

EDUARDO WERNECK VIEIRA MARQUES

**A APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE
GNL NO BRASIL**

**São Paulo
2007**

EDUARDO WERNECK VIEIRA MARQUES

**A APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE
GNL NO BRASIL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre**

**São Paulo
2007**

EDUARDO WERNECK VIEIRA MARQUES

**A APLICAÇÃO DAS NOVAS TECNOLOGIAS PARA PRODUÇÃO DE
GNL NO BRASIL**

*Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Energia e Fluidos*

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre**

**Área de concentração: Engenharia
Mecânica – Energia e Fluidos**

**Orientador: Prof. Doutor José Roberto
Simões-Moreira**

**São Paulo
2007**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Aparecido e Anna Martha

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Dr. José Roberto Simões-Moreira pela confiança, estímulo e compreensão durante todo o trabalho.

Aos meus pais, José Aparecido e Anna Martha, pelo apoio e confiança desde os primeiros passos.

Ao professor Dr. Edmilson Moutinho dos Santos e à professora Dra. Patricia Helena Lara dos Santos Mattai pelas oportunidades de aprendizado e valiosas sugestões.

À Promon Engenharia Ltda pelo apoio decisivo para conclusão desta dissertação.

Ao mentor Antonio Augusto Vellasco Filho pela dedicação às nossas conversas e reflexões.

Ao colega Christian Tacuse Begaso e Márcia Simões Souza pela ajuda durante levantamento bibliográfico.

RESUMO

Esta dissertação apresenta as tecnologias de desenvolvimento recente para produção de GNL em pequena e média escala. Por meio de uma abordagem de Engenharia de Sistemas uma metodologia é apresentada para indicar qual sistema de produção de GNL tem maior chance de obter êxito nas seguintes aplicações identificadas no contexto energético brasileiro: aproveitamento de campos remotos de gás natural, produção *offshore* de GNL, criação de pulmões energéticos de GNL e o uso do GNL para abastecimento de veículos a gás natural. Verifica-se que os ciclos de liquefação baseados em expansores tendem a ser a escolha mais provável para desempenhar as funções identificadas nas aplicações em referência.

Palavras-chave: GNL. Gás Natural. Engenharia de Sistemas. Tecnologia. Processos de liquefação.

ABSTRACT

This dissertation presents recently developed technologies for LNG production in small and medium scale plants. It uses a Systems Engineering approach through a methodology to indicate the LNG production system that is more likely to be successful in meet users requisites considering the following necessities identified in the Brazilian energy context: development of remote natural gas fields, LNG offshore production, LNG production as strategic reserves along distribution and transportation piping and the use of LNG to supply natural gas as vehicle fuel. The liquefaction cycles based on expanders are the most probable choice to perform the functions to meet the necessities identified herein.

Keywords: LNG. Natural gas. Systems engineering. Technology. Liquefaction process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Distribuição Percentual das Reservas Provadas de GN por Estado em 31/12/2005 (PETROBRAS, 2006).....	18
Figura 1.2 – GN Disponibilizado pela Petrobras e sua Projeção até 2010 (PETROBRAS, 2006).....	18
Figura 1.3 – Consumo de Derivados de Petróleo e Gás Natural versus GDP (PETROBRAS, 2006).....	19
Figura 1.4 – Histórico Evolutivo da Produção de Gás Natural pela Petrobras no Brasil (PETROBRAS, 2006).....	20
Figura 1.5 – Projeção de Crescimento da Demanda e Oferta Estimada por Fonte para 2011 (PETROBRAS, 2006).....	20
Figura 1.6 – Projetos para Produção de GN pela Petrobras e Previsão da Produção (PETROBRAS, 2006).....	23
Figura 1.7 – Rede Atual de Gasodutos no Brasil (PETROBRAS, 2006).....	24
Figura 1.8 – Gasodutos em Estudo (PETROBRAS, 2006).....	25
Figura 1.9 – Um Sistema Típico de Produção e Processamento de Gás Natural (KUMAR, 1987).....	32
Figura 1.10 – A Cadeia do GNL.....	42
Figura 2.1 – Diagrama Simplificado de um Ciclo Cascata Convencional (LOM, 1974).....	45
Figura 2.2 – Diagrama de Fluxo Simplificado de um Ciclo Cascata Modificado (LOM, 1974).....	46
Figura 2.3 – Diagrama de Fluxo Simplificado de um Ciclo Cascata Modificado – Ciclo Aberto (LOM, 1974).....	47
Figura 2.4 – Seção Transversal Trocador <i>Spiral Wound</i> (LOM, 1974) e Aspecto Construtivo (LINDE, 2007).....	52
Figura 2.5 – Seção Trocador <i>Plate-Fin</i> e Aspecto Externo (LINDE, 2007).....	53
Figura 2.6 – Processo PRICO - <i>Poly Refrigerant Integrated Cycle Operations</i> (PRICE, 2005).....	57
Figura 2.7 – Fluxograma do Sistema para Liquefação de GN (GTI, 2003).....	58
Figura 2.8 – Fluxograma de Processo Kryopac PCMR (KRYOPAC, 2007).....	59

