

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação Técnica do Fornecimento de GNV a partir do GNL
em postos de combustíveis**

Edson Carlos Germano

**São Paulo
2008**

**ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Avaliação Técnica do Fornecimento de GNV a partir do GNL
em postos de combustíveis**

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

Edson Carlos Germano

Prof. Dr. José R. Simões Moreira

**Área de Concentração:
Engenharia Mecânica**

**São Paulo
2008**

FICHA CATALOGRÁFICA

Germano, Edson Carlos

Avaliação Técnica do Fornecimento de GNV a partir do GNL em postos de combustíveis-/ E.C.Germano – São Paulo: EPUSP, 2008. 50p.

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

1.GNL – Gás Natural Liquefeito 2.GNV – Gás Natural Veicular 3.Posto de Combustíveis I.Germano, Edson C. II.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica t.

RESUMO

Ao longo das últimas décadas, o gás natural vem ganhando importância tanto no cenário mundial quanto no mercado brasileiro. No entanto, o aumento da participação deste combustível na matriz energética brasileira tem encontrado algumas barreiras ao seu desenvolvimento, dentre elas a principal refere-se à pequena malha dutoviária. Num cenário nacional caracterizado pela pequena infraestrutura de dutos, surge então um espaço que pode ser ocupado pelas tecnologias de transporte alternativo do gás natural. Estas tecnologias, conhecidas com GNC (Gás Natural Comprimido) e GNL (Gás Natural Liquefeito), poderiam suprir mercados onde a construção de gasodutos ainda não se tornou economicamente viáveis. Ao invés da utilização de dutos, o gás natural seria liquefeito e transportado por caminhões até o mercado consumidor, onde por sua vez será regaseificado para consumo no local.

A utilização da tecnologia de transporte do gás natural na forma líquida (GNL) apresenta-se de forma muito recente em nosso território, aliada de importação de GNL pelo Brasil, como resultado dos recentes projetos da Petrobras, PECEM no Ceará e Bacia de Campos no Rio de Janeiro, com isso espera-se que um maior número de regiões do país, hoje não atendidas por gasodutos, possa receber e utilizar o gás natural como fonte energética de forma economicamente viável. O objetivo deste trabalho é apresentar uma alternativa técnica a comercialização de GNV em postos de combustíveis onde não exista uma rede de gasodutos ou distribuição canalizada do gás natural. Isto se torna possível através da utilização do GNL, e sua posterior re-gaseificação, como fornecimento alternativo de gás natural para a comercialização do GNV.

ABSTRACT

In the last decade natural gas gained attention both on world and Brazilian markets. Besides that, the relative increase of natural gas in the Brazilian energy matrix is facing challenges associated with the small size pipelines infrastructure. In this context characterized by a scarce pipelines infrastructure, it's necessary open possibilities for alternatives technologies for natural gas transportation. These technologies, known as CNG (Compressed Natural Gas) and LNG (Liquefied Natural Gas), could attend markets where pipelines is not yet economic viable. Instead of using pipelines, natural gas would be liquefied and transported by truck to the consumer market, which in turn regasifier will be for consumption on the premises.

Transportation of LNG is a very recent practice in Brazil, resulting from Petrobras initiatives in PECEM, Ceará, and Campos, Rio de Janeiro. It is expected that markets not yet supplied trough pipelines could employ natural gas as an energetic source economically viable. This report aims to present a technical alternative to VNG (Vehicle Natural Gas) selling in refueling stations where pipelines are not available. This could be possible trough LNG.

ÍNDICE

INTRODUÇÃO	2
1. O GÁS NATURAL	5
1.1. História do Gás Natural no Brasil e no Mundo	5
1.2. Características do Gás Natural	7
1.3. Especificações do gás natural no Brasil	11
1.4. Vantagens do Gás Natural como Fonte Energética	12
1.5. Principais Definições do Gás Natural	13
1.6. O Combustível	14
1.7. Gás natural veicular (GNV)	15
1.8. Gás natural comprimido (GNC)	15
1.9. Gás natural liquefeito (GNL)	16
1.10. Utilização econômica do Gás Natural no Brasil	17
2. ANÁLISE TÉCNICA DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO (GNL)	20
2.1. Principais empresas de GNL	20
2.2. Transporte e Distribuição do GNL	23
3. POSTO GNV ABASTECIDO POR GNL	26
3.1. Estrutura do sistema Gás Natural Líquido - Comprimido	30
3.2. Abastecimento do Reservatório de GNL do Posto	31
3.3. Reservatório de GNL	33
3.4. Bomba de GNL	35
3.5. Vaporizador atmosférico de alta pressão	36
3.6. Odorizador de Gás Natural	37
3.7. Unidade de armazenamento de GNC e Dispenser	38
3.8. Instruções de Segurança para operação de GNL	39
3.8.1. Sistemas de químicos secos	40
3.8.2. Sistemas de espuma de alta expansão	40
3.8.3. Proteção no interior das instalações	41
3.8.4. As normas da NFPA	42
3.9. Alternativas para utilização do “frio” liberado pelo GNL	43
4. APLICAÇÃO DO “FRIO” EM CONDICIONAMENTO DE AMBIENTES	46
4.1. Fundamentos teóricos	46
4.1.1. Coeficiente de Convecção em Escoamentos Internos	47
4.1.2. Coeficiente de Convecção com Mudança de Fase	47
4.2. Simulação em um trocador de calor	48
4.3. Vaporização do GNL – Reutilização em Condicionamento de Ambiente	48
5. CONCLUSÕES	63
REFERÊNCIAS	76
ANEXO A. Visita a Planta de Liquefação de GN em Paulínia (GásLocal)	65
ANEXO B. Visita ao complexo GASTECH em Londrina	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características do gás natural boliviano	10
Tabela 2. Especificação brasileira do gás natural	11
Tabela 3. Comparação de nível de emissão de poluentes	12
Tabela 4. Composição média do GNL fornecido pela GASLOCAL.....	23
Tabela 5. Tabela de vantagens e desvantagens do GNL.....	30
Tabela 6. Propriedades do gás natural (ASHRAE, 1997).....	49
Tabela 7. Propriedades do gás natural (ASHRAE, 1997).....	49
Tabela 8. Valores das constantes c_0, c_1, c_2, c_3 (Van Wylen, 2003)	49
Tabela 9. Valores calculados de c_p em função da temperatura	50
Tabela 10. Propriedades da amônia	50
Tabela 11. Valores utilizados na simulação da amônia como refrigerante.....	50
Tabela 12. Parâmetros fixos do GN utilizados nos cálculos.	51
Tabela 13. Temperaturas do fluído refrigerante analisado.....	51
Tabela 14. Valores do fluxo de calor gerado em função da variação do fluxo mássico do gás.	52
Tabela 15. Valores de Nu e $h_{e,gas}$ em função do diâmetro do tubo.....	53
Tabela 16. Valores de vazão mássica do fluído refrigerante.....	53
Tabela 17. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=1 tubo.....	54
Tabela 18. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=5 tubos	54
Tabela 19. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=10 tubos	55
Tabela 20. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=20 tubos	55
Tabela 21. Cálculo de Nu em função de Re para N=1 tubo	56
Tabela 22. Cálculo de Nu em função de Re para N=5 tubos	56
Tabela 23. Cálculo de Nu em função de Re para N=10 tubos	57
Tabela 24. Cálculo de Nu em função de Re para N=20 tubos	57
Tabela 25. Cálculo de $h_{i,fluido}$ em função de Nu para N=1 tubo	58
Tabela 26. Cálculo de $h_{i,fluido}$ em função de Nu para N=5 tubos	58
Tabela 27. Cálculo de $h_{i,fluido}$ em função de Nu para N=10 tubos.....	58
Tabela 28. Cálculo de $h_{i,fluido}$ em função de Nu para N=20 tubos.....	59
Tabela 29. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=1 tubo.....	59
Tabela 30. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=5 tubos	59
Tabela 31. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=10 tubos	60
Tabela 32. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=20 tubos	60
Tabela 33. Cálculo de L em função de fluxo de refrigerante e D para N=10 tubos.....	60
Tabela 34. Parâmetros usados no calculo da utilização da energia “fria” do GNL.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Gás natural associado	8
Figura 2.	Gás natural não associado	8
Figura 3.	Cadeia do Gás Natural (LEAL, 2007)	9
Figura 4.	Volume ocupado pelo GN antes e após a liquefação	16
Figura 5.	Uso do Gás Natural no Brasil em 2007.....	18
Figura 6.	Rede de atendimento da GÁSLOCAL.....	22
Figura 7.	Caminhões Equipados com Carreta para Transporte de GNL.....	24
Figura 8.	Sistema de abastecimento Gás Natural Líquido-Comprimido	26
Figura 9.	Representação de um posto de combustíveis com armazenamento de GNL.	29
Figura 10.	Instalação típica de GNL em postos de GNV	31
Figura 11.	Imagem do reabastecimento to tanque de armazenamento de GNL.	31
Figura 12.	Bomba criogênica externa	32
Figura 13.	Bombas criogênicas submersas	32
Figura 14.	Abastecimento do reservatório de GNL através do caminhão	32
Figura 15.	Tanques de armazenamento de GNL	33
Figura 16.	Gráfico do nível de GNL presente no reservatório.	34
Figura 17.	Bomba criogênica modelo PD3000 – fabricante Cryostar	35
Figura 18.	Vaporizadores atmosféricos.....	36
Figura 19.	Escoamento do vaporizador “ORV”	37
Figura 20.	Escoamento no vaporizador “SMV”	37
Figura 21.	Unidade de odorização do GNC	38
Figura 22.	Unidade de armazenamento de GNC	39
Figura 23.	Dispenser de GNV	39
Figura 24.	Sistema de reutilização da energia “fria” advinda da vaporização do GNL	44
Figura 25.	Distribuição de temperatura em um trocador de calor (INCROPERA).....	46
Figura 26.	Trocador de calor inundado (Evaporador de GNL)	48
Figura 27.	Esquema da troca de calor para reutilização da energia “fria” em condicionamento de ambientes (LIAO, 2007)	61
Figura 28.	Fluxo mássico resfriado no condicionamento de ambiente em função Q [kw] 62	
Figura 29.	Planta de Liquefação de Paulínia	65

INTRODUÇÃO

No início do século XXI vive-se uma nova era marcada pelo alto custo do petróleo, pelas preocupações com o aquecimento global e o meio ambiente, a pesquisa e o desenvolvimento das energias renováveis e a utilização do petróleo e do gás natural como uma arma política, não somente no Brasil, como recentemente pode-se acompanhar com a crise na Bolívia entre o governo boliviano e a Petrobras, mas em todo o mundo, como as pressões pelos países da OPEP para manter o preço do barril de petróleo em um patamar alto, que segundo os mesmos faz se necessário para manter a política financeira interna de seus membros. (REVOLUTION, 2008)

O gás natural está presente em todo o mundo, seja em depósitos situados nas profundidades da superfície terrestre, ou nos oceanos. As ramas de gás podem formar-se por cima dos depósitos de petróleo bruto, ou estarem presentes no seio de pedras porosas.

O gás natural é uma fonte de energia e, portanto, participante da matriz energética brasileira. Dessa forma, sua utilização reflete um processo de competição com as demais fontes energéticas. Um dos principais promotores do crescimento do uso do gás natural é o critério econômico, uma vez que o energético apresentou e ainda apresenta preços mais atraentes quando comparado a outros concorrentes, como o óleo combustível. Entre as vantagens competitivas do gás natural destaca-se o atendimento às questões ambientais, na redução de emissão de poluentes atmosféricos. (VALLE, 2006)

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2001) o gás natural será a energia primária que crescerá mais rapidamente nas próximas décadas e o seu consumo irá duplicar até 2030. Nos próximos anos o gás irá ultrapassar o carvão tornando-se a segunda fonte de energia mundial mais importante; em 2050 poderá até mesmo ultrapassar o petróleo, tornando-se a primeira fonte energética a nível mundial.

As barreiras geográficas, financeiras e políticas ao desenvolvimento do gás são difíceis de se transpor. Em termos de repartição mundial das reservas de gás é fácil de concluir que existe um grande desequilíbrio. Segundo a CEDIGAS, dois países sozinhos, Rússia e Irã, detêm praticamente metade das reservas de gás natural confirmadas. Uma parte importante de recursos de gás natural está geograficamente

concentrada em áreas afastadas dos EUA, da Europa Ocidental, da China, do Brasil, da Índia e de outras áreas em que o crescimento da procura por esse combustível tem sido maior.

O gás natural é um combustível fóssil encontrado em rochas porosas no subsolo. Ele possui aplicações domésticas, industriais e automotivas, em substituição ao óleo diesel, ao álcool e à gasolina e pode estar associado ou não ao petróleo. O acúmulo de energia solar sobre matérias orgânicas do tempo pré-histórico, soterradas em grandes profundidades, forma o gás natural, graças à acomodação da crosta terrestre.

O uso do gás natural vem sendo amplamente incentivado, tanto pelo governo brasileiro como por instituições de pesquisa energética e proteção do meio ambiente, pois entre as vantagens de seu uso pode-se destacar uma menor emissão de poluentes na atmosfera. O gás natural é composto por gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, predominando o metano e, em menores quantidades o propano e o butano. Sua combustão é limpa, isenta de fuligem e outros materiais que possam prejudicar o meio ambiente. (ANP, 2002)

Geralmente apresenta baixos teores de contaminantes como o gás sulfídrico (H₂S) e o gás carbônico (CO₂), dependendo do local de origem o gás natural pode ainda conter outras impurezas, o que faz com que ele seja considerado um combustível com baixo nível de poluição. O gás natural permanece no estado gasoso, sob pressão atmosférica e temperatura ambiente. Outro atrativo refere-se ao poder calorífico, maior que os combustíveis derivados do petróleo, o que torna possível uma utilização direta, sem necessidade de refino.

Incolor e inodoro, o gás natural dissipa-se facilmente na atmosfera em caso de vazamento, pois é menos denso que o ar. Para que ocorra combustão espontânea é necessário que o mesmo seja submetido a uma temperatura superior a 620°C. Vale lembrar que o álcool se inflama a 200°C e a gasolina a 300°C. Além disso, o gás natural queima com uma chama quase imperceptível. Por questões de segurança, o gás natural comercializado é odorizado com enxofre.

Na indústria, o gás natural é utilizado como combustível para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz; como matéria-prima nos setores químicos e petroquímicos, principalmente para a produção de metanol, e de

fertilizantes, para a produção de amônia e uréia. É usado ainda como redutor siderúrgico na fabricação de aço.

O gás natural (GN) proporciona uma combustão limpa, isenta de agentes poluidores, ideais para processos que exigem a queima em contato direto com o produto final, como na indústria de cerâmica, fabricação de vidro e cimento.

Apesar de se tratar de uma indústria antiga, a indústria do gás natural ganhou importância a partir da década de 1970, com os choques do petróleo. Configurando-se como uma boa alternativa ao uso do petróleo, o GN ganhou destaque na definição das políticas energéticas dos países, pois suas principais reservas não estavam tão concentradas nos países membros da OPEP quanto as de petróleo.

Desde meados da década de 1990, a indústria do gás natural vem sofrendo profundas mudanças, tanto técnicas quanto mercadológicas. Neste contexto, o comércio internacional de GN por gasodutos ganhou um concorrente: o transporte via gás natural liquefeito (GNL). Esse processo consiste no resfriamento e liquefação do GN, reduzindo seu volume em 600 vezes para facilitar seu transporte via navios metaneiros para localidades distantes dos centros produtores.

O primeiro projeto de comercialização internacional de GNL ocorreu entre Argélia e Reino Unido, em 1964, e, atualmente, segundo dados *International LNG Alliance*(ILNGA, 2005) cerca de 28% do comércio internacional de GN se dá através dessa tecnologia de transporte. Nos últimos dez anos, foram realizados fortes investimentos em novas tecnologias para o processo de liquefação do GN, o que impulsionou um rápido avanço tecnológico e uma substancial queda de custos nessa cadeia.

No Brasil, as descobertas de novas reservas de GN na Bacia de Santos, e mais recentemente na camada do pré-Sal, trouxeram à tona a discussão sobre a conveniência do uso da tecnologia de GNL para a exploração, transporte, armazenamento e utilização econômica do gás proveniente das reservas existentes no Brasil e dos contratos para importação de GN firmado pelo Brasil.

1. O GÁS NATURAL

1.1. História do Gás Natural no Brasil e no Mundo

Segundo a GASENERGIA (2008), registros antigos mostram que a descoberta do gás natural ocorreu no Irã entre 6.000AC e 2.000AC e que, na Pérsia, utilizava-se o combustível para manter aceso o "fogo eterno", símbolo de adoração de uma das seitas locais. Há 2.500 anos, os chineses compreenderam que o gás natural poderia ser utilizado. Assim, os chineses construíram gasodutos rudimentares utilizando varas de bambu de forma a transportá-lo a partir de poços pouco profundos e posteriormente queimavam-no em grandes caçarolas para evaporarem água do mar para obterem sal.

Na Europa, o gás natural só foi descoberto em 1659, não despertando interesse por causa da grande aceitação do gás resultante do “town gas”, um carvão carbonizado, que foi o primeiro combustível responsável pela iluminação de casas e ruas desde 1790. Já nos Estados Unidos, o primeiro gasoduto com fins comerciais entrou em operação na cidade de Fredonia, no Estado de Nova York, em 1821, fornecendo energia aos consumidores para iluminação e preparação de alimentos.

Mais tarde, o gás natural passou a ser utilizado em maior escala na Europa no final do século XIX, devido à invenção do queimador *bunsen*, em 1885 (por Robert Bunsen) - que misturava ar com gás natural, e a criação de um gasoduto à prova de vazamentos, em 1890. Mesmo assim, as técnicas de construção eram modestas e os gasodutos tinham no máximo 160 km de extensão, impedindo o transporte de grandes volumes a longas distâncias, e, conseqüentemente, reduzindo a participação do gás natural no desenvolvimento industrial, marcado pela presença de óleo e carvão.

No final de 1930, os avanços em tecnologia viabilizaram a construção de gasodutos para o transporte do gás natural para longos percursos. O mercado industrial do gás natural era relativamente pequeno até a II Guerra Mundial, quando então o gás natural ganhou grande visibilidade com a escassez de carvão e petróleo. Entre 1927 e 1931, já existiam mais de 10 linhas de transmissão de grande porte nos Estados Unidos, mas sem alcance interestadual. A descoberta de vastas reservas

também contribuiu para reduzir o preço do gás natural, que o tornou uma opção mais atraente que o "town gas". (GASENERGIA, 2008)

O grande número de construções no período pós segunda guerra durou até o ano de 1960 e foi responsável pela instalação de milhares de quilômetros de dutos, proporcionado pelos avanços em metalurgia, técnicas de soldagem e construção de tubos. Desde então, o gás natural passou a ser utilizado em grande escala por vários países, devido às inúmeras vantagens econômicas e ambientais.

Segundo MOUTINHO (2001), o Brasil iniciou a utilização do gás em 1828, com D. Pedro I licenciando uma empresa para executar a iluminação das ruas da cidade do Rio de Janeiro. Em São Paulo a iluminação iniciou-se em 1872, propiciada pela empresa inglesa denominada "*The São Paulo Gás Company Ltda*".

Sua utilização começou a ser modestamente difundida por volta de 1940, com as descobertas de óleo e gás na Bahia, na bacia de Candeias, atendendo a indústrias localizadas no Recôncavo Baiano. Depois de alguns anos, as bacias do Recôncavo, Sergipe e Alagoas eram destinadas quase em sua totalidade para a fabricação de insumos industriais e combustíveis para a refinaria Landulfo Alves e o Pólo Petroquímico de Camaçari. (GÁSENERGIA, 2008)

As duas crises mundiais do petróleo na década de 70 impuseram ao Brasil uma revisão em sua política energética, principalmente em decorrência da nossa grande dependência dos combustíveis derivados do refino do petróleo para o setor de transporte (Óleo Diesel e Gasolina).

Dentre as diretrizes tomadas, a fim de minimizar a dependência e o impacto do aumento dos preços do petróleo no mercado internacional sobre a economia brasileira, destaca-se o Plano Nacional de Gás Natural – PLANGAS, desenvolvido na década de 80, pela Comissão Nacional de Energia, objetivando buscar um substituto para o óleo diesel utilizado no transporte rodoviário de cargas e passageiros, principalmente nos grandes centros urbanos, onde também já se tornavam críticos os problemas ambientais decorrentes de poluentes atmosféricos.

O óleo diesel utilizado como combustível correspondia a aproximadamente 52% do consumo energético do país, enquanto o gás natural representava apenas 1,8% desse total. O grande marco do gás natural ocorreu com a exploração da Bacia de Campos, no Estado do Rio de Janeiro, na década de 80. (GÁSENERGIA, 2008)

Com a exploração de um expressivo volume de combustíveis fósseis na Bacia de Campos, viabilizou-se a distribuição também do combustível para os grandes centros urbanos. (MOUTINHO, 2001)

1.2. Características do Gás Natural

Tradicionalmente consideram-se como energias primárias as que procedem de fontes naturais e diretamente utilizáveis, tais como o carvão, petróleo bruto, xistos betuminosos, gás natural, energia hidráulica, solar, eólica, nuclear entre outras.

