

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Érica Cristina de Carvalho

São Paulo

2008

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

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

Trabalho de Formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia.

Érica Cristina de Carvalho

Orientador: Prof. Dr. José R. Simões Moreira

Área de concentração: Engenharia Mecânica

São Paulo

2008

## FICHA CATALOGRÁFICA

Carvalho, Érica Cristina de

Avaliação técnica-econômica do armazenamento, transporte e regaseificação do gás natural liquefeito / É.C. de Carvalho. – São Paulo, 2008.

81 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Gás natural (Armazenagem) 2.Gaseificação 3.Sistemas de transporte (Avaliação) 4. Refrigeração (Sistemas; Custos)  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar à minha família, que me deu forças e teve paciência comigo durante todos os momentos. Pelas palavras de motivação que me fizeram sempre perseguir meus objetivos em toda minha vida, especialmente durante minha graduação, pelo apoio emocional e lealdade incontestável.

Aos meus professores de graduação, cujas participações em minha formação foram de extrema importância. Agradeço principalmente ao professor José R. M. Simões, cuja orientação e amizade me auxiliaram no desenvolvimento desse projeto e possibilitaram que eu adquirisse novos conhecimentos. Aos meus amigos do laboratório SISEA, que me ajudaram e possibilitaram meu crescimento pessoal e profissional.

Aos também colegas do IEE, pelas experiências e idéias trocadas durante o desenvolvimento desse projeto, principalmente o Prof. Miguel Udaeta. À ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) pelas oportunidades e pelo apoio financeiro.

A todos os amigos que fiz nesses cinco anos de faculdade, que passaram comigo por diversos momentos difíceis e com quem espero sempre poder comemorar meus momentos felizes. Em especial aos meus amigos da Engenharia Mecânica, que estudaram e compartilharam comigo momentos de suas vidas. Aproveito também para agradecer a um amigo especial, Rafael, que em pouco tempo me fez mudar o modo de lidar com meus problemas.

“O futuro não pode ser previsto, mas pode ser inventado. É a nossa habilidade de inventar o futuro que nos dá esperança para fazer de nós o que somos.”

Dennis Gabor

## 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 avaliação está dividida em três etapas: levantamento de dados, avaliação técnica e avaliação econômica, onde o foco das avaliações está direcionado principalmente para a avaliação técnica dos sistemas.

Além das avaliações já mencionadas, apresenta-se um estudo sobre o aproveitamento do “frio” da regaseificação, em que é possível efetuar a associação com alguma indústria local. Para tanto, são levantados os usos dos sistemas de resfriamento.

Para esse estudo é necessária a realização de uma pesquisa de associações já existentes, assim como a proposição de algum tipo de associação entre indústrias com o objetivo de aproveitar a energia utilizada na vaporização do gás natural liquefeito.

Palavras-chave: Gás natural (Armazenagem), Gaseificação, Sistemas de transportes (Avaliação), Refrigeração (Sistemas; Custos).

## 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.

The evaluation is divided in three phases: data acquisition, technical evaluation and economical evaluation. This study is mainly focused on the technical aspects of the system.

Besides the abovementioned evaluations, the use of 'cold' energy transfer during LNG; vaporization, which, for instance, could be used in some small industry, will be analyzed. To achieve this goal, the use of cooling systems will be researched.

To conduct this study, the nowadays-available solutions will be researched and a new solution will be proposed in order to bring together industries to a better use of LNG vaporization energy use.

Key-words: Natural Gas (Storage), Gasification, Transport systems (Evaluation), Refrigeration (Systems; Costs)

# SUMÁRIO

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

## LISTA DE TABELA

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE GÁS NATURAL LIQUEFEITO</b> .....	<b>11</b>
2.1.	Classificação quanto às características de projeto.....	13
2.1.1.	<i>Teto com isolamento interno (“Roof inner insulation type”)</i> ...13	
2.1.2.	<i>Deque suspenso (“Suspended Deck Type”)</i> .....	14
2.2.	Classificação quanto à localização com relação ao solo.....	14
2.2.1.	<i>Tanque de Superfície ou Elevado (Sistema “aboveground”)</i> ...14	
2.2.2.	<i>Tanques Semi-enterrados (Sistema “in-ground”)</i> .....	16
2.2.3.	<i>Tanques Enterrados (Sistema “underground”)</i> .....	18
2.2.4.	<i>Sistemas de armazenamento em cavernas (“Lined Rock Cavern for LNG Storage”)</i> .....	19
2.3.	Classificação quanto ao sistema de contenção.....	20
2.3.1.	<i>Contenção simples (“single containment”)</i> .....	20
2.3.2.	<i>Contenção dupla (“double containment”)</i> .....	21
2.3.3.	<i>Contenção completa (“full containment”)</i> .....	22
2.3.4.	<i>Tanque tipo membrana (“Membrane type”)</i> .....	23
<b>3</b>	<b>SISTEMAS DE REGASEIFICAÇÃO DE GÁS NATURAL LIQUEFEITO</b> .....	<b>24</b>
3.1.	Vaporizador com Troca Externa (“Open Rack Vaporizer” - ORV).....	25
3.2.	Vaporizador com Fluido Intermediário (“Intermediate Fluid Vaporizer” - IFV)	26
3.3.	Vaporizador de Combustão Imersa (Submerged Combustion Vaporizer - SCV)	27
3.4.	Vaporizador de Banho de Água (“Water Bath”).....	28
3.5.	Vaporizador Casco e Tubo (“Shell and Tube Vaporizer” - STV).....	29
3.6.	Vaporizador com Ar Ambiente como Fluido de Aquecimento.....	30

3.7.	Ciclo combinado de Unidade de Calor e Energia com Vaporizador de Combustão Imersa (CHP-SCV) .....	31
3.8.	Comparação dos diversos tipos de vaporizadores .....	32
<b>4</b>	<b>SISTEMAS DE TRANSPORTE DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO...34</b>	
<b>5</b>	<b>APROVEITAMENTO DO “FRIO” DA REGASEIFICAÇÃO .....38</b>	
5.1.	Aplicações de sistemas de refrigeração .....	38
5.1.1.	<i>Indústria alimentícia</i> .....	38
5.1.2.	<i>Condicionamento de ar na indústria</i> .....	40
5.1.3.	<i>Condicionamento de ar para conforto</i> .....	41
5.1.4.	<i>Indústria de manufatura</i> .....	41
5.1.5.	<i>Indústria de construção</i> .....	41
5.1.6.	<i>Indústria química e de processos</i> .....	41
5.1.7.	<i>Medicina e indústria farmacêutica</i> .....	41
5.1.8.	<i>Metalurgia</i> .....	42
5.1.9.	<i>Fabricação de gelo</i> .....	42
5.1.10.	<i>Outras aplicações</i> .....	44
5.2.	Tipos de trocadores de calor para sistemas de refrigeração .....	44
5.3.	Possíveis associações do sistema de regaseificação .....	45
5.3.1.	<i>Ar condicionado central</i> .....	45
<b>6</b>	<b>USO DO GÁS NATURAL .....47</b>	
6.1.	Setor industrial .....	48
6.1.1.	<i>Ferro e aço</i> .....	49
6.1.2.	<i>Setor de química e petroquímica</i> .....	50
6.1.3.	<i>Setor de metais não-ferrosos</i> .....	50
6.1.4.	<i>Setor de minerais não-metálicos</i> .....	51
6.1.5.	<i>Setor de mineração</i> .....	52
6.1.6.	<i>Setor de alimentos e tabaco</i> .....	52
6.1.7.	<i>Setor têxtil e couro</i> .....	53
6.2.	Setor residencial .....	53
6.3.	Setor comercial e serviços públicos.....	54
6.4.	Transporte .....	54
6.4.1.	<i>Posto de gás natural</i> .....	55

6.5.	Setor de agricultura.....	56
6.6.	Geração de energia .....	56
6.7.	Cogeração.....	57
<b>7</b>	<b>ESTUDO DE CASO: POSTO DE GNV.....</b>	<b>61</b>
7.1.	Funcionamento do Posto de Gás Natural.....	61
7.2.	Sistema de resfriamento .....	65
7.3.	Sistemas selecionados para o Posto de Gás Natural.....	67
7.4.	Cálculos para a associação.....	69
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>73</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>78</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1.1</b> - Características do GN, GNC e GNL (Begaso, 2006). .....	9
<b>Figura 2.1</b> - Principais tipos de sistemas de armazenamento (Tanque de superfície, tanque semi-enterrado e tanque enterrado) (Tokyo GAS, 2007).....	11
<b>Figura 2.2</b> - Sistemas de contenção simples, dupla e completa (“single”, “double” e “full”). (TOKYO GAS, 2007).....	12
<b>Figura 2.3</b> - Sistema com teto com isolamento interno (“roof inner insulation” (Mitsubishi Heavy Industries, 2001).....	13
<b>Figura 2.4</b> - Sistema com deque suspenso (“suspended deck”) (Mitsubishi Heavy Industries, 2001). .....	14
<b>Figura 2.5</b> - Tanque de superfície (sistema “aboveground”) desenvolvido pela empresa KOGAS-Tech. (2006) .....	15
<b>Figura 2.6</b> - Tanque com base elevada de concreto (esquerda) e com fundação de concreto com aquecimento (direita). (Munko, 2007). .....	16
<b>Figura 2.7</b> - Relação entre o custo de construção e a capacidade de armazenamento do tanque semi-enterrado (“in-ground”) (TOKYO GAS, 2007).....	17
<b>Figura 2.8</b> - Sistema “in-ground” de armazenamento. (TOKYO GAS, 2007). .....	18
<b>Figura 2.9</b> - Visão superior de um sistema “underground” de armazenamento. (TOKYO GAS, 2007).....	18
<b>Figura 2.10</b> - Características do armazenamento em cavernas (GEOSTOCK, 2005). .....	19
<b>Figura 2.11</b> - Espaço necessário para armazenamento – comparação com sistemas convencionais (GEOSTOCK, 2005).....	20
<b>Figura 2.12</b> - Tanque de contenção simples (“single containment”) (Munko, 2007). .....	21
<b>Figura 2.13</b> - Tanque de contenção dupla (“double containment”) (Munko, 2007). .....	22
<b>Figura 2.14</b> - Tanque de contenção completa (“full containment”) (Munko, 2007). .....	23
<b>Figura 3.1</b> - Esquema de um vaporizador com troca externa (“open rack”) (TOKYO GAS, 2007).....	26

<b>Figura 3.2</b> - Esquema de um vaporizador com fluido intermediário (“intermediate fluid vaporizer”). (Franklin, 2006). .....	27
<b>Figura 3.3</b> - Esquema de um vaporizador com combustão imersa (“submerged combustion”) (SELAS FLUID PROCESSING CORPORATION, 2007). .....	28
<b>Figura 3.4</b> - Vaporizador do tipo banho de água (“water bath”). (Franklin, 2006)...	29
<b>Figura 3.6</b> - Exemplo de vaporizador do tipo casco e tubo (Franklin, 2006). .....	29
<b>Figura 3.7</b> - Processos de regaseificação atmosférica para uso em postos de GNV e para a indústria, (GasLocal, 2006).....	30
<b>Figura 3.8</b> - Vaporizadores atmosféricos, (planta de regaseificação em Andradas, MG, 2007). .....	31
<b>Figura 3.9</b> - Detalhe de um vaporizador (Kamikozuru et al, 2007).....	31
<b>Figura 4.1</b> – Exemplo de caminhão de transporte de GNL.....	35
<b>Figura 5.1</b> – Sistema de produção de gelo (ASHRAE, 1994).....	43
<b>Figura 5.2</b> - Trocador de calor casco e tubo com um passe e contra-corrente (UFMG).....	44
<b>Figura 5.3</b> - Trocador de calor de placas (Universidade de Caxias do Sul).....	45
<b>Figura 5.4</b> – Esquema de um sistema de regaseificação de GNL (GASNET, 2007). .....	46
<b>Figura 6.1</b> – Consumo do gás natural no Brasil por setor (BEN, 2007 - adaptado)..	48
<b>Figura 6.2</b> – Uso do gás natural nos sub-setores industriais (BEN, 2007 - adaptado). .....	49
<b>Figura 6.3</b> – Ciclo de cogeração do Hotel Sofitel (Acquaviva, 2006).....	59
<b>Figura 7.1</b> – Esquema de um posto de abastecimento de GNL e seus equipamentos (GasLocal, 2006). .....	62
<b>Figura 7.2</b> – Esquema de um posto de abastecimento de GNV (GASNET, 2006)...	63
<b>Figura 7.3</b> – Esquema da instalação do posto de GNL (Tanque de armazenamento de GNL, bomba criogênica, trocador de calor e refrigerador).....	68

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b> – Resumo das principais classificações de tanques de armazenamento. .	13
<b>Tabela 3.1</b> - Tabela comparativa de diversos vaporizadores (Franklin, 2006). .....	33
<b>Tabela 6.1</b> – Comparação de eficiência térmica entre geração termelétrica e cogeração.....	58
<b>Tabela 7.1</b> – Valores comparativos do GNV, álcool e gasolina para veículos automotivos .....	64
<b>Tabela 7.2</b> – Propriedades da amônia (NH <sub>3</sub> ) (Refrigeração Industrial por Amônia, 2004). .....	66
<b>Tabela 7.3</b> – Propriedades do metano nos pontos 2 e 3 do esquema da instalação apresentado.....	70

## 1 INTRODUÇÃO

O gás natural (GN) é um combustível de origem fóssil, assim como o petróleo, e na forma como é encontrado na natureza, é composto principalmente por metano, além de conter outros hidrocarbonetos como etano, propano, butano e outros mais densos, e impurezas como vapor de água, nitrogênio, dióxido de carbono e compostos de enxofre, permanecendo gasoso nas condições de temperatura e pressão ambiente. Devido à sua composição, sua queima é mais limpa e uniforme, libera menos fuligem, particulados e outras substâncias prejudiciais ao meio ambiente (COMGAS).

A motivação para a realização desse projeto vem do fato de o GN ser um combustível considerado seguro e mais limpo, entre outras vantagens, mas também por ser de difícil transporte e armazenamento, já que no estado gasoso ocupa grande volume para poucos quilogramas de fluido.

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos e quando ocorre em conjunto com o petróleo, o gás é dito associado, já quando não há petróleo no reservatório ou apenas em pequenas quantidades, o gás é dito não associado (Fernandes e Shen, 2005).

O GN é considerado um combustível seguro, pois sua dispersão na atmosfera em caso de vazamentos é fácil e rápida, por esse gás ser menos denso que o ar, ou seja, diferentemente do gás de cozinha (GLP – gás liquefeito de petróleo), ele não se acumula no nível do solo, o que evita asfixia e potenciais explosões. Os componentes do GN são inertes no corpo humano, não causando intoxicação (GASNET, 2007).

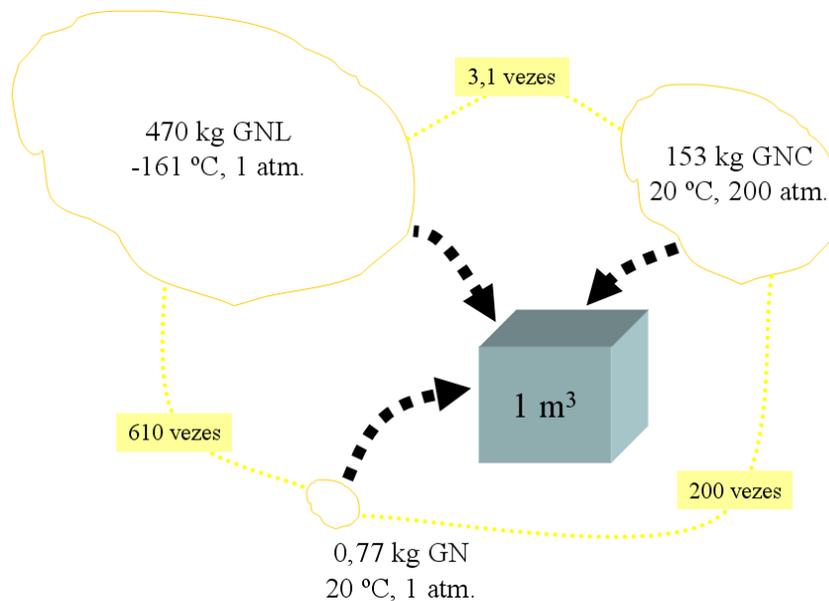
Outro fator de segurança do GN é o reduzido risco de incêndio devido ao seu alto limite de inflamabilidade inferior, o que significa que é preciso significativa quantidade de GN com relação ao ar para que ocorra queima, ou seja, em caso de vazamentos não é fácil manter a sua combustão pela presença de alguma fonte de calor, como um cigarro, por exemplo. Além disso, a faixa entre os limites de inflamabilidade inferior e superior é estreita, o que significa que mesmo que o limite inferior seja atingido, como o GN se dispersa rapidamente no ar, o limite superior

logo é superado, não sendo possível manter a auto-sustentação da combustão (GASNET, 2007).

A ANP (Agência Nacional de Petróleo) determina que o GN deve conter baixos teores de umidade, dióxido de carbono e compostos de enxofre para que não cause corrosão em tubulações, contribuindo para evitar vazamentos destas.

O gás natural é gasoso à pressão e temperatura ambiente, o que dificulta seu transporte e armazenamento uma vez que o gás possui baixa densidade, ou seja, para armazenar 1kg de gás é necessário maior volume do que para armazenar a mesma quantidade de líquido.

A solução encontrada para a dificuldade de transporte e armazenamento foi a pressurização do gás, chegando ao conhecido GNC (gás natural comprimido). Quando comprimido à temperatura ambiente e 200 atm, para um mesmo volume, pode-se armazenar 200 vezes mais massa do que à pressão ambiente (1atm). Outra solução é a liquefação do gás natural, mantendo a pressão a 1 atm, retira-se calor até que o gás atinja a temperatura de  $-162^{\circ}\text{C}$ , quando se torna líquido. Para um mesmo volume, pode-se armazenar aproximadamente 610 vezes mais massa de gás natural liquefeito (GNL) do que de GN. A Figura 1.1 representa as soluções propostas acima.



**Figura 1.1** - Características do GN, GNC e GNL (Begaso, 2006).

Percebe-se que o GNL é uma ótima solução em termos de espaço, mas por estar à temperatura criogênica, os tanques de armazenamento e transporte devem possuir características específicas para minimizar perdas de calor com o meio ambiente e, ao mesmo tempo, apresentar segurança com relação a vazamentos.

