno porte. Com o estudo da associação, para um posto que consome cerca de 150.000 Nm³ por mês, é possível a produção de cerca de 40 toneladas de gelo por mês, de forma que esse produto possa ser comercializado, atingindo-se uma economia de energia e de dinheiro para a produção do gelo.*

Palavras chave: *Gás Natural (Armazenagem), Gaseificação, Sistemas de transporte (Avaliação), Refrigeração (Sistemas; Custos).*

1. Introdução

O gás natural é um combustível de origem fóssil, composto por hidrocarbonetos, sendo quase 90% de metano. Esse combustível é considerado mais seguro e limpo, mas apresenta dificuldades no seu transporte e armazenamento, por ser gasoso à temperatura ambiente.

Uma solução encontrada para armazenar maior quantidade de combustível em um determinado volume foi a compressão do gás natural, o conhecido GNC (gás natural comprimido). Essa alternativa possui a vantagem de ocupar menos espaço que o gás a temperatura e pressão ambiente, mas possui a desvantagem de precisar de tanques de paredes espessas para suportar a pressão do interior do tanque.

Outra solução encontrada foi a liquefação do gás natural a pressão ambiente, pois dessa forma o combustível ocupa ainda menos volume e o seu sistema de armazenamento não tem os mesmos riscos relacionados à altas pressões.

O presente texto trata da caracterização dos sistemas de armazenamento, transporte e regaseificação do gás natural liquefeito. Sendo essa caracterização realizada a partir do levantamento de características desses sistemas. Além dessas caracterizações, apresentam-se também os principais usos de sistemas de refrigeração e potenciais casos para uso do “frio” obtido da regaseificação do GNL.

O objetivo desse trabalho é a caracterização dos principais sistemas existentes de armazenamento transporte e regaseificação para uma possível escolha do sistema mais atrativo para algum determinado uso, em pequena escala. Além disso, tem-se como objetivo uma associação do sistema de regaseificação do GNL com algum sistema de resfriamento, de modo que a energia “fria” do GNL possa ser utilizada.

2. Caracterização dos sistemas

A partir de ampla pesquisa bibliográfica, foi possível a caracterização de cada sistema encontrado no mercado com relação às suas principais características, como material, vantagens e desvantagens, eficiência, características construtivas, dentre outras. Devido à abrangência de assuntos abordados, esse trabalho não se aprofunda muito em nenhum deles, deixando o leitor com uma visão geral sobre os sistemas apresentados.

O gás natural liquefeito é armazenado à pressão ambiente e à temperatura de -162°C, o que requer um bom sistema de isolamento para que a troca de calor com o meio externo seja mínima. Os sistemas de armazenamento do GNL são descritos a seguir.

2.1. Sistemas de Armazenamento

Os sistemas de armazenamento podem ser classificados com relação a três critérios diferentes: sistema de contenção do tanque, posição do tanque em relação ao solo e características de projeto. As classificações são apresentadas na Tab.(1) e mais bem detalhadas a seguir.

O sistema de contenção simples consiste em um tanque de parede dupla, em que a parede interna é de algum material resistente a temperaturas criogênicas como, por exemplo, o aço inoxidável, uma camada intermediária de material isolante, por exemplo, a perita, e uma parede externa projetada para suportar as cargas externas, construída geralmente de aço carbono.

Em caso de rompimento do tanque interno do sistema de contenção simples, o tanque externo não consegue conter o GNL, sendo necessário um dique ao redor do tanque para a contenção do líquido em caso de vazamentos.

Tabela 1. Resumo das principais classificações de tanques de armazenamento.

Classificação				
Sistema de contenção	Simple	Dupla	Completa	“Membrane type”
Posição em relação ao solo	Tanque de superfície	Tanque semi-enterrado	Tanque enterrado	Sistema de caverna
Características de projeto	“Suspended deck”	“Roof inner insulation”		

Com relação ao sistema de contenção, são possíveis quatro configurações distintas. Esses tipos de contenção são apresentados na Fig. (1).

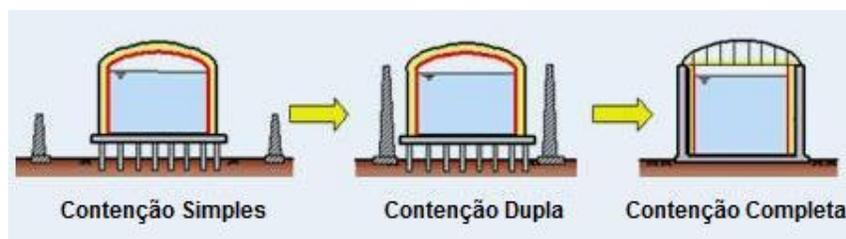


Figura 1. Sistemas de contenção simples, dupla e completa (“single”, “double” e “full” containment). (TOKYO GAS, 2007).