A forma como a energia é gerada e consumida afeta de forma importante a criação de emprego, o desenvolvimento de atividades econômicas estáveis, e o impacto sobre o meio ambiente. Espera-se então que a melhor forma de energia é aquela que não consome, sem que este fato afete de forma negativa o nível de vida ou os sectores produtivos, tendo-se em conta que não se vive melhor por se consumir mais energia, mas sim por consumi-la de forma mais apropriada. Esta é, sem dúvida, a diretriz básica que marca uma política nacional que visa concretizar uma melhor utilização da energia.

Centrando a atenção no gás natural, podem-se considerar como gás natural todos os gases que existem no subsolo. Porém, aquele a que vulgarmente se designa como gás natural é o resultado de uma mistura de hidrocarbonetos combustíveis que se encontram no subsolo e que freqüentemente se encontram associados ao petróleo bruto.

O principal componente do gás natural é sempre o metano (que representa normalmente 70% a 90% do volume total da mistura). Os outros hidrocarbonetos presentes na mistura do gás natural são o etano, propano e butano (os quais raramente ultrapassam 15% do total). Para além destes componentes, podem também estar presentes dióxido de carbono, nitrogênio, ácido sulfídrico e ainda pequenas quantidades de hélio e argônio.

O gás natural (GN) é um combustível fóssil formado a partir de matéria orgânica, soterrada a grandes profundidades há milhões de anos, degradada por bactérias anaeróbias, sob condições de elevada pressão e temperatura. Atualmente, é encontrado em acumulações de rochas sedimentares porosas no subsolo (terrestre ou

marinho), cobertas com uma camada de rocha impermeável. Quanto a sua origem, o gás natural pode ser classificado em:

- Gás natural associado: encontrado, no reservatório, dissolvido no óleo ou sob a forma de capa de gás (na parte superior da acumulação rochosa, onde a concentração de gás é superior à concentração de outros fluidos como água e óleo). Neste caso, a produção de gás é determinada diretamente pela produção de petróleo. Caso não haja condições econômicas para sua extração, o GN é reinjetado na jazida ou queimado, evitando o acúmulo de gases combustíveis próximos aos poços de petróleo.

- Gás natural não associado: encontrado, no reservatório, livre ou junto a pequenas quantidades de petróleo. Neste caso, somente a produção do GN é justificável comercialmente. No mundo, as maiores ocorrências de gás são de gás não associado.

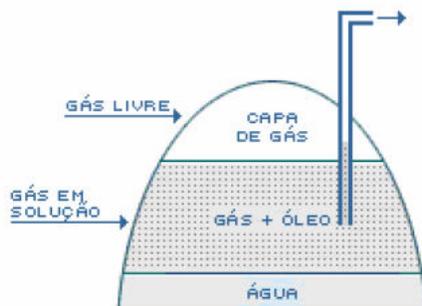


Figura 1. Gás natural associado

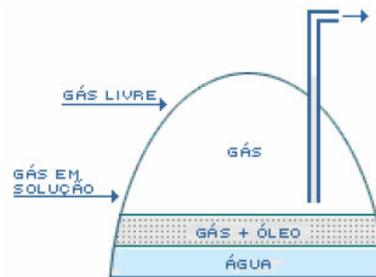


Figura 2. Gás natural não associado

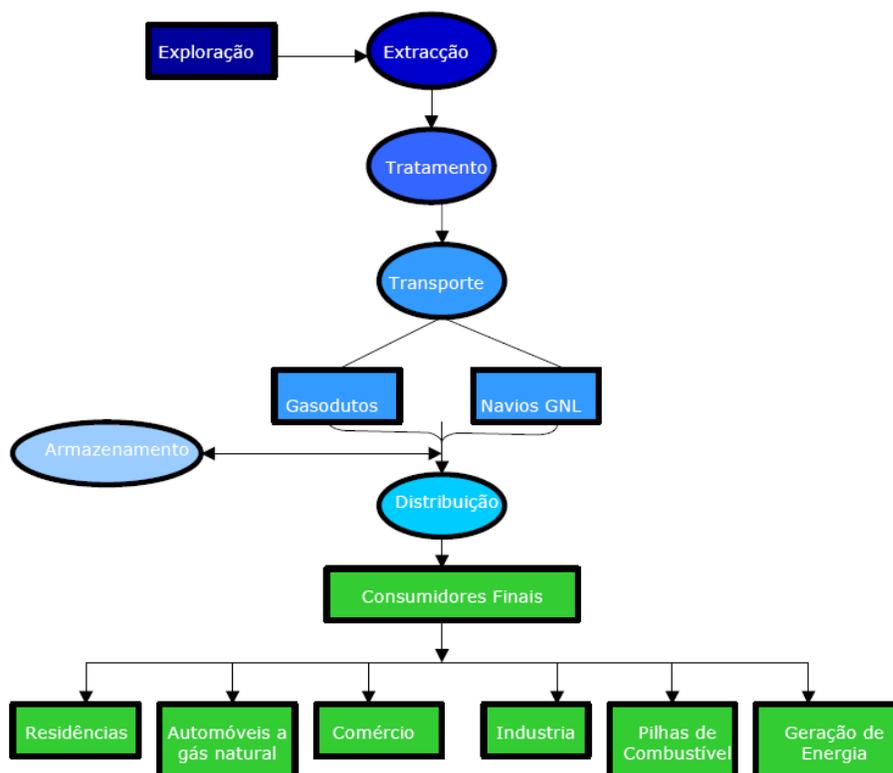
Fonte: SHEN 2006

O gás natural é constituído predominantemente por uma mistura de hidrocarbonetos saturados gasosos, que, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso. Sua composição é variável e depende do local da onde é extraído, mas em geral há uma preponderância do metano (CH_4) e do etano (C_2H_6) sobre os demais componentes. Além destes componentes mais leves, podem estar presentes outros hidrocarbonetos mais pesados, como propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}) e pentano (C_5H_{12}), além de impurezas como água, compostos de enxofre, de nitrogênio e de oxigênio que devem ser eliminados antes de sua utilização, uma vez que não são combustíveis e, portanto, diminuem o poder calorífico do gás natural.

As fases que se devem seguir na exploração de gás natural são as seguintes (LEAL, 2007):

- Prospecção geológica e geofísica;
- Perfuração de poços “selvagens” ou de poços que foram objeto das primeiras sondagens;
- Perfuração de poços de avaliação;
- Colocação dos dispositivos de evacuação do gás;
- Do ponto de vista econômico, a sondagem é o processo mais oneroso da exploração petrolífera representando entre 40% a 65% dos custos técnicos da produção por cada tonelada extraída.

Após a exploração seguem-se mais quatro fases até chegar ao consumidor final, nomeadamente: a extração, o tratamento, o transporte e a distribuição.



Fonte: Secretariado da UNCTAD, 2005.

Figura 3. Cadeia do Gás Natural (LEAL, 2007)

Em relação às outras fontes de energia, o gás natural apresenta vantagens competitivas, pois perde-se apenas em média 10% do gás natural produzido até chegar ao consumidor final (LEAL, 2007). Além do que, com a evolução tecnológica, a eficácia das técnicas de extração, de transporte e de armazenamento tem apresentado-se cada vez mais eficientes.

O gás natural é uma fonte de energia bastante versátil, sendo utilizada em vários setores (conforme se pode ver na figura 3). A produção de aquecimento e a geração de eletricidade são os seus usos tradicionais. Atualmente, a problemática da degradação e poluição do meio ambiente começam a incentivar como forma de diminuir tais problemas a uma maior utilização do gás natural também no setor dos transportes.

O gás natural é considerado uma fonte de energia mais limpa do que os derivados do petróleo e o carvão mineral, pois as suas emissões de compostos de enxofre e dióxido de carbono são relativamente baixas. Finalmente, o gás natural é também uma fonte de energia bastante segura, quer em relação ao seu transporte e armazenamento, quer na sua utilização.

Tabela 1. Características do gás natural boliviano

Valores de Referência			
Poder caloríf. Sup.(HHV) (kcal/m ³)	9400	37318	BTU/m ³
Temperatura (°C)	20		
Pressão absoluta (bar)	1013		
Poder Calorífico Superior (kJ/Nm ³)	38.813		
Poder Calorífico Inferior (kJ/Nm ³)	35.020	33,2	Mbtu/m ³
Pressão de Fornecimento (Mpa)	3,09 a 3,6		
Composição Química			
Metano	91,8 % mol		
Etano	5,58 % mol		
Propano	0,97 % mol		
I-butano	0,03 % mol		
N-butano	0,02 % mol		
Pentano	0,10 % mol		
Nitrogênio	1,42 % mol		
Dióxido Carbono	0,08 % mol		

Fonte: Informado pela MSGAS pela DTC nº 53/99, 07Abr 99. Dados do gás boliviano.

Incolor e inodoro, o gás natural dissipa-se facilmente na atmosfera em caso de vazamento, por ser mais leve que o ar. Para inflamar é preciso que seja submetido a uma temperatura superior a 620°C, vale lembrar que o álcool se inflama a 200°C e a gasolina a 300°C. Além disso, o gás natural queima com uma chama quase

imperceptível. Por questões de segurança, o gás natural comercializado é odorizado com enxofre.

1.3. Especificações do gás natural no Brasil

As especificações do gás natural no Brasil foram definidas pela primeira vez em 1998 pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). A Tabela 2 mostra as especificações do gás natural para as diferentes regiões do Brasil.

Tabela 2. Especificação brasileira do gás natural¹

Característica do Gás Natural (1)	UNIDADE	LIMITE(2) (3)		
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste, Centro-Oeste
Poder calorífico superior(4)	kJ/m^3	34.000 a 38.400	35.000 a 42.000	
	kWh/m^3	9,47 a 10,67	9,72 a 11,67	
Índice de Wobbe (5)	kJ/m^3	40.500 a 45.000	46.500 a 52.500	
Metano, mín.	% vol.	68	86	
Etano, máx.	% vol.	12	10	
Propano, máx.	% vol.	3		
Butano e mais pesados, máx.	% vol.	1,5		
Oxigênio, máx.	% vol.	0,8	0,5	
Inertes ($\text{N}_2 + \text{CO}_2$), máx.	% vol.	18	5	4
Nitrogênio	% vol.	2		
Enxofre total, máx.	mg/m^3	70		
Gás sulfídrico (H_2S), máx.(6)	mg/m^3	10	15	10
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	$^{\circ}\text{C}$	-39	-39	-45

Observações:

(1) O gás natural deve estar tecnicamente isento, ou seja, não deve haver traços visíveis de partículas sólidas e partículas líquidas.

(2) Limites especificados são valores referidos a 293,15 K (20 °C) e 101,325 kPa (1 atm) em base seca, exceto ponto de orvalho.

(3) Os limites para a região Norte se destinam às diversas aplicações exceto veicular e para esse uso específico devem ser atendidos os limites equivalentes à região Nordeste.

(4) O poder calorífico de referência de substância pura empregado neste Regulamento Técnico encontra-se sob condições de temperatura e pressão equivalentes a 293,15 K, 101,325 kPa, respectivamente em base seca.

(5) O índice de Wobbe é calculado empregando o Poder Calorífico Superior em base seca. Quando o método ASTM D 3588 for aplicado para a obtenção do Poder Calorífico Superior, o índice de Wobbe deverá ser determinado pela fórmula constante do Regulamento Técnico.

(6) O gás odorizado não deve apresentar teor de enxofre total superior a 70 mg/m^3 .

A definição das especificações do gás natural foi um passo importante para uniformizar a qualidade do gás natural no Brasil. O uso veicular requer disponibilidade de gás de alta qualidade, caso contrário, fica comprometido o

¹ Portaria ANP nº 104, de 8 de julho de 2002 – Regulamento Técnico ANP nº 3/2002. Estabelece a especificação do gás natural, de origem nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional.

desempenho dos veículos, muito sensível à presença de umidade e outras impurezas, bem como a variações na porcentagem de metano.

1.4. Vantagens do Gás Natural como Fonte Energética

As reservas de GN existem em praticamente todos os continentes, e o gás natural apresenta ainda melhor rendimento energético e maiores vantagens ambientais que outros combustíveis fósseis (ANP, 2001). Essas características impulsionam seu uso, em substituição ao gás liquefeito de petróleo, à gasolina, ao diesel e aos óleos combustíveis em praticamente qualquer aplicação. Outro aspecto positivo é a segurança, o gás natural é em geral transportado em gasodutos subterrâneos e dissipa-se rapidamente na atmosfera em caso de vazamento, o que também reduz seus efeitos ambientais.

Entre os combustíveis fósseis, é o de queima mais limpa, produzindo apenas água e gás carbônico (CO₂). A emissão de CO₂ é 30 % menor que a de outros combustíveis fósseis, o que reduz sua participação no efeito estufa. A queima do gás natural também não emite óxidos de enxofre, notórios poluidores. À redução do impacto ambiental, se junta outras vantagens técnicas, como facilidade de manuseio, alto rendimento energético e reduzido custo de manutenção.

A tabela 2 mostra o nível de emissões de poluentes em caldeiras industriais, comparando o gás natural com óleo diesel e óleo pesado.

Tabela 3. Comparação de nível de emissão de poluentes

Emissão (g/kWh)	Gás Natural	Óleo Diesel	Óleo Pesado
CO ₂	183	248	275
Particulados	Mínimo	Baixo	Alto
SO ₂	Isento	0,32	0,35

Fonte: SANTOS. D. B. 2006

Vários fatores contribuem para o estabelecimento de uma cultura do uso de gás natural (ASSUNÇÃO, 2004):

- ✓ Investimentos nas áreas de produção e transporte;
- ✓ Oferta crescente e regular do produto;
- ✓ Regulamentação de preços;
- ✓ Divulgação de seu baixo poder de impacto no meio ambiente.

A concretização dessas perspectivas deve fazer do gás natural uma das fontes de energia mais importante do país no futuro.

Tendo em vista as tendências, as novas tecnologias de produção e o uso de combustíveis que contribuem para preservação do meio ambiente, o setor industrial em todos os seus segmentos investe grande porcentagem de sua receita anual em proteção ambiental, otimização de energia, saúde e segurança. Neste cenário, cresce a importância da política de incentivo à utilização do gás natural em maior escala.

Além dos benefícios ambientais já citados anteriormente, o gás natural pode provocar melhorias em diversos processos industriais, devido a baixa concentração de compostos de nitrogênio e enxofre já que a probabilidade de formação de ácidos é reduzida, e conseqüentemente a taxa de corrosão de equipamentos e instalações. Desta forma, aumenta-se a vida útil e reduz-se o gasto com manutenção e substituição de equipamentos. Ainda, o gás natural dispensa ou reduz a necessidade de tratamento dos gases de combustão antes de sua liberação para a atmosfera.

1.5. Principais Definições do Gás Natural

- **Gás Natural**

Gás combustível rico em metano que provém de reservatórios naturais. Nele existem, em quantidades variáveis, hidrocarbonetos mais pesados que se liquefazem à pressão atmosférica, bem como vapor de água. Podem também conter compostos de enxofre, gás carbônico, hélio entre outros.

- **Líquidos do Gás Natural (LGN)**

Componentes existentes no gás natural que são retirados no estado líquido em separadores e instalações de tratamento de gás. Os líquidos do gás natural incluem (mas não se limitam a): etano, propano, butano, pentano, gasolina natural e condensados. Podem também conter, em pequenas quantidades, produtos que não são hidrocarbonetos.

- **Condensados**

Hidrocarbonetos que se encontram no estado gasoso em reservatórios, mas que se tornam líquidos em condições normais à superfície. Trata-se essencialmente de pentano e produtos mais pesados. Líquidos do gás natural e condensados são, freqüentemente, usados como sinônimos.

- **Gás Natural Liquefeito (GNL)**

Gás natural constituído principalmente por metano e etano e que, geralmente para facilitar o seu transporte, foi liquefeito pelo abaixamento da sua temperatura.

- **Gás Natural Comprimido (GNC)**

Gás natural armazenado sob pressão em tanques e utilizado para alimentar os motores de automóveis em sua grande maioria.

1.6. O Combustível

A denominação gás natural (GN) é genericamente aplicada à substância combustível de origem fóssil encontrada na natureza no estado gasoso, em reservatórios no subsolo. A gênese do gás natural é semelhante à do petróleo: ambos foram formados ao longo de milhões de anos pela decomposição de matéria orgânica e normalmente são encontrados juntos em uma mesma jazida. O gás natural pode ocorrer como gás associado – tanto dissolvido no petróleo como presente no mesmo reservatório, em uma fase separada – ou sem a presença de petróleo ou água, casos em que é denominado gás não-associado.

O componente predominante do gás natural é o metano (CH_4), um hidrocarboneto que possui em sua molécula apenas um átomo de carbono. As proporções de metano e de outros componentes podem variar conforme o local onde o gás é originado, como também acontece com a composição do petróleo, que difere de uma região para outra.²

O GN é um combustível que pode ser usado da forma que é encontrado na natureza, sem necessidade de refino, entretanto é necessário submetê-lo a um processamento adequado em plantas denominadas unidades de processamento de gás natural (UPGN's), com a finalidade de ajustar suas características às especificações requeridas pelos usos finais e pelos recursos de transporte.

Após os ajustes o transporte do gás natural até o local de consumo normalmente é feito por gasodutos, por navios ou por caminhões. O transporte dutoviário do gás natural é feito a pressões em torno de 100atm, enquanto nos modos

² O gás natural não deve ser confundido com o gás liquefeito de petróleo (GLP), que é um derivado de petróleo obtido através do processo de refino. O GLP, composto basicamente por propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}), é mais denso que o ar. Sob esse aspecto, o GN é mais seguro que o GLP, porque sendo menos denso que o ar, dissipa-se com mais facilidade e está menos susceptível a explosão em caso de vazamento.

aquaviário e terrestre o gás é transportado na forma de gás natural comprimido (GNC) ou gás natural liquefeito (GNL).

1.7. Gás natural veicular (GNV)

Gás natural veicular (GNV)³, ou gás metano veicular (GMV), são denominações dadas à mistura combustível gasosa destinada ao uso veicular, tipicamente proveniente do gás natural e do biogás, cujo componente principal é o metano. O GNV é comprimido a uma pressão de 220atm para ser armazenado em reservatórios especiais instalados nos veículos, geralmente em forma de cilindros.

O GNV é a forma veicular de uso do GNC, podendo ser usado em tanto em veículos leves como em veículos pesados. As estruturas de abastecimento são dotadas de equipamentos que elevam a pressão do gás disponibilizado na rede de distribuição para o valor adequado ao acondicionamento nos cilindros, em torno de 220atm. No Brasil, o GNV deve obedecer às especificações estabelecidas pela ANP.

1.8. Gás natural comprimido (GNC)

Gás natural comprimido (GNC)⁴ é o gás natural processado e condicionado para o armazenamento e transporte em reservatórios à temperatura ambiente e pressão de 220atm, próxima à condição de mínimo fator de compressibilidade.⁵

O GNC pode ser transportado por caminhões de forma economicamente viável em distâncias até aproximadamente 200km para o atendimento de mercados onde ainda não existe rede de gás. Este modo de transporte, conhecido como “gasoduto virtual”, normalmente é feito em distâncias de até 200km por carretas de 30 mil m³ a 50 mil m³, permitindo a criação de novos mercados consumidores em localidades não servidas por gasodutos. Também é possível transportar o GNC por balsas ou plataformas ferroviárias. Ao chegar ao ponto de consumo, o reservatório usado para transporte, normalmente um conjunto de cilindros, é descarregado e

³ Em inglês, a sigla NGV (*natural gas vehicle*) é usada para designar veículos movidos a gás natural.

⁴ Denominação em inglês, usada na literatura internacional: CNG – *compressed natural gas*.

⁵ O mínimo fator de compressibilidade (z) corresponde à condição de pressão na qual o GN conserva o comportamento descrito pela equação de estado dos gases ideais ($PV = znRT$).

conectado a uma estação de descompressão e regulagem, possibilitando o consumo final do gás.

A expressão “veículos a GNC” é usada para designar todos os tipos de veículos a gás natural abastecidos com GNC, sejam dedicados, “*dual-fuel*”, OEM (*Original Equipment Manufacturer*), convertidos, com motor estequiométrico ou “*lean-burn*”. A característica peculiar a todo veículo a GNC é a presença de cilindros de aço para armazenamento do gás natural comprimido.

1.9. Gás natural liquefeito (GNL)

Quando o gás natural é refrigerado a uma temperatura de -162°C na pressão atmosférica, condensa-se a um líquido chamado gás natural liquefeito (GNL)⁶. A principal vantagem do GNL sobre o gás natural em estado gasoso na pressão atmosférica é que seu volume é 600 vezes menor. Além disso, o GNL pesa somente 45% do mesmo volume de água. A vantagem do volume e do peso do GNL facilita o armazenamento e o transporte de grandes quantidades de gás para o local de consumo.