## 2 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE GÁS NATURAL LIQUEFEITO

O gás natural liquefeito deve ser armazenado à temperatura de aproximadamente  $-162^{\circ}\text{C}$ , o que requer um bom sistema de isolamento para que a perda de calor para o meio seja mínima e o gás permaneça na fase líquida.

O isolamento dos reservatórios conhecidos não é suficiente para manter a temperatura baixa, devendo-se manter o gás à temperatura de evaporação e à pressão constante, já que dessa forma, mesmo que se forneça calor ao gás, sua temperatura não é modificada desde que se libere o vapor do reservatório. Esse vapor liberado do reservatório é conhecido como “boil-off”

Existem diversos tipos de tanques de armazenamento, dependendo da quantidade que se deseja armazenar, do local em que o tanque está localizado e da disponibilidade de tecnologia e material.

Os tanques de armazenamento de gás natural liquefeito podem ser classificados de acordo com três parâmetros principais: localização, características de projeto e tipo de contenção.

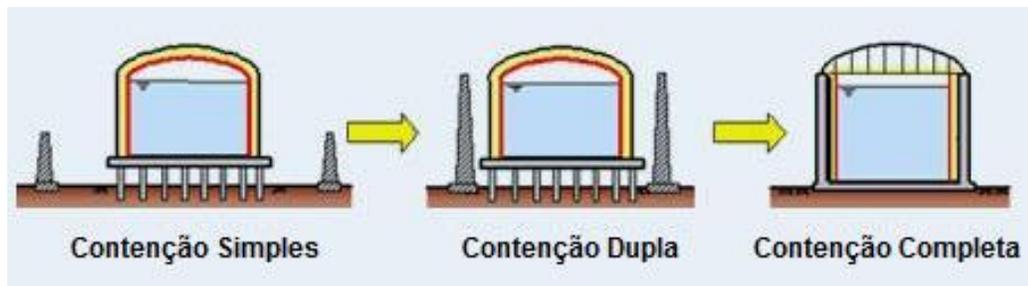
Com relação à localização, os tanques podem ser classificados como de tanque de superfície (“aboveground”), tanque semi-enterrado (“in-ground”) ou tanque enterrado (“underground”), como mostrado na Figura 2.1.



**Figura 2.1** - Principais tipos de sistemas de armazenamento (Tanque de superfície, tanque semi-enterrado e tanque enterrado) (TOKYO GAS, 2007).

A localização do tanque acima ou abaixo do solo determina algumas características em seu projeto, pois de acordo com o local do tanque, devem ser tomadas algumas medidas com relação ao isolamento, à segurança, dentre outros fatores. Os tipos de armazenamento de acordo com a localização em relação ao solo serão posteriormente apresentados.

Há uma classificação dos tanques quanto ao seu tipo de contenção. De acordo com a BS7777 (British Standards) os tanques são classificados em três tipos: contenção simples (“single containment”), contenção dupla (“double containment”) e contenção completa (“full containment”). Existe ainda um outro sistema conhecido como “membrane type”. A Figura 2.2 mostra os três tipos mais comuns de sistemas de contenção.



**Figura 2.2** - Sistemas de contenção simples, dupla e completa (“single”, “double” e “full”). (TOKYO GAS, 2007).

Já a norma americana NFPA59A classifica os tanques em parede única ou parede dupla, sendo que na última, estão inclusos os sistemas de contenção simples, dupla e completa.

Geralmente, o tanque de armazenamento possui dois tanques, em que o interno é composto de aço com aproximadamente 9% de níquel e é desenvolvido para resistir a produtos criogênicos, além de prevenir vazamentos de gás. Já o tanque externo é projetado para resistir todas as cargas externas, incluindo cargas sísmicas. Os tanques possuem entradas no topo tanto para cargas como descargas de gás.

Esses sistemas de contenção serão mais bem detalhados em um próximo item desse relatório.

Com relação às características de projeto do tanque, os tanques são classificados como com teto com isolamento interno (“roof inner insulation type”)

ou com deque suspenso (“suspended deck type”). A seguir, serão apresentados esses dois tipos de tanque.

A Tabela 2.1 apresenta as principais classificações dos sistemas de armazenamento usados.

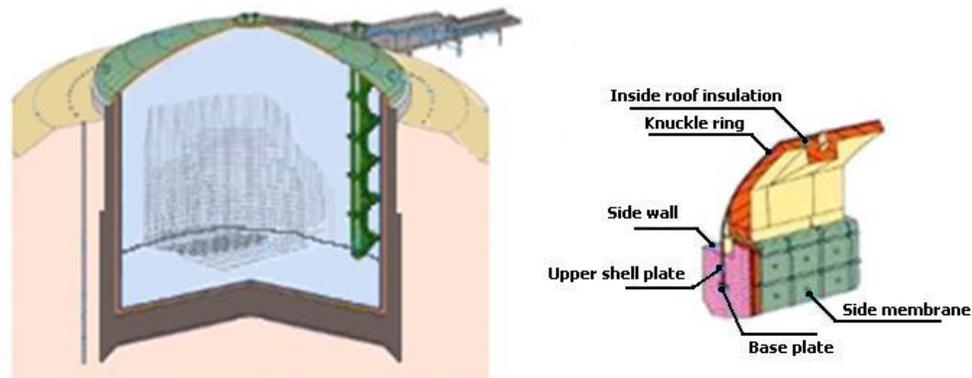
**Tabela 2.1** – Resumo das principais classificações de tanques de armazenamento.

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	Deque suspenso	Teto com isolamento interno		

## 2.1. Classificação quanto às características de projeto

### 2.1.1. Teto com isolamento interno (“Roof inner insulation”)

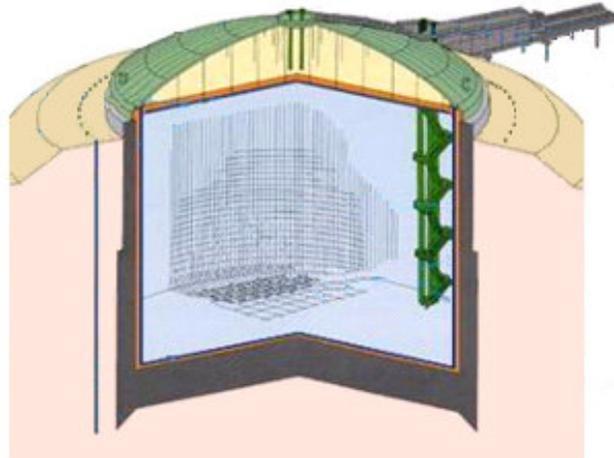
A Figura 2.3 representa um tanque com isolante no domo sem a utilização de um deque suspenso.



**Figura 2.3** - Sistema com teto com isolamento interno (“roof inner insulation”) (Mitsubishi Heavy Industries, 2001).

### 2.1.2. Deque suspenso (“Suspended Deck Type”)

No sistema com deque suspenso a parte interna do teto de alumínio pode ser suportado pela parte externa do teto, que é fixo, por um sistema de cabos. Utilizando-se esse sistema, a elevação do teto interno pode ser ajustada podendo ficar mais ou menos elevada. Esse sistema é um método seguro de ajustar a altura do teto e eliminar obstruções facilitando a manutenção do tanque. A Figura 2.4 representa um tanque com deque suspenso.



**Figura 2.4** - Sistema com deque suspenso (“suspended deck”) (Mitsubishi Heavy Industries, 2001).

## 2.2. Classificação quanto à localização com relação ao solo

Os tanques de armazenamento podem ser classificados quanto a três posições em relação ao solo: tanque de superfície ou elevado (sistema “aboveground”), tanque semi-enterrado (sistema “in-ground”) ou tanque enterrado (sistema “underground”).

### 2.2.1. Tanque de Superfície ou Elevado (Sistema “aboveground”)

O tanque elevado é aquele que se encontra acima do solo sustentado por qualquer estrutura. Já o tanque de superfície se encontra acima do solo, mas com sua base diretamente à superfície do terreno.

Por se localizar acima do solo, o tanque de superfície ou elevado (sistema “aboveground”) deve ser protegido de choques causados por veículos automotivos, fios elétricos, postes, muros e cercas. Além disso, o tanque deve ser projetado para garantir certa segurança contra qualquer tipo de carga externa, como, por exemplo, rajadas de ventos, terremotos, vibrações, dentre outros.

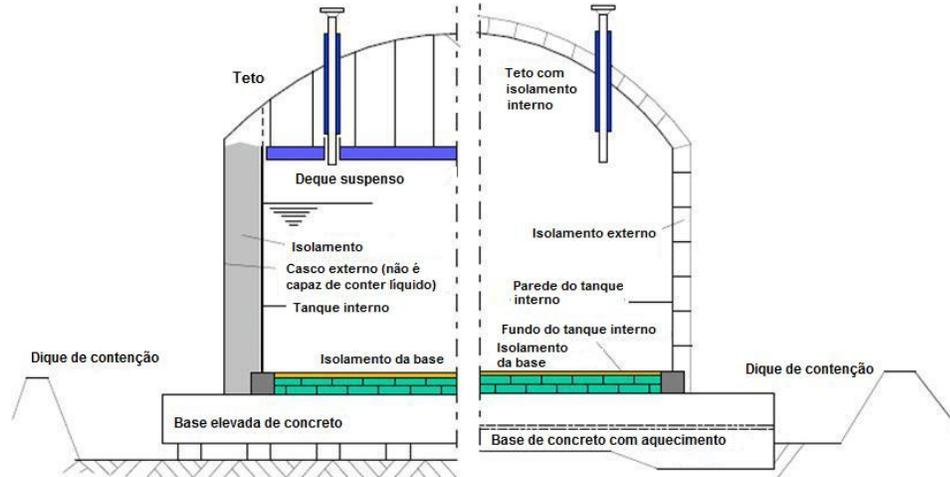
A Figura 2.5 apresenta um tanque de superfície (sistema de armazenamento “aboveground”) desenvolvido pela empresa KOGAS-Tech, com capacidade de 200.000m<sup>3</sup> e construído no ano de 2006.



**Figura 2.5** - Tanque de superfície (sistema “aboveground”) desenvolvido pela empresa KOGAS-Tech. (2006)

O tanque nem sempre é construído no solo, podendo ser construído sobre uma base elevada do solo, sendo conhecido como tanque elevado, como é mostrado do lado esquerdo da Figura 2.6.

Além dessa configuração, o tanque pode estar sobre uma base de concreto com aquecimento inferior (“concrete foundation with bottom heater”), que evita o congelamento do solo. Essa característica pode ser observada do lado direito da Figura 2.6.



**Figura 2.6** - Tanque com base elevada de concreto (esquerda) e com fundação de concreto com aquecimento (direita). (Munko, 2007).

### 2.2.2. Tanques Semi-enterrados (Sistema “in-ground”)

Tanques semi-enterrados (sistemas “in-ground”) são aqueles que estão parte acima do nível solo (teto) e parte abaixo do nível do solo (paredes). Esse tipo de tanque de armazenamento tem alta segurança e é ecologicamente amigável. A parede e o fundo (laje) do tanque possuem múltipla estrutura com três camadas: concreto pré-esforçado, isolamento e uma membrana. Os itens apresentados a seguir, apresentam os materiais usados para a construção desse tipo de tanque de armazenamento.

Esse tipo de tanque, por estar com suas paredes e fundo enterrados, está sujeito a pressões exercidas pela água e pela terra que são maiores que a pressão interna. O melhor material para ser usado nas paredes desse tipo de tanque é o concreto pré-esforçado, já que pode suportar compressão. Os tanques são especialmente desenvolvidos para resistir terremotos, enfatizando seu nível de segurança.

Para o isolamento do tanque, é usada uma espuma de poliuretano flexível (PUF), restringindo a transferência de calor de fora para dentro do tanque e transferindo a pressão interna exercida pelo GNL nas paredes e no fundo do tanque.

Internamente, uma membrana de 2 mm mantém a tensão do GNL e do gás. A membrana é ondulada para absorver a contração devido à diferença de temperatura entre o ambiente e o gás natural liquefeito (diferença de 162°C).

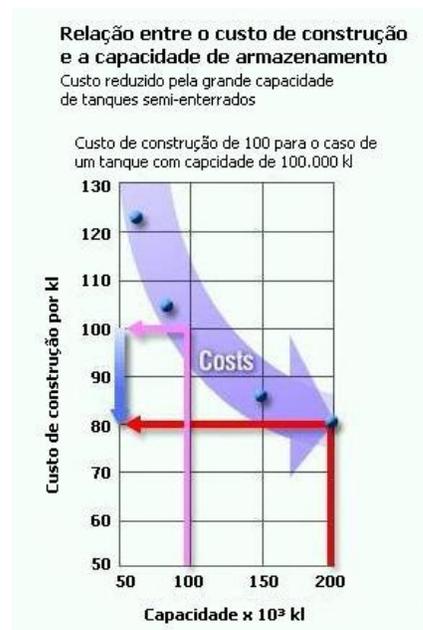
Em regiões em que é possível ocorrer ataques terroristas, o teto é feito reforçado.

O tipo de tanque para armazenamento semi-enterrado é considerado a maneira mais segura de armazenar gás natural liquefeito pela EN 1437 (European Norms). Nesse sistema, o tanque é apenas parcialmente visível, sendo mais seguros que tanques de superfície em casos de terremotos, pois não permitem a amplificação de abalos sísmicos.

Outra vantagem desse sistema, quando comparado ao sistema de superfície, é o menor espaço físico ocupado, já que a distância requerida entre tanques semi-enterrados requerida por norma, deve ser apenas a necessária para a construção desses tanques.

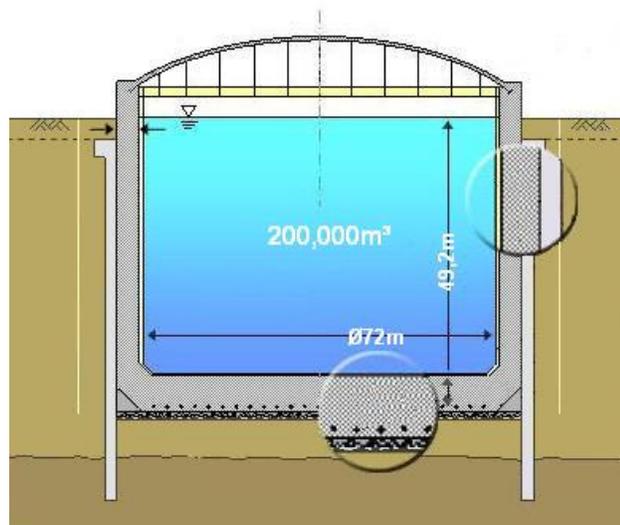
Pelo fato de o tanque estar semi-enterrado e à baixa temperatura, pode ocorrer o congelamento do solo ao redor do tanque, provocando estresse térmico. Uma das soluções para esse problema é a colocação de algum sistema de aquecimento do solo suficiente para que este não congele.

Pode-se observar na Figura 2.7 a relação entre o custo de construção e a capacidade de armazenamento do sistema semi-enterrado (“in-ground”).



**Figura 2.7** - Relação entre o custo de construção e a capacidade de armazenamento do tanque semi-enterrado (“in-ground”) (TOKYO GAS, 2007).

Na Figura 2.8, observa-se um típico tanque semi-enterrado.



**Figura 2.8** - Sistema “in-ground” de armazenamento. (TOKYO GAS, 2007).

### 2.2.3. Tanques Enterrados (Sistema “underground”)

Os tanques de armazenamento enterrados (“sistemas “underground”) são localizados completamente abaixo do solo, como pode ser observado na Figura 2.9. Suas características são possuírem a parede externa de concreto armado, um isolamento de poliuretano flexível (PUF) e uma membrana de 2mm de aço inoxidável. A estrutura superior consiste em um teto em formato de domo feito de concreto armado, tendo internamente membrana e isolamento.



**Figura 2.9** - Visão superior de um sistema “underground” de armazenamento. (TOKYO GAS, 2007).

#### 2.2.4. Sistemas de armazenamento em cavernas (“Lined Rock Cavern for LNG Storage”)

O sistema “Lined Rock Cavern” é aquele em que uma caverna é aproveitada para o armazenamento do GNL, sendo que deve passar por uma série de procedimentos para que possa ser utilizada. Depois de preparada para uso, o sistema em caverna consegue conter o GNL e protegê-lo de choques térmicos.

No interior da caverna são colocadas camadas de material para formação do sistema de contenção. Junto à rocha, coloca-se concreto, depois o material isolante que é uma espuma de poliuretano flexível (PUF) e, como contenção, uma membrana de aço inoxidável.

Nos primeiros meses de funcionamento é utilizado um sistema de drenagem para remover a água que está ao redor da caverna e para prevenir a ação de pressões hidrostáticas no sistema de armazenamento. Quando uma quantidade suficiente de massa de GNL resfriada é colocada na caverna, o sistema de drenagem não é mais utilizado, permitindo que a água escoe para dentro da rocha e forme, de forma controlada, um anel de gelo impermeável. A Figura 2.10 mostra características do sistema de isolamento e do anel de gelo externo para o armazenamento em cavernas.

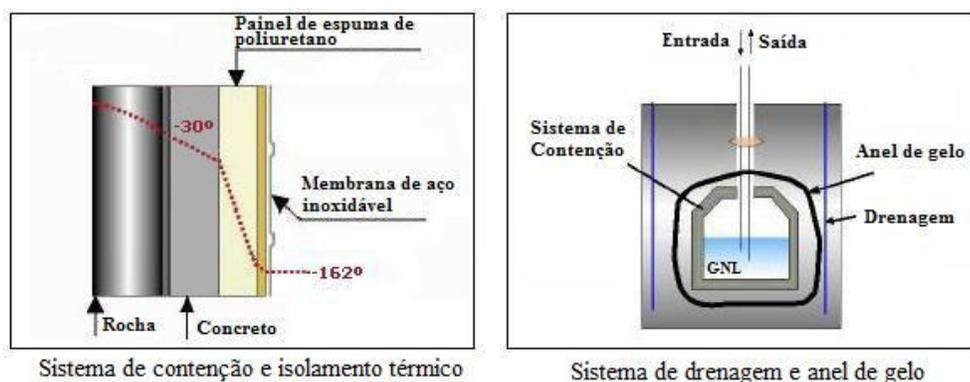


Figura 2.10 - Características do armazenamento em cavernas (GEOSTOCK, 2005).

O armazenamento subterrâneo é seguro e ecologicamente aceitável. Outra vantagem é a minimização do espaço requerido para o terminal de GNL. Isso porque o armazenamento é feito a 50m de profundidade, contribuindo para redução de

custos especialmente em regiões litorâneas onde as indústrias já estão desenvolvidas e as áreas desocupadas são escassas e caras.