O sistema de contenção dupla é constituído de um tanque de parede dupla, semelhante ao do sistema de contenção simples. A diferença desses dois sistemas é que na contenção dupla, há uma parede de concreto pré-esforçado ao redor do tanque, garantindo contenção do GNL em caso de vazamentos. Essa parede de concreto não é capaz de conter o vapor devido à evaporação do GNL.

O sistema de contenção completa consiste de um tanque de parede dupla como nos outros dois sistemas, mas sua principal diferença é a existência de paredes externas de concreto pré-esforçado e um domo também de concreto, formando um tanque externo, capaz de conter não apenas o gás natural na fase líquida, mas também o vapor formado. Esse sistema deve ser capaz de resistir a choques e abalos sísmicos.

Os sistemas de contenção dupla e completa necessitam de menor área para serem construídos, já que se eliminou a construção de um dique ao redor destes.

Outra classificação é de acordo com a posição em relação ao solo, em que são possíveis quatro configurações: tanque de superfície, tanque semi-enterrado, tanque enterrado e sistema de armazenamento em cavernas.

Os tanques de superfície são aqueles localizados completamente acima do nível do solo, podendo ser construídos sobre uma base elevada de concreto ou em uma base de concreto colocada diretamente no solo. Esse tipo de tanque deve ser protegido contra choques causados por veículos e deve ser colocado longe de muros e cercas elétricas. Além disso, devem ser projetados para suportar diversos tipos de cargas externas como terremotos, rajadas de vento, vibrações, dentre outros.

Os tanques semi-enterrados são aqueles em que as paredes do tanque estão abaixo do nível do solo e o teto está no nível do solo, sendo apenas uma parte visível. Esse tipo de tanque é mais seguro que o tanque de superfície, pelo fato de estar parcialmente abaixo do solo.

O concreto reforçado é utilizado na construção desse tipo de tanque por ser um material que suporta compressões elevadas, que no caso desse tanque são causadas pela água e pala terra na parte em que ele está enterrado. Além do concreto são utilizados um material isolante, que diminui a troca de calor com o meio externo, e uma membrana metálica, que é responsável pela contenção do líquido.

A EN 1437 (European Norms) considera o tanque semi-enterrado como a maneira mais segura de armazenamento do GNL. Uma das vantagens com relação à segurança é que no caso de um terremoto não ocorre amplificação de abalos sísmicos pelo fato de o tanque estar parcialmente enterrado.

Além dessa vantagem, a área necessária para a construção desse tanque requerida pela norma é menor que a área para sistemas de superfície. A Fig. (2) mostra um esquema típico de um tanque semi-enterrado.

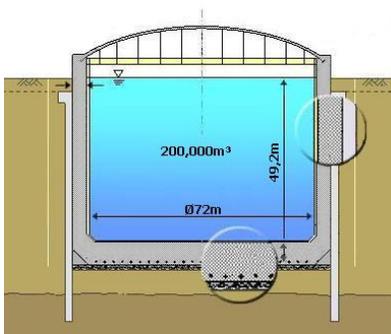


Figura 2. Sistema semi-enterrado de armazenamento (TOKYO GAS, 2007).

Os tanques enterrados são aqueles localizados completamente abaixo do nível do solo. Suas características são semelhantes às dos sistemas semi-enterrados, mas como agora o teto também está sofrendo compressão, este também deve ser construído de concreto reforçado. A Fig. (3) apresenta uma vista aérea de um tanque enterrado.



Figura 3. Visão superior de um sistema enterrado de armazenamento (TOKYO GAS, 2007).

Existe ainda um quarto sistema, não tão explorado, que é o armazenamento em cavernas. Esse sistema consiste na preparação de uma caverna para que esta possa armazenar o GNL, sendo que alguns materiais são colocados no interior das paredes da caverna para que se garanta o armazenamento. Junto à rocha coloca-se o concreto, depois o material isolante, que é uma espuma de poliuretano flexível (PUF), e, por último, uma membrana ondulada de aço inoxidável, responsável pela contenção do GNL.

Os sistemas de armazenamento ocupam áreas diferentes dependendo de sua localização. A Fig. (4) mostra uma comparação entre o espaço ocupado por cada sistema e a área útil de armazenamento do GNL.



Figura 4. Espaço necessário para armazenamento – comparação entre os diversos sistemas (GEOSTOCK, 2005).

A última classificação a ser considerada é com relação à característica do teto do tanque de armazenamento, que pode ser de dois tipos: “roof inner insulation type” e “suspended deck type”.