O armazenamento do GNL é feito em tanques criogênicos, que são construídos com paredes duplas contendo vácuo entre elas, projetados para possibilitar sua manipulação a temperatura externa ambiente, mantendo baixa a temperatura interna. Para ser utilizado, o GNL deve ser re-vaporizado e ajustado à pressão requerida no uso final. (OLIVEIRA, 2006)

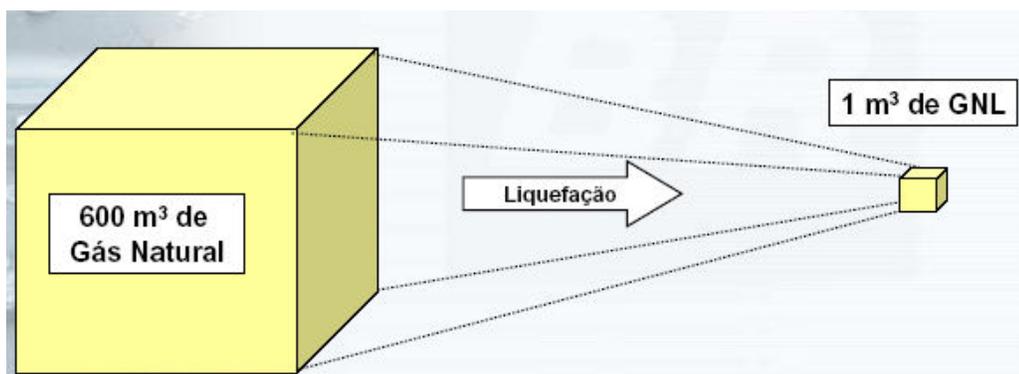


Figura 4. Volume ocupado pelo GN antes e após a liquefação

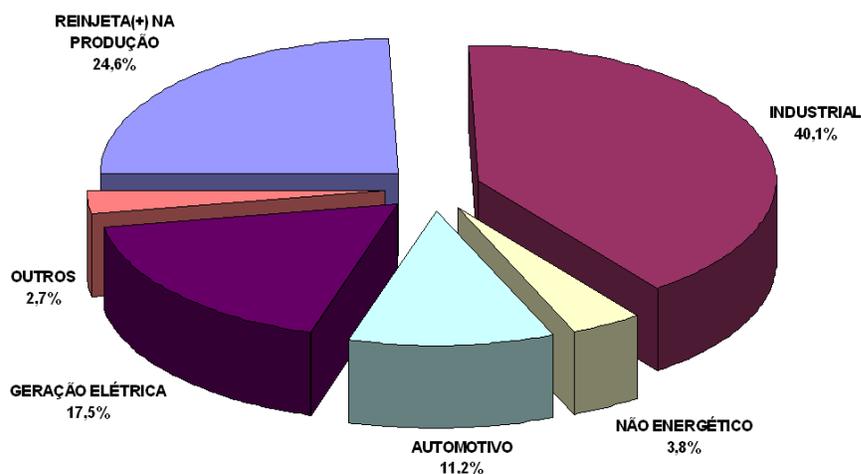
⁶ Denominação em inglês, usada na literatura internacional: LNG – *liquefied natural gas*.

O processo de obtenção do GNL possibilita a liquefação seletiva em estágios de temperatura, permitindo separar o metano dos outros componentes do gás, devido às diferentes temperaturas de liquefação, isolando também as impurezas. Desta maneira o GNL obtido possui maior quantidade de metano que o gás original, e mais adequado ao uso veicular. Segundo OLIVEIRA (2006), por esse motivo, as emissões dos ônibus a GNL costumam ser melhores que as dos ônibus a GNC. Devido à densidade do GNL ser o dobro da densidade do GNC, um ônibus ou caminhão a GNL poderá ter uma melhor relação autonomia/espaco ocupado pelos reservatórios de gás. Por outro lado, o manuseio de líquidos criogênicos requer procedimentos e mão-de-obra especiais.

A diferença principal entre veículos a GNL e veículos convencionais é o sistema de combustível criogênico, abastecido com o combustível a temperatura de -129°C e pressão 7atm, para posteriormente ser aquecido, regulado, e entregue ao motor na forma gasosa. Os custos do sistema de ônibus a GNL e das estruturas logística e de abastecimento criogênico são maiores que os do ônibus a GNC. Cerca de dez por cento dos ônibus a gás natural dos EUA são a GNL. No Brasil não há ônibus a GNL, e também ainda não há estrutura de abastecimento criogênico para uso veicular.

1.10. Utilização econômica do Gás Natural no Brasil

No Brasil, a utilização do gás natural tem se concentrado tradicionalmente em três grandes mercados: industrial, comercial e residencial. Mais recentemente, ganhou espaço também no mercado automotivo, sob a forma de combustível (gás natural veicular – GNV). A Figura 8 apresenta as porcentagens de utilização do gás natural em 2007, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) por setor de mercado.



(+) consumo em refinarias e na exploração e produção de petróleo

Figura 5. Uso do Gás Natural no Brasil em 2007

Uso industrial: engloba todas as aplicações do gás natural nos ramos da indústria, definidos no Balanço Energético Nacional, quais sejam: alimentos e bebidas, cimento, cerâmica, têxtil, ferro gusa e aço, ferro-ligas, mineração/pelotização, química, nãoferrosos, papel e celulose e outras indústrias. Neste bloco de aplicações, destacam-se o uso do gás natural como combustível para geração de força motriz, para aquecimento direto, calor de processo, climatização de ambientes, como matéria prima na indústria petroquímica ou como redutor siderúrgico.

Uso automotivo (GNV): combustível veicular de carros de passeio, vans e ônibus urbanos. Envolve também as atividades de instalações de reabastecimento nos postos de serviço ou estações de compressão.

Geração de energia: queima do gás em motores e turbinas para acionamento de geradores elétricos e da utilização dos efluentes térmicos das máquinas para geração de vapor, o que caracteriza os sistemas de cogeração.

Uso Comercial: concentra-se basicamente no aquecimento de água, condicionamento de ambientes, fornos de panificadoras, lavanderias em instalações comerciais ou hospitalares e para cocção em restaurantes e hotéis.

Uso residencial: cocção de alimentos, aquecimento ambiental (que representa um significativo mercado de gás em países de clima frio), refrigeração e iluminação em locais onde não há disponibilidade de energia elétrica.

2. ANÁLISE TÉCNICA DO GÁS NATURAL LIQUEFEITO (GNL)

O GNL é uma alternativa tecnológica para o transporte do gás entre regiões onde não existe uma infra-estrutura de gasodutos, ou onde sua construção não é técnica ou economicamente viável. A liquefação do gás ocorre quando o gás natural é exposto à temperatura criogênica de -162° C. No estado líquido, o GNL tem uma densidade energética aproximadamente 230% superior ao GNC e 60% superior ao óleo diesel. (Teixeira, 2003, p.43)

Os processos de liquefação de gás natural se dividem em dois tipos: os processos do tipo “*base-load*” e do tipo “*peak-shaving*”. Os objetivos e as características técnicas de cada tipo de processo de liquefação são diferentes. Os processos do tipo “*base-load*” têm como objetivo a liquefação de gás natural em grandes volumes, visando o transporte por navios metaneiros e comercialização do gás natural no mercado internacional. Enquanto isso, as plantas do tipo “*peak-shaving*” têm uma capacidade máxima de produção bem menor que a “*base-load*” e visam abastecer pequenos mercados consumidores, como postos de GNV e algumas fábricas.

Nos EUA, muitas distribuidoras de gás confiam nas plantas “*peak-shaving*” como forma de suprir os picos de demanda que ocorrem principalmente durante o inverno. Lá o GNL é estocado em grandes tanques refrigerados e integrados à rede local de dutos. Esses tanques podem servir então como uma alternativa para a estocagem do gás não consumido, podendo então ser utilizado num período em que o consumo deste seja mais elevado, como ocorre no inverno. As plantas “*peak-shaving*” produzem em média 100.000t/ano de metros cúbicos de gás e costumam estar localizadas próximas ao mercado consumidor. (Parfomak, 2003)

2.1. Principais empresas de GNL

Atualmente, as principais empresas com capacitação tecnológica para fornecer plantas de GNL de pequena escala são: Air Products and Chemicals Inc. (EUA), Black & Veatch Pritchard (EUA), Chart Industries Inc. (EUA), CH-IV Cryogenics (EUA), Chicago Bridge & Iron Company (EUA), Chart (EUA), Cryogenics (EUA), Hamworthy KSE (Noruega), KryoPak Inc. (EUA) and Linde (Alemanha) e a Russa Gazprom.

O panorama brasileiro com relação ao GNL mudou devido a *Joint Venture* feita entre a PETROBRAS e a White Martins – Praxair Inc., dando origem à primeira Planta de Liquefação de Gás Natural do Brasil, localizada em Paulínia (São Paulo) com capacidade de liquefazer 380 mil m³/dia. Trata-se de uma planta de liquefação de pequena escala chamada GASLOCAL, que produz GNL a um custo de 10% a 15% do preço do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo) e por isso vem despertando o interesse das indústrias.

O objetivo da GASLOCAL é levar o gás em carretas para locais que não são atendidos por gasodutos, e atualmente, a unidade de liquefação instalada em Paulínia é capaz de abastecer o interior de São Paulo, norte do Paraná, Mato Grosso do Sul, Goiás, Distrito Federal e Sul de Minas até um limite de 1000km, a partir desta distância, segundo a própria GASLOCAL, a operação torna-se economicamente inviável.

Esta nova alternativa para o transporte de gás natural atende as regiões não abastecidas por gasodutos e viabiliza o suprimento de gás natural para indústrias dos ramos alimentício, metalúrgico, cerâmico e químico, entre outros, assim como postos de GNV e concessionárias estaduais de gás natural canalizado. Para essas concessionárias, a chegada do GNL representa a antecipação de suas atividades, ajudando-as a atender os requisitos de crescimento das redes exigidos pelos estados.

De acordo com a GASLOCAL o sistema de entrega de GNL não tem condições de competir economicamente com o modelo de transporte de gás natural via gasodutos, que reduz em 30% o preço do combustível entregue ao cliente final, em relação ao gás liquefeito, entretanto o preço do GNL pode ser, dependendo da distância percorrida, até 20% mais baixo que o valor do gás liquefeito de petróleo (GLP).



Figura 6. Rede de atendimento da GÁSLOCAL.

Fonte: GASLOCAL 2006

A escolha do método de transporte depende da comparação econômica das duas possibilidades e da disponibilidade de capital. No caso do GNC, deverá ser construída uma estação de compressão no local de origem, enquanto que, no caso do GNL, uma unidade de liquefação. O processo de liquefação do gás é mais caro se comparado ao processo de compressão, no entanto possibilita o transporte do GN com um custo menor em distâncias maiores.

Portanto, para se optar entre uma ou outra tecnologia, além de depender da disponibilidade de recursos financeiros, deverá levar-se em conta a distância e o volume a ser transportado.

Os gasodutos móveis ou virtuais, nome dado às carretas GNC e GNL, surgem como uma boa opção para o mercado brasileiro, dado o elevado custo de capital no Brasil. Um dos grandes problemas dos gasodutos tradicionais são os elevados custos de construção. Essas construções demandam vultosas quantias de capital com longo prazo de retorno, e com isso, elevam o risco do empreendimento. Desta forma, num

país como o Brasil, com uma taxa de juros considerada alta, os investimentos em infra-estrutura de dutos tornam-se menos atrativos aos investidores.

Além do menor tempo e custo de construção, os gasodutos virtuais apresentam outras vantagens aos gasodutos tradicionais, como menor escala de eficiência e menor burocracia para sua implementação. Além disso, as tecnologias GNC e GNL podem suprir mercados de pequena escala, como um posto de GNV ou uma pequena fábrica, que não justificariam a construção de um gasoduto.

Os gasodutos móveis vêm sendo utilizados em inúmeros países, como Rússia, Argentina, EUA, Iran e Egito. No Brasil este tipo de projeto já vem ocorrendo em cidades como Teresina (PI), Campina Grande (PB), Engenheiro Coelho (SP) e recentemente Londrina (PR). Porém, vale ressaltar que os gasodutos móveis não devem ser considerados como concorrentes aos dutos de distribuição, mas sim como uma forma de antecipar ou completar o abastecimento realizado pela tubulação tradicional.

Tabela 4. Composição média do GNL fornecido pela GASLOCAL

Componente	Composição
Metano	98%
Etano	1,40%
Propano	0,40%
Butano	0,10%
Pentano ou superior	0,00%
N ₂	0,67%
O ₂	0,16%
H ₂ O	0,00%
CO ₂	0,00%
H ₂ S	0,00%
Poder calorífico superior de referência: 9.400 kcal/m ³	

Fonte: GASLOCAL 2006

2.2. Transporte e Distribuição do GNL

O GN pode ser transportado até o mercado consumidor através de dutos ou via sistemas de transporte alternativos, os gasodutos virtuais. Esse sistema utiliza caminhões com carretas especiais, que possuem capacidade de transporte de grande volume de gás natural comprimido ou liquefeito e que são abastecidas nas estações de compressão/liquefação atendidas pelo gasoduto. Segundo alguns estudos já feitos

nessa área, estas carretas transportam o GNC ou GNL até outra região, desprovida de infraestrutura dutoviária em um raio de 200Km (no caso do GNC) e até 1000Km (no caso do GNL).

Liquefeito, o gás natural é armazenado e transportado em carretas criogênicas, com capacidade de 50m³ de GNL (12 toneladas), o que equivale à cerca de 30 mil m³ de gás natural. No cliente estão instaladas as Unidades Autônomas de Regaseificação (UAGs). Nas UAGs o GNL é estocado em tanques criogênicos a -162°C e, para de acordo com a demanda de GN ser regaseificado e odorizado.



Figura 7. Caminhões Equipados com Carreta para Transporte de GNL

Fonte: GASLOCAL 2006

Uma vez produzido na planta de liquefação, o GNL pode ser transportado por caminhão ou trem em tanques criogênicos, fabricados com aço inoxidável e com sistema de isolamento térmico. O GNL pode ser estocado nos tanques criogênicos de transporte por até 3 dias sem perdas por vaporização. A transferência do GNL do tanque do caminhão de transporte para o tanque de GNL do posto e do tanque GNL do posto para os evaporadores na UAG deve ser realizada através de uma bomba criogênica.

O tanque de transporte de combustível do caminhão atua como um isolante térmico entre o líquido interno e o meio exterior. Na construção do tanque é utilizada a Perlita⁷ como isolante térmico em conjunto com uma manta superisolante. O tanque é composto por dois cilindros, um tanque interno construído com Aço Inox 304 ou Aço Carbono com 9% de níquel e um tanque externo construído com material usual. Entre os dois tanques é mantido um afastamento mínimo e presença de vácuo para melhor a função isolante.

⁷ A perlite ou perlita é um tipo de vidro vulcânico, de composição riolítica que tem seu ponto de fusão a 1260°C. Quando moída e aquecida a 871 °C ela se expande, formando bolhas em seu interior, igual a pipoca, por causa da evaporação da água. Por causa das bolhas, oferece ótimas propriedades físicas de isolamento de calor e som e possui baixo peso específico. Pode-se adicionar N₂ à Perlita para evitar absorção de umidade pela Perlita.

3. POSTO GNV ABASTECIDO POR GNL

O GNL utilizado para fornecer GNV em um posto de combustíveis é bombeado do local de armazenamento através de uma bomba criogênica que aumenta sua pressão para um vaporizador atmosférico, onde através de processos de troca de calor, o GNL sofrerá o processo de regaseificação. Em seguida o gás obtido será armazenado em tanques de armazenamento a determinada pressão para posterior utilização no fornecimento de GNV aos veículos.

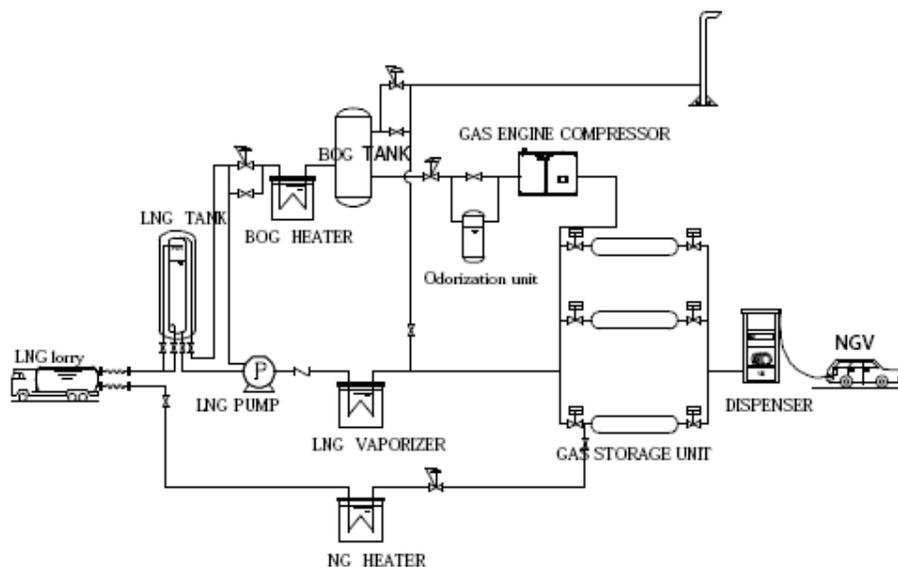


Figura 8. Sistema de abastecimento Gás Natural Líquido-Comprimido
Fonte: YONEZAWA, 2002

Podem-se citar algumas vantagens do abastecimento de gás natural através da tecnologia do GNL, se comparado ao sistema usual de fornecimento de gás:

(i) Postos de abastecimento de GNV podem ser construídos em uma área fora da malha de atendimento da concessionária de gás do local. Os postos podem ser reabastecidos através de caminhões de transporte de GNL.

O gás natural é fornecido por uma empresa distribuidora de gás que geralmente tem uma concessão exclusiva para operar em uma determinada região ou cidade, utilizando uma rede de gasodutos vicinais conectados aos postos de abastecimento dos veículos.

No Brasil, atualmente, as tubulações de gás nas cidades estão presentes apenas em grandes áreas urbanas, tornando assim limitada a construção de posto de

abastecimento de GNV abastecidos pela malha de gás da concessionária local. Para resolver este problema, o reabastecimento dos postos pode ser feito através do transporte de GNC em cilindros, contudo esse sistema não tem sua utilização aplicada em larga escala devido aos elevados custos de operação.

Portanto, a disseminação do GNV acaba sendo limitada a veículos comerciais, tais como transporte público ou veículos que realizam trabalhos de rotina em áreas urbanas. A utilização de veículos movidos a GNV também vem sendo estimulada em grandes centros urbanos onde vêm ocorrendo uma preocupação com a diminuição dos níveis de poluição do ar.

(ii) A bomba criogênica de GNL utilizada para bombear o GNL para os vaporizadores onde serão produzidos o GNC garante elevada eficiência ao processo, diminuindo significativamente o consumo de energia elétrica no processo de compressão do GN. Nos sistemas convencionais de reabastecimento de GNV, os postos de abastecimentos podem operar a baixa pressão, o chamado abastecimento lento, ou operar com gás armazenado a alta pressão. Em função do alto tempo de abastecimento dos veículos no primeiro caso, podendo chegar a 20 minutos, grande parte dos postos de combustíveis utiliza-se da tecnologia de abastecimento rápido.

No abastecimento rápido, o gás recebido a baixa pressão da companhia distribuidora (de 2 a 4 bar em geral) é comprimido a cerca de 250 bar por um sistema de compressores e armazenado em tanques de alta compressão, chamados de pulmões. O abastecimento é feito por dispensers conectados a esses pulmões, que à medida que vão fornecendo gás perdem pressão.

Quando a pressão cai a um determinado nível, automaticamente o dispenser passa a utilizar outro tanque e o compressor volta a fornecer gás comprimido ao tanque que perdeu pressão, e assim sucessivamente, de forma que o abastecimento é realizado sempre em alta pressão, minimizando o tempo em que o veículo fica parado.

Considerando a tecnologia de alta pressão, o tempo de abastecimento por veículo pode variar de 3 a 8 minutos dependendo da relação entre a quantidade de compressores, volume do pulmão e o número de veículos abastecendo simultaneamente (NTU, 2004).

(iii) Potencial econômico futuro, nos EUA já existem em circulação veículos abastecidos diretamente com GNL, no Brasil através de uma parceria entre a GasLocal e a Bosch, vêm sendo pesquisado e desenvolvido um sistema para utilização diretamente do GNL em veículos de grande porte como ônibus e caminhões. Segundo testes iniciais do novo sistema, 1 tanque de GNL traz uma autonomia de 1000km para o veículo, e no aspecto ambiental, cada caminhão diesel convertido para utilização de gás natural equivale a uma redução na emissão de poluentes igual a conversão de 123 automóveis de passeio. O sistema trabalha simultaneamente com dois combustíveis em diferentes proporções, garantindo ao condutor a mesma potência original do veículo. A taxa de substituição de diesel por gás natural pode atingir 90%, trazendo uma economia de até 30% sobre as despesas com combustível.

Além disso, o sistema de reabastecimento pode ser combinado com outros sistemas de cogeração e ainda utilização do frio gerado no processo de regaseificação do GNL em sistemas de refrigeração de prédios e estabelecimentos comerciais.