Estudos de custo baseados em referências da Coreia do Sul mostraram que o custo para esse tipo de unidade se encontra entre os custos dos convencionais sistemas de tanque de superfície (“aboveground”) e de tanque semi-enterrado (“in-ground”) de armazenamento. Mesmo assim, o tanque de armazenamento enterrado (underground) é mais competitivo que os outros sistemas. A Figura 2.11 mostra uma comparação do espaço ocupado pelos diferentes tipos de armazenamento. Nesse esquema são apresentadas figuras de cada tipo de sistema de armazenamento com um desenho logo abaixo, que compara a área ocupada pelo sistema (área cinza) com a área aproveitada para o armazenamento do GNL (área alaranjada). Pode-se observar pelo esquema que com relação à área, o sistema de armazenamento em cavernas é o que possui melhor relação área ocupada/área de armazenagem.



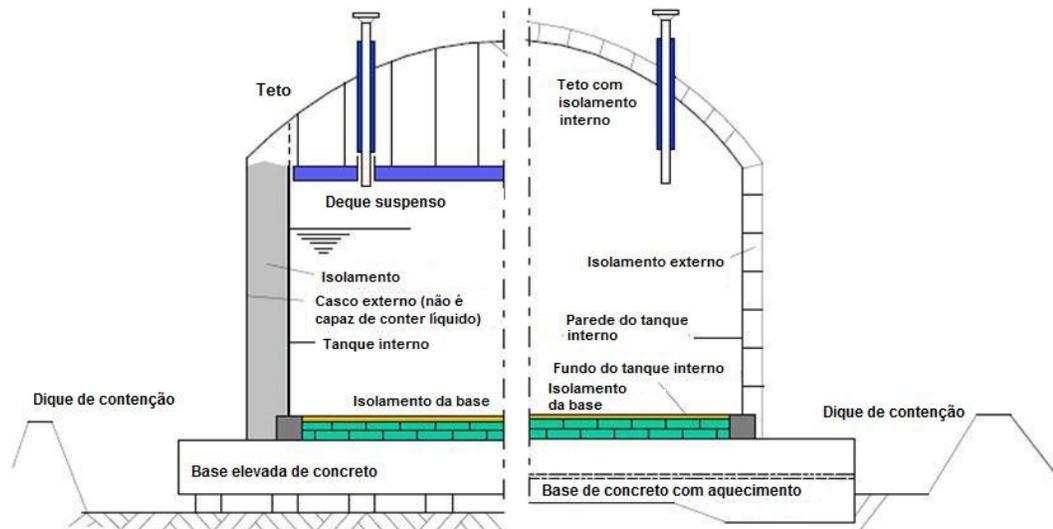
**Figura 2.11** - Espaço necessário para armazenamento – comparação com sistemas convencionais (GEOSTOCK, 2005).

### 2.3. Classificação quanto ao sistema de contenção

#### 2.3.1. *Contenção simples (“single containment”)*

O sistema de contenção simples é composto por um tanque interno que contém o produto e um tanque externo que retém e protege o isolamento. Esse sistema é apresentado na Figura 2.12. Nessa figura podem-se observar duas metades de tanques, sendo a parte esquerda com deque suspenso (“suspended deck type”) e

com base elevada de concreto e a parte direita com isolamento no teto (“roof inner insulation”) com base de concreto na altura do solo.



**Figura 2.12** - Tanque de contenção simples (“single containment”) (Munko, 2007).

Caso ocorra um aumento de pressão ou qualquer outra condição adversa que seja capaz de romper o tanque interno, a parede externa não é capaz de conter o líquido e acaba se rompendo. Nesse caso, para que o líquido não se espalhe e fique contido em uma área segura, realiza-se a construção de um dique ao redor do tanque, de dimensões tais que consiga armazenar volume de líquido equivalente ao do tanque, impedindo que o GNL se espalhe. Esse dique pode ser observado na Figura 2.12, apresentada acima.

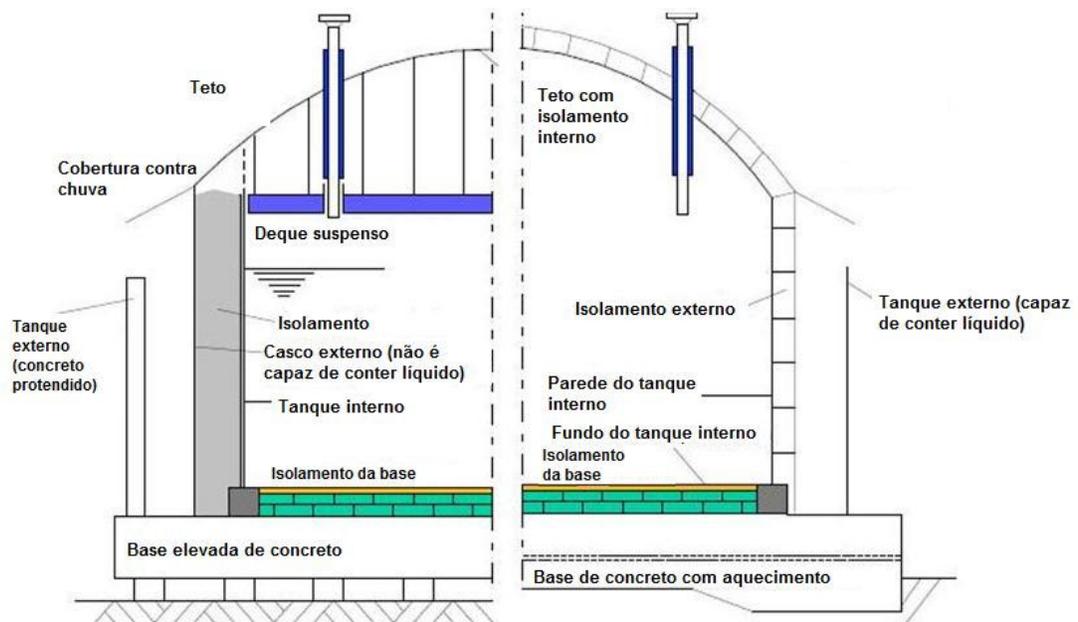
### 2.3.2. *Contenção dupla (“double containment”)*

O sistema de contenção dupla é composto por um tanque igual ao do sistema de contenção simples, possuindo uma parede interna, o isolamento e uma parede externa. A diferença desse tipo de sistemas é que no de contenção dupla há um tanque externo a esse que em caso de rompimento do interno, é capaz de conter o produto líquido (mas não o vapor, que se espalha).

O tanque externo é geralmente feito de concreto protendido e, além de armazenar líquido em caso de vazamentos, também é responsável por proteger o

tanque interno em caso de choques ou abalos sísmicos. O sistema descrito é apresentado na Figura 2.13.

Embora o tanque externo de concreto aumente os custos em relação ao sistema simples de contenção, a área requerida para esse sistema é menor, uma vez que o dique não é mais necessário, não sendo necessária uma área tão extensa ao redor do tanque.



**Figura 2.13** - Tanque de contenção dupla (“double containment”) (Munko, 2007).

### 2.3.3. *Contenção completa (“full containment”)*

O sistema de contenção completa é composto por um tanque igual ao do sistema de contenção simples e, em caso do rompimento deste, há um tanque externo que é capaz de conter o produto líquido e mesmo o vapor do GNL. Esse sistema é apresentado na Figura 2.14.

Esse tanque externo deve ser capaz de resistir a choques e abalos sísmicos, protegendo assim o sistema interno. O material usado para o sistema externo é o concreto protendido.

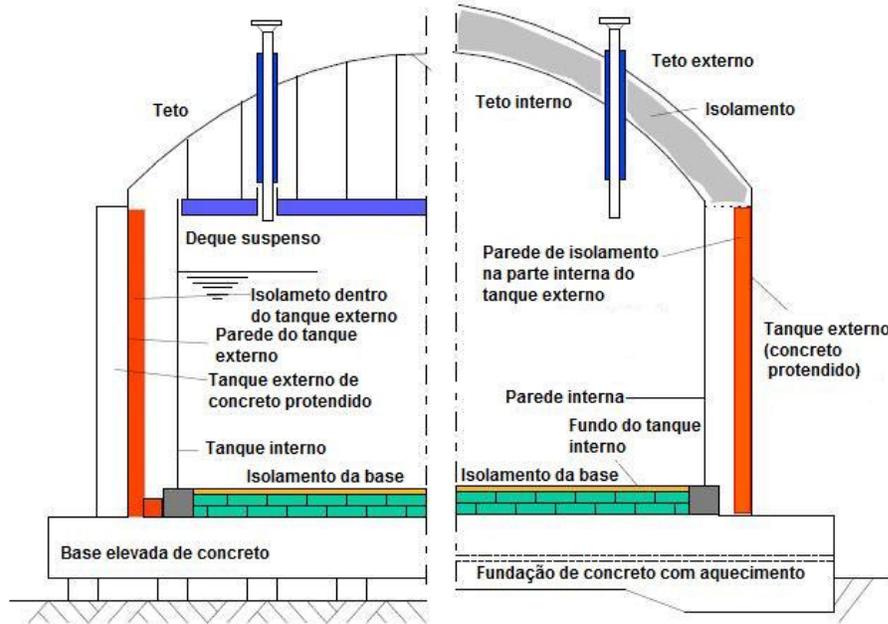


Figura 2.14 - Tanque de contenção completa (“full containment”) (Munko, 2007).

#### 2.3.4. Tanque tipo *membrane* (“*Membrane type*”)

O tanque de armazenamento tipo *membrane* é constituído de um tanque de concreto protendido com uma camada de isolamento interna coberta por uma membrana fina de aço inoxidável. O tanque de concreto suporta cargas hidrostáticas, as quais são transferidas através da membrana e do isolamento, ou seja, a membrana não é auto-sustentável. A membrana deve contrair e expandir com a mudança de temperatura.

Esse sistema é utilizado em navios de transporte de GNL, sendo que pode haver diversas variações na membrana, mas todas são feitas de ligas de metal cercadas por um material isolante e outra camada de aço.

### 3 SISTEMAS DE REGASEIFICAÇÃO DE GÁS NATURAL LIQUEFEITO

Os terminais de recepção de gás natural liquefeito armazenam o gás em tanques especiais, depois vaporizam o GNL e ou o injetam em uma linha de distribuição, utilizando o gás como combustível como uso final.

Essa parte do projeto trata da etapa da vaporização do GNL, para que ele possa ser distribuído ou consumido no local da revaporização.

De acordo com a norma NFPA 59A, os vaporizadores podem ser classificados em cinco tipos. A seguir serão apresentados essas cinco classificações e, logo depois, serão descritos os tipos mais comuns de vaporizadores utilizados no mundo, suas principais características e um quadro comparativo entre os sistemas.

Classificação segundo a NFPA 59A:

- Vaporizador Aquecido (“Heated vaporizer”): recebe calor da combustão de um fluido, de um sistema elétrico, através da perda de calor de um sistema de “boilers”, ou de equipamentos de combustão interna;
- Vaporizadores com Aquecimento Integrado (“Integral heated vaporizers”): são os vaporizadores em que a fonte de calor está integrada à câmara de vaporização, o que inclui o tipo “vaporizador de combustão imersa”;
- Vaporizadores Ambientes Remotos (“Remote heated vaporizers”): são os vaporizadores cuja fonte de calor primária está separada da câmara de vaporização e se utiliza um fluido intermediário para o transporte de calor;
- Vaporizadores Ambientes (“Ambient vaporizers”): são os vaporizadores cuja fonte de calor é natural, como a atmosfera, água do mar ou fontes de águas termais. Se a temperatura da fonte de calor natural ultrapassa os 100°C, o vaporizador é considerado “vaporizador ambiente remoto”. Se a fonte de calor natural é separada da câmara de vaporização e um meio controlado é usado para a condução de calor para a câmara, o vaporizador é considerado um “vaporizador ambiente remoto”.

- Vaporizadores de Processo (“Process vaporizers“): são os vaporizados cujo calor provém de um processo termodinâmico ou químico, ou ainda de um processo que utilize o “frio” do gás natural liquefeito.

Após a apresentação dos principais tipos de vaporizadores, será apresentada uma tabela comparativa desses sistemas.

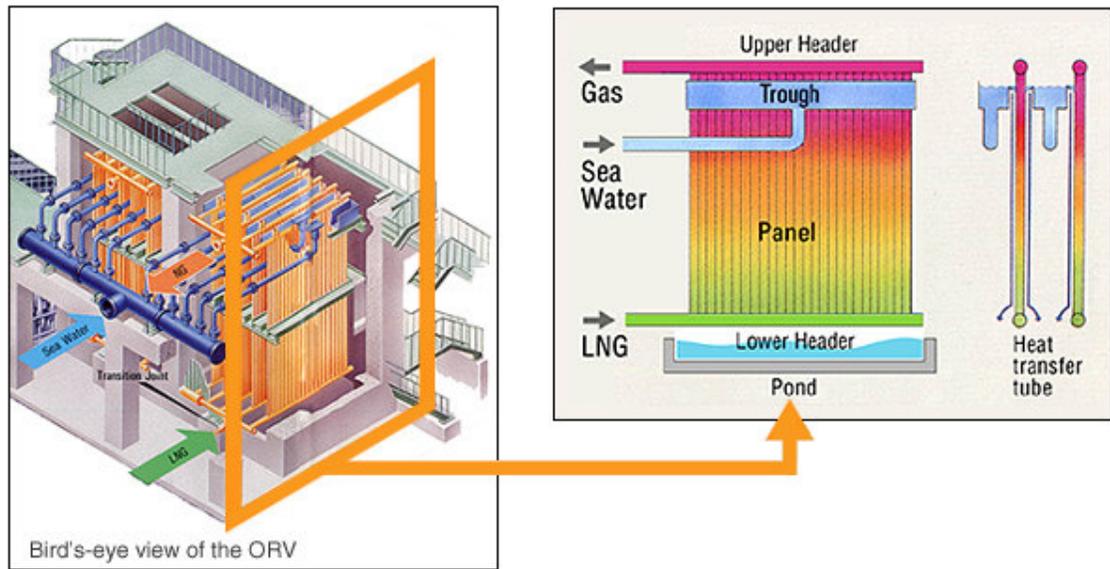
### **3.1. Vaporizador com Troca Externa (“Open Rack Vaporizer” - ORV)**

Esse vaporizador é do tipo “vaporizador ambiente”, pois utiliza a água do mar como fonte de calor, sendo utilizado na maioria dos terminais de recepção do mundo, principalmente na Europa e Ásia, representando 70% do total. Esse tipo de vaporizador possui baixo custo, construção simples, fácil manutenção, elevadas confiabilidade e segurança.

Esse vaporizador é constituído de liga de alumínio que possui boas características a baixas temperaturas e condutividade térmica alta. Geralmente utilizado em plantas de regaseificação de terminais marítimos, usando água do mar para vaporizar o GNL.

As características da água são críticas para o funcionamento desse vaporizador. Para proteger o ORV contra corrosão pela água do mar, é empregada uma liga de alumínio-zinco nas partes em contato com a água do mar. Em lugares onde a água do mar pode ficar em aproximadamente 5°C, o uso de ORVs não é recomendado porque a baixa temperatura pode causar congelamento da água.

Os vaporizadores ORV apresentam a vantagem de serem seguros, além de não precisarem de fonte de calor. A fonte de calor utilizada é a água do mar, não sendo uma fonte cara. Sua principal desvantagem é o impacto ao ambiente marinho, além de seu uso estar restrito devido à qualidade da água e da necessidade de manutenção periódica. A Figura 3.1 mostra o esquema de um vaporizador com troca externa.



**Figura 3.1** - Esquema de um vaporizador com troca externa (“open rack”) (TOKYO GAS, 2007).

### 3.2. Vaporizador com Fluido Intermediário (“Intermediate Fluid Vaporizer” - IFV)

Esse tipo de vaporizador é classificado como “vaporizador ambiente remoto”, pois utiliza um fluido intermediário para a transferência de calor para a câmara de vaporização. É necessária grande quantidade de água do mar para prover quantidade suficiente de calor para regaseificar o GNL.

Esse tipo de vaporizador é um trocador de calor vertical tipo casco e tubo, sendo que o GNL passa pelo tubo para ser regaseificado, e pelo casco passa uma solução de 25% de propileno glicol (PG), como fluido intermediário.

As vantagens desse vaporizador são o baixo custo inicial, baixo custo da fonte de calor, facilidade de iniciar e manter sua operação, a baixa quantidade de emissões e a necessidade de pouca manutenção.

Como desvantagens, apresentam impacto à vida marinha pelo decréscimo da temperatura (quando a água do mar é utilizada como fluido), introdução de propano no sistema e baixa eficiência térmica. A Figura 3.2 representa um esquema desse tipo de vaporizador.

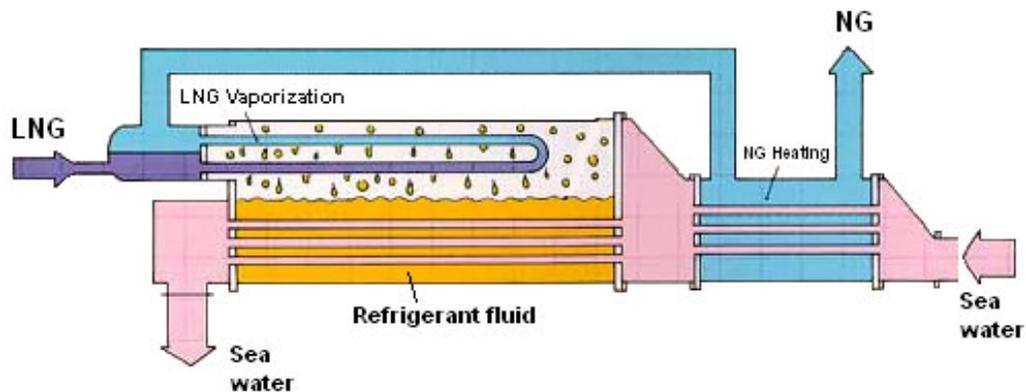


Figura 3.2 - Esquema de um vaporizador com fluido intermediário (“intermediate fluid vaporizer”).

(Franklin, 2006).