O primeiro é um domo metálico com sistema de isolamento interno. Já o segundo, é constituído por um teto de alumínio suspenso por cabos, fixos no teto externo. Dessa forma, a altura do teto interno pode ser ajustada para facilitar a limpeza e manutenção do tanque.

De acordo com a classificação apresentada, podem-se classificar os diversos tipos de tanques de armazenamento. Como exemplo, o tanque apresentado na parte esquerda da Fig. (5), pode ser classificado como um tanque de superfície de base elevada, com contenção completa e teto do tipo “suspended deck”, enquanto o tanque da parte direita é

classificado como um tanque de superfície com base de concreto, contenção completa e teto do tipo “roof inner insulation”.

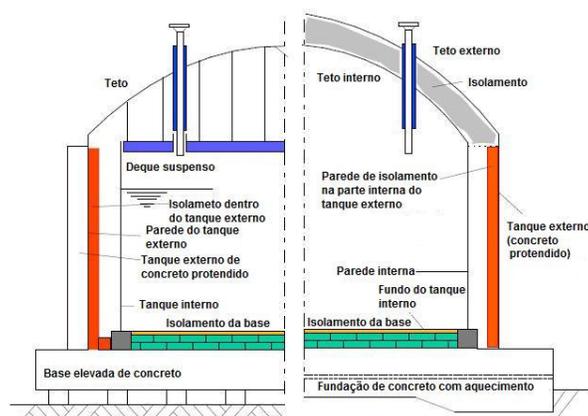


Figura 5. Exemplo de tanque de superfície com contenção completa e algumas características de projeto (Munko, 2007).

2.2. Sistemas de Regaseificação

Os sistemas de regaseificação são classificados em cinco tipos pela norma NFPA 59^a:

- Vaporizador aquecido – recebe calor de algum meio externo, como da combustão de um fluido, de um sistema elétrico, de uma troca de calor com “boilers” ou de um sistema de combustão interna;
- Vaporizador com aquecimento integrado – a fonte de calor está integrada à câmara de vaporização;
- Vaporizador ambiente remoto – utiliza-se um fluido intermediário para a troca de calor;
- Vaporizador ambiente – utiliza fonte de calor natural, como ar ou água do mar ou fontes termais, sendo que esta fonte deve apresentar temperatura até 100°C e deve estar separada da câmara de vaporização;
- Vaporizador de processo – calor proveniente de um processo químico ou termodinâmico, ou ainda, de algum processo que utilize o “frio” do GNL.

Esses sistemas podem ser classificados com relação à fonte de calor utilizada, custo, manutenção, capacidade, dentre outros aspectos. Os principais tipos de vaporizadores encontrados no mercado serão listados e brevemente descritos a seguir.

- ✓ Vaporizador com troca externa (ORV) – classificado como vaporizador ambiente, utiliza a água do mar como fonte de calor e é o sistema mais utilizado no mundo, correspondendo a 70% do total (Munko, 2007). Como desvantagens, apresenta impacto ao ambiente marinho, necessidade de controle da qualidade da água e manutenção periódica;
- ✓ Vaporizador com fluido intermediário (IFV) – classificado como vaporizador ambiente remoto, utiliza água do mar como fonte de calor e um fluido intermediário para transferir o calor. Apresenta como vantagens, o baixo custo e ausência de fonte de ignição e, como desvantagens, impacto ao ambiente marinho e baixa eficiência térmica;
- ✓ Vaporizador de combustão imersa (SCV) – classificado como vaporizador com aquecimento integrado, é utilizado principalmente em situações de peak-shaving;
- ✓ Vaporizador de banho de água, vaporizador casco e tubo (STV) – é caracterizado por um tanque de água por onde passam tubos em que o GNL é vaporizado. Suas vantagens são o baixo custo inicial, a facilidade de operação e a baixa emissão de NOx, e, como desvantagens, apresenta alto custo de operação e baixa eficiência térmica (<90%);
- ✓ Vaporizador casco e tubo – é um trocador de calor por onde passa o GNL e mais algum fluido como qual o GNL troca calor e vaporiza. Como vantagem, não utiliza fonte de ignição, é seguro e a fonte de calor é barata (água do mar), apresentando impacto ao ambiente marinho como desvantagem;
- ✓ Vaporizador com ar ambiente como fluido de aquecimento – nesse tipo de vaporizador o GNL troca calor com o ar ambiente, não sendo um processo satisfatório em locais muito frios. Não há gastos com fonte de calor, necessita pouca manutenção e possui custo operacional baixo, entretanto possui dependência do ambiente;
- ✓ Ciclo combinado de uma unidade de calor e energia com vaporizador de combustão imersa (CHP-SCV) – sistema em que os gases extraídos de uma turbina passam por um recuperador onde trocam calor com a água e, esta, troca com o GNL.