(iv) O consumo de energia elétrica para o funcionamento do dispenser de GNC, abastecido por um reservatório de GNL, pode ser até 10 vezes menor se comparado ao consumo energético do dispenser de GNC de um posto convencional de GNV, de acordo com as condições de uso.

No caso das grandes postos de reabastecimento (automóveis e caminhões) o investimento financeiro inicial para implantação de uma planta de GNLC é inferior ao custo de uma planta GNC. Para postos de reabastecimentos convencionais o investimento é equivalente as plantas comuns de GNC. O sistema criogênico exige pouca manutenção se comparado a um compressor de múltiplos estágios. Os custos de manutenção chegam a ser até 3 vezes menores.

Um posto abastecido por GNL não requer compressores para armazenar o gás natural em cilindros de alta pressão. O GNL é bombeado através de uma bomba criogênica para um vaporizador de alta pressão, que permite transferir o gás diretamente para os cilindros do posto.

Uma vez que o posto GNL não requer investimento em capacidade de compressão, o custo de investimento do posto se reduz em cerca de investimento do

posto se reduz em cerca de 20% a 30%, quando comparado a um posto padrão abastecido por gasoduto (IANGV, 1997).



Figura 9. Representação de um posto de combustíveis com armazenamento de GNL.

Fonte: Cryostar, 2008

Entretanto algumas desvantagens desse sistema dificultam a utilização desse recurso para pequenos usuários. Se comparado ao sistema convencional de GNV, a instalação de uma planta de GNL para obtenção de GNV requer unidades e dispositivos específicos para a tecnologia criogênica, como o tanque de GNL, bomba de GNL, e vaporizador de GNL. O custo dos equipamentos que desempenham a mesma função nos dois sistemas, para funcionamento da tecnologia GNL acaba sendo maior, entre 30% a 50% do valor dos equipamentos para uma instalação convencional. Além disso, uma vez que um espaço para a instalação dessas unidades e dispositivos necessários requeridos é maior, a área terrestre necessária também se torna maior do que a do sistema convencional.

Outra desvantagem que deve ser levada em consideração trata-se do processo de evaporação do GNL devido ao calor. Em plantas onde o potencial instalado de GNL para fornecer GNC é superior ao consumo de GNC poderão ocorrer perda de

GN para o ambiente, devido ao processo natural de evaporação do gás armazenado no tanque de GNL.

Tabela 5. Tabela de vantagens e desvantagens do GNL

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Eliminação de impurezas e inertes no processo de liquefação • Elevada relação entre quantidade de produto transportado e peso total do transporte • Equipamentos de armazenamento e transferência de tecnologia comercial 	<ul style="list-style-type: none"> • Necessidade de planta para liquefação do gás • Perdas de produto no processo de liquefação, transporte e armazenamento • Operação em temperatura criogênica • Custo elevado dos tanques de armazenamento • Necessidade de criação de infra-estrutura de logística para abastecimento

3.1. Estrutura do sistema Gás Natural Líquido - Comprimido

Um posto de GNV padrão, abastecido via GNL, é composto pelos seguintes equipamentos:

- Tanques criogênicos de GNL;
- Vaporizadores atmosféricos;
- Quadro de regulagem de pressão;
- Medidores de pressão, vazão, temperatura;
- Detectores de chama e gás;
- Bombas criogênicas;
- Vaporizador atmosférico e sistema de odorização do gás;
- Tanque de armazenamento de GNC e
- Dispenser de GNV.

O GNL é regaseificado através de vaporizadores atmosféricos de alta pressão, após a regaseificação ocorre a injeção de odorante, preparando o gás para o consumo.

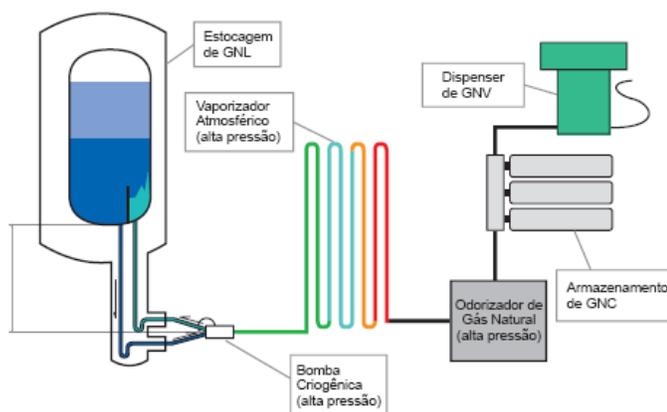


Figura 10. Instalação típica de GNL em postos de GNV

Fonte: GASLOCAL 2006

O armazenamento de combustíveis líquidos quer sejam os tradicionais gasolina, álcool e diesel, bem como o GNL, no posto de combustíveis permite ao mesmo ser abastecido a partir de diferentes fornecedores. A utilização de GNL mostra-se mais flexível neste aspecto, enquanto que o fornecimento de GNV a partir do GNC é realizado exclusivamente por um fornecedor que detém a permissão de distribuição do gás natural através de gasodutos instalados na cidade ou região.

3.2. Abastecimento do Reservatório de GNL do Posto

O procedimento de transferência do GNL a partir do caminhão de abastecimento pode ser realizado através de duas formas, através da ação da força da gravidade ou através do uso de bombas. A utilização de uma bomba reduz significativamente o tempo de transferência do GNL. Esta bomba pode ser acoplada no caminhão ou na estrutura de recebimento do posto. Estas bombas podem ser manuais ou automáticas, e devem obedecer a padrões e normas de segurança especificadas por órgãos reguladores.



Figura 11. Imagem do reabastecimento to tanque de armazenamento de GNL.

As bombas que operam com GNL são do tipo criogênicas sendo utilizadas para transferência do GNL da unidade de liquefação para os tanques de transporte e entre esses tanques e os de armazenamento nas localidades.



Figura 12. Bomba criogênica externa



Figura 13. Bombas criogênicas submersas
Fonte: Cryogenic Industries

O caminhão descarrega o combustível líquido no cliente, diferentemente dos outros combustíveis líquidos, no caso do GNL pode se transferir a carga total ou parcial, no caso do caminhão ser descarregado parcialmente o mesmo pode prosseguir para outros clientes onde acontecerá o abastecimento destes. Durante o abastecimento do reservatório do cliente, o operador deve usar uma roupa especial adequada para proteção, construída com tecido Nomex® (fabricante DuPont®).



Figura 14. Abastecimento do reservatório de GNL através do caminhão

Quando carregado, 92% do tanque é ocupado pelo GNL e o restante por GNC. Durante o transporte, a pressão interna do tanque é mantida entre 8psig⁸ (0,55bar) e 10psig(0,69bar). Quando todo o combustível líquido é retirado do caminhão, o interior do tanque possuirá em torno de 50kg à 60kg de GNC, como alternativa a manter a pressão interna do tanque no nível necessário.

3.3. Reservatório de GNL

O GNL é armazenado em tanques criogênicos. A tecnologia de isolamento à vácuo garante segurança na armazenagem e mínima transferência de calor entre o líquido e o exterior do tanque. Os tanques de armazenagem de GNL podem ser construídos na vertical ou horizontal e em diversos tamanhos. A fim de permitir o monitoramento em tempo real dos tanques, esses são acoplados de sensores responsáveis pelo monitoramento do nível e pressão no interior.



Figura 15. Tanques de armazenamento de GNL.

O tanque reservatório presente no posto é construído de forma semelhante ao utilizado no caminhão de transporte. Em sua construção é utilizada também a perlita para melhorar o isolamento térmico. A capacidade média do tanque de

⁸ **psig**: abreviação de “*pounds per square inch gauge*” – libras por polegada quadrada manométrica. A pressão manométrica sempre ignora a pressão atmosférica (esta pressão é obtida por efeito mecânico de compressores, bombas, etc.)

armazenamento de GNL é variável, no Brasil vem sendo utilizado o tanque com capacidade de 45 m³ de GNL. Na parte superior do tanque reservatório existe uma válvula de descompressão, essa válvula é controlada por um sistema computadorizado de monitoramento.

Apesar do tanque possuir isolamento térmico, o mesmo não possui eficiência de 100%, assim com o tempo uma pequena quantidade de GNL é vaporizada no seu interior, então para evitar que a pressão interna do tanque aumente, a válvula de descompressão é acionada pela central de monitoramento liberando esse gás para o ambiente exterior. Devido a suas propriedades físico-químicas já enumeradas o GN liberado se dissipa facilmente na atmosfera sem causar riscos à instalação.

O sistema de monitoramento automático também é responsável por controlar o nível do combustível no interior do tanque. O nível de GNL deve ser mantido entre um nível máximo, que deve ser menor que a capacidade máxima do tanque para permitir a presença do GN que vaporiza com o tempo, e um nível de segurança mínimo que garanta o funcionamento da instalação. Quando a quantidade de GNL armazenada está próxima do nível mínimo a central de monitoramento envia uma mensagem ao fornecedor de GNL solicitando uma nova carga do reservatório.

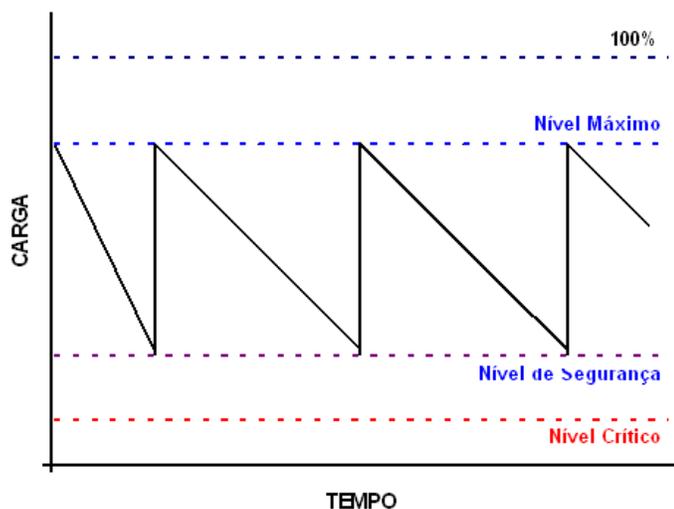


Figura 16. Gráfico do nível de GNL presente no reservatório.

Quando o reservatório do cliente é abastecido pelo caminhão de transporte de GNL, a temperatura criogênica do GNL da carreta faz com que o GN presente no interior reservatório seja liquefeito novamente. Na estocagem o GNL é mantido a

uma temperatura próxima de $-164,2^{\circ}\text{C}$ e a pressão entre 0,5psig e 1,0psig. O custo médio dos tanques de 45m^3 é da ordem de US\$ 200mil.

3.4. Bomba de GNL

A bomba de GNL deve ser instalada para aumentar a pressão do GNL de 0,2~0,3 MPa para 25 MPa. Ao selecionar uma bomba de GNL e instalá-lo, os seguintes pontos devem ser considerados:

(1) A bomba de GNL deve ser usada para fornecer ao vaporizador o fluido a pressão elevada requerida e vazão determinada;

(2) Para evitar eventuais problemas no funcionamento, a pressão no reservatório de armazenamento de GNC deve ser monitorada e mantida constante;

(3) Ao considerar-se partida rápida da planta, é preferível utilizar uma bomba do tipo submersa, que será instalada no interior do tanque de GNL. No entanto, quando se avaliam os custos de manutenção, o uso de bombas submersas torna-se inviável devido à complexidade técnica do procedimento. Portanto, têm se optado pela utilização de bombas verticais para o bombeamento do GNL no processo de vaporização. Este tipo de bomba possui o corpo principal armazenado em um pequeno invólucro de isolamento térmico sob vácuo.

(4) A bomba deve ser instalada o mais próximo possível do tanque de GNL para minimizar as perdas de calor e escoamento da tubulação.

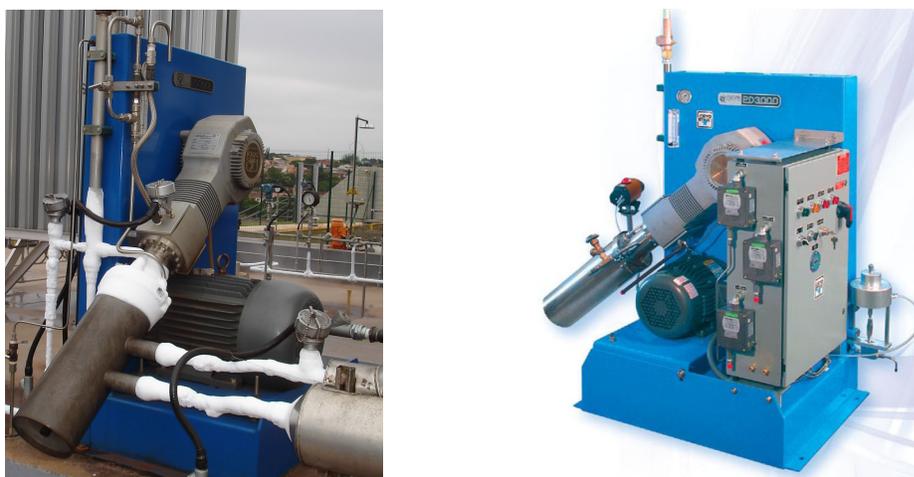


Figura 17. Bomba criogênica modelo PD3000 – fabricante Cryostar

Entre os fabricantes de bombas criogênicas para transferência pode-se citar: Grofe (nacional), ACD, CS&P, Cryostar e Ebara Cryodyanmics. As bombas externas, se comparadas às submersas, são mais baratas embora se aqueçam quando não estão sendo utilizadas, acarretando vaporização de líquido. No entanto, são as mais utilizadas pela sua simplicidade. O preço médio das bombas é da ordem de US\$10mil.

3.5. Vaporizador atmosférico de alta pressão

São equipamentos onde efetivamente acontece a transformação do GNL em GNC através da troca de calor por convecção forçada. A Figura 13, a seguir, mostra este tipo de equipamento. Entre os fabricantes destacam-se: White Martins (nacional), Taylor-Wharton, Finnco.



Figura 18. Vaporizadores atmosféricos

O vaporizador de GNL é projetado para regaseificar o gás natural liquefeito em temperatura criogênica através de processos de troca de calor. Existem dois tipos básicos de vaporizadores, o tipo “Open Rack type (ORV)”, onde o trocador de calor fica exposto à atmosfera, e o tipo "Submerged Combustion type (SMV)" onde o trocador de calor fica submerso em água.

Os vaporizadores ORV podem utilizar água ou ar atmosférico no processo de troca de calor. São usados preferencialmente devido ao baixo custo de operação, construção simples, fácil manutenção, alta confiabilidade e segurança.

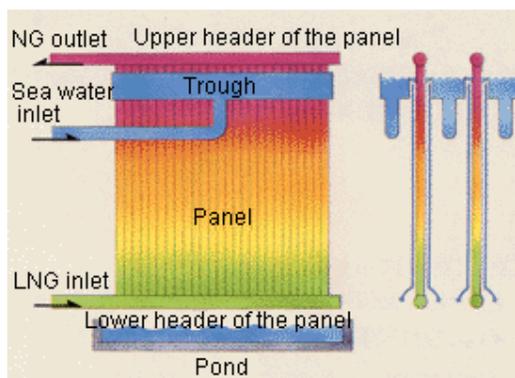


Figura 19. Escoamento do vaporizador "ORV"

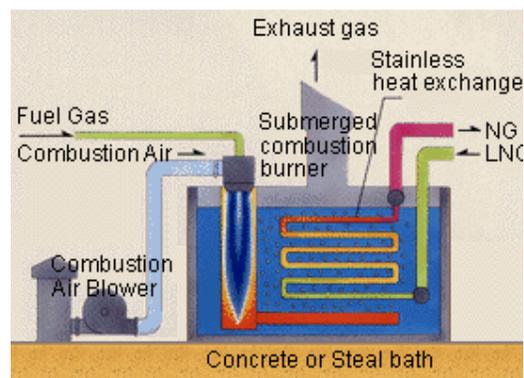


Figura 20. Escoamento no vaporizador "SMV"

Fonte: Sumitomo Co.

Uma vez que a temperatura atmosférica é utilizada como fonte de calor, não se faz necessário a utilização de fontes adicionais de calor, como por exemplo um sistema de água quente encanada, garantindo assim uma estrutura simples de instalação do equipamento. Como a temperatura atmosférica afeta diretamente o processo de troca de calor, a temperatura do GNC produzido será aproximadamente constante, normalmente essa temperatura será 10% inferior a temperatura do ar atmosférico. Quando a instalação opera continuamente, pode ocorrer formação de gelo na superfície da tubulação do vaporizador, ocasionando assim uma perda de rendimento do trocador de calor.

O preço médio de um vaporizador que atenda as especificações abaixo é de aproximadamente US\$ 30mil.

Especificação básica:

- Pressão de trabalho = 300 psig
- Temperatura de projeto = -196°C
- Dimensões = 3,16 m x 0,68 m x 5,15 m
- Vazão = 8000 ft³/h

3.6. Odorizador de Gás Natural

De acordo com legislação específica existente no Brasil, o gás natural comercializado na forma de combustível GNV deve ser odorizado para posterior comercialização. Por isso faz se necessária a instalação de uma unidade de odorização do gás.

No sistema convencional de reabastecimento, o GN que é fornecido pela concessionária local já é odorizado, dispensando esse tipo de equipamento. O gás natural é inodoro de maneira que sua odorização é necessária por economia e por medida de segurança permitindo a detecção de vazamentos antes que a concentração de gás na área atingida chegue a níveis perigosos. Portanto faz se necessária a instalação de uma unidade odorizadora do gás em plantas que produzem o GNV a partir de GNL.

O gás natural pode ser odorizado artificialmente com “etil-mercaptana”, componente químico que lhe confere um cheiro característico, tornando possível a detecção de vazamento. O odor do gás natural é semelhante ao do gás de cozinha tradicional, já que este passa pelo mesmo processo de odorização.



Figura 21. Unidade de odorização do GNC

Em São Paulo, a Comgás utiliza um odorante que mistura três componentes: terc-butil-mercaptana 78%, iso-propil-mercaptana 16%, n-propil-mercaptana 6%, a taxa de concentração de utilização é da ordem de 4 mg por m³

3.7. Unidade de armazenamento de GNC e Dispenser

Os equipamentos instalados depois do vaporizador GNL são basicamente os mesmos equipamentos de uma instalação convencional de reabastecimento de GNV, portanto os equipamentos convencionais podem ser utilizados nesta parte da estrutura.



Figura 22. Unidade de armazenamento de GNC



Figura 23. Dispenser de GNV

3.8. Instruções de Segurança para operação de GNL

Os tanques de armazenagem fixos podem ser sujeitos a explosões causadas pela expansão do vapor emitido pelo líquido em ebulição, mas a probabilidade de ocorrência desse tipo de evento é baixa, principalmente pela existência de válvulas de segurança na parte externa superior do tanque. Estas válvulas são controladas pelo sistema de monitoramento central e são acionadas sempre que a pressão no interior do tanque aumentar devido a vaporização do GNL.

Para as instalações que ainda se encontram na fase de planejamento, dispor do melhor equipamento no local pode com certeza ajudar a conseguir as autorizações necessárias a construção de novas instalações e expandir as oportunidades de transporte. É importante notar que o fabricante de equipamento de supressão de incêndios deveria ser consultado antes de selecionar um sistema de supressão de incêndios para a proteção de instalações de GNL.

Uma proteção efetiva de instalações de GNL se concentra em três áreas: a prevenção, o controle e a extinção. Precisa-se um grande leque de soluções em termos de agentes e de equipamento para lidar como cada um dos objetivos. Esses produtos são dedicados a prevenir os incêndios de GNL nas etapas do processo de utilização, incluindo as instalações de enchimento e armazenagem, os equipamentos de evaporação e posterior armazenagem e distribuição do GNV.

3.8.1. Sistemas de químicos secos

Os grandes sistemas a base de químicos secos são utilizados para proteger muitas aplicações no interior das instalações de GNL. As zonas dos gasodutos e da distribuição, os tanques de armazenagem, as bombas de transferência, as trincheiras e as fossas podem todos ser protegidos com grandes unidades ou sistemas de químicos secos em plataformas de arrasto. Essas unidades podem incorporar carretes de mangueiras para combate manual ao fogo ou uma torre que dispensa químico seco em volumes elevados quando se precisa um lance com maior alcance, como por exemplo para proteger braços de carga e descarga. Além dos sistemas de químicos secos, existem sistemas de duplo agente. A tecnologia de duplo agente combina a capacidade de supressão rápida do químico seco com as capacidades de retenção da espuma.

Os grandes sistemas de químicos secos podem também ser sistemas fixos com tubo/esguicho utilizados para proteção contra riscos permanentes ou fixos como bombas ou vaporizadores. Uma aplicação adicional onde se pode usar um grande sistema fixo de tubo/esguicho em instalações de GNL seria a proteção de chaminés de ventilação sobre os tanques de armazenamento. Esse sistema seria dimensionado de acordo com a capacidade máxima de ventilação de cada chaminé.