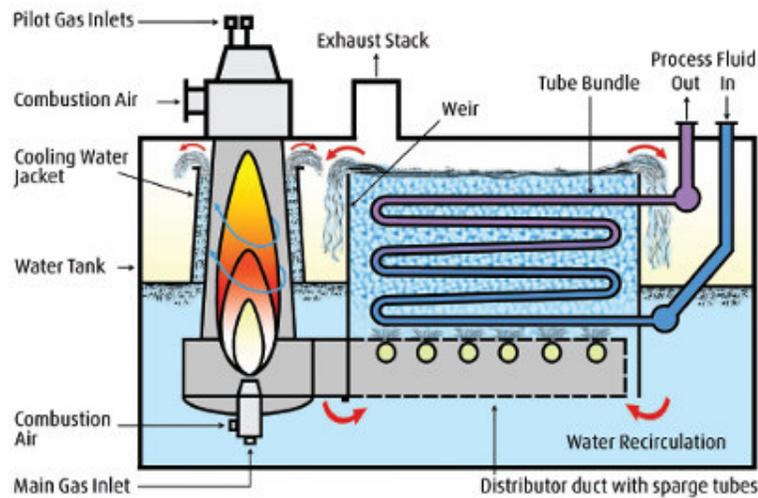
### 3.3. Vaporizador de Combustão Imersa (Submerged Combustion Vaporizer - SCV)

Outro método para a vaporização do GNL é realizado com a utilização de um vaporizador localizado em um banho de água que é constantemente aquecida, fornecendo mais calor ao gás do que quando se utiliza o vaporizador atmosférico. Esse vaporizador é do tipo “vaporizador com aquecimento integrado”.

Esse tipo de vaporizador possui baixo custo, elevada eficiência (>98%), partida rápida (“quick startup”) e é utilizado principalmente em situações de emergência ou em “peak-shaving”. Suas desvantagens são o alto custo de operação, o impacto ambiental (NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>) e a necessidade de fonte de calor.

Embora possua a vantagem de ser mais satisfatório, para que se aqueça constantemente a água, é necessária a queima de algum combustível, podendo ser usado o próprio gás natural. Uma alternativa para aquecer a água é usar o “boil-off” do gás como combustível.

O “boil-off” é o vapor formado a partir da evaporação do combustível dentro do tanque de armazenamento, sendo que essa formação de vapor faz com que a pressão interna do tanque aumente. Esse vapor é retirado do tanque e, geralmente é liberado diretamente na atmosfera, mas uma alternativa melhor seria a sua queima para aquecer o banho de água que vai trocar calor com o GNL para a regaseificação deste. A Figura 3.3 mostra o esquema de um vaporizador de combustão imersa.



**Figura 3.3** - Esquema de um vaporizador com combustão imersa (“submerged combustion”) (SELAS FLUID PROCESSING CORPORATION, 2007).

### 3.4. Vaporizador de Banho de Água (“Water Bath”)

Os vaporizadores desse tipo são constituídos de um vaso de água onde é instalado um conjunto de tubos. Nesse sistema o fluxo de gás vaporizado é controlado pela temperatura da água, que geralmente é mantida a 60°C durante a operação.

Suas vantagens são o baixo custo inicial, a facilidade de iniciar e manter sua operação, a baixa emissão de NO<sub>x</sub>, a possibilidade da incorporação ao sistema de um controle de emissão de CO além de ser uma excelente solução para operação descontínua.

As desvantagens são o elevado custo de operação e a baixa eficiência térmica (<90%). A Figura 3.4 apresenta um vaporizador do tipo “water bath”.



Figura 3.4 - Vaporizador do tipo banho de água (“water bath”). (Franklin, 2006)

### 3.5. Vaporizador Casco e Tubo (“Shell and Tube Vaporizer” - STV)

O vaporizador casco e tubo é um trocador de calor, em que se utiliza o GNL e outro fluido, como água do mar, para que o gás natural vaporize. A Figura 3.5 mostra um esquema desse vaporizador.

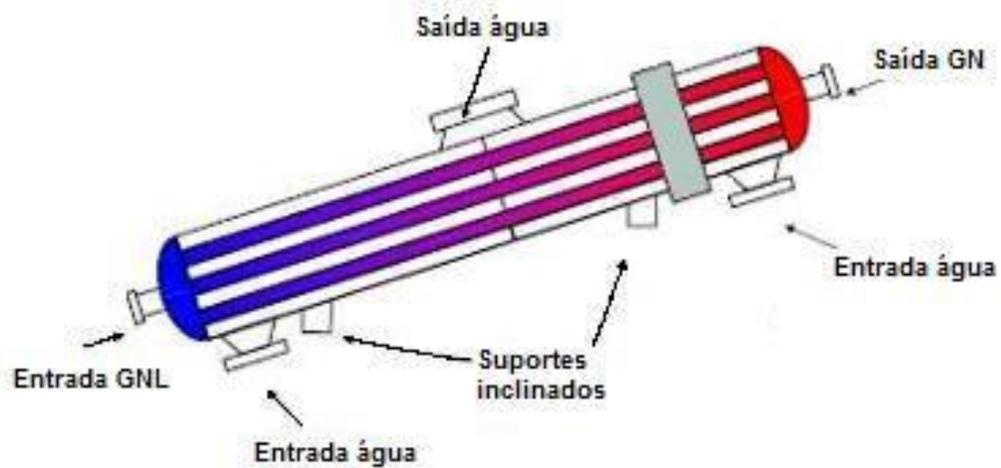


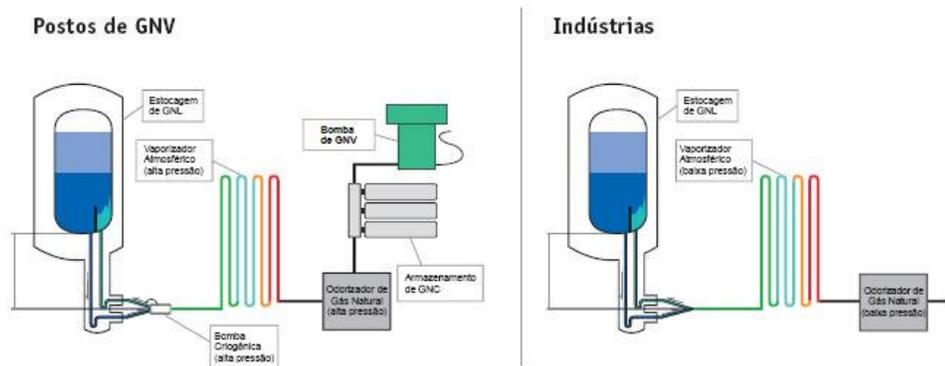
Figura 3.5 - Exemplo de vaporizador do tipo casco e tubo (Franklin, 2006).

Suas vantagens são a não utilização de uma fonte de calor, ser seguro e utilizar fonte de calor barata (água do mar). Como desvantagem, provoca impacto no ambiente marinho e necessita de manutenção periódica.

### 3.6. Vaporizador com Ar Ambiente como Fluido de Aquecimento

O GNL pode ser regaseificado a partir da sua passagem por vaporizadores atmosféricos, ou seja, que trocam calor com o ar. A utilização desse método é influenciada pelo local onde a planta de regaseificação será instalada, pois em locais muito frios, esse método pode não ser satisfatório. Os vaporizadores atmosféricos podem ser diretos ou com convecção forçada.

A Figura 3.6 apresenta dois esquemas de terminais de regaseificação que utilizam vaporizadores atmosféricos diretos.

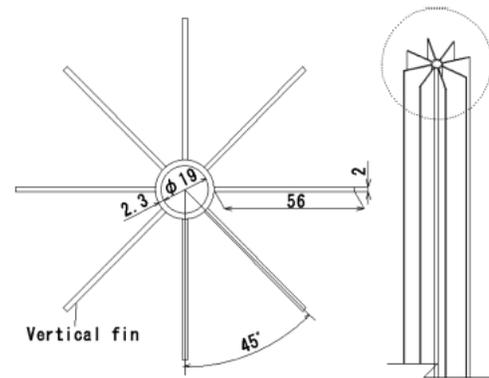


**Figura 3.6** - Processos de regaseificação atmosférica para uso em postos de GNV e para a indústria, (GasLocal, 2006).

Os processos de regaseificação atmosférica utilizam vaporizadores como os da Figura 3.7. Esses vaporizadores são constituídos por tubos, cercados de aletas, o que aumenta a área de troca com o ar atmosférico, como mostra a Figura 3.8.



**Figura 3.7** - Vaporizadores atmosféricos, (planta de regaseificação em Andradadas, MG, 2007).



**Fig. 1** Details of cross section of fin

**Figura 3.8** - Detalhe de um vaporizador (Kamikozuru et al, 2007).

Abaixo são listadas as principais características técnicas do vaporizador da Figura 4.9, para efeito quantitativo:

- ✓ Temperatura de projeto:  $-196^{\circ}\text{C}$
- ✓ Pressão de projeto: 1,0 MPa
- ✓ Temperatura de operação:  $-162^{\circ}\text{C}$
- ✓ Pressão de operação:  $\leq 1,0$  MPa
- ✓ Temperatura de operação do ambiente:  $\geq 0^{\circ}\text{C}$
- ✓ Temperatura de saída do gás: menos que  $5^{\circ}\text{C}$  da temperatura ambiente
- ✓ Material do tubo: LF21 (alumínio)
- ✓ Material do suporte: 1Cr18Ni9Ti

Nos vaporizadores atmosféricos não há gastos com fonte de calor, há necessidade de pouca manutenção e o custo de operação é baixo. As desvantagens são a dependência das condições ambientais, o fato de o processo ser cíclico (vaporização e regeneração) e o potencial para formação de “fog”.

### 3.7. Ciclo combinado de Unidade de Calor e Energia com Vaporizador de Combustão Imersa (CHP-SCV)

Com a intenção de diminuir o consumo de gás nos SCVs, assim como para aumentar a eficiência e economia do processo de regaseificação, o terminal de recepção pode ser modificado para usar cogeração que oferece vantagens com relação ao meio ambiente, por produzir uma forma mais segura de energia. Esse sistema foi implementado no Zeebrugge LNG Terminal Cogeneration Project (Tractebel Engineering, 2008). A parte principal desse sistema é uma turbina que gera 40 MW de potência elétrica. Os gases da exaustão da turbina passam por um recuperador de calor, onde o calor do gás é transferido para aumentar a temperatura da água de um ciclo fechado. Essa água quente vai ser injetada no banho de água do vaporizador e irá transferir seu calor para regaseificar o LNG. O uso desse sistema nessa instalação promove redução de 27,8% nas emissões de CO e 65% nas emissões de NOx quando comparado com sistemas separados de produção de energia elétrica e calor.

A modificação feita aos vaporizadores, fez com que eles fossem híbridos, podendo operar como de três formas. A primeira, como no projeto inicial, com combustão submersa (“submerged combustion”); a segunda, com o queimador submerso desligado e um circuito fechado de aquecimento de água; e, o terceiro, com as duas formas de calor. Essa última forma possui maior eficiência energética, embora possua certas desvantagens.

### **3.8. Comparação dos diversos tipos de vaporizadores**

A escolha do vaporizador depende da operabilidade e manutenção do vaporizador, da locação da planta de regaseificação, do ambiente, da segurança, do custo inicial e do custo de operação, do “layout” da planta e dos riscos técnicos.

O vaporizador casco e tubo (“Shell and Tube Vaporizer” - STV) e o vaporizador com fluido intermediário (“Intermediate Fluid Vaporizer” - IFV) são menores com relação ao tamanho e ao custo quando comparados com o ORV ou o SCV. Calor é fornecido ao fluido por um circuito fechado com um trocador de calor médio. Usados geralmente quando uma boa fonte de calor está disponível.

A Tabela 3.1 apresenta alguns tipos vaporizadores e uma avaliação qualitativa desses em relação aos aspectos de escolha citados.

**Tabela 3.1** - Tabela comparativa de diversos 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 Imersa (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)	●●●○○	●●●●○	●●●○○	●●●○○	●●●●○	●●●○○	●○○○○

## 4 SISTEMAS DE TRANSPORTE DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO

O GNL começou a ser transportado por caminhões em 1969, quando equipamentos para transporte de nitrogênio líquido foram adaptados para o GNL. No ano de 1977, 75 caminhões de transporte de GNL estavam em funcionamento nos Estados Unidos (Office of Technology Assessment, 1977).

Os tanques de transporte de GNL devem seguir a norma NFPA 57 e alguns aspectos dessa norma serão brevemente descritos.

As partes dos tanques diretamente em contato com o GNL devem ser de material compatível física e quimicamente com este, para operar a temperatura de -162°C. Quanto à pressão no interior do tanque, ela deve ser inferior quer o máximo suportado pela pressão de trabalho do container. Em tanques em geral, são necessários medidores de vazão para se determinar se o tanque está no máximo de carga possível.

A tecnologia utilizada em tanques de caminhões de transporte de GNL é derivada da tecnologia usada em caminhões de transporte de outros gases criogênicos industriais, como o nitrogênio líquido e oxigênio (Office of Technology Assessment, 1977).

O tanque de transporte consiste em uma parede interna de materiais que apresentam alta resistência a temperaturas criogênicas, como, por exemplo, o níquel e o aço inoxidável, uma camada intermediária de material isolante, responsável por diminuir a troca de calor do GNL com o meio, e uma parede externa de aço carbono.

Em tanques estacionários, usa-se como sistema de isolamento, a perlita, enquanto que em sistemas de transporte, é comum o uso de um superisolante a base de alumínio.

Além das características já citadas, suportes do tanque permitem que este agüente as cargas estáticas e dinâmicas, assim como a contração e expansão do tanque interno. Anéis rígidos são incorporados às paredes externas, de forma a garantir resistência estrutural e prevenir colapsos.

Em um tanque de transporte, o centro de gravidade é elevado em relação ao solo, o que faz com o caminhão de transporte de GNL tenha maiores riscos de capotamento que outros caminhões. Dessa forma, os tanques de parede dupla de armazenamento devem ser capazes, mesmo em caso de capotamento, de proverem resistência a danos ao tanque e perdas de produto.

Até 1998, apenas um caso de capotamento com perda de produto era conhecido. O caso ocorreu em 1971 em Westbury, em que um caminhão de transporte de GNL capotou, perdendo cerca de 20% do total de GNL do tanque. Mesmo com a perda do produto, não houve ocorrência de incêndio no acidente.

Atualmente, tanques de GNL transportam 10.000 gallons, o equivalente a 37,862 m<sup>3</sup>. Na Figura 4.1, é apresentado um caminhão de transporte de GNL.



**Figura 4.1** – Exemplo de caminhão de transporte de GNL.

Além do uso de caminhões para o transporte do GNL, é possível a utilização de barcas ou de trens, sendo que no caso de barcas os conceitos de segurança são semelhantes aos do transporte marítimo, mas em um grau menor.

O transporte por trens tem menor flexibilidade como uma alternativa no transporte do gás natural liquefeito, pois a demora em agendamento de horários podem fazer com o GNL fique mais tempo no tanque, recebendo maior quantidade de calor do meio externo aumentando o “boil-off”.

Os caminhões de transporte podem ser equipados com sistemas de alimentação do tanque de combustível do caminhão com o “boil-off” do tanque de

transporte. Conforme ocorre a formação de vapor no tanque de GNL, esse é retirado e liberado na atmosfera. Uma alternativa seria a utilização desse vapor como combustível do caminhão, havendo economia e ao mesmo tempo eliminando a liberação de metano na atmosfera.

A parede dupla do sistema de transporte é mais robusta que a de tanques de transportes para outros líquidos. Dessa maneira, o GNL é mais seguro do ponto de vista do transporte caso ocorra alguma ruptura do tanque em algum acidente, pois uma ruptura da parede externa, promove a perda do sistema de isolamento e o conseqüente aumento da troca de calor com o meio externo, fazendo com que ocorra aumento da ventilação do vapor do GNL.

No caso da ruptura do tanque de GNL com conseqüente derramamento deste, poderá ocorrer a formação de uma chama devido à mistura ar/vapor que se formará. Em acidentes, a probabilidade dessa chama ocorrer aumenta na presença de fontes de ignição como faísca elétrica, superfície quente ou pelo fogo causado pelo tanque de combustível do caminhão de transporte. A principal vantagem do GN em relação a outros combustíveis, é que ele é facilmente dispersado pelo ar, diminuindo as chances de um acidente de maiores proporções.

O procedimento de alimentação do tanque de transporte é complexo e deve seguir diversos passos para que seja feito com segurança. Depois de parar o caminhão e desligar seu motor, conecta-se ao caminhão um fio terra para eliminação de qualquer carga eletrostática.

Conecta-se um cabo flexível para transferir o gás natural na fase líquida do tanque de armazenamento para o tanque do caminhão. Deve-se controlar a pressão no tanque do caminhão de forma que haja uma certa diferença de pressão entre os dois tanques.

Os dispositivos de segurança necessários para o tanque incluem equipamentos como válvulas, sistema remoto de controle de diversos parâmetros, alarmes no tanque para prevenir enchimento desse acima do limite e dispositivos de drenagem para liberação do vapor do GNL, que se não for liberado, faz a pressão do tanque aumentar.

A complexidade do processo de transferência do líquido cria potenciais riscos de vazamentos em caso de erro do operador ou falha do equipamento. Além disso, o

fato de os equipamentos utilizados nesse processo de transferência são ciclicamente resfriados à temperatura criogênica e aquecidos à temperatura ambiente, criando tensões adicionais no equipamento, o que pode causar uma diminuição de sua durabilidade.

## 5 APROVEITAMENTO DO “FRIO” DA REGASEIFICAÇÃO

Durante a regaseificação do gás natural liquefeito, grande quantidade de calor é trocada com uma fonte para que o GNL passe de  $-162^{\circ}\text{C}$  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.

Os sistemas de refrigeração têm como componentes principais compressores, trocadores de calor, ventiladores, bombas, tubos e dutos de controle, sendo que os fluidos mais comumente utilizados são o ar, a água e fluidos refrigerantes.

Um dos tipos de refrigeração é a industrial, que pode ser caracterizada pela sua faixa de operação de temperaturas, que varia de  $-70^{\circ}\text{C}$  a  $15^{\circ}\text{C}$  (Stoecker). A seguir são listados e brevemente descritos alguns exemplos de aplicação da refrigeração.

### 5.1. Aplicações de sistemas de refrigeração

#### 5.1.1. Indústria alimentícia

Na indústria alimentícia, a refrigeração é uma das aplicações mais delicadas e complexas, já que a comida requer tratamento em diferentes temperaturas, de acordo com a fase de transformação.

A refrigeração diminui a proliferação das bactérias nos alimentos, sendo que a técnica utilizada na prática é baseada na ação extremamente rápida e intensa do efeito do frio, o que permite que as propriedades organolépticas desse alimento sejam mantidas, alargando assim a conservação com o tempo.

Os sistemas concebidos e instalados tanto para aplicações industriais e varejo são baseados no padrão de procedimentos e técnicas. O sistema de refrigeração é apenas parte de uma instalação mais complexa e permite ao evaporador definir o nível ideal de troca de calor e, conseqüentemente, o ideal de armazenamento dos alimentos.