Figura 2.9 – Fluxograma de Processo Ciclo a Nitrogênio Hamworthy (HAMWORTHY, 2006)	60
Figura 2.10 – Fluxograma de Processo Pré-Cooled Dual TEX (FOGLIETTA, 2004)	61
Figura 2.11 – Fluxograma do Processo Kryopac EXP (KRYOPAC, 2007)	63
Figura 2.12 – Fluxograma de Processo Let Down (SHEN e outros, 2006)	64
Figura 3.1 – Diagrama Funcional para Uso Veicular	71
Figura 3.2 – Diagrama Funcional para Aproveitamento Campos <i>Offshore</i>	74
Figura 3.3 – Diagrama Funcional para Aproveitamento Campos Remotos	77
Figura 3.4 – Diagrama Funcional para Demandas de Pico e Formação de Pulmão de GNL	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Constituição do Gás Natural (ANP, 2002)	28
Tabela 1.2 – Reservas de Gás Natural por País (DOE/IEIA, 2003)	30
Tabela 1.3 – Propriedades Físico-Químicas do Gás Natural (Petrobras, 2002).....	33
Tabela 1.4 – Plantas de Liquefação Existentes em Out/2003 (DOE/EIA, 2003)	35
Tabela 1.5 – Terminais de Importação de GNL Existentes em Out/2003 (DOE/EIA, 2003)	37
Tabela 1.6 – Navios Metaneiros em Operação em Out./2003 (DOE/EIA, 2003).....	40
Tabela 2.1 – Trens de Liquefação por Processo (BARCLAY e DENTON, 2005).....	48
Tabela 2.2 - Trabalho Mínimo para Liquefação do Metano (LOM, 1974).....	49
Tabela 2.3 – Compressores para Plantas de GNL (LOM, 1974).....	51
Tabela 2.4 – Comparativo de Trocadores SWHE e PFHE (LINDE, 2007)	54
Tabela 2.5 –Tecnologias para Liquefação em Pequena e Média Escala (BEGAZO e outros, 2006)	56
Tabela 4.1 – Confiabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	81
Tabela 4.2 – Disponibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	82
Tabela 4.3 – Manutenibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações...	83
Tabela 4.4 – Sustentabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	84
Tabela 4.5 – Adaptabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	85
Tabela 4.6 – Interoperabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações ..	86
Tabela 4.7 – Estabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	87
Tabela 4.8 – Intercambialidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações...	88
Tabela 4.9 – Maturidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	89
Tabela 4.10 – Obsolescência: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	90
Tabela 4.11 – Revampeabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	91
Tabela 4.12 – Derivabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	93
Tabela 4.13 – Suportabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	95
Tabela 4.14 – Escalabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações.....	96
Tabela 4.15 – Flexibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações.....	97
Tabela 4.16 – Modularidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	98
Tabela 4.17 – Pré-Fabricação: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	99