3.8.2. Sistemas de espuma de alta expansão

Enquanto os sistemas de químicos secos e os grandes sistemas de químicos secos são preferidos para a supressão dos incêndios de GNL, os sistemas de espuma de alta expansão (High Expansion Foam Systems – HEF) proporcionam a supressão do vapor por derrames de GNL e reduzem a liberação de calor e o calor radiante nas poças afetadas. As áreas usualmente protegidas por HEF em instalações de GNL são as áreas das bombas, os poços secundários de contenção, e as trincheiras que dirigem um derrame potencial de GNL para esses poços. Experiências práticas demonstraram que o HEF é muito efetivo em reduzir as concentrações de metano ao nível do chão durante os derrames de LNG.

Os sistemas de HEF bem projetados servem um objetivo duplo. Em primeiro lugar, fornecem o controlo do fogo com reduções substanciais da liberação de calor e

o retorno de calor radiante no incêndio das poças, que, se não for controlado, iria intensificar ainda mais o fogo.

Em segundo lugar, uma cobertura de HEF sobre um derrame não incendiado de GNL é efetiva na redução dos níveis de vapor de GNL a favor do vento. Um derrame de GNL vai produzir uma nuvem de vapor visível. Os vapores de GNL são mais pesados que o ar e vão derivar com o vento até que se aqueçam o suficiente para tornar-se mais leves que o ar e se dispersar na atmosfera. Isso apresenta o problema potencial de uma fonte de ignição a favor do vento causando um incêndio de vapores de GNL. A cobertura de HEF aquece os vapores de GNL que passam pela espuma, dispersa os vapores mais rapidamente na atmosfera e reduz assim a concentração de GNL a favor do vento.

Os geradores de alta expansão são intrinsecamente seguros porque são alimentados por água. Estão disponíveis em aço inoxidável 316 resistente a corrosão, projetado para cumprir com os requisitos da NFPA 11, Espuma de Baixa, Média e Alta Expansão, podem ser equipados de dispositivos de descarga que dirigem o fluxo.

3.8.3. Proteção no interior das instalações

É importante não deixar de lado aquilo que precisa de proteção no interior das instalações de GNL. Em instalações onde se utilizam computadores, servidores, hardware e software eletrônicos delicados, o agente extintor preferido seria um agente limpo. Os extintores de incêndio de agente limpo são capazes de proteger equipamento eletrônico delicado e cumprem com os requisitos mínimos dos códigos de proteção contra incêndio para a proteção contra “Riscos leves de Classe A”, não se necessitando outros extintores.

Para a proteção das instalações de GNL e todas as aplicações de GNL de alto risco, tais como bombas, compressores, flanges, áreas de descarga, e áreas de carga, existe equipamento específico e especial para combate a incêndio. Quando ocorre um incêndio em instalações de GNL em aplicações de alto risco, existem apenas duas maneiras de apagar os incêndios rapidamente. O primeiro e melhor método é a remoção do combustível. Isso é mais fácil de dizer do que de fazer. Ao fechar as válvulas de distribuição do produto normalmente o fluxo de combustível para. Às

vezes pode haver válvulas a uma distancia considerável do fogo, e não se pode deixar o fogo se extinguir sozinho sem causar danos avultados aos compressores, as bombas, ao equipamento e /ou as instalações. Por isso, o fogo deve ser apagado por meio de equipamento especial de combate a incêndio.

Ao combater-se um incêndio de GNL, podem ser enfrentados dois problemas. Em primeiro lugar, o GNL é usualmente transferido sob pressão devido as operações de bombas e compressores; o segundo problema é o aumento de volume associado a vaporização de GNL. Uma vez que o volume aumenta quando o GNL se vaporiza, precisam-se extintores de fogo especiais que forneçam um grande fluxo de agente extintor de químico seco. O extintor especial de alto fluxo suprime o fogo por inibição da reação química.

3.8.4. As normas da NFPA

Existem organizações e empresas independentes no mercado que concentram os seus esforços na segurança do GNL em todas as etapas, da fabricação, passando pelo transporte e armazenagem e finalmente no uso final. A NFPA 59A, Produção, Armazenagem e Manuseamento de Gás Natural Liquefeito lida de forma ampla com a proteção contra incêndio. É excelente para fornecer os requisitos necessários para projetar, instalar e operar as instalações de GNL de forma segura. Isso é comprovado pelo registro de segurança de esse tipo de instalações, que são das mais seguras na indústria. A segurança foi alcançada aplicando requisitos para o projeto das instalações. A norma está bastante orientada para a prevenção das perdas e dos incêndios, bem como os afastamentos de forma a controlar os danos em caso de um incidente com o GNL ou com o gás natural.

Os capítulos da NFPA 59A que cobrem o projeto e a instalação de equipamento, incluindo os tanques de armazenagem, põem o enfoque na robustez do projeto. Os tanques de armazenagem devem ser projetados de forma a resistir a riscos ambientais como terremotos e inundações e são também projetados para conter o produto em um segundo sistema de contenção caso o reservatório interno de GNL falhe.

A norma inclui requisitos para projetar as tubulações de maneira a minimizar a perda de produto, com materiais especiais e válvulas para parar o fluxo em caso de

um incidente. Os afastamentos entre os reservatórios, entre reservatórios e outro equipamento, entre reservatórios e edifícios, e entre reservatórios e limites da propriedade estão especificados com vista a prevenir os danos causados pelo calor e evitar que os vapores de gás natural atinjam as fontes de ignição.

Requer-se para cada instalação que existam procedimentos escritos de interrupção de atividades de emergência (emergency shut down - ESD) para a contenção dos incidentes. A norma define aquilo que deve ser coberto pelo ESD e como esse deve ser instituído e mantido. Um capítulo separado define os requisitos para as operações de transferência de forma a garantir o manuseamento seguro do GNL. A norma adota uma abordagem baseada no desempenho para o combate aos incêndios. O parágrafo 12.2 requer “uma avaliação baseada nos princípios da engenharia de combate ao incêndio, a análise das condições locais, dos riscos existentes nas instalações, e da exposição eventual de outras propriedades, ou dessa para outras.” O parágrafo define em detalhe aquilo que a avaliação deve determinar. Esse requisito cobre todos os aspetos da proteção contra incêndio, mas não especifica exatamente aquilo que deve ser protegido ou os métodos de proteção. Inclui-se uma informação limitada sobre a detecção, os sistemas de água, e o equipamento portátil de supressão de incêndios.

3.9. Alternativas para utilização do “frio” liberado pelo GNL

Durante o processo de volta ao estado gasoso, o GNL tem a capacidade de esfriar os materiais ao seu redor, ou seja, absorver calor desses materiais. Para aumentar a temperatura do GNL do seu estado líquido, cerca de $-161,5^{\circ}\text{C}$, para o estado gasoso a 0°C é necessário absorver aproximadamente 200 kcal por kg de GNL. Nessas 200 kcal estão incluídas 120 kcal de calor latente mais 80 kcal de calor sensível.

É importante assinalar que a energia gasta para gerar temperaturas baixas cresce drasticamente quanto mais baixa for a temperatura final. Portanto, quanto mais baixa a temperatura em que é usada a capacidade de absorção de calor do GNL maior o mérito termodinâmico do seu uso. O frio do GNL também pode ser utilizado para geração de energia, isto é, a partir da do frio do GNL é possível aumentar o rendimento de turbinas.

O frio do GNL pode ser combinado com uma turbina a gás, conhecido como CCGT – Combined Cycle Gás Turbine e o objetivo desse tipo de aplicação é de aumentar a eficiência do CCGT. A eficiência de uma típica planta CCGT é reduzida de acordo com o aumento de temperatura. Normalmente isso ocorre quando há picos na demanda por energia e conseqüentemente esta pode ser vendida a preços mais elevados.

De maneira geral, os processos industriais que podem usufruir a energia “fria” vinda da regaseificação do GNL o fazem através de um fluido refrigerante intermediário, sendo que apenas este participa ativamente do processo de resfriamento, independente da finalidade da energia “fria”. A figura 24 é uma ilustração do processo, onde o ponto que está indicado com ‘ar quente e ar frio’ pode ser substituído por “água” no caso de fabricação de gelo.

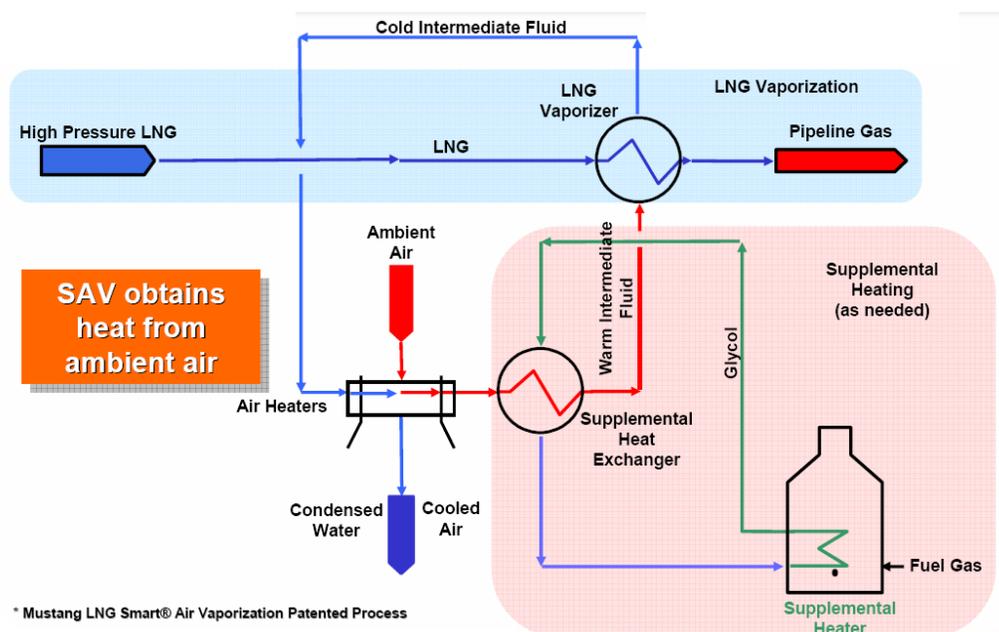


Figura 24. Sistema de reutilização da energia “fria” advinda da vaporização do GNL

Fonte: Mustang Engineering 2007

Pode-se então destacar as seguintes utilidades para o “frio” gerado pelo GNL em postos de combustíveis:

- ✓ Refrigeradores (alimentos, bebidas)
- ✓ Ar condicionado

Os sistemas de refrigeração funcionam com um fluido refrigerante. Exemplos de refrigerantes podem ser; a amônia (NH₃), dióxido de enxofre, hidrocarbonetos

halogenados, e o mais conhecido de todos, o freon. Nos últimos anos uma nova geração de compostos não prejudiciais para a camada de Ozônio, tem vindo a ser cada vez mais utilizada.

Os aparelhos de ar condicionado funcionam da mesma maneira que os refrigeradores. Ao invés de esfriar apenas um pequeno espaço isolado, o ar condicionado refrigera uma sala, uma residência inteira ou até um edifício inteiro. Além disso, o ar condicionado trabalha com temperaturas mais elevadas, já que se trata de condições de conforto térmico humano.

Os aparelhos de ar condicionado utilizam substâncias químicas que se transformam facilmente de gás para líquido, e de volta para gás de novo. Essa substância química é utilizada para transferir o calor do ar de um espaço para fora. É constituída de três principais partes: o compressor, o condensador e o evaporador. O compressor e o condensador geralmente se localizam na parte externa do espaço a ser resfriado enquanto o evaporador se encontra no interior.

O fluido de trabalho chega ao compressor como um gás frio e a baixa temperatura, o fluido é então comprimido de maneira a aumentar sua pressão e temperatura, seguindo para o condensador. Se observarmos a parte externa ao ambiente a ser resfriado, pode se perceber que existem laminas de metal, essas ajudam a dissipar o calor.

Quando o fluido de trabalho deixa o condensador a sua temperatura é muito mais baixa, no entanto a sua pressão permanece alta. Este deixa de ser gás e se encontra na sua fase líquida que vai para o evaporador através de um pequeno buraco, que faz com que a pressão caia de maneira a evaporar o fluido, que mais uma vez passa a se encontrar em sua fase gasosa. É nesse momento que ele extrai calor do ar ao seu redor. O evaporador possui laminas de metal que ajuda na troca de calor com o ar ao redor. Quando o fluido sai do evaporador ele é um gás frio e a baixa temperatura.

Esse processo continua até que a sala atinja a temperatura desejada. O termostato sente que a temperatura está conforme a solicitação e desliga o ar condicionado. Conforme a temperatura da sala aumenta, o termostato liga novamente o ar condicionado.

4. APLICAÇÃO DO “FRIO” EM CONDICIONAMENTO DE AMBIENTES

4.1. Fundamentos teóricos

Para realizar a simulação de um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor com as temperaturas de entrada e saída do fluido, o coeficiente global de transferência de calor e a área total da superfície para que ocorra a transferência.

Devem-se utilizar equações de balanço global de energia pra fluidos quente e frio, como mostra a equação (1), sendo que a última parcela da equação é aplicável nos casos que há mudança de fase da substância ou mistura.

$$q = \dot{m}_{gas} c_{gas,p} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} \quad (1)$$

E a eq. (2) relaciona o fluxo de calor, coeficiente global de troca de calor e as temperaturas de entrada e de saída (Incropera).

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (2)$$

Como a área de troca de calor é circular, a equação (2) fica:

$$q = U\pi DL\Delta T_{lm}$$

Onde $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$, sendo ΔT_1 e ΔT_2 conforme a figura abaixo

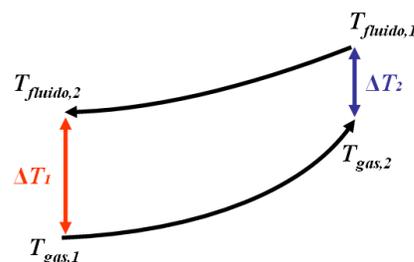


Figura 25. Distribuição de temperatura em um trocador de calor (INCROPERA)

Considerando a parede do(s) tubo(s) onde a troca de calor se realiza como sendo delgada suficiente pra se desconsiderar a condutividade térmica do material, U depende apenas de $h_{i,fluido}$ e de $h_{e,gas}$, através da equação (3) a seguir.

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{i,fluido}}\right) + \left(\frac{1}{h_{e,gas}}\right)} \quad (3)$$

4.1.1. Coeficiente de Convecção em Escoamentos Internos

O coeficiente de convecção de uma mistura ou substância depende de vários fatores como temperatura, fluxo mássico, diâmetro entre outros. E para que seja possível a obtenção de um valor teórico de $h_{i,fluido}$ deve se fazer um levantamento desse parâmetro.

Quando trata-se de escoamentos internos, como é o caso do fluido de vaporização, é importante ter conhecimento da natureza do escoamento, se o mesmo é laminar ou turbulento. O número de Reynolds (Re) para escoamento em um tubo circular é definido pela equação (4) abaixo.

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi D \mu} \quad (4)$$

Se $Re < 2300$, então o escoamento é laminar, se $Re > 10.000$ se trata de um escoamento turbulento, e se $3000 < Re < 10.000$ é uma transição entre laminar e turbulento.

Sabendo que o coeficiente de convecção é dado pela fórmula empírica expressa pela equação (5) calcula-se também o número de Nusselt (Nu) de acordo com Re.

$$h_{i,fluido} = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (5)$$

O número de Nusselt é função de Re se o escoamento é uma transição, equação (6) ou turbulento, equação (7) e é constante se o escoamento é laminar, $Nu = 4,36$.

$$Nu = \frac{(f/8)(Re-1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3}-1)} \quad (6)$$

$$Nu = 0,023Re^{4/5} Pr^{0,3} \quad (7)$$

4.1.2. Coeficiente de Convecção com Mudança de Fase

No lado externo da área onde há troca de calor, se encontra o líquido que ao ser aquecido mudará de fase e passará a se encontrar em seu estado gasoso com

aumento de temperatura. Para o caso onde há mudança de fase, há a formação de uma película de ebulição, e o Nu pode ser expresso por:

$$Nu = 0,62 \left[\frac{g\rho_v(\rho_l - \rho_v)h'_{fg} D^3}{\mu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (8)$$

$$\text{Onde } h'_{fg} = h_{fg} + 0,80c_{gas,v}(T_s - T_{sat})$$

4.2. Simulação em um trocador de calor

A vaporização do gás natural será analisada através da troca de calor na forma inundada, isto é, o GNL se encontra na parte externa do trocador, enquanto um fluido de aquecimento passa por dentro dos tubos.

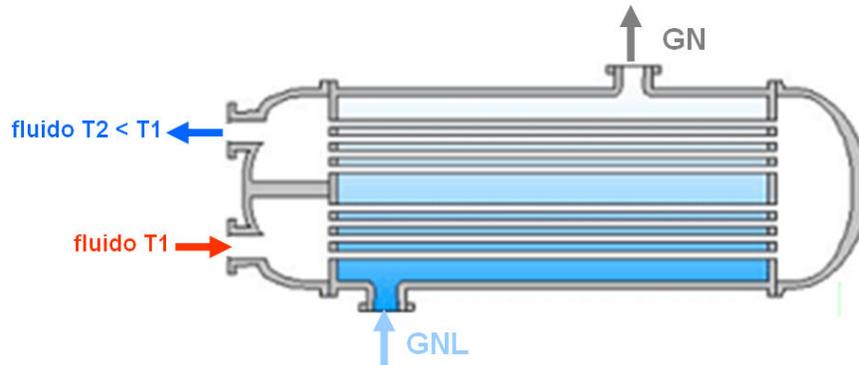


Figura 26. Trocador de calor inundado (Evaporador de GNL)

A análise da troca de calor será feita através da fixação de parâmetros, no que se refere ao gás natural e ao fluido de aquecimento. Foi realizada uma simulação utilizando-se a amônia como fluido refrigerante.

4.3. Vaporização do GNL – Reutilização em Condicionamento de Ambiente

O gás natural é uma mistura composta de diversas substâncias. Sabe-se que o calor específico, a viscosidade dinâmica e massa específica são propriedades termodinâmicas que dependem da temperatura da sua composição da mistura.

A obtenção de valores é então feita através da média ponderada pela fração mássica de cada uma de seus componentes, com mostra as equações (9 – 11) abaixo.

$$c_p = \sum_{i=1}^{i=j} m_i c_{pi} \quad (9)$$

$$\mu_p = \sum_{i=1}^{i=j} m_i \mu_i \quad (10)$$

$$\rho_p = \sum_{i=1}^{i=j} m_i \rho_i \quad (11)$$

As composições volumétricas do gás natural obtido a partir da regaseificação do GNL que são mostradas na tabela 4. Os valores de viscosidade e condutividade térmica referem-se a uma temperatura de 15°C, ou 288 K.

Tabela 6. Propriedades do gás natural (ASHRAE, 1997)

Substância	Viscosidade	Cond. Térmica	% Volume	%Mássica	Peso Molecular
	Pa.s	W/(m.K)			(g/mol)
Metano	0,00001027	0,0328	0,980	0,990	16,04
Etano	0,00000855	0,0180	0,015	0,010	30,07
Propano	-	0,0152	0,005	0,005	44,10
Dióxido de Carbono	0,00001372	0,0147	0,000	0,000	44,01
Nitrogênio	0,0000166	0,0240	0,007	0,007	28,01

Tabela 7. Propriedades do gás natural (ASHRAE, 1997)

Substância	Ponto de Ebulição		Gás(T=0)	Líquido(T=P.E)	Líquido
	Celsius	K	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
Metano	-161,49	111,51	0,68	1,819	422,62
Etano	-88,63	184,37	1,282	2,054	546,49
Propano	-42,04	230,96	1,910	2,423	582,00
Dióxido de Carbono	-78,50	194,5	1,870	2,814	1032,00
Nitrogênio	-195,80	77,2	1,185	4,614	808,61

Para o cálculo do calor específico do gás natural utilizou-se a seguinte equação polinomial apresentada por Van Wylen:

$$c_p = c_0 + c_1\psi + c_2\psi^2 + c_3\psi^3 \quad (12)$$

onde, $\psi = T/1000$

Os valores de c_p , c_0 , c_1 , c_2 , c_3 encontram-se na tabela 6.

Tabela 8. Valores das constantes c_0 , c_1 , c_2 , c_3 (Van Wylen, 2003)

Substância	fórmula	C0	C1	C2	C3	Intervalo K
Metano	CH3	1,20	3,25	0,75	-0,71	250-1200
Etano	C2H6	0,18	5,92	-2,31	0,29	250-1200
Propano	C3H8	-0,096	6,95	-3,60	0,73	250-1200
Dióxido de Carbono	CO2	0,45	1,67	-1,27	0,39	250-1200
Nitrogênio	N2	1,11	-0,48	0,96	-0,42	250-1200

Assim, obteve-se a tabela abaixo dos valores de c_p das substâncias acima listadas presentes na composição do gás natural em função de temperatura.