As principais unidades de refrigeração utilizadas para a conservação dos alimentos são:

- Salas frias
- Salas de congelamento
- Armários
- Expositores

- Armazenamento de alimentos não congelados

O armazenamento de alimentos a baixas temperaturas incrementa o seu tempo de vida sem degradação. Muitos alimentos são apenas resfriados, não necessitando de congelamento para ser armazenado. Exemplos de alimentos que devem ser resfriados são: frango, peixe, carne, ovos, leite, frutas como maçã e morango, dentre outras.

- Armazenamento de alimentos congelados

Existem diversas formas de congelamento de alimentos, sendo que os mais comuns são os túneis com ar a alta velocidade (“air-blast”), congelamento por contato, congelamento por imersão em uma salmoura a baixa temperatura e o congelamento criogênico, em que um fluido criogênico é aspergido no interior da câmara de congelamento (geralmente N<sub>2</sub> ou CO<sub>2</sub>, sendo o N<sub>2</sub> líquido a -195°C e o CO<sub>2</sub> líquido a -78,5°C).

Os alimentos congelados são armazenados em temperaturas que variam de -30°C e -18°C.

- Processamento de alimentos

Em alguns casos, a refrigeração pode também representar uma das fases do processo de produção alimentar. Os principais alimentos que incluem refrigeração em seu processo de produção são: queijos, bebidas (cerveja, vinho e sucos congelados), pão e café instantâneo.

### ***5.1.2. Condicionamento de ar na indústria***

O condicionamento de ar para a indústria é utilizado em diversos processos, como nas indústrias têxtil, editorial, de material fotográfico e laboratórios, sendo necessária precisão para esse tipo de uso, diferentemente de quando é utilizado para conforto. Deve-se levar em conta a temperatura necessária, um controle adequado de umidade e elevada qualidade da filtragem e remoção de partículas e contaminantes.

Na indústria, o condicionamento de ar é em diversas atividades. Abaixo são apresentadas algumas dessas utilizações:

- Resfriamento localizado;
- Laboratórios ambientais, em que o ambiente deve apresentar determinadas características para cada tipo de experimento;
- Imprensa, em que se deseja o controle da umidade do ar para que seja garantido o registro apropriado no papel, além de se evitar sua danificação pelo excesso de umidade e auxiliar na secagem da tinta;
- Indústria têxtil, já que o tecido é sensível a condições de umidade e de temperatura;
- Processos de alta precisão, em que as tolerâncias são estreitas, portanto deve-se manter a temperatura uniforme a fim de se garantir que não ocorram variações do metal, além de ser necessário controlar a umidade do ambiente para que se impeça a formação de ferrugem;
- Produtos fotográficos, em que se deve controlar a temperatura e umidade a fim de que se evite a deterioração de material fotográfico;
- Salas de computador;
- Usina de geração de potência.

### ***5.1.3. Condicionamento de ar para conforto***

Para o condicionamento de ar para conforto deve-se levar em consideração o controle da temperatura, umidade, pureza e distribuição, envolvendo também processos de aquecimento, radiação térmica e regulação de velocidade e qualidade do ar.

### ***5.1.4. Indústria de manufatura***

Na manufatura, o resfriamento é utilizado em máquinas de corte, através do uso de um fluido de corte, ou ainda na manutenção do ar comprimido, que atua no funcionamento de diversas máquinas.

Na manufatura o resfriamento também serve para manter as condições do ambiente em câmaras de teste, em que se deve controlar temperatura e umidade.

### ***5.1.5. Indústria de construção***

Os dois principais usos de resfriamento na construção são o resfriamento de grande quantidade de concreto e o congelamento do solo para sua escavação, sendo que esses dois usos são comuns em obras civis de grande porte.

### ***5.1.6. Indústria química e de processos***

Nesse tipo de indústria, as principais aplicações da refrigeração estão na separação de gases, condensação de gases, separação de alguma espécie química de uma mistura através da sua solidificação, remoção de calor da reação e manutenção de um líquido a baixa temperatura para controle de pressão no interior do tanque de armazenamento.

### ***5.1.7. Medicina e indústria farmacêutica***

O resfriamento em hospitais é bastante utilizado para ar condicionado, já que é necessário o controle alguns aspectos principais: a diminuição da circulação entre

algumas áreas e em algumas áreas, requisitos específicos de qualidade do ar e ventilação para remoção de partículas contaminantes, necessidade de diferenças de temperaturas e umidade dependendo da local e controle rigoroso das condições ambientes.

Existem recomendações para salas cirúrgicas, salas de emergência, de atendimento, quarto dos pacientes dentre outros ambientes. O comum dentre todos esses ambientes é a necessidade do controle das condições do ambiente.

Além da aplicação da refrigeração em ambientes hospitalares, é igualmente importante a aplicação do resfriamento na preservação de características fisiológicas, como no resfriamento de uma célula ou de algum tecido.

A refrigeração também pode ser utilizada no ambiente de pesquisas, em que as condições laboratoriais devem ser favoráveis para a conservação do material estudado e para manutenção da qualidade do ar.

Outro uso da refrigeração é para aplicações clínicas como a hipotermia, reduzindo o metabolismo do corpo para certas cirurgias, e a criocirurgia, em que o “frio” é utilizado para congelar e destruir algumas lesões cutâneas, promovendo renovação de tecidos. Atualmente, na criocirurgia, utiliza-se o nitrogênio líquido para resfriamento.

#### ***5.1.8. Metalurgia***

Nos processos metalúrgicos, o resfriamento é utilizado para a mudança de características mecânicas e físicas dos metais.

Propriedades como a tensão de escoamento, ductilidade, dentre outras, variam com a temperatura de processamento. As variações das características com a temperatura das ligas ferrosas são diferentes das variações das ligas não-ferrosas.

#### ***5.1.9. Fabricação de gelo***

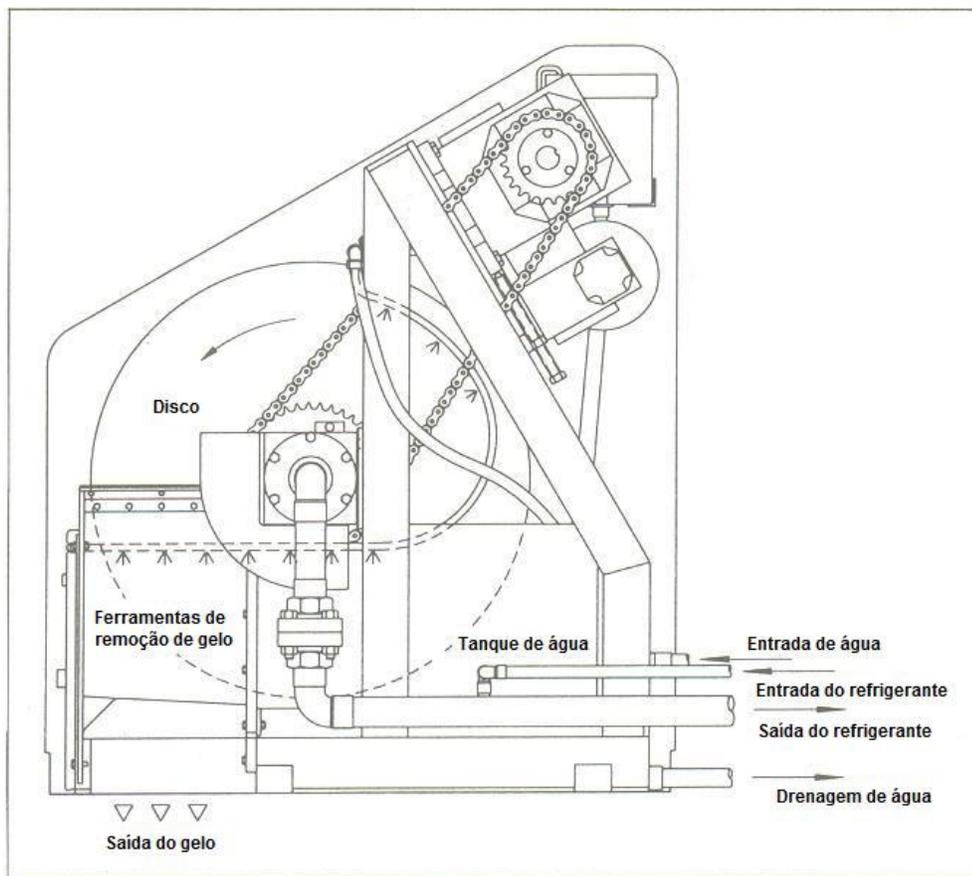
Gelo pode ser produzido em três diferentes tipos, dependendo de sua aplicação. As aplicações do gelo incluem o processamento de alimentos, o transporte e armazenamento de alimentos, produção de produtos químicos e farmacêuticos,

mistura e cura de concreto, consumo do próprio gelo e armazenamento “off-peak”, dentre outras.

Para que ocorra a produção de gelo, independentemente do processo escolhido, deve-se retirar calor da água, fazendo com que sua temperatura baixe para um ponto menor que o do congelamento. Esse resfriamento ocorre através da troca de calor com um fluido refrigerante que passa por um ciclo de resfriamento.

Uma alternativa para a produção de gelo é que ao invés do fluido refrigerante passar por algum ciclo para diminuir sua temperatura, ele pode passar por um trocador de calor cedendo calor para o GNL e baixando sua temperatura.

A Figura 5.1 representa um sistema de produção de gelo. No caso desse sistema, o fluido refrigerante que entra no sistema, pode vir um trocador de calor onde ocorreu a troca com o GNL. Da mesma forma, ao sair do sistema, ele voltaria para o trocador de calor do sistema de regaseificação.



**Figura 5.1** – Sistema de produção de gelo (ASHRAE, 1994).

### 5.1.10. Outras aplicações

Separação de substâncias pelo uso da solidificação fracionada.

Separação de ar.

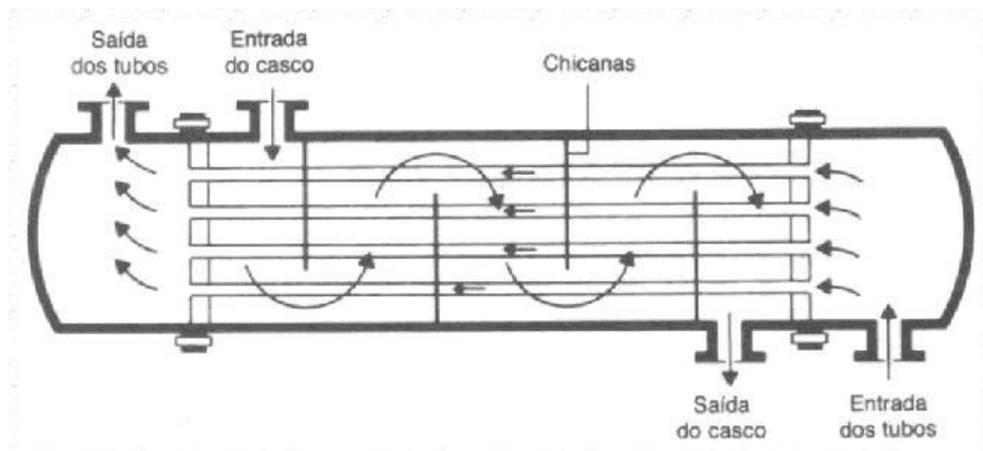
Liquefação de dióxido de carbono.

Produção de gelo seco.

## 5.2. Tipos de trocadores de calor para sistemas de refrigeração

A troca de calor entre os fluidos que compõe o processo de refrigeração ocorre em trocadores de calor, que são equipamentos que podem ter formatos variados, dependendo de sua aplicação.

Há alguns anos, a maioria dos trocadores utilizados em processos de refrigeração era do tipo casco-tubo, em que um dos fluidos passa pelo casco e o outro fluido passa pelos tubos desse trocador de calor, como pode ser observado na Figura 5.2, que representa um trocador casco-tubo de passe simples e contra-corrente. Esse tipo de trocador pode apresentar diversas configurações, como por exemplo, corrente paralela ou cruzada, ou variação do número de passes.



**Figura 5.2** - Trocador de calor casco e tubo com um passe e contra-corrente (UFMG).

Nesses tipos de evaporadores, o fluido refrigerante pode escoar pelo casco (trocador conhecido como “inundado”) ou pelo interior dos tubos, ocorrendo mudança de fase do fluido refrigerante em ambos os casos.

Atualmente, os trocadores do tipo casco-tubo estão sendo substituídos por trocadores de outros tipos como o de placas, representado na Figura 5.3.

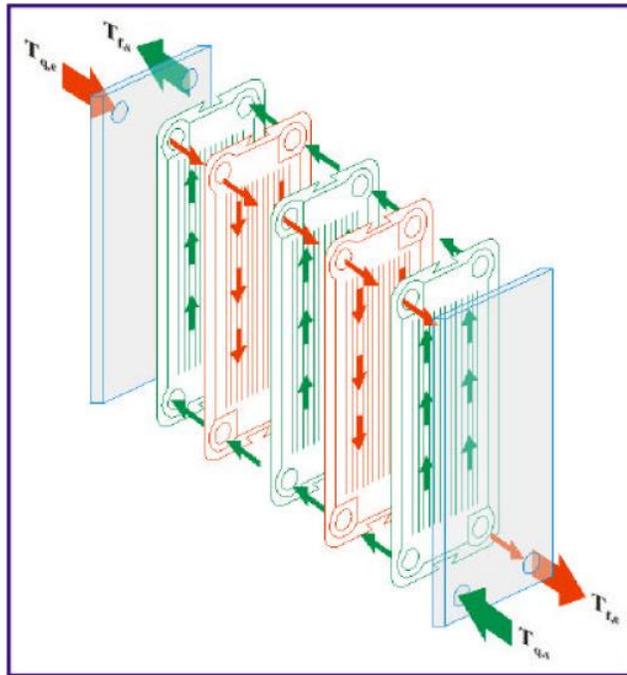


Figura 5.3 - Trocador de calor de placas (Universidade de Caxias do Sul).

Esse tipo de trocador possui melhor rendimento térmico, o que permite que sua construção seja realizada em menor tamanho, quando comparado ao trocador casco-tubo.

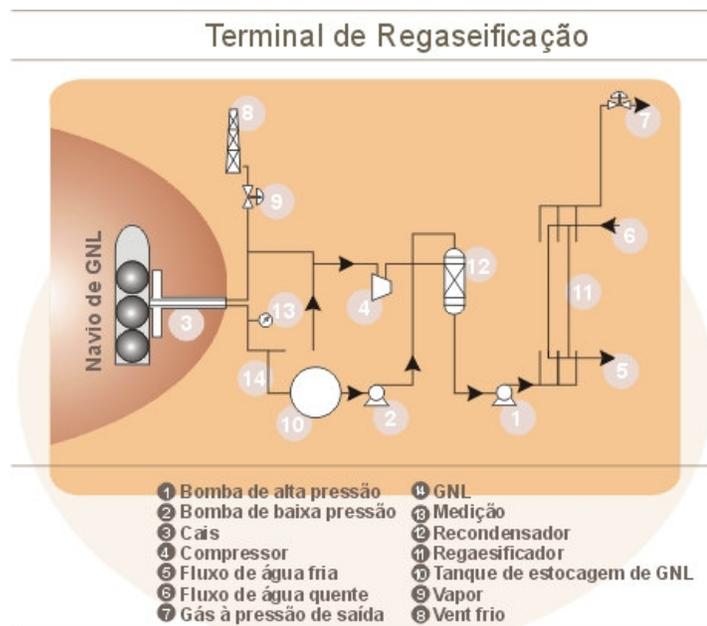
### 5.3.Possíveis associações do sistema de regaseificação

#### 5.3.1. Ar condicionado central

O ar condicionado central utiliza água gelada que corre por serpentinas e promove o resfriamento do ar por radiação. Esse tipo de sistema de resfriamento é adequado para projetos com insuflamento pelo piso ou pelo teto, em que a difusão do ar é feita por meio de um forro metálico com serpentinas.

Nos sistemas centrais de ar condicionado, utiliza-se chiller para o resfriamento da água, sendo que esta segue por dutos isolados termicamente. Depois de utilizada para o resfriamento do ar, fato que faz a temperatura da água subir, esta é redirecionada ao chiller, onde sofre novo resfriamento.

O processo utilizado no chiller para o resfriamento da água, pode ser substituído por um sistema onde a água participa do processo de regaseificação do gás natural liquefeito, como mostrado na Figura 5.4. Nessa figura observa-se que a água entra no circuito (6) com determinada temperatura, ocorrendo seu resfriamento no tanque (11) e sua saída (5) ocorre com menor temperatura do que a de entrada.



**Figura 5.4** – Esquema de um sistema de regaseificação de GNL (GASNET, 2007).

## 6 USO DO GÁS NATURAL

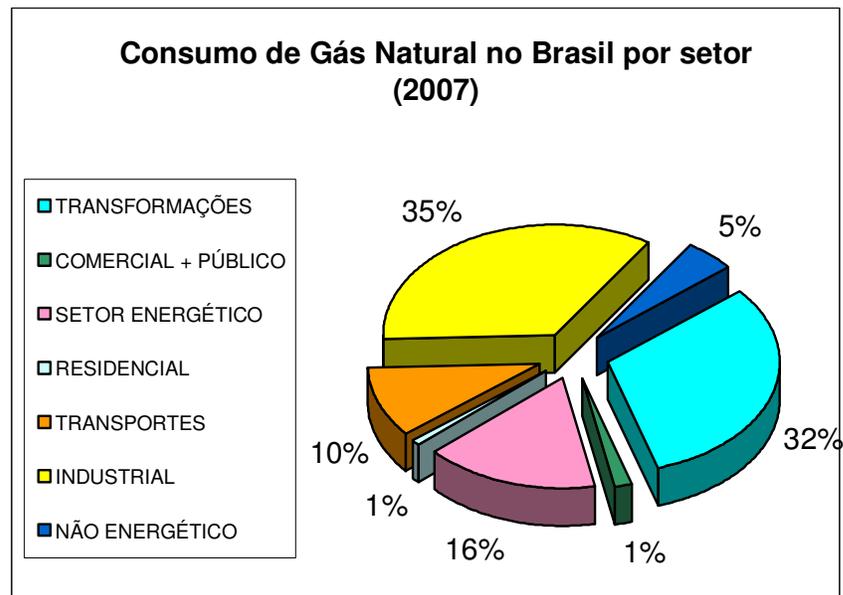
O gás natural pode ser utilizado como combustível em diversas aplicações, sejam no setor industrial, comercial ou residencial. Esse texto trata das principais aplicações desse combustível em cada setor e ainda apresenta exemplos e características sobre sua aplicação em sistemas de geração e cogeração.