Tabela 4.18 – Robustez: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações.....	100
Tabela 4.19 – Transparência: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	101
Tabela 4.20 – Vulnerabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações ..	102
Tabela 4.21 – Similaridade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	103
Tabela 4.22 – Simplicidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	104
Tabela 4.23 – Testabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	105
Tabela 4.24 – Extensão Ciclo de Vida: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações.....	106
Tabela 4.25 – Intervencibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	107
Tabela 4.26 – Tempo de Resposta: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	108
Tabela 4.27 – Potencial: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações	109
Tabela 5.1 – Painel de Decisão para Aplicação <i>Offshore</i>	113
Tabela 5.2 – Painel de Decisão para Aplicação como Pulmão Energético	115
Tabela 5.3 – Painel de Decisão para Aplicação como Combustível Veicular	117
Tabela 5.4 – Painel de Decisão para Desenvolvimento de Campos Não Convencionais.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APCI	<i>Air Products and Chemicals Inc.</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i>
ASTM	<i>American Society of Testing and Materials</i>
C3MR	<i>propane pre-cooled mixed refrigerant</i>
COTS	<i>commercial off-the-shelf</i>
DMR	<i>Shell double mixed refrigerant process</i>
DOE	<i>US Department of Energy</i>
Dual TEX	<i>dual independent expander refrigeration cycles</i>
E&P	<i>exploração e produção</i>
FLNG	<i>floating liquefied natural gas</i>
FONG	<i>floating oil and natural gas</i>
FPSO	<i>floating production storage and off-loading</i>
GN	<i>gás natural</i>
GNL	<i>gás natural liquefeito</i>
GNV	<i>gás natural veicular</i>
GTI	<i>Gas Technology institute</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INCOSE	<i>International Council on Systems Engineering</i>
LGN	<i>líquidos de gás natural</i>
MCHE	<i>main cryogenic heat exchanger</i>
MFCP	<i>mixed fluid cascade process</i>
MR	<i>mixed refrigerant</i>
PCMR	<i>Kryopac pre-cooled mixed refrigerant process</i>
PFHE	<i>plate fin heat exchanger</i>
PRICO	<i>poly refrigerant integrated cycle operations</i>
SWHE	<i>spiral wound heat exchanger</i>
TEX	<i>turbo expander</i>

SUMÁRIO

1	Introdução - O Contexto Energético e o Gás Natural Liquefeito	16
1.1	Objetivos e Motivação.....	16
1.2	Contexto Energético e do Uso do Gás Natural	17
1.3	Propriedades Físico-Químicas do Gás Natural.....	27
1.4	O Gás Natural Liquefeito (GNL)	33
2	As Tecnologias para Produção de GNL.....	43
2.1	Plantas de Liquefação de Gás Natural.....	43
2.2	Ciclos Clássicos de Liquefação	44
2.3	Tecnologias para Produção de GNL em Pequena e Média Escala	55
2.4	Armazenagem e Disponibilização	65
2.5	Transporte – Tanques Criogênicos	66
3	Aplicações da Cadeia de GNL para o Brasil e Seus Benefícios	67
3.1	GNL como Combustível para Transporte.....	69
3.2	Aproveitamento de Campos Offshore.....	71
3.3	Aproveitamento de Campos Remotos e Fontes Não-Convencionais	75
3.4	Demandas de Pico e Pulmões de GN.....	78
4	Propriedades das Cadeias de GNL Consideradas na Seleção de Tecnologias.....	80
4.1	Confiabilidade	81
4.2	Disponibilidade.....	82
4.3	Manutenabilidade.....	83
4.4	Sustentabilidade	84
4.5	Adaptabilidade	85
4.6	Operabilidade e Interoperabilidade	86
4.7	Estabilidade	87
4.8	Substitubilidade e Itercambialidade.....	88
4.9	Maturidade Comercial e Tecnológica.....	89
4.10	Obsolescência	90
4.11	Revampeabilidade	91
4.12	Derivabilidade	92

4.13	Suportabilidade (Suporte Logístico Integrado).....	94
4.14	Escalabilidade.....	95
4.15	Flexibilidade.....	97
4.16	Modularidade.....	98
4.17	Pré-Fabricação e Montagem.....	99
4.18	Robustez.....	100
4.19	Transparência.....	101
4.20	Vulnerabilidade.....	102
4.21	Similaridade e Afinidade.....	103
4.22	Outras Propriedades.....	104
5	Painéis de Decisão – A Aplicação das Tecnologias para Uso do GNL no Brasil 110	
5.1	Introdução.....	110
5.2	Metodologia.....	111
5.3	Painéis de Decisão e Resultados.....	112
6	Conclusão.....	120
	Referências.....	123
	GLOSSÁRIO.....	128
	Apêndice A - Ferramentas para Otimização Técnico-Econômica da Cadeia do GNL	131
	Apêndice B - Conversões Práticas Usuais de Unidades.....	134