Tabela 9. Valores calculados de c_p em função da temperatura

Calor específico em função da temperatura (kJ/kgK)					
Temperatura	Metano	Etano	Propano	CO2	N2
250	2,05	1,52	1,43	0,79	1,04
300	2,22	1,76	1,68	0,85	1,04
350	2,40	1,98	1,93	0,90	1,04
400	2,57	2,20	2,15	0,94	1,04
450	2,75	2,40	2,37	0,98	1,05
500	2,92	2,60	2,57	1,02	1,06
600	3,27	2,96	2,94	1,08	1,08
800	3,92	3,59	3,53	1,17	1,13
1000	4,49	4,08	3,98	1,24	1,17

A amônia na forma de vapor será analisada como fluido de aquecimento do gás natural, e por essa razão todos as suas propriedades termodinâmicas utilizadas neste trabalho possuem valores referentes a média das temperaturas da amônia durante a troca de calor.

Tabela 10. Propriedades da amônia.

	°C	K
Ponto de Ebulição	-33,3	239,7
Ponto de Congelamento	-77,7	195,3
Peso molecular [g/mol]	17,03	

Fonte: Van Wylen, 2003

Tabela 11. Valores utilizados na simulação da amônia como refrigerante.

Dados a 1 atm e T=290K		
Densidade	0,73	[kg/m ³]
Volume específico	1,41	[m ³ /kg]
Calor específico c_p	2,17	[kJ/kg.K]
Calor específico c_v	1,64	[kJ/kg.K]
Viscosidade Dinâmica	0,0000098	[PA.s]
Condutividade Térmica	0,02219	[w/m.K]

Fonte: Van Wylen, 2003

Aplicando a equação de energia no processo de vaporização do gás natural, verifica-se que para atingir a temperatura desejada de utilização do gás natural, o mesmo deve sofrer uma mudança de fase, isto é, existe uma parcela de energia devido ao calor latente e outra devido ao calor sensível de elevação da temperatura, como segue na equação abaixo.

$$q = \dot{m}_{gas} c_{p,gas} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} \quad (13)$$

Na simulação realizada, os parâmetros $T_{gas,2}$, $T_{gas,1}$, $c_{p,gás}$, h_{fg} foram fixados, assim a energia necessária de vaporização depende apenas da vazão mássica do gás

natural. Na tabela 12 abaixo, encontram-se os valores utilizados, lembrando que a pressão em questão permanece constante e igual a 100 kPa.

Tabela 12. Parâmetros fixos do GN utilizados nos cálculos.

$T_{gas,1}$	$T_{gas,2}$	C_{gas}	h_{fg}
K	K	J/kg.K	J/kg
110	288	2130	510000

Determinou-se que a temperatura de entrada e de saída $T_{fluido,1}$ e $T_{fluido,2}$ e que estas referem-se a reutilização da energia “fria” no ciclo termodinâmico do ar condicionado.

Tabela 13. Temperaturas do fluido refrigerante analisado.

$T_{fluido,1}$	$T_{fluido,2}$
K	K
287	273

Partindo da equação 13 podemos desenvolver:

$$q = \dot{m}_{gas} c_{p,gas} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} = \dot{m}_{fluido} c_{p,fluido} (T_{fluido,2} - T_{fluido,1})$$

Analisando a equação acima podemos concluir que, se variarmos o valor de \dot{m}_{gas} o valor de \dot{m}_{fluido} também irá variar, pois todos os outros parâmetros da equação foram fixados da definição do problema. Portanto foi determinado o valor do fluxo de calor gerado para cada valor de fluxo de massa do gás, conforme pode ser verificado na tabela abaixo:

Tabela 14. Valores do fluxo de calor gerado em função da variação do fluxo mássico do gás.

\dot{m}_{gas} [kg/s]	Q [kw]	\dot{m}_{gas} [kg/s]	Q [kw]	\dot{m}_{gas} [kg/s]	Q [kw]
0,001	0,89	0,700	622,4	8,00	7113,1
0,002	1,78	0,750	666,9	8,50	7557,7
0,003	2,67	0,800	711,3	9,00	8002,3
0,004	3,56	0,850	755,8	9,50	8446,8
0,005	4,45	0,900	800,2	10,00	8891,4
0,006	5,33	0,950	844,7	12,00	10669,7
0,007	6,22	1,000	889,1	14,00	12448,0
0,008	7,11	1,200	1067,0	16,00	14226,2
0,009	8,00	1,400	1244,8	18,00	16004,5
0,010	8,89	1,600	1422,6	20,00	17782,8
0,020	17,78	1,800	1600,5	25,00	22228,5
0,030	26,67	2,000	1778,3	30,00	26674,2
0,040	35,57	2,200	1956,1	35,00	31119,9
0,050	44,46	2,400	2133,9	40,00	35565,6
0,100	88,91	2,600	2311,8	45,00	40011,3
0,150	133,37	2,800	2489,6	50,00	44457,0
0,200	177,83	3,000	2667,4	55,00	48902,7
0,250	222,29	3,500	3112,0	60,00	53348,4
0,300	266,74	4,000	3556,6	65,00	57794,1
0,350	311,20	4,500	4001,1	70,00	62239,8
0,400	355,66	5,000	4445,7	75,00	66685,5
0,450	400,11	5,500	4890,3	80,00	71131,2
0,500	444,57	6,000	5334,8	85,00	75576,9
0,550	489,03	6,500	5779,4	90,00	80022,6
0,600	533,48	7,000	6224,0	95,00	84468,3
0,650	577,94	7,500	6668,6	100,00	88914,0

A partir das equações (5) à (8) foi encontrado os valores para o número de Nusselt em função do diâmetro, $Nu(D)$, e conseqüente coeficiente de convecção do gás natural, $h_{e,gas}(D)$, que também é função do diâmetro.

Com o valor de $h_{e,gas}(D)$ pode-se calcular o coeficiente global de transferência de calor (equação 3) e assim determinar o comprimento necessário de tubo para que a vaporização de tal fluxo mássico ocorra. Na avaliação do fluxo mássico deve-se ainda levar em conta restrições construtivas e econômicas para o trocador.

A seguir, utilizando os resultados da tabela 14 foram calculados os diferentes valores de \dot{m}_{fluido} para cada valor de Q gerado em função de \dot{m}_{gas} .

Tabela 15. Valores de Nu e $h_{e, gas}$ em função do diâmetro do tubo

D [m]	$Nu(D)$	$h_{e, gas}$ [w/m2K]	D [m]	$Nu(D)$	$h_{e, gas}$ [w/m2K]
0,03	119	130	0,20	493	81
0,04	148	121	0,21	512	80
0,05	174	114	0,22	530	79
0,06	200	109	0,23	548	78
0,07	224	105	0,24	566	77
0,08	248	102	0,25	583	77
0,09	271	99	0,26	601	76
0,10	293	96	0,27	618	75
0,11	315	94	0,28	635	74
0,12	336	92	0,29	652	74
0,13	357	90	0,30	669	73
0,14	377	88	0,31	685	73
0,15	398	87	0,32	702	72
0,16	417	86	0,33	718	71
0,17	437	84	0,34	734	71
0,18	456	83	0,35	751	70
0,19	475	82	0,36	768	69

Tabela 16. Valores de vazão mássica do fluido refrigerante

Q [kw]	\dot{m}_{fluido} [kg/s]	Q [kw]	\dot{m}_{fluido} [kg/s]	Q [kw]	\dot{m}_{fluido} [kg/s]
0,9	0,029	622,4	20,487	7113,1	234,14
1,8	0,059	666,9	21,950	7557,7	248,77
2,7	0,088	711,3	23,414	8002,3	263,41
3,6	0,117	755,8	24,877	8446,8	278,04
4,4	0,146	800,2	26,341	8891,4	292,67
5,3	0,176	844,7	27,804	10669,7	351,21
6,2	0,205	889,1	29,267	12448,0	409,74
7,1	0,234	1067,0	35,121	14226,2	468,28
8,0	0,263	1244,8	40,974	16004,5	526,81
8,9	0,293	1422,6	46,828	17782,8	585,35
17,8	0,585	1600,5	52,681	22228,5	731,68
26,7	0,878	1778,3	58,535	26674,2	878,02
35,6	1,171	1956,1	64,388	31119,9	1024,35
44,5	1,463	2133,9	70,241	35565,6	1170,69
88,9	2,927	2311,8	76,095	40011,3	1317,03
133,4	4,390	2489,6	81,948	44457,0	1463,36
177,8	5,853	2667,4	87,802	48902,7	1609,70
222,3	7,317	3112,0	102,435	53348,4	1756,04
266,7	8,780	3556,6	117,069	57794,1	1902,37
311,2	10,244	4001,1	131,703	62239,8	2048,71
355,7	11,707	4445,7	146,336	66685,5	2195,05
400,1	13,170	4890,3	160,970	71131,2	2341,38
444,6	14,634	5334,8	175,604	75576,9	2487,72
489,0	16,097	5779,4	190,237	80022,6	2634,06
533,5	17,560	6224,0	204,871	84468,3	2780,39
577,9	19,024	6668,6	219,505	88914,0	2926,73

Para se obter o coeficiente de convecção da amônia calculou-se os valores do número de Reynolds em função dos fluxos mássicos e do diâmetro dos tubos $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$. Foram realizadas simulações com trocadores de número de tubos diversos (N=1, 5, 10 e 20)

Tabela 17. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=1 tubo

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]								
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,15
0,03	86615	129922	216537	303152	389767	433075	519690	606305	649612
0,04	64961	97442	162403	227364	292325	324806	389767	454728	487209
0,05	51969	77953	129922	181891	233860	259845	311814	363783	389767
0,06	43307	64961	108269	151576	194884	216537	259845	303152	324806
0,07	37121	55681	92802	129922	167043	185603	222724	259845	278405
0,08	32481	48721	81202	113682	146163	162403	194884	227364	243605
0,09	28872	43307	72179	101051	129922	144358	173230	202102	216537
0,10	25984	38977	64961	90946	116930	129922	155907	181891	194884
0,11	23622	35433	59056	82678	106300	118111	141734	165356	177167
0,12	21654	32481	54134	75788	97442	108269	129922	151576	162403
0,13	19988	29982	49970	69958	89946	99940	119928	139916	149910
0,14	18560	27841	46401	64961	83522	92802	111362	129922	139203
0,15	17323	25984	43307	60630	77953	86615	103938	121261	129922
0,16	16240	24360	40601	56841	73081	81202	97442	113682	121802
0,17	15285	22927	38212	53497	68782	76425	91710	106995	114637
0,18	14436	21654	36090	50525	64961	72179	86615	101051	108269
0,19	13676	20514	34190	47866	61542	68380	82056	95732	102570
0,20	12992	19488	32481	45473	58465	64961	77953	90946	97442

Tabela 18. Cálculo de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ para N=5 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]								
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,15
0,03	17323	25984	43307	60630	77953	86615	103938	121261	129922
0,04	12992	19488	32481	45473	58465	64961	77953	90946	97442
0,05	10394	15591	25984	36378	46772	51969	62363	72757	77953
0,06	8661	12992	21654	30315	38977	43307	51969	60630	64961
0,07	7424	11136	18560	25984	33409	37121	44545	51969	55681
0,08	6496	9744	16240	22736	29233	32481	38977	45473	48721
0,09	5774	8661	14436	20210	25984	28872	34646	40420	43307
0,10	5197	7795	12992	18189	23386	25984	31181	36378	38977
0,11	4724	7087	11811	16536	21260	23622	28347	33071	35433
0,12	4331	6496	10827	15158	19488	21654	25984	30315	32481
0,13	3998	5996	9994	13992	17989	19988	23986	27983	29982
0,14	3712	5568	9280	12992	16704	18560	22272	25984	27841
0,15	3465	5197	8661	12126	15591	17323	20788	24252	25984
0,16	3248	4872	8120	11368	14616	16240	19488	22736	24360
0,17	3057	4585	7642	10699	13756	15285	18342	21399	22927
0,18	2887	4331	7218	10105	12992	14436	17323	20210	21654
0,19	2735	4103	6838	9573	12308	13676	16411	19146	20514
0,20	2598	3898	6496	9095	11693	12992	15591	18189	19488

Tabela 19. Cálculo de $Re(\dot{m}_{\text{fluido}}, D)$ para N=10 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]								
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,15
0,03	8661	12992	21654	30315	38977	43307	51969	60630	64961
0,04	6496	9744	16240	22736	29233	32481	38977	45473	48721
0,05	5197	7795	12992	18189	23386	25984	31181	36378	38977
0,06	4331	6496	10827	15158	19488	21654	25984	30315	32481
0,07	3712	5568	9280	12992	16704	18560	22272	25984	27841
0,08	3248	4872	8120	11368	14616	16240	19488	22736	24360
0,09	2887	4331	7218	10105	12992	14436	17323	20210	21654
0,10	2598	3898	6496	9095	11693	12992	15591	18189	19488
0,11	2362	3543	5906	8268	10630	11811	14173	16536	17717
0,12	2165	3248	5413	7579	9744	10827	12992	15158	16240
0,13	1999	2998	4997	6996	8995	9994	11993	13992	14991
0,14	1856	2784	4640	6496	8352	9280	11136	12992	13920
0,15	1732	2598	4331	6063	7795	8661	10394	12126	12992
0,16	1624	2436	4060	5684	7308	8120	9744	11368	12180
0,17	1528	2293	3821	5350	6878	7642	9171	10699	11464
0,18	1444	2165	3609	5053	6496	7218	8661	10105	10827
0,19	1368	2051	3419	4787	6154	6838	8206	9573	10257
0,20	1299	1949	3248	4547	5847	6496	7795	9095	9744

Tabela 20. Cálculo de $Re(\dot{m}_{\text{fluido}}, D)$ para N=20 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]								
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,15
0,03	4331	6496	10827	15158	19488	21654	25984	30315	32481
0,04	3248	4872	8120	11368	14616	16240	19488	22736	24360
0,05	2598	3898	6496	9095	11693	12992	15591	18189	19488
0,06	2165	3248	5413	7579	9744	10827	12992	15158	16240
0,07	1856	2784	4640	6496	8352	9280	11136	12992	13920
0,08	1624	2436	4060	5684	7308	8120	9744	11368	12180
0,09	1444	2165	3609	5053	6496	7218	8661	10105	10827
0,10	1299	1949	3248	4547	5847	6496	7795	9095	9744
0,11	1181	1772	2953	4134	5315	5906	7087	8268	8858
0,12	1083	1624	2707	3789	4872	5413	6496	7579	8120
0,13	999	1499	2499	3498	4497	4997	5996	6996	7496
0,14	928	1392	2320	3248	4176	4640	5568	6496	6960
0,15	866	1299	2165	3032	3898	4331	5197	6063	6496
0,16	812	1218	2030	2842	3654	4060	4872	5684	6090
0,17	764	1146	1911	2675	3439	3821	4585	5350	5732
0,18	722	1083	1804	2526	3248	3609	4331	5053	5413
0,19	684	1026	1710	2393	3077	3419	4103	4787	5129
0,20	650	974	1624	2274	2923	3248	3898	4547	4872


 Escoamento Laminar
 Transição
 Escoamento Turbulento

Percebe-se que fixando o valor do diâmetro e aumentando \dot{m}_{fluido} temos um aumento no número de Re . Por outro lado se fixamos o valor de \dot{m}_{fluido} e aumentamos o diâmetro o número de Re diminui. Verifica-se ainda que o maior número de tubos no trocador de calor resulta num menor valor para Re .

O escoamento laminar ($Re < 2300$) é destacado na cor vermelha, a transição entre laminar e turbulento na cor azul e turbulento na cor verde. Com os valores de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ calculou-se os respectivos valores de Nu , que para escoamento laminar é uma constante $Nu=4,36$ e para escoamentos turbulentos $Nu(Re)$.

Tabela 21. Cálculo de Nu em função de Re para $N=1$ tubo

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	199	275	414	542	663	721	834	943	997	1102	1919	2654
0,04	158	219	329	430	526	573	663	750	792	875	1524	2108
0,05	132	183	275	360	440	479	554	627	663	732	1275	1764
0,06	114	158	238	311	381	414	479	542	573	633	1102	1524
0,07	101	140	210	275	336	366	423	479	506	560	974	1347
0,08	91	126	189	247	302	329	381	430	455	503	875	1211
0,09	83	114	172	225	275	299	346	392	414	458	797	1102
0,10	76	105	158	207	253	275	318	360	381	421	732	1013
0,11	70	97	146	192	234	255	295	334	353	390	679	939
0,12	66	91	137	179	219	238	275	311	329	364	633	875

Tabela 22. Cálculo de Nu em função de Re para $N=5$ tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	55	76	114	150	183	199	230	260	275	304	529	732
0,04	44	60	91	119	145	158	183	207	219	242	421	582
0,05	36	50	76	99	121	132	153	173	183	202	352	487
0,06	32	44	66	86	105	114	132	150	158	175	304	421
0,07	28	39	58	76	93	101	117	132	140	154	269	372
0,08	25	35	52	68	83	91	105	119	126	139	242	334
0,09	23	32	47	62	76	83	96	108	114	126	220	304
0,10	21	29	44	57	70	76	88	99	105	116	202	280
0,11	19	27	40	53	65	70	81	92	97	108	187	259
0,12	18	25	38	49	60	66	76	86	91	100	175	242

Tabela 23. Cálculo de Nu em função de Re para N=10 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	32	44	66	86	105	114	132	150	158	175	304	421
0,04	25	35	52	68	83	91	105	119	126	139	242	334
0,05	21	29	44	57	70	76	88	99	105	116	202	280
0,06	18	25	38	49	60	66	76	86	91	100	175	242
0,07	16	22	33	44	53	58	67	76	80	89	154	214
0,08	14	20	30	39	48	52	60	68	72	80	139	192
0,09	13	18	27	36	44	47	55	62	66	73	126	175
0,10	12	17	25	33	40	44	50	57	60	67	116	161
0,11	11	15	23	30	37	40	47	53	56	62	108	149
0,12	4	14	22	28	35	38	44	49	52	58	100	139

Tabela 24. Cálculo de Nu em função de Re para N=20 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	18	25	38	49	60	66	76	86	91	100	175	242
0,04	14	20	30	39	48	52	60	68	72	80	139	192
0,05	12	17	25	33	40	44	50	57	60	67	116	161
0,06	4	14	22	28	35	38	44	49	52	58	100	139
0,07	4	13	19	25	31	33	39	44	46	51	89	123
0,08	4	11	17	23	28	30	35	39	41	46	80	110
0,09	4	4	16	20	25	27	32	36	38	42	73	100
0,10	4	4	14	19	23	25	29	33	35	38	67	92
0,11	4	4	13	17	21	23	27	30	32	35	62	85
0,12	4	4	12	16	20	22	25	28	30	33	58	80

Utilizando os valores obtidos de Nu e a equação 5 podemos encontrar os valores teóricos do coeficiente de convecção $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$.

Conforme podemos verificar nas tabelas seguintes, o aumento do D com valor fixado para \dot{m}_{fluido} mostra uma diminuição do valor de $h_{i,fluido}$. Entretanto de fixarmos o valor de D e aumentando \dot{m}_{fluido} verificamos que ocorre aumento no valor de $h_{i,fluido}$. Pode verificar ainda que o aumento no numero de tubos do trocador também diminui o valor de $h_{i,fluido}$.

Tabela 25. Cálculo de $h_{i, fluido}$ em função de Nu para N=1 tubo

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	147	204	306	401	490	533	617	698	738	815	1420	1964
0,04	88	121	183	239	292	318	368	416	440	486	846	1170
0,05	59	81	122	160	195	213	246	278	294	325	566	783
0,06	42	58	88	115	141	153	177	200	212	234	408	564
0,07	32	44	67	87	107	116	134	152	161	177	309	427
0,08	25	35	52	69	84	91	106	119	126	140	243	336
0,09	20	28	42	56	68	74	85	97	102	113	197	272
0,10	17	23	35	46	56	61	71	80	84	93	163	225
0,11	14	20	30	39	47	51	60	67	71	79	137	189
0,12	12	17	25	33	40	44	51	58	61	67	117	162

Tabela 26. Cálculo de $h_{i, fluido}$ em função de Nu para N=5 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	41	56	85	111	135	147	170	193	204	225	392	542
0,04	24	33	50	66	81	88	101	115	121	134	233	323
0,05	16	22	34	44	54	59	68	77	81	90	156	216
0,06	12	16	24	32	39	42	49	55	58	65	113	156
0,07	9	12	18	24	29	32	37	42	44	49	85	118
0,08	7	10	14	19	23	25	29	33	35	39	67	93
0,09	6	8	12	15	19	20	24	27	28	31	54	75
0,10	5	6	10	13	15	17	20	22	23	26	45	62
0,11	4	5	8	11	13	14	16	19	20	22	38	52
0,12	3	5	7	9	11	12	14	16	17	19	32	45

Tabela 27. Cálculo de $h_{i, fluido}$ em função de Nu para N=10 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	23	32	49	64	78	85	98	111	117	129	225	311
0,04	14	19	29	38	46	50	58	66	70	77	134	185
0,05	9	13	19	25	31	34	39	44	47	52	90	124
0,06	7	9	14	18	22	24	28	32	34	37	65	89
0,07	5	7	11	14	17	18	21	24	25	28	49	68
0,08	4	6	8	11	13	14	17	19	20	22	39	53
0,09	3	4	7	9	11	12	14	15	16	18	31	43
0,10	3	4	6	7	9	10	11	13	13	15	26	36
0,11	2	3	5	6	7	8	9	11	11	12	22	30
0,12	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	19	26

Tabela 28. Cálculo de $h_{i,fluido}$ em função de Nu para N=20 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	13	19	28	37	45	49	56	64	67	74	129	179
0,04	8	11	17	22	27	29	33	38	40	44	77	107
0,05	5	7	11	15	18	19	22	25	27	30	52	71
0,06	2	5	8	10	13	14	16	18	19	21	37	51
0,07	1	4	6	8	10	11	12	14	15	16	28	39
0,08	1	3	5	6	8	8	10	11	11	13	22	31
0,09	1	1	4	5	6	7	8	9	9	10	18	25
0,10	1	1	3	4	5	6	6	7	8	8	15	20
0,11	1	1	3	4	4	5	5	6	6	7	12	17
0,12	1	1	2	3	4	4	5	5	6	6	11	15

O cálculo do coeficiente global de transferência de calor U é função de $h_{i,fluido}$ e de $h_{e,gas}$, portanto depende indiretamente de \dot{m}_{fluido} , D , N (para o escoamento interno) e de D (para o escoamento externo).