A Tab. (2) apresenta uma comparação entre os diversos tipos de vaporizadores existentes no mercado.

Tabela 2 – Comparação entre diversos tipos de vaporizadores (Franklin, 2006).

Tecnologia de Vaporização	Riscos Técnicos	Considerações Ambientais	Considerações de Segurança	Custos (Capital)	Custos (Operating)	Operacionalidade e Manutenção	Questões de Layout
Vaporizador de Combustão Imerosa (SCV)	●●●●●	●●○○○	●●●○○	●●●●●	●●○○○	●●●○○	●●●●○
Vaporizador de Banho de Água	●●●●●	●○○○○	●●●○○	●●●●●	●○○○○	●●●●○	●●●●○
Vaporizador com Troca Externa (ORV)	●●●●○	●●●○○	●●●●●	●●○○○	●●●●○	●●○○○	●●●●○
Vaporizador Casco e Tubo (STV)	●●●○○	●●●○○	●●●○○	●●○○○	●●●●○	●●○○○	●●●○○
Vaporizador com Fluido Intermediário (IFV)	●●●●○	●●●○○	●●●○○	●○○○○	●●●●○	●●○○○	●●●○○
Vaporizador com Ar Ambiente como Fluido de Aquecimento	●●●○○	●●●●●	●●●●●	●●●○○	●●●●●	●●●●●	●○○○○
LNG Smart vaporization (Mustang)	●●●○○	●●●●○	●●●○○	●●●○○	●●●●○	●●●○○	●○○○○

2.3. Sistemas de Transporte

O transporte terrestre de GNL pode ser feito por caminhões, trens ou hidrovias. O sistema mais comum é o por caminhões, em que a tecnologia é derivada da tecnologia de tanques de transporte de produtos criogênicos, como o nitrogênio líquido e oxigênio.

O tanque de transporte consiste em uma camada interna de material compatível com a temperatura do GNL, uma camada intermediária de isolante, o material mais comumente utilizado é um superisolante à base de alumínio, e uma parede externa de aço carbono.

Para a parte estrutural do tanque, anéis são colocados na parte externa para garantir a resistência estrutural e prevenir colapsos.

O mais crítico para sistemas de armazenamento é a carga/descarga do produto, que deve seguir diversos procedimentos de segurança para que não ocorram acidentes relacionados a vazamentos ou até mesmo a tensões adicionais causados pela mudança de temperatura.

A Fig. (6) mostra um típico caminhão tanque de transporte de GNL.



Figura 6. Exemplo de caminhão de transporte de GNL (Dahlgren e Steen, 2007).

3. Potenciais usos do aproveitamento do “frio” do GNL

Durante a regaseificação do gás natural liquefeito, grande quantidade de calor é trocada com uma fonte quente para que o GNL passe de -162°C para a temperatura ambiente. Essa troca de calor pode ser feita com o ar atmosférico, água aquecida ou água do mar como já visto no tópico sobre vaporizadores. Nesses casos, o calor trocado não é utilizado para nenhuma aplicação.

Uma alternativa para a troca de calor é a associação com algum uso de frio em processos, ou seja, transfere-se calor de alguma fonte para o GNL o que garante a vaporização deste e o resfriamento da fonte de calor.

A seguir serão apresentados exemplos de uso de processos de resfriamento e de que forma esses processos podem ser associados ao processo de regaseificação do gás natural liquefeito. Além disso, serão analisados os tipos de trocadores de calor necessários para o sistema e a necessidade de utilização de algum fluido intermediário.

- Indústria alimentícia – refrigeração e processamento de alimentos;
- Condicionamento de ar na indústria – utilizado na indústria têxtil, gráfica, material fotográfico e laboratórios, processos de alta precisão, salas de computador, dentre outros;

- Condicionamento de ar para conforto – controle da temperatura, umidade, pureza, regulagem de velocidade, distribuição e qualidade do ar;
- Indústria de manufatura – máquina de corte ou manutenção de ar comprimido, garantia das condições em câmaras de teste;
- Indústria de construção – resfriamento de grandes quantidades de concreto ou congelamento do solo para escavação;
- Indústria química e de processo – separação de gases, condensação de gases, separação de espécies químicas a partir da solidificação de uma das espécies da mistura, remoção de calor da reação e manutenção de um líquido a baixa temperatura para controle de pressão no interior do tanque de armazenamento;
- Medicina e indústria farmacêutica – resfriamento em hospitais, ambientes de pesquisas para manutenção de condições laboratoriais, aplicações como a hipotermia e a criocirurgia;
- Metalurgia – para mudança de características mecânicas e físicas de metais;
- Fabricação de gelo – passagem de fluido refrigerante em algum tipo de trocador de calor;
- Outras aplicações – liquefação de dióxido de carbono, separação de ar.