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.

O programa brasileiro de expansão da capacidade de geração de energia elétrica está fortemente apoiado na instalação de UTE (Usinas Térmicas de Eletricidade) movidas a gás natural. Mais recentemente o gás natural tem sido muito utilizado em projetos de co-geração que proporcionam alta eficiência energética na produção de eletricidade, calor e frio.

SANTOS (2002) julga que o principal papel do gás natural é o de substituir a energia elétrica utilizada em aquecimento industrial de processos ou na geração de vapor. A seguir, serão apresentados os principais setores para a utilização do gás natural.

A Figura 6.1 apresenta o gráfico do uso do gás nos diversos setores da economia brasileira. A seguir, será apresentado cada um desses setores. Além disso, serão citados potenciais de substituição de outros combustíveis atualmente utilizados, pelo gás natural.



**Figura 6.1** – Consumo do gás natural no Brasil por setor (BEN, 2007 - adaptado)

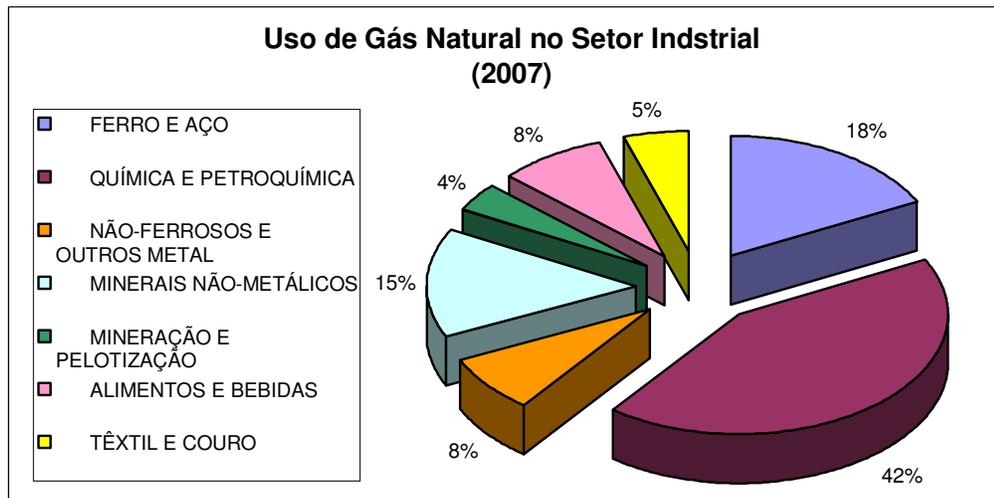
### 6.1. Setor industrial

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.

O setor industrial é responsável pelo consumo de 45% da energia elétrica produzida, sendo o setor que apresenta o maior potencial de substituição dessa eletricidade por algum combustível químico. Diversas indústrias brasileiras já utilizam o gás natural como combustível, como a Cerâmica Porto Ferreira, Eletrolux do Brasil, Nestlé Brasil Ltda., Parmalat Brasil, Tecelagem São Carlos entre outras (GÁS BRASILIANO GBD).

Serão apresentados a seguir os principais sub-setores da indústria que podem ou já utilizam o gás natural como combustível.

Como já foi observado na Figura 6.1, o setor industrial já é o que mais utiliza o gás natural como combustível. Na Figura 6.2, é apresentado o uso do gás natural nos sub-setores do setor industrial e, a seguir, esse sub-setores são detalhados.



**Figura 6.2** – Uso do gás natural nos sub-setores industriais (BEN, 2007 - adaptado).

### **6.1.1. Ferro e aço**

No setor de ferro e aço, cerca de 70% da energia elétrica utilizada destina-se a usos finais térmicos, principalmente no aquecimento de fornos elétricos.

A energia elétrica é utilizada em diversas etapas, como: redução direta, fusão, aquecimento de panelas, lingotamento contínuo, pré-aquecimento de placas, forjaria e tratamento térmico. Para ferro-gusa e aço, o principal uso da eletricidade ocorre no aquecimento de fornos elétricos.

O gás natural pode substituir não só a energia elétrica, mas também outros combustíveis químicos. De acordo com SANTOS (2002), a substituição por gás natural pode gerar economias significativas como, por exemplo, na substituição do óleo diesel pelo gás natural em fornos de forja.

Além disso, as siderúrgicas também utilizam o combustível para melhorar a qualidade de seus produtos, como na produção de tiras de aço, em que o gás natural é utilizado para controle da temperatura do processo.

### ***6.1.2. Setor de química e petroquímica***

No setor de química e petroquímica, os processos que mais utilizam energia são o aquecimento direto, em especial indústrias de óxidos metálicos e fertilizantes, e o processo de secagem, como na indústria de papel e celulose.

Nesse setor o gás natural pode ser usado como substituto do óleo combustível e da lenha e as tecnologias propícias para esse combustível são os diversos tipos de caldeiras, tecnologias de combustão submersa, como trocadores de calor submersos compactos. Para gás combustível e gás natural, os fornos mais usados são os do tipo túnel e tambor rotativo.

A Argentina pode ser tomada como exemplo nesse setor de uso de 100% de gás natural como combustível, ou seja, não há uso de eletricidade com finalidade térmica para esse setor. No Brasil, ainda há 9,36% do uso de eletricidade destinada ao uso final térmico.

### ***6.1.3. Setor de metais não-ferrosos***

Nesse setor, a energia é utilizada pelas indústrias produtoras de metais primários, através de redução de minério, nas indústrias de fundição, que operam na recuperação da sucata, e em indústrias de conformação para a forjaria, fundição e extrusão. Percebe-se que esse setor utiliza elevada quantidade de energia com uso final térmico.

Observa-se um importante mercado para o gás natural como substituto ao óleo diesel em fornos de forja de metal não-ferroso (Comgás, 1993). Além disso, o

gás também pode ser utilizado em fornos de tratamento térmico, estufas de secagem, aquecimento de cadinhos de fundição, geração de atmosfera controlada, equipamento de corte de chapas, estufas litográficas, fornos de fusão e espera de metais não-ferrosos.

O potencial para substituição da energia elétrica não é muito elevado, mas a substituição compensa pelo alto consumo de energia elétrica para uso final térmico nesse setor.

#### ***6.1.4. Setor de minerais não-metálicos***

Esse setor abrange as indústrias de cerâmica, cimento e vidro. Nesse setor, o gás natural apresenta muitas vantagens quando comparado a outros combustíveis por não possuir impurezas, possibilitar controle automatizado da temperatura e a utilização de queimadores de alta velocidade de combustão. Países como Itália e Espanha têm atentado para essas vantagens do gás natural, ganhando competitividade no cenário internacional.

Os equipamentos a gás natural em geral têm custo mais elevado que o similar elétrico, mas apresentam a vantagem de ter menor custo operacional.

Na indústria de vidros o gás natural poderia ter uma maior participação nos sistemas auxiliares do processo de fusão. Por exemplo, em fornos para fabricação de vidros não-planos e prensados, em que é necessário um controle preciso de temperatura, é possível a utilização do gás natural.

Nesse setor, torna-se difícil a substituição da energia elétrica pelo gás natural pelo fato de a tarifa da energia elétrica ser baixa. Apesar disso, pode-se realizar a substituição do óleo diesel pelo gás natural, como mostram estudos realizados pela Comgás – SANTOS (2002) – em que se afirma que a economia é de aproximadamente 25% ao se realizar essa substituição.

A vantagem do uso do gás nesse setor é que esse combustível permite melhor controle da temperatura e a utilização de queimadores de alta velocidade de combustão, reduzindo o consumo de combustível.

### **6.1.5. Setor de mineração**

No setor de mineração, a eletricidade apresenta consumo representativo, assim como também o consumo de óleo combustível e carvões vegetal e metalúrgico, principalmente nos processos de secagem e calcinação do mineral. O potencial de substituição da eletricidade desse setor é estimado como 100%.

Indústrias de mineração, como a Vale do Rio Doce, buscam otimizar sua matriz energética com o uso do gás natural como combustível. Em 2007, a Vale entrou na Nona Rodada do leilão da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e adquiriu alguns campos para exploração do gás em 2007 (Tn Petróleo, 2007).

A partir de setembro de 2007, a empresa esperava que todas as sete usinas de pelletização operassem com gás natural em substituição ao óleo combustível, que reduz as emissões de CO<sub>2</sub>. Se a substituição for 100% realizada, o consumo de gás natural pela empresa poderá chegar a 1,3 milhões de m<sup>3</sup> por dia (IBRAM, 2007).

### **6.1.6. Setor de alimentos e tabaco**

O setor de alimentos e tabaco apresenta grande consumo de energia com uso final térmico em diversos segmentos: açúcar, biscoitos, café, panificação, massas, farinhas, bebidas e tabaco.

Nesse setor, a energia é mais utilizada nos processos de lavagem, pasteurização, cozimento, aquecimento, secagem e evaporação.

O gás é utilizado na indústria de biscoitos e bolachas e na de panificação. Os processos de aquecimento direto, especialmente secagem e cozimento, possibilitam um uso bastante nobre para o gás natural, enquanto que o uso em calor de processo, com o aquecimento de caldeiras, pode ser otimizado através da cogeração.

Segundo SANTOS (2002), a utilização do gás natural em substituição ao óleo diesel no processo de torrefação do café, apresentou uma economia de 42,2%.

### **6.1.7. Setor têxtil e couro**

Na fase de tratamento há grande potencial para uso do gás natural como combustível, já que sua queima é mais limpa, sendo ideal para a chamuscagem, onde fiapos de tecido são eliminados.

A cogeração também pode ser utilizada, pois nesse setor há um elevado consumo de vapor.

Comparando esse setor no Brasil com o de outros países, observa-se que se utiliza mais energia elétrica em nível nacional, o que mostra ser possível maior substituição por fontes químicas como o gás natural.

Em resumo, o uso do gás natural na indústria apresenta diversas vantagens, que serão listadas a seguir:

- O gás natural se apresenta na fase gasosa a temperatura e pressão ambiente, dispensando sistemas de nebulização ou atomização, o que simplifica a construção do queimador;
- A eficiência do processo é maior por ser um combustível na fase gasosa;
- Apresenta maior faixa de regulação dos sistemas, melhorando o desempenho;
- Apresenta maior facilidade operacional e de instalação, possibilitando menores custos com paradas para manutenção e limpeza, além de não conter enxofre ou vanádio, reduzindo o ataque químico na câmara de combustão;
- Reduz significativamente as emissões gasosas.

## **6.2. Setor residencial**

Esse setor apresenta elevado consumo de energia em usos finais térmicos, como calor de processo, aquecimento direto, cocção de alimentos, aquecimento ambiental, refrigeração e iluminação em locais em que não há energia elétrica disponível.

O uso do gás natural nesse setor oferece conforto e praticidade, pois é possível o aquecimento da água da cozinha, banheiro e piscina ou mesmo em equipamentos como secadoras de roupas, lavadoras de louças, lareiras,

churrasqueiras e aquecedores de ambiente. Além disso, a queima do gás natural é mais limpa e não deixa resíduos nos equipamentos, diminuindo as despesas com manutenção.

O gás natural como combustível residencial traz diversas vantagens como a melhoria na qualidade de vida do consumidor, por proporcionar fácil manuseio do energético para as utilidades diárias e a potencial expansão associada a políticas públicas de melhoria de condições de habitação e de incentivo de planejamento urbano.

### **6.3. Setor comercial e serviços públicos**

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).

### **6.4. Transporte**

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.

O gás natural como combustível para veículos é uma aplicação bastante difundida em países como Argentina, Itália, Rússia e EUA. No Brasil, esse uso para o gás natural aumentou nos últimos anos com a permissão do seu uso pelo governo

em frotas urbanas e interurbanas, veículos de carga de transporte, frotas de serviços públicos, táxis e veículos particulares.

Diversas empresas, como a Souza Cruz, passaram a utilizar o gás como combustível em sua frota e alguns fabricantes de veículos, como a Volkswagen, já fornecem seus veículos com um kit para conversão para gás natural (GÁS BRASILIANO GBD).

#### ***6.4.1. Posto de gás natural***

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 seguir, são descritos os passos do processo de distribuição do GNV.

- 1) O gás natural é armazenado em um conjunto de cilindros metálicos a pressão de 250 atmosferas, essa carga do cilindro é feita pelo uso de compressores;
- 2) O conjunto de cilindros é então transportado até o local de consumo através do uso de carretas, caminhões, via ferroviária ou balsas;
- 3) No local de distribuição, os cilindros são conectados a uma estação de descompressão e regulagem, de forma que seja possível seu consumo final.
- 4) Após o consumo do gás, o conjunto de cilindros, agora vazio, retorna ao ponto de carga, reiniciando o ciclo.

Em um posto de abastecimento alimentado com GNL, é necessária a realização de compressão antes da passagem do combustível no regaseificador, seguida pela odorização e armazenamento do gás natural na sua forma comprimida.

## **6.5. Setor de agricultura**

O setor de agricultura é responsável pelo consumo de 4% de toda a energia produzida no país, apresentando uma baixa demanda quando comparada a outros setores produtivos da economia.

As principais fontes utilizadas para a manutenção de uma propriedade agrícola são a energia elétrica, que representa 36,07% do total, o óleo diesel com 45,79% e a lenha com 17,12% do total consumido.

A energia passou a determinar a possibilidade ou não de absorção de novas tecnologias na produção de alimentos de melhor qualidade, o que é determinante para a atividade agrícola. Dentre as atividades agrícolas, podem-se citar algumas que utilizam diretamente a energia, como a irrigação, a avicultura, a piscicultura e a secagem de grãos.

Nesse setor o principal uso de energia se dá nos processos de secagem, em que são utilizados equipamentos como o forno tipo túnel, tambor rotativo e spray dryers. No Brasil, a eletricidade não é muito utilizada em usos finais térmicos nesse setor (CNA - Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil, 2004).

## **6.6. Geração de energia**

A geração de energia elétrica e para aquecimento através da queima do gás natural ganha cada vez mais mercado no mundo e começa a ganhar forma no Brasil.

A geração de energia elétrica pode ser feita pela queima do gás e movimentação das turbinas a gás pelos gases de combustão, ou pela queima do gás que gera vapor que aciona turbinas a vapor, sendo as turbinas as responsáveis pelo acionamento dos geradores.

A geração elétrica a partir do gás natural pode ser empregada no setor industrial, pequeno, médio e grande porte, ou no setor comercial, como em shoppings, hotéis, complexos de lazer, entre outros.

As termelétricas podem ser abastecidas com gás natural para a geração de energia elétrica. A geração de energia em uma termelétrica ocorre a partir da queima do combustível e da movimentação da turbina a gás pelos gases de combustão da queima, sendo que a turbina aciona o gerador de energia.

As termelétricas podem operar em dois ciclos, aberto ou combinado. No ciclo aberto, os gases de combustão são liberados na atmosfera após a passagem pela turbina, o que faz com que esse ciclo tenha rendimento de aproximadamente 35%. Já no ciclo combinado, os gases de combustão, após passarem pela turbina a gás, são aproveitados para gerar vapor através de aquecimento de água, sendo que esse vapor passa por turbinas a vapor que acionam geradores, o que garante maior geração de energia, podendo ter rendimento de 55%.

### **6.7. Cogeração**

No Brasil, a cogeração vem ganhando destaque e aumentando cada vez mais, enquanto que nos países desenvolvidos a cogeração já é empregada em diversos segmentos.

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.

A energia da cogeração pode ser fornecida a hospitais, shoppings, hotéis, prédios comerciais, indústria de bebidas e alimentos, indústria química, indústria têxtil, indústria cerâmica, redes de distribuição de calor e frio e consumidores de energia elétrica em geral.

O potencial de geração de energia elétrica a partir da cogeração com gás natural no Brasil é de 10.000MW (Santos, 2004).

Certos equipamentos utilizados para a cogeração são responsáveis pela produção da energia mecânica, que por meio de um eixo pode ser convertida em energia elétrica, enquanto outros equipamentos são responsáveis por produzir energia

térmica. Dentre esses equipamentos, podem ser citados o motor de combustão interna, caldeiras de geração de vapor para turbinas a vapor, geradores elétricos e equipamentos elétricos associados, turbinas a gás, sistemas de chillers de absorção, entre outros.

Existem diversas vantagens em se adotar um sistema de cogeração, como o menor custo de energia, a maior confiabilidade no fornecimento de energia, melhor qualidade da energia produzida, maior eficiência energética, menor emissão de poluentes, criação de novas oportunidades de trabalho e de negócios e evita o custo de transmissão e distribuição de eletricidade.

Como desvantagens, a cogeração apresenta utilização menos atrativa em processos de poucas necessidades térmicas, tempo de vida útil relativamente curta e o calor só pode ser utilizado no centro produtor.

As características necessárias para que seja proveitosa a instalação de uma unidade de cogeração são listadas a seguir.

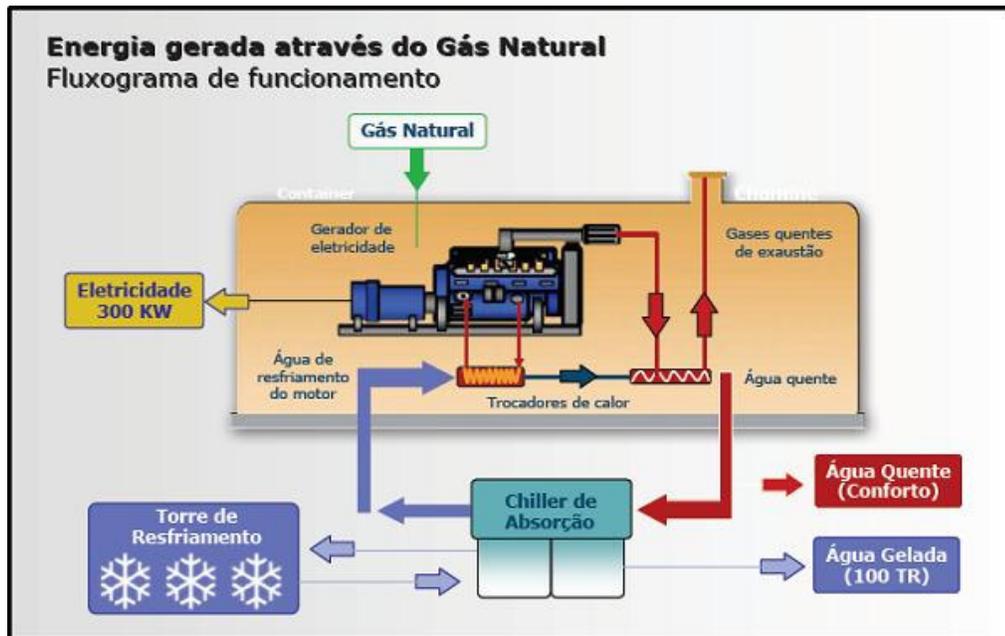
- Existência de demandas simultâneas de potência e calor (ou frio);
- Estabilidade de operação;
- Operação por períodos prolongados;
- Tarifas elétricas não subsidiadas;
- Possibilidade de venda de excedentes.