Tabela 29. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=1 tubo

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	114	146	191	224	250	261	279	295	302	314	375	405
0,04	75	98	134	163	186	196	214	229	236	249	318	355
0,05	53	70	99	122	141	150	166	180	187	199	268	309
0,06	39	52	75	94	110	118	132	144	150	160	227	268
0,07	30	41	59	75	88	95	106	117	122	132	192	233
0,08	24	33	48	60	72	77	87	97	101	110	165	203
0,09	20	27	39	50	60	64	73	81	85	92	142	177
0,10	16	22	33	42	51	55	62	69	72	79	123	156
0,11	14	19	28	36	43	47	53	59	62	68	108	138
0,12	12	16	24	31	37	40	46	52	54	59	95	123

Tabela 30. Cálculo de U em função de h_i e h_{gas} para N=5 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	38	51	73	91	107	114	128	140	146	156	222	263
0,04	23	31	46	58	70	75	85	94	98	106	160	198
0,05	16	21	32	41	49	53	60	67	70	76	120	152
0,06	11	16	23	30	36	39	45	50	52	57	92	119
0,07	9	12	18	23	28	30	35	39	41	45	73	96
0,08	7	9	14	18	22	24	28	31	33	36	59	78
0,09	6	8	11	15	18	20	23	25	27	29	49	65
0,10	5	6	9	12	15	16	19	21	22	25	41	55
0,11	4	5	8	10	13	14	16	18	19	21	35	47
0,12	3	5	7	9	11	12	14	15	16	18	30	41

Tabela 31. Cálculo de U em função de hi e hgas para N=10 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	22	30	44	57	67	73	82	91	95	103	156	193
0,04	14	19	27	35	42	46	52	58	61	67	106	136
0,05	9	13	19	24	29	32	36	41	43	47	76	100
0,06	7	9	14	18	21	23	27	30	32	35	57	76
0,07	5	7	10	13	16	18	20	23	24	27	45	60
0,08	4	5	8	11	13	14	16	18	19	21	36	48
0,09	3	4	7	9	11	11	13	15	16	17	29	40
0,10	3	4	5	7	9	9	11	12	13	14	25	33
0,11	2	3	5	6	7	8	9	10	11	12	21	28
0,12	1	3	4	5	6	7	8	9	9	10	18	24

Tabela 32. Cálculo de U em função de hi e hgas para N=20 tubos

Diâmetro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	13	18	26	34	41	44	51	57	59	65	103	132
0,04	8	11	16	21	25	27	31	35	37	41	67	88
0,05	5	7	11	14	17	19	21	24	25	28	47	63
0,06	2	5	8	10	13	14	16	18	19	20	35	47
0,07	1	4	6	8	10	10	12	13	14	16	27	36
0,08	1	3	5	6	8	8	9	11	11	12	21	29
0,09	1	1	4	5	6	7	8	9	9	10	17	24
0,10	1	1	3	4	5	5	6	7	8	8	14	20
0,11	1	1	3	3	4	5	5	6	6	7	12	17
0,12	1	1	2	3	4	4	5	5	5	6	10	14

Para finalizar, foi calculado o comprimento L necessário para que ocorra a transferência de calor com os parâmetros impostos (D, Q, \dot{m}_{fluido}).

Tabela 33. Cálculo de L em função de fluxo de refrigerante e D para N=10 tubos

Diametro [m]	Fluxo Mássico Total [kg/s]											
	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,1	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,03	0,41	0,45	0,52	0,57	0,61	0,63	0,67	0,71	0,72	0,76	1,00	1,21
0,04	0,51	0,56	0,63	0,68	0,73	0,75	0,79	0,83	0,84	0,88	1,10	1,29
0,05	0,60	0,66	0,74	0,80	0,85	0,87	0,91	0,95	0,97	1,00	1,23	1,41
0,06	0,69	0,76	0,85	0,91	0,97	0,99	1,04	1,08	1,09	1,13	1,36	1,54
0,07	0,78	0,85	0,95	1,02	1,08	1,11	1,16	1,20	1,22	1,26	1,50	1,68
0,08	0,87	0,95	1,05	1,13	1,20	1,23	1,28	1,32	1,34	1,38	1,64	1,82
0,09	0,95	1,04	1,15	1,24	1,31	1,34	1,39	1,44	1,46	1,51	1,77	1,97
0,10	1,04	1,13	1,25	1,34	1,42	1,45	1,51	1,56	1,58	1,63	1,91	2,11
0,11	1,12	1,22	1,35	1,45	1,53	1,56	1,62	1,68	1,70	1,75	2,05	2,25
0,12	2,85	1,30	1,45	1,55	1,63	1,67	1,74	1,79	1,82	1,87	2,18	2,40

A reutilização da energia “fria” que o fluido de trabalho carrega se dá através do esquema abaixo, figura 27, e seus parâmetros resumem-se na tabela 34.

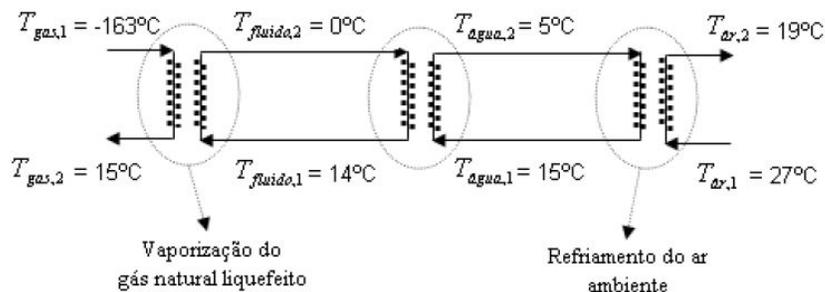


Figura 27. Esquema da troca de calor para reutilização da energia “fria” em condicionamento de ambientes (LIAO, 2007)

Tabela 34. Parâmetros usados no cálculo da utilização da energia “fria” do GNL

	Temp. Entrada		Temp. Saída		Variação	C _p [kJ/kg.K]
	°C	K	°C	K		
amônia	14	287	0	273	14	2,17
água	15	288	5	278	10	4,19
ar	27	300	19	292	8	1,00

Desta maneira, como o mesmo valor de Q de vaporização do gás natural calcula-se pela equação de energia o fluxo mássico de ar que pode ser resfriado. Nessa análise apenas o fluxo de calor do processo de vaporização do gás entra na equação, dessa forma o fluido de aquecimento não interfere nos resultados.

$$q = \dot{m}_{gas} c_{p,gas} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} = \dot{m}_{ar} c_{p,ar} (T_{ar,2} - T_{ar,1})$$

O gráfico dos valores estimados para o fluxo mássico de ar atingidos no condicionamento de ambientes é mostrado na figura 28.

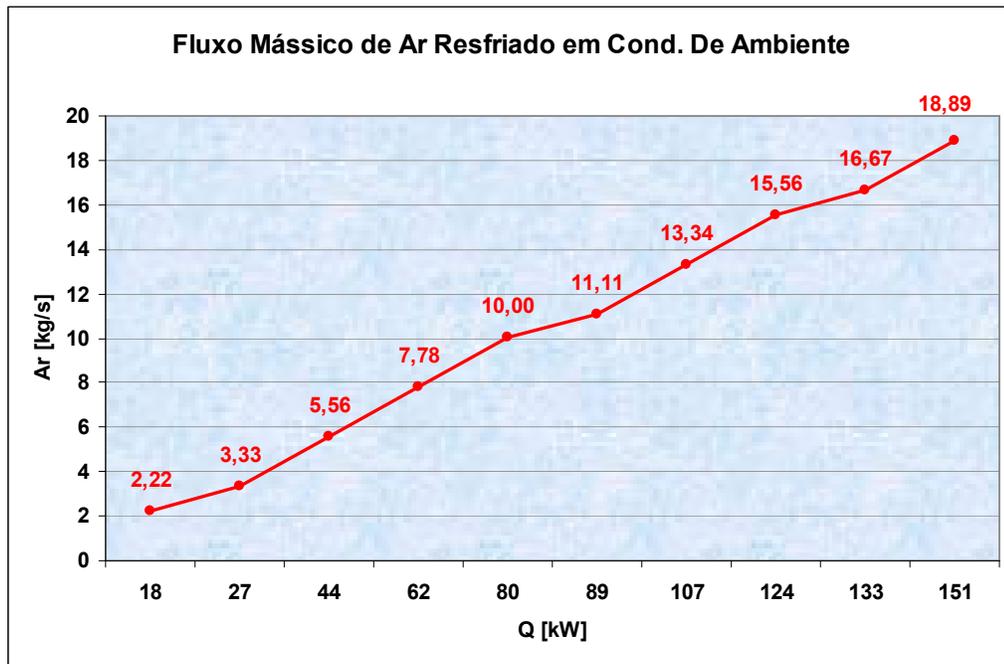


Figura 28. Fluxo mássico resfriado no condicionamento de ambiente em função Q [kW]

5. CONCLUSÕES

Sob a forma de GNL, o gás natural pode ser armazenado e transportado através de carretas, da estação de liquefação/compressão até o mercado consumidor, formado por postos de GNV ou indústrias que necessitam do gás natural para melhorar sua produção, dispensando a utilização de gasodutos. Desta forma, podem-se diversificar então as possíveis formas de distribuição do gás natural, tornando o Brasil menos dependente de gasodutos, o qual se caracteriza por ser uma estrutura cara e com grande tempo para construção. A criação dos chamados gasodutos virtuais, sejam eles via GNL ou até mesmo GNC, permitem aumentar a participação do gás natural na matriz energética brasileira. Além disso, os chamados “gasodutos virtuais”, quando relacionadas ao mercado interno, são uma das formas mais eficientes para suprir regiões com baixas ou médias demandas, que não justificam o elevado investimento em gasodutos.

O GNL utilizado para fornecer GNV em um posto de combustíveis apresenta-se como uma alternativa extremamente viável e segura para desenvolver toda uma cultura de conversão de veículos e utilização do GNC em pequenos centros comerciais e áreas distantes ou ainda não atendidas por gasodutos. Para isso deve ser instalada no local de recebimento do GNL uma UAG (Unidade Autônoma de Regaseificação), composta por um tanque criogênico de armazenamento, uma bomba criogênica, um evaporador e um módulo de armazenamento de GNC e os dispensers de abastecimento. O custo energético de operação dos equipamentos, se comparado a uma instalação tradicional de fornecimento de GNV, pode chegar a ser até 30% menor, devido às características dos equipamentos necessários para se trabalhar com o GNL.

Outra vantagem associada ao GNL, refere-se a possibilidade da utilização da energia “fria” gerado no processo de regaseificação do gás natural. Durante o processo de volta ao estado gasoso, o GNL acaba liberando muito frio, esse frio poderá ser utilizado para esfriar materiais ou fluidos de trabalho. O frio do GNL poderá ser utilizado no sistema de condicionamento de ar da instalação, poderá ainda também ser usado na refrigeração nos equipamentos de refrigeração existentes no local, e ainda também pode ser utilizado para geração de energia, isto poderia ser

possível com a utilização de equipamentos específicos instalados em paralelo com o sistema de regaseificação.

ANEXO A. Visita a Planta de Liquefação de GN em Paulínia (GásLocal)

A.1. Objetivos

Com intuito de conhecer melhor o processo de liquefação do Gás Natural foi realizada uma visita técnica a planta de Liquefação de GN localizada em Paulínia (SP). Desde agosto de 2006, a GásLocal, uma associação entre a White Martins e a Petrobras, disponibiliza para o mercado brasileiro o GNL – Gás Natural Liquefeito, um produto até então inédito no país.



Figura 29. Planta de Liquefação de Paulínia

A.2. A Empresa

A GásLocal é a líder do consórcio formado pela White Martins, Petrobras e a própria GásLocal. Com um investimento na ordem de US\$ 50 milhões, o consórcio tem por objetivo comercializar o Gás Natural Liquefeito (GNL).

A planta possui capacidade de liquefação de 380 mil m³/dia, a GásLocal comercializa e transporta o GNL em carretas com capacidade de transportar até 30 mil m³ de GNL. Esta nova alternativa para o transporte de gás natural atende as regiões não abastecidas por gasodutos e viabiliza o suprimento de gás natural para indústrias dos ramos alimentício, metalúrgico, cerâmico e químico, entre outros, assim como postos de GNV e concessionárias Estaduais de Gás Natural Canalizado. Para essas concessionárias, o acesso ao GNL representa a antecipação de suas

atividades, ajudando-as a atender os requisitos de crescimento das redes exigidos pelos estados.

A.3. O Projeto Gemini

O projeto Gemini consiste na produção de GNL na unidade de liquefação de Gás Natural e sua comercialização a granel. O transporte é feito em carretas até os consumidores finais e futuramente também em vagões criogênicos (a GásLocal está desenvolvendo um projeto de fabricação de vagões para transporte de GNL, tal meio de transporte permitirá que o GNL alcance de forma economicamente viável mercados distantes acima de 1000km da planta de liquefação de Paulínia).

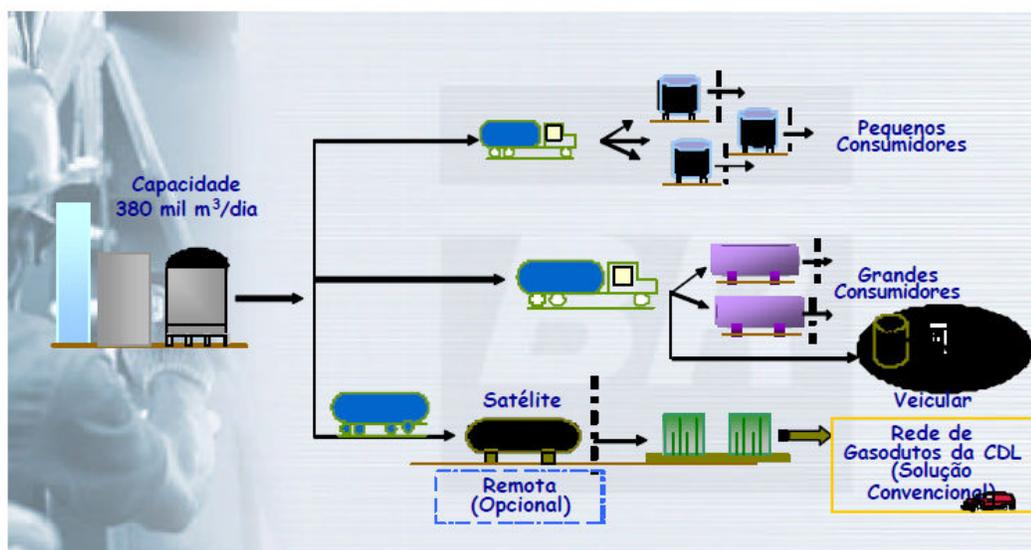


Figura 30. Esquema de Funcionamento do Sistema GNL Gemini – GásLocal

A liquefação do gás natural para o transporte é uma das diversas alternativas para conectar reservas de gás aos mercados. Outras alternativas incluem gasodutos ou a conversão do GNL em metanol ou diesel GTL. Para a maior parte das reservas, a opção do GNL é uma escolha para as situações onde os mercados e as reservas estão separadas por grandes distâncias e por oceanos extensos, tornando o GNL economicamente prático, sob determinadas situações, para empregar navios carregadores capazes de transportar o gás ao mercado. De acordo com o gráfico

abaixo, o custo de transporte do gás natural através do GNL torna-se menor do que por gasoduto quando as distâncias superam 4 mil km, conforme demonstrado no gráfico da Figura A.3.

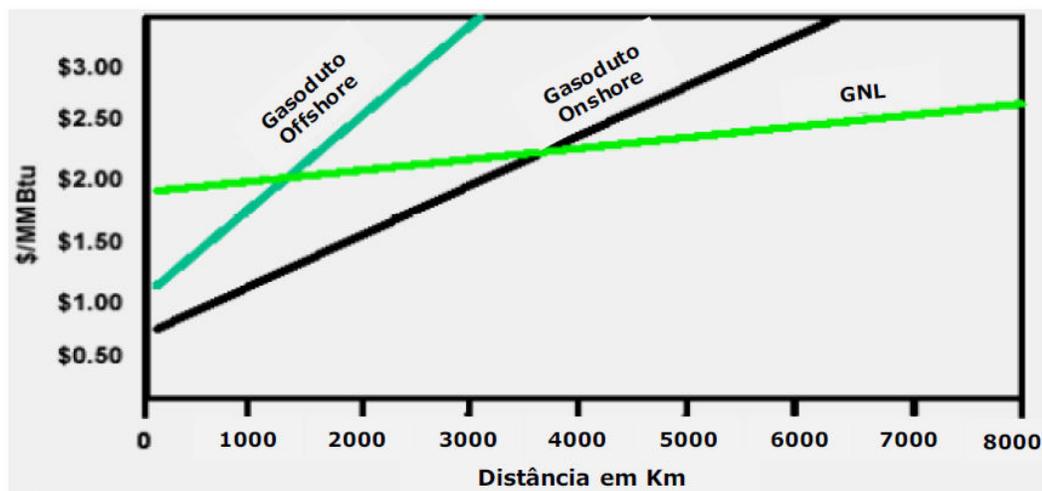


Figura 31. Comparação dos Custos de Transporte do GN

Fonte: Institute of Gas Technology, 2005.

A vantagem de se liquefazer o GN é devido a sua redução de volume quando comparado ao seu estado gasoso, ocupando 600 vezes menos espaço para uma mesma quantidade de gás, facilitando assim o transporte e armazenamento deste recurso.

A.4. O Funcionamento da Planta

Para que o gás natural mude para o estado líquido é necessário que este seja resfriado à temperatura de $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este processo de liquefação é um tanto complexo e custoso, portanto requer uma grande quantidade de energia para que possa ser concluído. O processo de liquefação do gás natural engloba várias etapas, e pode ser apresentada como uma cadeia de processos que começa na produção do GN na Bolívia e transportado até a planta de liquefação através do Gasoduto Brasil-Bolívia (GasBol), depois a liquefação, o armazenamento e finalmente o transporte através de

caminhões. No cliente o GNL é armazenado em tanques criogênicos e a regaseificação ocorre conforme a necessidade de uso do GN.

A instalação visitada trata-se de uma planta de liquefação “*on-shore*”, compõe-se basicamente, como se vê na Figura A.4 de uma unidade de tratamento, do conjunto de trocadores de calor e dos tanques de armazenagem.

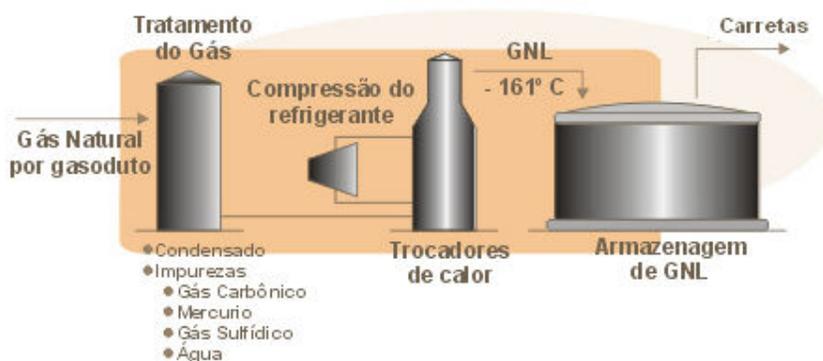


Figura 32. Planta de liquefação do gás natural

A unidade de tratamento destina-se a remover as impurezas existentes no gás vindo dos campos, como gás carbônico, enxofre, nitrogênio, mercúrio e água, além do condensado. O processo inclui a separação do gás liquefeito de petróleo (GLP), basicamente propano e butano, que poderá ser vendido como produto final ou reinjetado no GNL.