4. Usos do gás natural

O gás natural pode ser utilizado como combustível em diversas aplicações e setores da economia. Serão listados a seguir os principais setores que podem utilizar ou já utilizam o gás natural como combustível.

Atualmente no Brasil, ainda são poucos desenvolvidos alguns setores para o uso do gás natural como, por exemplo, a indústria, setor em que seriam necessários diversos investimentos em infra-estrutura de transporte e distribuição do gás natural. Além disso, ainda existe elevado risco para viabilizar esse tipo de investimento. A Fig.(7) **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o gráfico do uso do gás nos diversos setores da economia brasileira. Pode-se notar a partir do gráfico que o setor que mais utiliza o gás natural é a indústria.

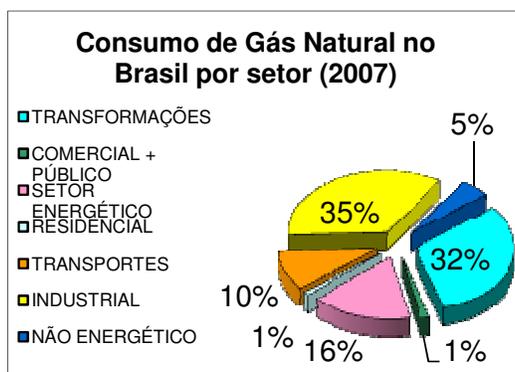


Figura 7. Consumo do gás natural no Brasil por setor (BEN, 2007 - adaptado)

Na indústria, o gás natural é utilizado como combustível para aquecimento direto, calor de processo, para geração de força motriz, como matéria-prima nos setores químicos, petroquímico e de fertilizantes, como redutor siderúrgico e para geração de eletricidade.

No setor comercial, o gás natural é utilizado como combustível para aquecimento de água, condicionamento de ar e aquecimento de ambientes, para cocção em restaurantes e hotéis, em pequenos fornos de panificadoras e em lavanderias em instalações comerciais ou hospitalares.

No comércio e serviços, ele substitui com vantagens o GLP o óleo diesel e a lenha (em padarias e restaurantes).

Como combustível veicular o gás natural é utilizado em automóveis, ônibus, caminhões, substituindo a gasolina, álcool e o óleo diesel. Seu uso automotivo também diz respeito às atividades de instalações de abastecimento nos postos de serviço e estações de compressão. Os postos de gás natural foram difundidos com a ampliação do número de carros que utilizam o GNV como combustível. O GNV nada mais é do que o gás natural na sua forma comprimida. O uso de gás natural como combustível de veículos em grandes centros urbanos é fundamental para a diminuição das emissões.

A cogeração é ideal para uso em empresas ou indústrias que necessitam simultaneamente de energia mecânica, frio, calor e eletricidade. Esse processo consiste na geração de mais de um tipo de energia a partir de um único combustível, por exemplo, o gás natural.

5. Estudo de caso: Posto de GNV

O posto de gás natural liquefeito será composto por um tanque para armazenar o GNL enquanto ainda não é necessário o seu uso, já que a forma liquefeita ocupa menor volume de armazenamento.

Para que se possa utilizar o gás natural em veículos, ele deve estar em sua forma comprimida, o conhecido GNC. O gás natural liquefeito é retirado do tanque de armazenamento, passando por bombas que o comprimem, aumentando sua

pressão. Após a passagem por essas bombas, o GNL passa por um vaporizador, trocando calor com um fluido intermediário que pode trocar calor com alguma outra substância, resfriando-a.

O gás natural passa então por um odorizador de alta pressão, onde é adicionada mercaptana, um composto de carbono, hidrogênio e enxofre que confere odor ao gás natural, permitindo a identificação de possíveis vazamentos.

A Fig.(8) mostra um esquema de abastecimento de um posto de gás natural com o GNL, em que é necessária a realização de compressão antes da passagem do combustível no vaporizador, no esquema da figura, atmosférico, seguida pela odorização e armazenamento do gás natural na sua forma comprimida.

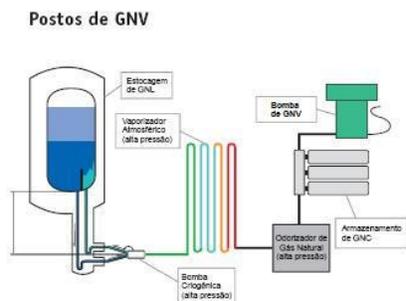


Figura 8. Esquema de um posto de abastecimento de GNL e seus equipamentos.