Quando comparados aos sistemas tradicionais de geração termelétrica, os sistemas de cogeração apresentam maior eficiência térmica, como é mostrado na Tabela 6.1.

**Tabela 6.1** – Comparação de eficiência térmica entre geração termelétrica e cogeração (COGEN, 2007).

Ciclo	Otto ou Diesel	Rankine	Brayton	Combinado
Termelétrico	40 a 45%	30 a 45%	35 a 45%	57%
Cogeração	62%	50%	70 a 75%	70 a 75%

A Figura 6.3 apresenta um fluxograma que exemplifica um sistema de cogeração utilizado em um Hotel da rede Sofitel. Nesse fluxograma é possível observar a entrada de um único combustível, o gás natural, e a saída de água quente e fria e eletricidade, suprimindo demandas devido à climatização, de aparelhos de resfriamento e de iluminação.



**Figura 6.3** – Ciclo de cogeração do Hotel Sofitel (Acquaviva, 2006).

Algumas empresas já utilizam sistemas de cogeração com o gás natural como combustível, como a Central Globo de Produção (Projac), que é o maior centro de produção de TV da América Latina. O uso de cogeração é justificado pela principal necessidade do uso de energia para iluminação, equipamentos elétricos e ar condicionado.

Essa unidade de cogeração é abastecida com o gás natural da Bacia de Campos e é capaz de gerar 4,9 MW. Essa energia é utilizada para produção de água gelada e quente

Com o aumento do número de estúdios, houve um aumento da demanda por energia, não sendo possível alcançar a auto-suficiência apenas com a planta de cogeração. Em virtude deste infortúnio, a Central Globo muitas vezes compra energia da rede, principalmente na produção de programas ao vivo ou em caso carga elevada, embora a empresa também conte com a energia de geradores locais.

O gás natural é bastante utilizado em sistemas de cogeração devido às suas características favoráveis quando comparadas às de outros combustíveis fósseis. Algumas das vantagens apresentadas são o abastecimento do combustível por gasodutos, o que evita a construção de depósitos na unidade consumidora, redução na emissão de CO<sub>2</sub> (redução de até 20% quando comparado ao óleo e redução de até

50% quando comparado ao carvão), redução dos custos de manutenção, já que na queima do gás natural há menor deposição de resíduos, redução no consumo de óleo de lubrificação e preço competitivo quando comparado com outros combustíveis.

## **7 ESTUDO DE CASO: POSTO DE GNV**

A partir do levantamento dos possíveis usos do gás natural como combustível em diversas atividades e setores, como indústria, comércio, dentre outras, foi realizada a escolha de um Posto de Gás Natural para a instalação da associação com um sistema de resfriamento. O sistema de resfriamento escolhido é a fabricação de gelo para comercialização, atividade bastante comum em postos de abastecimento.

O estudo dessa associação tem início com uma breve descrição dos dois sistemas apresentados, o posto de gás natural e o sistema de produção de gelo. Além disso, será explicitado o porquê da escolha dessa associação, focando-se nas vantagens que esta apresenta.

Com relação ao posto, foram levantados dados sobre os pontos de distribuição já existentes e, a partir da demanda caracterizada, pôde-se estimar a quantidade de GNL a ser regaseificada para que fosse possível encontrar a quantidade de energia disponível para o sistema de resfriamento associado.

Dentre os equipamentos necessários para um posto que será abastecido a GNL, está o tanque de armazenamento de GNL enquanto este não é regaseificado, bombas para a compressão do GNL, o vaporizador para a regaseificação do combustível e equipamentos comuns a postos de GNV, como o tanque de armazenamento e bombas de abastecimento.

Com relação ao sistema de produção de gelo, será necessário um refrigerador por onde passa o fluido que resfria a água, condensando-a. Além disso, também será utilizado um trocador de calor por onde passam os fluidos.

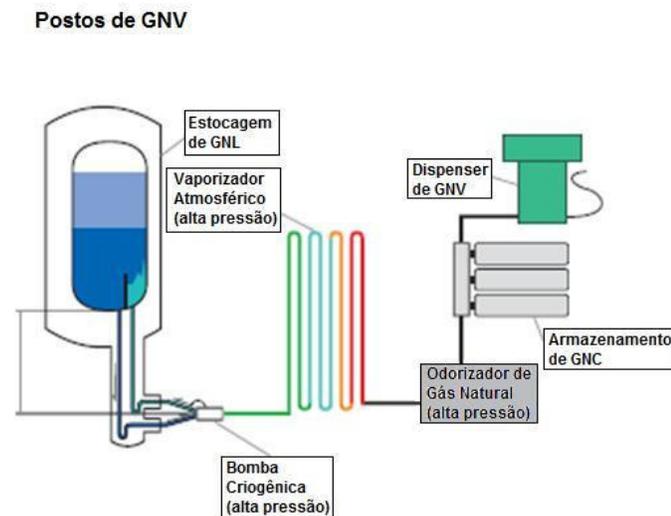
### **7.1. Funcionamento do Posto de Gás Natural**

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 algum fluido e regaseificando, sendo que esse outro fluido ainda 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 Figura 7.1 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.

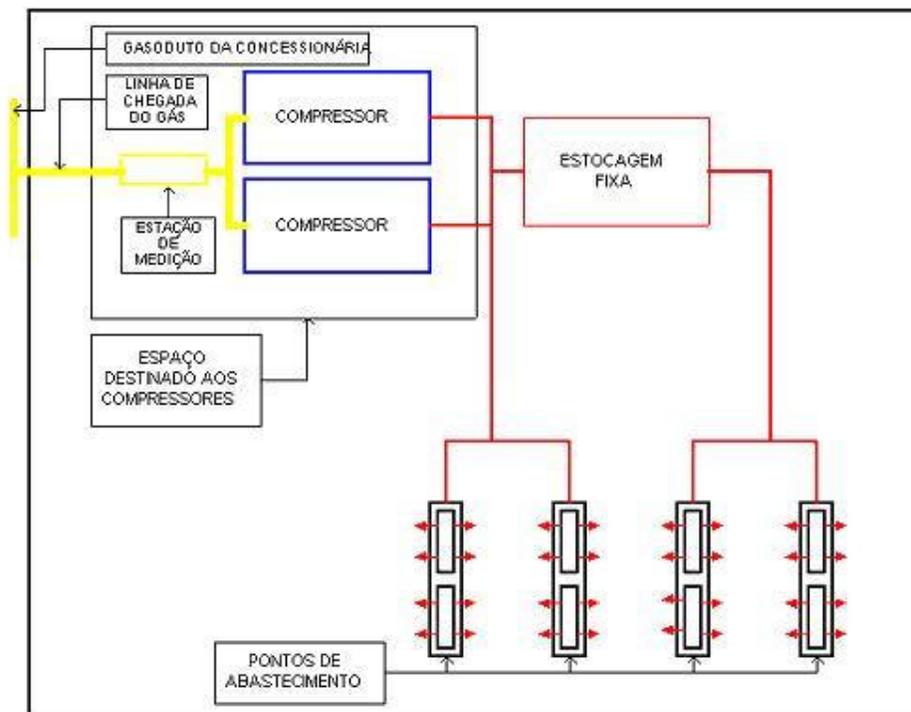


**Figura 7.1** – Esquema de um posto de abastecimento de GNL e seus equipamentos (GasLocal, 2006).

Pode-se observar a partir da Figura 7.2 o esquema de um posto de GNV alimentado por um gasoduto. Os principais componentes desse posto são os compressores, que não são necessários quando se alimenta o posto com GNL, já que a compressão deste ocorre com o uso de bombas. Dessa forma, consegue-se grande

economia na construção do posto alimentado com GNL, pois os compressores representam uma fatia considerável dos gastos do posto.

Além dos compressores, observa-se que assim como no posto do estudo de caso proposto, o posto de GNV possui um tanque para estocagem do gás na forma comprimida que será imediatamente utilizado para abastecimento de veículos.



**Figura 7.2** – Esquema de um posto de abastecimento de GNV (GASNET, 2006)

Já foi dito que este trabalho trata da associação do sistema de regaseificação com uma unidade produtora de gelo em um posto de gás natural, ou seja, a água que vai formar o gelo cederá calor ao GNL que, pode dessa maneira, voltar à fase gasosa, sendo armazenado em reservatórios adequados à pressão elevada a que esse gás é submetido.

A escolha dessa associação foi realizada com base nas vantagens do uso do gás como combustível automotivo quando comparado com combustíveis tradicionais como a gasolina ou o diesel. São apresentadas abaixo algumas vantagens do uso do gás natural como combustível de veículos.

- Temperatura superior de ignição → manuseio mais seguro;

- A combustão do gás natural com excesso de ar é quase completa, reduzindo resíduos a carbono, o que diminui a vida útil do motor;
- Devido à baixa formação de resíduos e por ser um combustível que não se mistura com nem contamina o óleo lubrificante, é possível um maior intervalo entre trocas de óleo lubrificante sem comprometer a integridade do motor.

Além disso, o GNV possui todas as propriedades físicas e químicas necessária ao bom desempenho de um veículo, possibilitando desempenho regular em marchas lentas, em situações de alta solicitação de potência ou torque.

Os motores que utilizam o gás natural como combustível apresentam eficiência térmica maior que aqueles operados com gasolina ou álcool devido à sua operação ser realizada com maiores taxas de compressão. Apesar disso, atualmente, como a disponibilidade de postos de GNV ainda não é relativamente ampliada, os motores são projetados para utilizarem também algum outro tipo de combustível, operando com menores taxas de compressão e não retirando toda a potência possível da queima do gás natural.

A Tabela 7.1 apresenta valores comparativos entre o GNV, álcool e gasolina, comparando-os em relação ao custo, consumo e valores calculados, mostrando a economia que pode ser alcançada com o uso do gás natural.

**Tabela 7.1** – Valores comparativos do GNV, álcool e gasolina para veículos automotivos  
(ANP, 2004).

Comparativo das Vantagens Econômicas no Uso de GNV						
	Consumo	Custo	Gasto/dia	Custo/km	Gasto em 25 dias	Consumo/km
<b>GNV</b>	18 m <sup>3</sup>	R\$ 1,09/m <sup>3</sup>	R\$ 19,62	R\$ 0,08	R\$ 490,50	13,8 km/m <sup>3</sup>
<b>Alcool</b>	31 l	R\$ 1,15/l	R\$ 35,65	R\$ 0,14	R\$ 891,25	8 km/l
<b>Gasolina</b>	28 l	R\$ 2,10/l	R\$ 58,80	R\$ 0,23	R\$ 1.471,25	9 km/l

Base: 250 km/dia.

Após a análise dos dados da Tabela 7.1, observa-se que o gás natural apresenta além de menor preço de comercialização, um menor consumo relativo à distância percorrida, mostrando ser um fonte econômica para o consumidor.

Além da economia no seu consumo, já foi dito que o gás natural provoca menor desgaste das partes do motor e as trocas de óleo lubrificante podem ser feitas com menor frequência em motores a gás natural.

Os dados apresentados mostram que a amortização da conversão do motor para operar com gás natural, que é de aproximadamente R\$ 2.000,00, pode ser alcançada em um período entre 4 e 6 meses, dependendo do combustível original (GASNET, 2006).

Os dados já citados mostram as vantagens econômicas do gás natural quando comparado a outros combustíveis e também vantagens com relação à própria combustão do gás que é benéfica ao motor do veículo e menos prejudicial ao ambiente. Vale também citar questões relacionadas à segurança desse combustível.

A conversão de veículos para operarem a gás natural são extremamente rígidas e possuem controle quanto aos componentes utilizados pelos fabricantes, assegurando confiabilidade para seu uso.

Os postos de gás natural também possuem normas severas para construção e operação, possuindo padrão de segurança no mínimo igual ou superior aos de postos de combustíveis líquidos.

Além de todas as vantagens já citadas, o uso de gás natural como combustível de veículos ajuda a reduzir as emissões de monóxido de carbono (CO) em 76%, de óxido de nitrogênio (NOx) em 84% e hidrocarbonetos pesados em 88% (GASNET, 2006).

## **7.2. Sistema de resfriamento**

Com relação à escolha da associação do sistema de resfriamento, a produção de gelo foi escolhida por ser um sistema simples e bastante comum a postos de abastecimento de combustível. A troca de calor para produção de gelo pode ocorrer em geladeiras comuns, em que um fluido refrigerante trocará calor com o GNL e com a água que se resfriará, produzindo o gelo. O fluido refrigerante escolhido foi a amônia (NH<sub>3</sub>), por suas características termodinâmicas favoráveis em sua utilização como fluido refrigerante.

Além das suas vantagens para uma troca de calor mais eficiente, a amônia não agride diretamente o meio ambiente, pois não destrói o ozônio atmosférico e não contribui para o aquecimento global. Dentre as características da amônia, podemos citar a sua toxicidade, inflamabilidade e riscos quando em contato com a pele ou quando inalada em grandes quantidades. Para que seu uso seja possível é necessário medidas que impeçam seu vazamento do sistema e, caso isso ocorra, a evacuação de pessoas deve ser possibilitada de forma rápida. O odor característico da amônia contribui para a percepção de vazamentos e medidas para a evacuação da área.

A amônia se caracteriza por possuir diversas características desejáveis em um fluido de resfriamento, como ser volátil, ter odor que revele sua presença, possibilitar a rápida verificação de vazamentos, existir em abundância no meio comercial e ter custo razoável. Além a amônia é o único refrigerante natural ecologicamente correto.

Durante a operação com a amônia no trocador de calor, essa substância será mantida sempre em sua fase líquida, pois assim pode-se garantir que ela não vaporize ou congele no trocador de calor, o que poderia trazer danos ao equipamento. Algumas propriedades da amônia são apresentadas na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2** – Propriedades da amônia (NH<sub>3</sub>) (Refrigeração Industrial por Amônia, 2004).

<b>Propriedades da Amônia (NH<sub>3</sub>)</b>	
Ponto de ebulição	33,35 °C
Ponto de Fusão	-77,7 °C
Peso molecular	17 g/mol
Densidade a 20 °C	0,682 g/cm <sup>3</sup>
Temperatura auto ignição	651 °C
Limite inferior de ignição	16%
Limite superior de ignição	25%

Além das vantagens e desvantagens da amônia, que já foram citadas, serão mostrado um resumo de algumas aplicações de mercado que utilizam a amônia, evidenciando a sua disponibilidade no mercado.

A amônia é utilizada em atividades de refrigeração, preparação de fertilizantes, na indústria petroquímica para neutralização e proteção de equipamento

contra a corrosão, na extração de metais como cobre, níquel e molibdênio, na fabricação de explosivos industriais e militares e para algumas atividades de calibração e ajuste de instrumentos de medição para controle ambiental.

### **7.3. Sistemas selecionados para o Posto de Gás Natural**

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 Nm<sup>3</sup> mensais, de acordo com Ogavasara, 2005. Para que esse volume de GNV possa ser atendido mensalmente, é necessário o armazenamento de aproximadamente 50.000 m<sup>3</sup> 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 m<sup>3</sup>, que deverá ser carregado por carretas de transporte, conforme descrito no item 4 desse relatório.

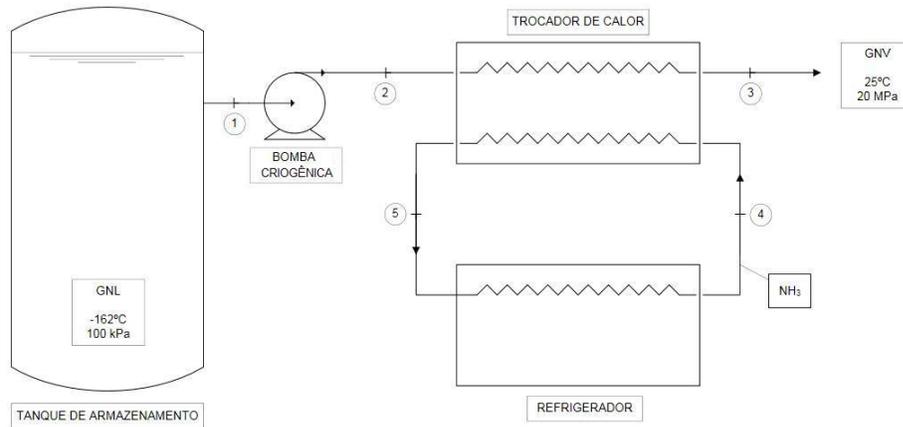
O tanque de combustível para armazenar o GNL será o de parede dupla, contenção simples (“single containment”) e elevado em relação ao solo (“aboveground”), pois a quantidade armazenada e comercializada de gás não justifica o custo de um tanque mais complexo ou enterrado no solo. Para o tanque de armazenamento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

O transporte do GNL da planta de liquefação até o tanque será realizado por carretas, o sistema mais comum e mais flexível atualmente no Brasil para que se garanta sempre o abastecimento do posto para seu funcionamento contínuo. De acordo com a demanda levantada, são necessárias duas carretas por mês para garantir a oferta do GNL, já que cada carreta tem capacidade de aproximadamente 25.000 m<sup>3</sup>.

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.

Essa associação pode ser representada pelo esquema da Figura 7.3, em que pode ser observado o tanque de armazenamento de GNL, o trocador de calor e o refrigerador.



**Figura 7.3** – 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  $-162^{\circ}\text{C}$  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  $-162^{\circ}\text{C}$ .

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  $25^{\circ}\text{C}$  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 casco e tubo, 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 calor 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 calor.

Os estados e propriedades das substâncias envolvidas no processo descrito anteriormente serão apresentados no próximo item desse relatório, em que serão realizados os cálculos de troca de calor que ocorrem entre o GNL e o fluido intermediário e entre este e a água do refrigerador.

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.

Um posto abastecido por GNL não requer compressores para armazenar o gás natural em cilindros de alta pressão, já que o GNL foi bombeado por uma bomba e será transferido para os cilindros de armazenamento de gás comprimido, após sua passagem pelo vaporizador.

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).

#### **7.4. Cálculos para a associação**

Para a associação em questão serão calculados os valores do calor trocado entre o GNL e a amônia e entre a amônia e a água. As expressões e valores utilizados para esses cálculos serão apresentados a seguir.