Antes de ser transportado até os consumidores, o GNL é estocado em pressão atmosférica no tanque de armazenagem isolado de dupla parede com características inovadoras e altamente seguro. A parede do tanque, compostas de um aço especial de alta pureza combinado com níquel e alumínio e recoberto com concreto compactado, é capaz de manter a temperatura criogênica. Os tanques de estocagem de GNL são feitos a partir de blocos de concreto vitrificados com “perlite” vulcânico e com adição de cimento Portland, tudo reforçado com barras de aço. Estes blocos separam a tanque criogênico do chão. O perlite também é usado para isolamento das paredes do tanque.

Para segurança contra vazamentos, alguns tanques de estocagem tem um sistema de duplo compartimento, sendo que, tanto o tanque interno quanto o externo

são capazes de armazenar o GNL. A seguir tem-se na Figura A.5. que demonstra o isolamento do tanque de estocagem do GNL.

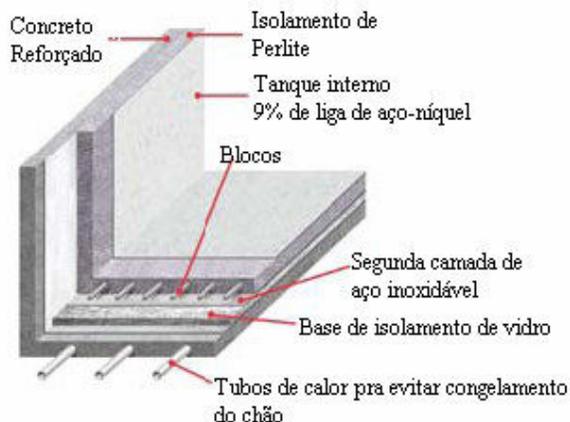
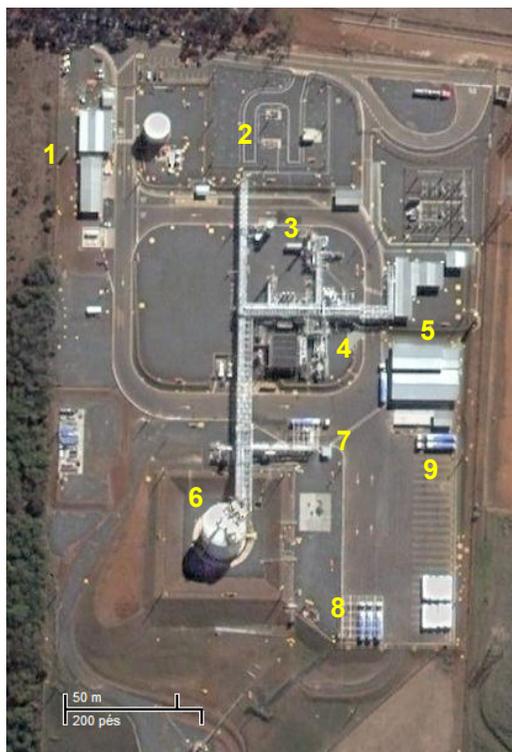


Figura 33. Isolamento térmico dos tanques de armazenamento de GNL

Fonte: (adaptado de: “Liquefied Natural Gas: Understand the Basic Facts”, Departamento de Energia dos EUA)

O GNL armazenado pode ser transportado em carretas criogênicas, com capacidade de até 30 mil m³ de GNL (12 toneladas), o que equivale à cerca de 18 milhões de m³ de gás natural. No cliente estão instaladas as Unidades Autônomas de Regaseificação (UAGs). Nas UAGs o GNL é estocado em tanques criogênicos a -162°C e, em seguida, regaseificado e odorizado.

A Figura A.6 trata-se da fotografia aérea da planta de liquefação.



1. Escritório Administrativo da Planta
2. Conexão da Planta com o GasBol
3. Separação do GN, medição e remoção de impurezas
4. Torre de Liquefação
5. Central de Controle e Monitoramento
6. Tanque de Armazenamento de GNL
7. Terminal para carregamento das carretas
8. Estacionamento de carretas carregadas
9. Estacionamento de carretas vazias

Figura 34. Imagem de satélite da planta de liquefação instalada

Fonte: Google Maps

As unidades de liquefação fazem inicialmente um tratamento do gás natural para remover as impurezas que poderiam sofrer solidificação durante o processo de rebaixamento da temperatura, tais como, água, dióxido de carbono, compostos sulfurosos, óleos lubrificantes, mercúrio e hidrocarbonetos pesados. Estas substâncias são removidas até uma dosagem considerada aceitável, de acordo com normas internacionais.

Após o tratamento, o gás é submetido ao rebaixamento da temperatura até 162°C negativos, sem alterar significativamente a pressão. Os processos mais utilizados são o CRC (ciclo de refrigeração em cascata) e o CRM (ciclo de refrigeração misto). O primeiro envolve um único fluido refrigerante que passa por processos de compressão e expansão em múltiplos estágios. O segundo é semelhante ao primeiro, envolvendo vários fluidos refrigerantes, tais como, butano, propano, etano, metano e nitrogênio. Na figura A.7 pode-se observar todas as etapas envolvidas no processo de obtenção do GNL.

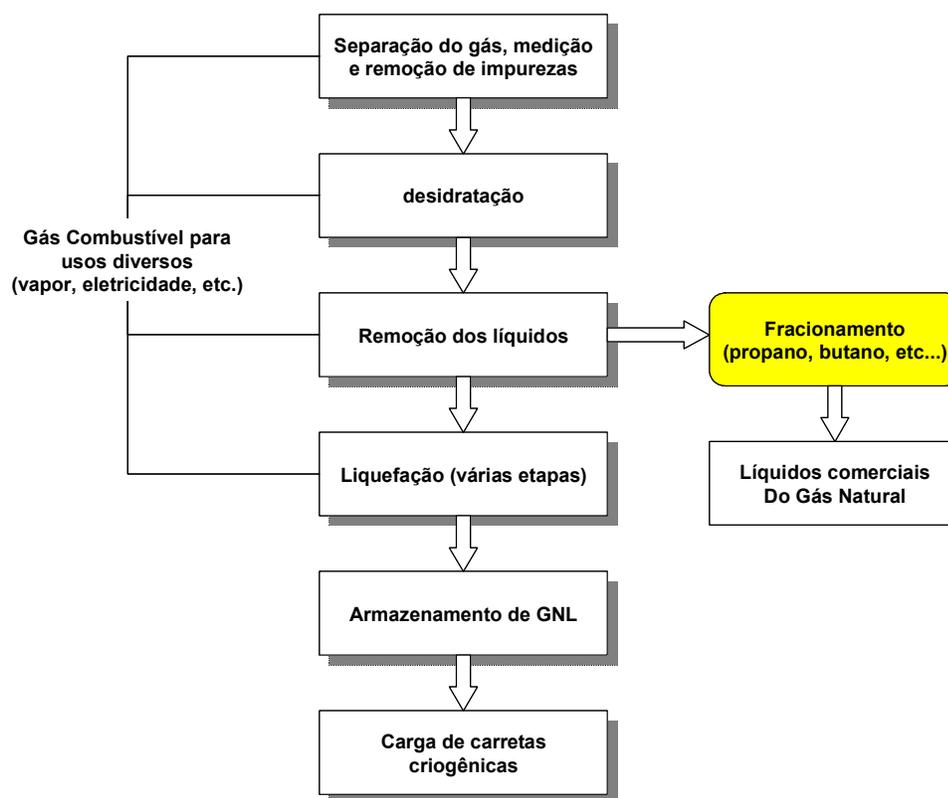


Figura 35. Etapas da obtenção do GNL na Planta de Liquefação GásLocal

O conjunto de trocadores de calor, peça principal da liquefação, funciona segundo o mesmo princípio de um refrigerador doméstico. Um gás refrigerante (em geral, uma mistura de metano, etano e propano) é pressurizado e em seguida expande-se através de uma válvula (efeito Joule-Thompson), extraindo calor do gás natural que chega aos trocadores de calor. O GNL é a seguir armazenado em um tanque de 380 mil m³ e capaz de mantê-lo a -161°.

ANEXO B. Visita ao complexo GASTECH em Londrina

B.1. Objetivos

Para verificar na prática as vantagens e possibilidades relacionadas ao GNL, bem como todos os requisitos necessários para utilização desta tecnologia, foi realizada uma visita técnica ao complexo da GasTech em Londrina-PR. Trata-se de uma Unidade Autônoma de Regaseificação (UAG) responsável por receber o GNL diretamente da GasLocal, regaseificar o GN e realizar a distribuição em forma de GNC para outros postos de GNV, para a indústria e comércio da região do Norte do Paraná. Londrina é a segunda cidade do Brasil que utilizará a tecnologia do GNL para abastecer os postos de GNV.



Figura 36. Complexo GasTech (UAG) de Londrina-PR

B.2. A Empresa e o Incentivo do Mercado de GN na Região

O Complexo GasTech faz parte de uma empresa inovadora no fornecimento de tecnologia no setor energético, tais como: Gás Natural, Biomassa e Lixo Orgânico (Gás Metano). O complexo de Gás Natural Veicular e Industrial Gastech começou suas operações na região norte do Paraná, Londrina, em Setembro/2007. O empreendimento estimado em 20 milhões, é fruto da parceria entre GásLocal, White Martins (Cilbras) e a própria GasTech, com interesse de desenvolver na região um mercado consumidor de Gás Natural, seja para utilização automotiva, residencial e industrial.

Como se tratava de uma região onde não existia o fornecimento de GN antes da instalação da UAG da Gastech, o mercado consumidor para o GN também era inexistente, sendo assim, a partir de uma parceria entre a Gastech e a White Martins foi lançada uma campanha promocional para incentivar os motoristas de Londrina a

converterem seus veículos através da instalação de kit's GNV. Quem opta-se pela conversão com produtos White Martins (cilindro Cibrás e Kit de conversão BRC) ganhava um talão "Bônus Gás" contendo 14 tíquetes no valor de R\$ 10,00 em descontos no abastecimento de veículos no posto GNV do Complexo Gástech. O total de R\$140,00 do bônus equivale ao que seria gasto para trafegar até mil quilômetros.



Figura 37. Vista do Posto de GNV instalado no Complexo GasTech

A campanha marcar também o início da operação do primeiro posto de GNV do Norte do Paraná, que começou a funcionar dia 10 de setembro de 2007, localizado no Complexo Gástech, em Londrina. Criado para viabilizar a chegada do gás natural à região, o Complexo atenderá veículos, indústrias e outros postos numa segunda fase. A divulgação foi realizada em anúncios na TV, em rádios e outdoors, assim como materiais que foram distribuídos nas lojas convertedoras que participaram da promoção. A promoção aconteceu entre setembro e dezembro de 2007.

B.3. A Cadeia de Valor do GN que chega a Londrina

O Gás Natural chega a Londrina através do GNL, produzido em Paulínia-SP, o GNL é transportado através de carretas criogênicas. Cada carreta tem a capacidade de transportar 49m³ de GNL. Hoje, a região Norte do Paraná não é abastecido por gasoduto, desta forma é de suma importância a alternativa encontrada de universalizar o uso do gás natural na região num raio de até 300 Km.

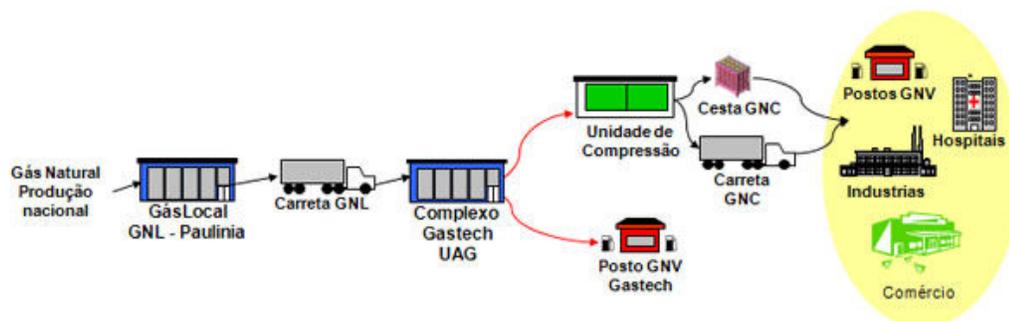


Figura 38. Cadeia de valor do GN disponibilizado para a região de Londrina

O Complexo Gastech através da regaseificação trabalha em três projetos:

- Abastecimento Veicular – GNV e abastecimento de outros postos de GNV credenciados.
- Prospecção de indústrias a fim de criar alternativas energéticas num custo menor e ecologicamente correto, através do Projeto Gás Natural Comprimido (GNC).
- Assistência e Fornecimento de Kits/Cilindros para consumidores e convertedores.

B.4. A Estrutura Instalada em Londrina

O complexo iniciou as operações com uma estimativa inicial de demanda de cerca de mil metros cúbicos de GNV por dia para abastecimento de veículos (que equivale ao consumo de 300 veículos) e entre 300 mil a 500 mil metros cúbicos para empresas instaladas em um raio de 200 quilômetros ao redor de Londrina.

A capacidade instalada atualmente é de 60mil m³ de GN, compreende duas torres de armazenamento de GNL, cada uma com capacidade de 49m³, duas bombas criogênicas, dois trocadores de calor para a regaseificação do GN e uma unidade de armazenamento de GNC que é ligada ao posto de GNV para fornecimento do combustível aos *dispensers* instalados.



Figura 39. Capacidade de armazenamento de GNL instalada
1 – Tanques de armazenamento de GNL;
2 – TC tipo Vaporizadores;
3 – Tanque de armazenamento de GNC;
4 – Central Eletrônica de Monitoramento da Instalação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO - ANP. **Indústria Brasileira de Gás Natural: Regulação Atual e Desafios Futuros**. Rio de Janeiro, 2001.

ANP, Horta Nogueira, L.A., **Produção e processamento de petróleo e gás natural no Brasil: perspectivas e sustentabilidade nos próximos 20 anos**, fev-2002

AGÊNCIA PETROBRAS DE NOTÍCIAS. Acessado em ago/2008. Disponível em <http://www.agenciapetrobrasdenoticias.com.br/>.

Assunção, A. S. **Procedimento experimental para avaliação metrológica do desempenho de uma microturbina utilizada para geração de energia elétrica** Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2004.

ASHRAE **Handbook – Fundamentals** (1997). Editora LTC

BRASIL, MMA – Ministério de Minas e Energia, **BEM 2008 – Balanço Energético Nacional 2008 (Ano Base 2007)**. Disponível em http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432 , acessado em 20/11/2008.

BRASIL, MMA – Ministério do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **PROCONVE – Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores**. Disponível em http://servicos.ibama.gov.br/cogeq/index.php?id_menu=113, acessado em 10/08/2008.

BRASIL, MME – Ministério de Minas e Energia. ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bicomcombustíveis. **Boletim mensal do gás natural**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/>, acessado em 11/08/2008. Brasília, Dezembro de 2004.

CEDIGAS. Natural Gas in the World, 2000 Survey. Acessado em set/2008. Disponível em <http://www.ifp.fr>.

CRYOSTAR. Acessado em set/2008. Disponível em <http://www.cryostar.com/web/lng-lcng-lh2-fueling-stations.php>.

CRIOTEC. Acessado em Nov/2008. Disponível em www.criotec.com/uk/vaporization.htm

GASENERGIA. Acessado em ago/2008. Disponível em www.gasenergia.com.br.

GASLOCAL. Gás Natural Liquefeito, Mais Energia para seu Negócio. Folheto de divulgação, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em <http://www.gaslocal.com.br>.

GASNET. Acesso em agosto de 2008. Disponível em <http://www.gasnet.com.br>.

Guia Didático da Energia, Lisboa: Direção-Geral de Energia, 1991

IANGV(1997). **Chapter 6: Gas Supply and Refuelling**. International Association for Natural Gas Vehicles. Position Paper Disponível em: <http://www.iangv.org/>. Acesso em setembro de 2008.

ILNGA, International LNG Alliance. **LNG Making Gas Markets Global**. Presentation of David. M. Sweet, Paris, 2005. Disponível em: <http://www.ilnga.org/>.

IEA, **World Energy Outlook 2000**, International Energy Agency, Paris, 2001

Incropera, F. P.; Dewitt, D.P. “Transferência de Calor e de Massa”. Editora LTC.

LAPIP, M. V. **GNL Como Opção de Oferta de Gás Natural no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LEAL, Catarina Mendes. **GÁS NATURAL NO SÉCULO XXI: UMA VISÃO GEOECONÓMICA**. Departamento de Prospectiva e Planejamento e Relações Internacionais, Artigo, Lisboa, 2007.

LIAO, PATRICIA W. S. **Utilização da energia “fria” de regaseificação do gás natural liquefeito em outras aplicações**, trabalho de formatura da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2007.

MOUTINHO, Edmilson - **Curso: Introdução ao Petróleo e Gás Natural**, ministrado pelo Prof. Edmilson Moutinho dos Santos, dentro do Programa de Pós-Graduação do Instituto de Eletrotécnica e Energia - PIPGE - IEE/USP - 1º semestre - 2001.

Mustang Engineering (2007)

www.oilonline.com/oece/oeaa/2007/presentations/mustang_lngsmartvap.pdf
(acessado: abr/07)

NEX GEN FUELING. Acessado em ago/2008. Disponível em http://www.nexgenfueling.com/p_fs_howstationworks.html.

National Fire Protection Association, **NFPA 59A: Standard For the Production, Storage, and Handling of Liquefied Natural Gas (LNG)**; 2006

NTU - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS, **Utilização do Gás Natural no Transporte Público Urbano - Relatório Final**, Brasília, Brasil. 2004

OLIVEIRA FILHO, A. D.. **Substituição de diesel por gás natural em ônibus do transporte público urbano**. Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. 2006

Olson, K., Behnke, J., Edlbeck, D. **Gás Natural Líquido**. JORNAL NFPA LATINO AMERICANO, março. 2008

PARFOMAK, P.W. **Liquefied Natural Gas (LNG) Infrastructure Security: Background and Issues for Congress**. CRS Report for Congress. September 9, 2003.

PERLITE (GEOLOGIA), Wikipédia. Disponível em [http://pt.wikipedia.org/wiki/Perlite_\(geologia\)](http://pt.wikipedia.org/wiki/Perlite_(geologia)). Acessado em novembro de 2008.

PETROBRAS. Produtos e Serviços. Disponível em http://www2.petrobras.com.br/portugues/ads/ads_Produtos.html. Acessado em agosto de 2008.

PRESS RELEASE ROBERT BOSCH LTDA - **DG Flex: O Sistemas Diesel-gás da Bosch** – ASSESSORIA DE IMPRENSA DA BOSCH DO BRASIL, 2008.

RELATÓRIO TÉCNICO DPP/PER 117/02 **Análise técnico-econômica preliminar das opções tecnológicas do gás comprimido (GNC), gás liquefeito (GNL) e Gás-to-Liquid (GTL) para transporte do gás natural na Amazônia**. CEPTEL – Rio de Janeiro, 2002.

RIGOLIN, P. H. C. **Avaliação Global dos Modos Energéticos de Transporte do Gás Natural Inclusive Como Energia Secundária** / Dissertação f.101 (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo, 2007.

REVOLUTION/REVOLUCIÓN – Partido Comunista Revolucionário dos EUA nº141, **As alterações e fissuras na economia mundial e a rivalidade entre as grandes potências: O que está a acontecer e o que isso pode significar**. Publicado em 24/ago/2008. Disponível em <http://www.paginavermelha.org/artigos/lotta-economia-mundial4.htm>. Acessado em novembro de 2008.

Rosa, E.S. Apresentação Universidade de Campinas
www.fem.unicamp.br/~im450/Textos&Transparencias/aula-6/aula-6.pdf (acessado: abr/07)

Santos, D. B. Santos, R. R. **“Instrumentação e controle de uma bancada de teses de compressores na fase vapor superaquecido”** (2006), trabalho de formatura da Universidade de Brasília. Curso de Engenharia Mecatrônica.

Shen, Débora Mei, **“Estudo da viabilidade técnica de um ciclo de liquefação de gás natural de pequena escala”**, trabalho de formatura da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2006.

Sumitomo Precision Products Co. Ltda. **LNG Vaporizer** Disponível em:
<http://www.spp.co.jp/English/jigyoku/ekika-e.html>. Acessado em novembro de 2008

TEIXEIRA, F, M, T. **Potencial do Gás Natural Veicular no Mercado Gaúcho**. 2003. 177 f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Engenharia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VALLE, M. A. N. do **A utilização do gás natural numa refinaria de petróleo: Um Estudo de Caso sobre a necessidade de um planejamento adequado para o uso do gás natural na matriz energética brasileira**. 2006. 202 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2006.

Wylen, V. Sonntag, R. Borgnakke, C. **Fundamentos da Termodinâmica** (2003). Editora Edgard Blucher

YONEZAWA, M. (2002). **“Development Of L-Cng Refueling System”**. Chiyoadkikai Works Co.,Ltd. 8th International Conference and Exhibition on Natural Gas Vehicles, IANGV.2002

ZAMALLOA, G. A. C. **Avaliação das Alternativas Tecnológicas (GNL e GTL) para Viabilização de Jazidas de Gás Natural Remotas em países em Desenvolvimento**. 2004. 210 f. Tese (Doutorado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.