A partir da caracterização dos sistemas realizada nos itens anteriores desse relatório, pôde-se escolher a melhor alternativa para o estudo de caso proposto, da associação de um posto de GNV com a produção de gelo. Para que os sistemas fossem escolhidos, foi preciso a realização de um levantamento das características de um posto de abastecimento que comercializa gás natural.

A demanda mensal de GNV foi estabelecida como 150.000 Nm³ mensais, de acordo com ELBER, 2005. Para que esse volume de GNV possa ser atendido mensalmente, é necessário o armazenamento de aproximadamente 50.000 m³ de GNL, já que na sua forma liquefeita o gás natural ocupa cerca de três vezes menos volume do que na forma gasosa. A partir dessa demanda mensal foi escolhido um tanque de 50.000 m³, que deverá ser carregado por carretas de transporte, com capacidade de aproximadamente 25.000 m³.

O tanque de combustível para armazenar o GNL será o de parede dupla, contenção simples (“single containment”) e elevado em relação ao solo (“aboveground”), pois a quantidade armazenada e comercializada de gás não justifica o custo de um tanque mais complexo ou enterrado no solo. Para o tanque de armazenamento devem ser seguidas todas as normas de segurança para o tanque de GNL e para um posto de combustível.

O sistema de regaseificação escolhido é o com fluido intermediário, em que será utilizado um fluido que fornece calor para o GNL, fazendo com que este se torne gás e, ao mesmo tempo, retira calor da água contida em um refrigerador, tornando possível a produção de gelo. O trocador de calor utilizado é do tipo casco-tubo.

Essa associação pode ser representada pelo esquema daFig.(9), em que pode ser observado o tanque de armazenamento de GNL, o trocador de calor e o refrigerador.

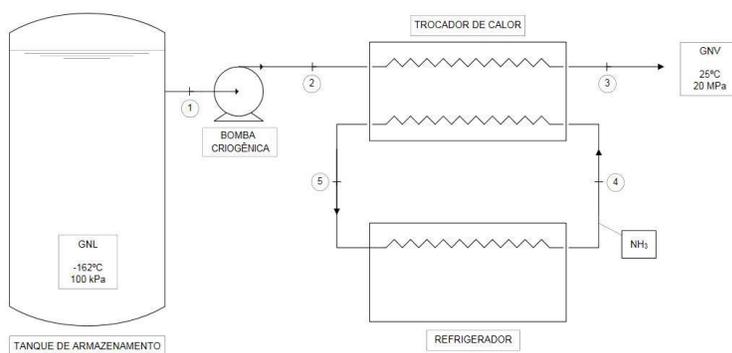


Figura 9. Esquema da instalação do posto de GNL (Tanque de armazenamento de GNL, bomba criogênica, trocador de calor e refrigerador).

O GNL é retirado do tanque com temperatura -162°C e pressão de 100 kPa, passando então por uma bomba que faz com que sua pressão aumente até 20 MPa, que é a pressão de armazenamento e abastecimento do GNV, e mantém a sua temperatura de -162°C.

Após a passagem pela bomba, o gás natural liquefeito passa por um trocador de calor do tipo casco e tubo, onde recebe calor de um fluido, passando para a fase gasosa, a 25°C e 20 MPa, sendo armazenado em um tanque próprio de um posto de abastecimento de GNV.

O fluido intermediário, que fornece calor para o GNL passa pelo casco do trocador do tipo casco e tubo, pois está à pressão menos elevada, utilizado na regaseificação. Após sua passagem pelo trocador o fluido passa pelo refrigerador, retirando calor da água que é congelada, ocorrendo então a produção de gelo. O sistema de regaseificação escolhido para o posto de abastecimento não precisará de fonte de ignição já que a regaseificação pode ser feita com baixa vazão de GNL, já que este é armazenado na sua forma comprimida para uso imediato, ou seja, a vaporização no posto não precisará ser imediata, já que o GNV ficará armazenado em um tanque próprio, garantindo certa demanda. Além disso, o custo da vaporização é menor por não se usar fonte de ignição.

Além dos equipamentos já citados para o posto de abastecimento, devem ser escolhidos os dutos e válvulas corretos para o escoamento do GNL antes da sua passagem no trocador de calor, já que sua baixa temperatura pode congelar os dutos e o próprio GNL pode regaseificar antes de chegar à bomba, o que pode acarretar problemas para esse equipamento. Por isso motivo, todos os dutos antes do trocador de calor são revestidos com algum tipo de isolamento, garantindo que o GNL permaneça na sua fase líquida. Além disso, o projeto da tubulação deve ter válvulas de segurança, que em caso de aumento da pressão dentro do duto devido à vaporização do GNL, permite que o excesso de vapor escape da tubulação.