Para efeitos de cálculo, o GNL será considerado como metano puro, o que é uma aproximação razoável, uma vez que cerca de 90% do GNL é composto de metano (CH<sub>4</sub>).

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

$$\dot{Q}_{VC} + \dot{m} \cdot h_e = \dot{W}_{VC} + \dot{m} \cdot h_s$$

No volume de controle considerado, não há trabalho, sendo necessário apenas saber as entalpias de entrada e saída e o fluxo mássico do metano no trocador. A partir desses valores, pode-se encontrar o calor recebido pelo metano.

As entalpias de saída e entrada do metano podem ser encontradas, pois as temperaturas e pressões são conhecidas na entrada e saída do trocador. Conhecendo-se o calor trocado entre o metano e a amônia, pode-se encontrar o estado da amônia na saída do trocador. O conhecimento deste estado será necessário para saber o calor trocado entre a amônia e a água, que formará o gelo, podendo-se calcular a quantidade de gelo formada e a quantidade de energia que foi economizada através do uso dessa associação.

Para calcular o calor trocado entre o GN e a amônia no trocador de calor, foram considerados os seguintes estados para o metano, considerando a numeração igual ao do esquema da Figura 7.3.

$$1: \begin{cases} T_1 = -162^\circ\text{C} \\ P_1 = 100\text{kPa} \end{cases} \quad 2: \begin{cases} T_2 = -162^\circ\text{C} \\ P_2 = 20\text{MPa} \end{cases} \quad 3: \begin{cases} T_3 = 25^\circ\text{C} \\ P_3 = 20\text{MPa} \end{cases}$$

Com a utilização do programa CATT2, foi possível encontrar as entalpias do metano nos pontos 2 e 3, valores necessários para o cálculo da troca de calor entre o metano e a amônia. Os valores de entalpias obtidos para os pontos em questão são apresentados na Tabela 7.3.

**Tabela 7.3** – Propriedades do metano nos pontos 2 e 3 do esquema da instalação apresentado.

Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)	Energia interna (kJ/kg)	Entalpia Específica (kJ/kg)	Entropia específica (kJ/kgK)
-162	20	0,002277	-303,3	-257,8	4,777
25	20	0,006370	315,6	443	8,410

Admitiu-se para o fluxo mássico de metano o valor de 9 kg/s, pois a vazão não precisa ser muito grande no caso do posto de abastecimento e, 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:

$$\dot{Q}_{VC} = \dot{m} \cdot (h_s - h_e)$$

$$\dot{Q}_{VC} = 9 \cdot (443 - (-257,8))$$

$$\dot{Q}_{VC} = 6307,2 \text{ kJ/s}$$

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,  $P=1,003 \text{ MPa}$  e  $T=25^\circ\text{C}$ , e o estado depois da troca com o metano,  $P=1,003 \text{ MPa}$  e  $T=-70^\circ\text{C}$ , 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.

$$-\dot{Q}_{VC} = \dot{m} \cdot (h_s - h_e)$$

$$-6307,2 = \dot{m} \cdot (-130,4 - 298,3)$$

$$\dot{m} \cong 14,7 \text{ kg/s}$$

Considerando-se que o trocador de calor é adiabático, sua eficiência é máxima e que não há perdas nos dutos ou outros equipamentos, então o calor trocado entre o GNL e a amônia será o mesmo calor trocado entre a amônia e a água do refrigerador.

Considerando-se agora a água do refrigerador como um sistema, pode-se aplicar a primeira lei para um sistema, dada pela expressão:

$${}_i Q_f + m \cdot u_i = {}_i W_f + m \cdot u_f$$

Para o sistema considerado, não há trabalho realizado, apenas calor. Esse valor de calor já é conhecido, tendo-se o estado inicial da água à temperatura e pressão ambiente e o estado final da água, na forma de gelo, é possível saber qual a

massa de água que pode ser solidificada com o calor que é retirado desta e fornecido ao GNL em determinado período de tempo.

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

$${}_iQ_f = m \cdot (u_f - u_i)$$

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  $u_i=104,9\text{ kJ/kg}$  e  $u_f=-333,5\text{ kJ/kg}$ , encontramos a massa que pode ser solidificada em determinado período de tempo, no caso, será calculado o valor para um mês.

$${}_iQ_f = m \cdot (u_f - u_i)$$

$$-16.348.262.400 = m \cdot (-333,5 - 104,9)$$

$$m \cong 37,3 \text{ toneladas}$$

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.

Essa quantidade de gelo produzida é justificável em locais em que o consumo é elevado, como perto de hotéis ou mesmo supermercados, que precisam de grande quantidade de gelo principalmente para a área de pescados. Além disso, é possível disponibilizar esse gelo produzido para pequenos pescadores, em áreas propícias, que possuem consumo elevado desse item para conservação dos alimentos.

Caso o posto não necessite de tamanha quantidade de gelo produzido, é possível fazer com que o trocador troque calor com o ar antes de entrar no trocador de calor onde trocará com a amônia, pois dessa maneira, a quantidade de água necessária e, conseqüentemente, a quantidade de gelo produzida será menor.

## 8 CONCLUSÃO

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 melhor 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.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acquaviva, E. 3º Congresso Brasileiro de Eficiência Energética e Cogeração de Energia. Iqara Energy Services, 2006.

ANP, 2005. “Agência Nacional de Petróleo”. Disponível em: [http://www.anp.gov.br/gas/gas\\_precotarifas.asp](http://www.anp.gov.br/gas/gas_precotarifas.asp). Acesso em: ago., 2007.

ASHRAE handbook. Heating, ventilating and air conditioning applications. Atlanta, 1991.

\_\_\_\_. Refrigeration – Systems and Applications. Atlanta, 1994.

Barclay, M. A.; Yang, C. C. “Offshore LNG: The Perfect Starting Point for the 2-Phase Expander?”. Offshore Technology Conference, Texas, USA, maio 2007.

Barron, R. “Cryogenic systems”. Series in Mechanical Engineering. McGraw Hill, Nova York, 1966.

BEN, 2004. “Balanço Energético Nacional”. Disponível em: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br). Acesso: set., 2007.

Begaso, C. D. T. “Análise Termodinâmica de Plantas e Processos de Produção GNL”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 2006.

COMGAS. São Paulo. “Companhia de gás de São Paulo”. Disponível em: [www.comgas.com.br](http://www.comgas.com.br). Acesso em: maio, 2007.

COMPAGAS. Paraná: “Companhia Paranaense de Gás”. Disponível em: [www.compagas.com.br](http://www.compagas.com.br). Acesso em: maio, 2007.

Dahlgren, T., Rasmussen, S. “Experiences with LNG Worldwide”. LNG Conference, 2007. Disponível em: <http://offshorecenter.dk/log/filer/5.%20Experiences%20with%20LNG%20Worldwide.pdf>. Acesso em: jun., 2008.

Fernandes, F.; Shen, D. M. “Estudo da viabilidade técnico-econômica da produção direta de gás natural liquefeito a partir de linhas de alta pressão (GNL direto): projeto P119 (Relatório parcial nº1)”. São Paulo, 2005. 47p.

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](http://phts.homestead.com/phtsh_-_march_2006.pdf). Acesso em: ago., 2007.

GÁS BRASILIANO GBD. “Concessionária de Gás Canalizado Área Noroeste - SP”. Disponível em: <<http://www.gasbrasiliano.com.br/index.asp>>. Acesso em: jul., 2008.

GÁSLOCAL. Disponível em: <[www.gaslocal.com.br/home.htm](http://www.gaslocal.com.br/home.htm)>. Acesso em: nov., 2007.

GASNET. “Abastecendo com GNV”, 2006a. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/novo\\_gnv/abastecendo\\_gnv.asp](http://www.gasnet.com.br/novo_gnv/abastecendo_gnv.asp)>. Acesso em: out., 2008.

\_\_\_\_\_. “Glossário”, 2006b. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/gasnet\\_br/distribuicao/glossario\\_gas.asp](http://www.gasnet.com.br/gasnet_br/distribuicao/glossario_gas.asp)>. Acesso em: out., 2008.

\_\_\_\_\_. “GNV: Gás Natural Veicular”, 2006c. Disponível em: <[http://www.gasnet.com.br/novo\\_gnv/entendendo\\_gnv.asp](http://www.gasnet.com.br/novo_gnv/entendendo_gnv.asp)>. Acesso em: out., 2008.

Geostok. “Lined Rock Caves for LNG storage”. Disponível em: <[www.geostockgroup.com/en/index.php3?con=minedunline&rubis=3](http://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.

Itou, H., Inaba, T. “Development of security system for LNG tank truck”. Disponível em: <[http://www.igu.org/html/wgc2003/WGC\\_pdffiles/10433\\_1046418381\\_19662\\_1.pdf](http://www.igu.org/html/wgc2003/WGC_pdffiles/10433_1046418381_19662_1.pdf)>. Acesso em: jun., 2008.

Kamikozuru, M.; Miyahara, M.; Shigehisa, K.; Tsuruhara, K. “Design of LPG Vaporizer Heated by the Wind”. KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU. Vol. 33, pp.142-145, 2007.

KOGAS-Tech. Disponível em: <<http://www.kogas-tech.co.kr/english/index.asp>>. Acesso em: jul. 2007.

Leite, O. C. “Submerged combustion vaporizers for LNG distribution facilities”. THERMICA Technologies. Mar., 1997. Disponível em: <<http://www.geocities.com/thermicatech/Publications/LNGvaporizers.html>>. Acesso em: set., 2007.

Liao, P. W. S. “Utilização da energia “fria” de regaseificação do Gás Natural Liquefeito em outras aplicações”. São Paulo, 2007. 98p.

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.

MTE, SIT, DSST. Nota técnica nº 03/2004. Refrigeração Industrial por Amônia: Riscos, Segurança e Auditoria Fiscal. Brasília., 2005. 31 P.

NPFA. “National Fire Protection Association”. Disponível em: <[www.nfpa.org](http://www.nfpa.org)>. Acesso em: jan., 2008.

Office of Technology Assessment. “Transportation of Liquefied Natural Gas”. Congress of the United States, 1977. Disponível em: <[http://govinfo.library.unt.edu/ota/Ota\\_5/DATA/1977/7712.PDF](http://govinfo.library.unt.edu/ota/Ota_5/DATA/1977/7712.PDF)>. Acesso em: jun., 2008.

Ogavasara, E. K. N. “Estudo de viabilidade técnica da implantação da revenda de GNV num posto de abastecimento”. São Paulo, 2005.

Patakai, G.E. “Report on Issues Regarding the existing New York Liquefied Natural Gas Moratorium”. Nova Iorque, 1998. Disponível em: <[http://www.nyserda.org/Energy\\_Information/lngstudy.pdf](http://www.nyserda.org/Energy_Information/lngstudy.pdf)>. Acesso em: jun., 2008.

Santos, A. L. F. dos. “Distribuição do Gás Natural e Oportunidades para a Co-geração”. Petrobras – Diretoria de Gás e Energia. 2004.

Sassaki, F. “Estudo de viabilidade técnica e econômica da implantação da revenda de GNV num posto de abastecimento”. São Carlos, 2005.

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.

Shen, D. M.; Fernandes, F.; Simões-Moreira, J. R. “Using Gas Pipeline Pressure to Liquefy Natural Gas or Generate Electricity”. Hydrocarbon Processing, jan. 2006, pp. 47-50.

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.

Soudek, M. “The Strategic Choice of Contrasting Vaporization Technologies”. Mustang, 2006. 28 p. Disponível em: <[http://www.mustangeng.com/content/Downloadable/LNG\\_SmartAirVaporization\\_28Apr06.pdf](http://www.mustangeng.com/content/Downloadable/LNG_SmartAirVaporization_28Apr06.pdf)>. Acesso em: set., 2007.

Tractebel Engineering. “Co-generation Unit at the Everett LNG Terminal (USA)”. Disponível em: <[http://www.tractebel-engineering.com/tractebel\\_engineering/news/co\\_generation\\_unit\\_at\\_the\\_everett\\_lng\\_terminal\\_usa](http://www.tractebel-engineering.com/tractebel_engineering/news/co_generation_unit_at_the_everett_lng_terminal_usa)>. Acesso em: set., 2008.

TOKYO GAS, 2007. “In-Ground LNG Storage Tanks”. Disponível em: <[www.tokyo-gas.co.jp/lngtech/ug-tank/index.html](http://www.tokyo-gas.co.jp/lngtech/ug-tank/index.html)>. Acesso em: jul., 2007.

Universidade de Caxias do Sul. “Trocadores de Calor”. Disponível em: <<http://www.ucs.br/ccet/demc/craltafi/TrocadoresdeCalor.pdf>>. Acesso em: jun., 2008.

Universidade Federal de Minas Gerais. “Trocadores de calor”. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/trocador/cascotub.htm>>. Acesso em: jun., 2008.

Yang, C. C.; Huang, Z.. “Lower Emission LNG Vaporization”. Foster Wheeler North America Corporation, USA, 2004. 3 p. Disponível em: <[http://www.fwc.com/publications/tech\\_papers/files/Lower%20Emission%20LNG%20Vap.pdf](http://www.fwc.com/publications/tech_papers/files/Lower%20Emission%20LNG%20Vap.pdf)>. Acesso em: ago., 2007.

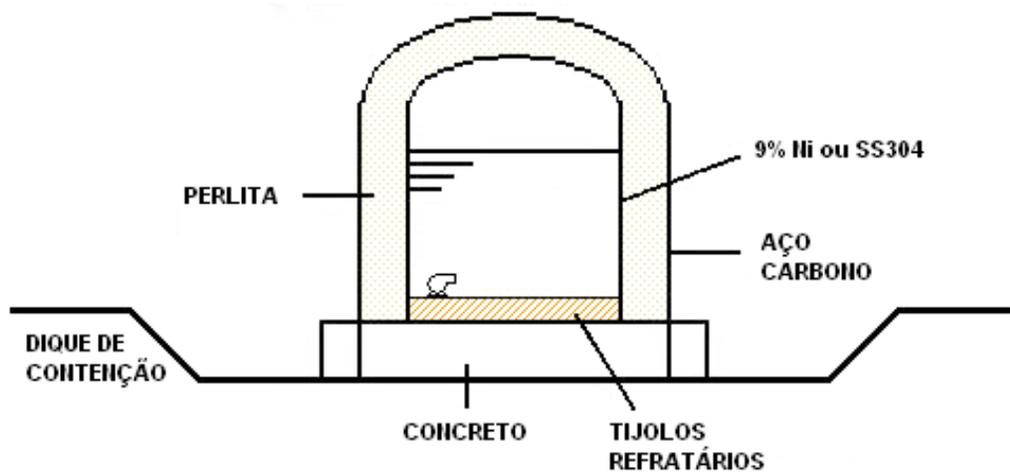
## ANEXO I

### VISITA À PLANTA DE LIQUEFAÇÃO DE PAULÍNIA E À UNIDADE DE REGASEIFICAÇÃO EM ANDRADAS

#### **Armazenamento**

O tanque de armazenamento é do tipo tanque de superfície (“aboveground”), ou seja, está localizado completamente acima do solo e possui o sistema de contenção simples. Esse sistema consiste em um tanque com dupla parede, sendo que entre as duas paredes há um material isolante, no caso, a perlita. A parede interna é feita de aço com 9%Ni ou aço inoxidável SS304, a externa é constituída de aço carbono e a base é feita de concreto para suportar o peso do tanque e possui acima dela uma camada de tijolos refratários para dificultar a perda de calor para o ambiente externo.

No sistema de contenção simples não há nenhum tipo de proteção contra vazamento de líquido, como no caso dos sistemas de contenção dupla ou completa que possuem paredes de concreto ao redor do tanque. A solução para casos de vazamentos é a construção de um dique ao redor do tanque, que é capaz de conter o líquido caso ocorra ruptura do tanque. A Figura 1 representa o sistema descrito.



**Figura 1:** Tanque de armazenamento.

No isolamento, injeta-se  $N_2$  na perlita para que o ar não entre em contato com esta. O isolamento possui espessura aproximada de 1m. O tanque da planta de Paulínia tem volume de  $4500m^3$  e o GNL é armazenado a  $-162^\circ C$  e  $0,07bar$ . A Figura 2 mostra o tanque de armazenamento da planta de Paulínia.



**Figura 2:** Tanque de armazenamento de GNL da planta de liquefação de Paulínia.

## Transporte

Uma carreta de transporte consegue armazenar  $25000\text{m}^3$  de GNL, enquanto consegue armazenar apenas  $6300\text{m}^3$  de GNC. A carreta de transporte possui sistema de controle de estabilidade, GPS e o tipo de isolamento é a lã de rocha, não podendo ser utilizada a perlita por esta ser um material compactante. O GNL é transportado com pressão de aproximadamente 1bar.

Os caminhões transportam o GNL até terminais de regaseificação, onde o GNL é armazenado para ser vaporizado de acordo com a demanda dos clientes. O processo de esvaziar a carreta leva cerca de duas horas quando todo seu conteúdo é descarregado. A Figura 3 apresenta um exemplo de caminhão de transporte de GNL.



**Figura 3:** Carreta de transporte de GNL.

## Regaseificação (em Andradas)

O terminal de regaseificação consiste em um tanque de armazenamento, onde o gás é armazenado no estado líquido, e dois vaporizadores atmosféricos, ou seja, que trocam calor com o ambiente.

O tanque de armazenamento consegue armazenar aproximadamente  $35000\text{m}^3$  de GNL (13000 galões), quantidade superior à de uma carreta de transporte. A carreta de transporte transfere o GNL para o tanque e do tanque o GNL passa para o vaporizador, retornando ao estado gasoso e sendo enviado para um gasoduto que leva o gás natural até os clientes.

A transferência do gás da carreta para o tanque de armazenamento pode ser feita por tubulações por cima ou por baixo do tanque, pois dessa maneira pode-se controlar a pressão interna do tanque, que não pode ultrapassar  $28\text{kgf/cm}^2$ . Quando se coloca gás por baixo no tanque, aumenta-se a pressão do tanque e, quando se coloca por cima, a pressão diminui.

A presença de dois vaporizadores se faz necessária, pois à medida que no exterior de um se concentra grande quantidade de água condensada, prejudicando a troca de calor, usa-se o outro. Os vaporizadores possuem vazão máxima de  $1250\text{ m}^3/\text{h}$  a  $20^\circ\text{C}$  e  $1\text{atm}$ .

Após a regaseificação do GNL, é realizada a odorização do gás com a adição de mercaptana. A odorização é necessária porque o gás natural não tem cheiro, o que dificulta a percepção de vazamentos. A Figura 4 representa um sistema de vaporização ambiente.



**Figura 4:** Vaporizador do terminal de regaseificação de Andradas.