Uma vez que o posto GNL não requer investimento em capacidade de compressão, o custo de investimento do posto se reduz em cerca de 20 a 30%, quando comparado a um posto padrão abastecido por gasoduto (IANGV, 1997).

5.1. Cálculos

Considerando o trocador de calor como um volume de controle, pode-se aplicar a primeira lei da termodinâmica:

$$\dot{Q}_{VC} + \dot{m} \cdot h_e = \dot{W}_{VC} + \dot{m} \cdot h_s \quad (1)$$

Para calcular o calor trocado entre o metano e a amônia no trocador de calor, foram considerados os seguintes estados para o metano, considerando a numeração igual ao do esquema da Fig.(9).

$$1: \begin{cases} T1=-162^\circ\text{C} \\ P1=100\text{kPa} \end{cases} \quad 2: \begin{cases} T2=-162^\circ\text{C} \\ P2=20\text{MPa} \end{cases} \quad 3: \begin{cases} T3=25^\circ\text{C} \\ P3=20\text{MPa} \end{cases}$$

Admitiu-se para o fluxo mássico de metano o valor de 9 kg/s, pois essa vazão é a mínima necessária para que seja possível regaseificar a quantidade consumida por mês se o vaporizador estiver em operação o tempo todo. Com os valores encontrados de entalpia, usando a expressão da primeira lei apresentada anteriormente e considerando-se que não há trabalho no trocador de calor:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{VC} &= \dot{m} \cdot (h_s - h_e) & (2) \\ \dot{Q}_{VC} &= 9 \cdot (443 - (-257,8)) \\ \dot{Q}_{VC} &= 6307,2 \text{ kJ / s} \end{aligned}$$

Sabe-se então que esse será o calor recebido pelo metano e cedido pela amônia. Conhecendo-se esse valor, pode-se encontrar o estado da amônia antes da troca de calor com a água. Para que esse cálculo seja possível, foi estipulado o estado para a amônia antes da troca com o metano, P=1,003MPa e T=25°C, e o estado depois da troca com o metano, P=1,003MPa e T=-70°C, de forma que a amônia sempre esteja na fase líquida durante o seu ciclo, possibilitando a operação da bomba que a faz circular. Com os estados já conhecidos e sabendo-se que o calor retirado da amônia é o que foi cedido ao metano, pode-se encontrar a vazão de amônia necessária para o sistema em questão.

$$\begin{aligned} -\dot{Q}_{VC} &= \dot{m} \cdot (h_s - h_e) \\ -6307,2 &= \dot{m} \cdot (-130,4 - 298,3) \\ \dot{m} &\cong 14,7 \text{ kg / s} \end{aligned}$$

Foram adotados o estado inicial da água com temperatura e pressão ambiente, T=25°C e P=100 kPa, e o estado final, na fase sólida, com T=0°C e P=100 kPa. A expressão da primeira lei da termodinâmica para esse sistema fica da seguinte forma:

$${}_i Q_f = m \cdot (u_f - u_i) \quad (3)$$

Os valores de energia interna podem ser encontrados em tabelas, já que as propriedades dos estados inicial e final são conhecidas. Substituindo os valores de energia interna $u_i=104,9$ kJ/kg e $u_f=-333,5$ kJ/kg, encontramos a massa que pode ser solidificada em determinado período de tempo, no caso, será calculado o valor para um mês.

$$\begin{aligned}
 {}_i Q_f &= m \cdot (u_f - u_i) \\
 -16.348.262.400 &= m \cdot (-333,5 - 104,9) \\
 m &\cong 37,3 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

Esse cálculo mostra que, por mês, é possível produzir no mínimo aproximadamente 37 toneladas de gelo no posto de combustível, desconsiderando-se as eficiências dos equipamentos. Caso esses valores de eficiência fossem considerados, a massa de gelo produzida seria de mais elevada, pois seria necessário maior fornecimento de calor ao GNL para sua vaporização.

6. Conclusões

O objetivo desse trabalho foi o estudo do emprego do GNL em uma aplicação, de forma que fosse possível seu armazenamento e transporte de forma mais flexível e econômica e, que ao mesmo tempo, possibilita-se uma associação para uso do “frio” da regaseificação.

Através de amplo levantamento bibliográfico sobre todos os sistemas envolvidos no estudo em questão, foi possível avaliar as opções disponíveis a fim de se encontrar a melhor opção para o estudo de caso escolhido.

Percebe-se, após a realização desse trabalho, que a tecnologia para o gás natural liquefeito já existe e é difundida pelo mundo, mas ainda não é amplamente difundida no Brasil, tendo seu início muito recentemente com uma planta de liquefação e um terminal marítimo de recepção de navios metaneiros.

Com o estudo realizado nesse trabalho, nota-se que a aplicação em pequena escala é mais bem aproveitada do ponto de vista energético e econômico quando uma associação, como a proposta, é empregada. Dessa forma, garante-se tanto certo retorno de gastos, como se torna uma opção ambientalmente mais correta, já que nenhum sistema é afetado pela troca de calor que ocorre na vaporização do GNL e há ainda a economia de energia que seria utilizada no processo de resfriamento.

A solução proposta nesse projeto é apenas uma dentre diversas aplicações possíveis, o que demonstra que pode existir mercado suficiente para a implementação em larga escala do GNL como combustível.

7. Referências

- ANP, 2005. “Agência Nacional de Petróleo”. Disponível em: http://www.anp.gov.br/gas/gas_precotarifas.asp. Acesso em: ago., 2007.
- 1991 ASHRAE handbook. Heating, ventilating and air conditioning applications. Atlanta, 1991.
- 1994 ASHRAE handbook. Refrigeration – Systems and Applications. Atlanta, 1994.
- COMGAS. São Paulo. “Companhia de gás de São Paulo”. Disponível em: www.comgas.com.br. Acesso em: maio, 2007.
- COMPAGAS. Paraná: “Companhia Paranaense de Gás”. Disponível em: www.compagas.com.br. Acesso em: maio, 2007.
- Franklin, D. A. “LNG Vaporizers: An Overview of LNG Vaporizer Technologies”. Black & Veatch. Mar., 2006. Disponível em: http://phts.homestead.com/phtsh_-_march_2006.pdf. Acesso em: ago., 2007.
- GÁSLOCAL. Disponível em: www.gaslocal.com.br/home.htm. Acesso em: nov., 2007.
- Geostok. “Lined Rock Caves for LNG storage”. Disponível em: www.geostockgroup.com/en/index.php3?con=minedunline&rubis=3. Acesso em: maio, 2007.
- Heat-Control Products. “LNG Vaporizers”. Disponível em: <http://www.spp.co.jp/English/jigyounetusei-e.html>. Acesso em: ago., 2007.
- LOM, W.L. “Liquefied Natural Gas”. England: Applied Science Publishers LTD, 1974. 178p.
- Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2007. Disponível em: <http://www.mhi.co.jp/ydmw/e/tank/lng/ug/index.htm>. Acesso em: ago., 2007.
- Munko, B. “Economic Design of Small Scale LNG Tankers and Terminals”. LNG Conference. Denmark, jun. 2007.
- NPFA. “National Fire Protection Association”. Disponível em: www.nfpa.org. Acesso em: jan., 2008.
- Selas Fluid Processing Corporation. Disponível em: [www.selasfluid.com/international/web/le/us/likeextllsfus.nsf/0/DF177ED5545D2251852572B10066C7A2/\\$file/LNG%20Brochure.pdf](http://www.selasfluid.com/international/web/le/us/likeextllsfus.nsf/0/DF177ED5545D2251852572B10066C7A2/$file/LNG%20Brochure.pdf). Acesso em: set., 2007.
- Ogavasar, E. K. N. “Estudo de viabilidade técnica da implantação da revenda de GNV num posto de abastecimento”. São Paulo, 2005.
- SIMOES-MOREIRA, J. R. ; BEGASO, C. D. T. ; CARVALHO, É. C. . “Small-Scale LNG Plant Technologies”. Hydrocarbon World 2007, v. 1, p. 28-33, 2007.
- TOKYO GAS, 2007. “In-Ground LNG Storage Tanks”. Disponível em: www.tokyo-gas.co.jp/lngtech/ug-tank/index.html. Acesso em: jul., 2007.

EVALUATION OF THE STORAGE, TRANSPORT E REGASIFICATION OF LIQUEFIED NATURAL GAS**Érica Cristina de Carvalho**

E-mail: erica.cristina.carvalho@poli.usp.br

Abstract: The objective of the present work is to make a technical and economical evaluation about storage systems, transport systems and regasification techniques for Liquefied Natural Gas. The project is divided in two main parts: the evaluation of all systems and a case study. Based on a bibliographic research, it was made the characterization of different systems that can be used to LNG, so it is necessary to choose the best alternative to use in a small application. The choice that was made is to study the application of a LNG gas station with ice production, based on researches about the use of NG as fuel and some refrigeration application. This case study was possible with the evaluation of the systems capability and costs. After the study of the association, for a gas station which consumption is about 150.000 Nm³ per month, it is possible to produce around 40 ton of ice and, this product can be commercialized, making an energy and cost reduction.

Key-words: *Natural Gas (storage), Gasification, Transport Systems (Evaluation), Refrigeration (Systems; Costs).*