1 Introdução - O Contexto Energético e o Gás Natural Liquefeito

1.1 Objetivos e Motivação

Esta dissertação tem como objeto de estudo os sistemas de desenvolvimento recente de produção, transporte e armazenamento de gás natural liquefeito (GNL) e seu potencial de inserção no contexto energético do Brasil. Ao longo deste trabalho estão reunidos elementos teóricos, dados e fatos técnicos de forma a compor uma visão integrada da cadeia de produção de GNL e a partir dos quais procura-se responder à pergunta abaixo formulada, bem como extrair algumas conclusões e recomendações para seleção de oportunidades de investimento, estudos conceituais, seleção tecnológica e estudos de viabilidade técnico-econômica que antecedem a fase de projeto básico de engenharia.

- Quais propriedades funcionais como confiabilidade, disponibilidade, sustentabilidade, flexibilidade, robustez, escalabilidade, durabilidade, reciclabilidade e adaptabilidade contribuem para viabilizar a inserção do GNL no Brasil ?

O momento do setor de energia no Brasil e no mundo nesta primeira década do século XXI passa por uma fase de grandes transformações, com novas demandas – principalmente sócio-ambientais - e está em curso um momento de equacionamento das soluções em infra-estrutura para disponibilização e uso de energia de forma racional sem precedentes. Este momento afeta diretamente a forma de consumo e disponibilização do GN que, sem dúvida, desempenha um papel importante nesse novo cenário. Este trabalho pretende contribuir com a sistematização e domínio técnico das novas tecnologias para sistemas de liquefação de gás natural considerados de pequeno (até 300.000 t/ano) a médio porte (até 1,5 milhões t/ano) para então, a partir da identificação das necessidades atuais envolvendo a produção e uso de gás natural no Brasil, delinear de forma estruturada uma arquitetura funcional que permita indicar quais tecnologias (arquiteturas físicas) são adequadas

para cada caso. A abordagem de engenharia usada é a de Engenharia de Sistemas¹ e o foco é compatível com as fases de projeto conceitual e engenharia básica do ciclo de vida de uma planta.

A dissertação contribui para a relativamente escassa literatura em língua portuguesa sobre o GNL. Pretende fornecer um conjunto coerente e conciso de conhecimento que servirá de matéria-prima para estudos acadêmicos, estudos conceituais, de viabilidade e projetos básicos de engenharia que seguramente estarão em curso no Brasil como parte do desenvolvimento de sua matriz e sua integração energética.

1.2 Contexto Energético e do Uso do Gás Natural

1.2.1 Cenário Brasileiro

Recentemente o Brasil vem procurando reduzir sua dependência em relação ao suprimento de gás boliviano uma vez que o novo presidente eleito Evo Morales realizou processo para nacionalização da indústria de petróleo e gás daquele país assim como pretende rever as bases contratuais segundo as quais o fornecimento para o Brasil foi estabelecido a partir de 1999. Estes fatos trazem incertezas de suprimento e preço que comprometem as expectativas de investimento ao longo de toda cadeia do gás até o consumidor final, o que é inaceitável para o país.

A produção interna de GN é insuficiente para atender toda demanda interna e, por esta razão, estão sendo ampliados os investimento previstos em exploração e produção (E&P) na bacia da Santos e antecipados os projetos de gás natural na bacia do Espírito Santo (GAZETA MERCANTIL, 2006).

¹ Engenharia de Sistemas: empregada para tratar problemas envolvidos na criação de sistemas produto / serviço de crescente complexidade foi desenvolvida e metodizada uma série de atividades de engenharia com expressivos progressos na área de defesa, aeroespacial, comunicações e energia (VALERIANO, 1998)

A Figura 1.1 abaixo mostra a distribuição percentual das reservas provadas de GN por estado.

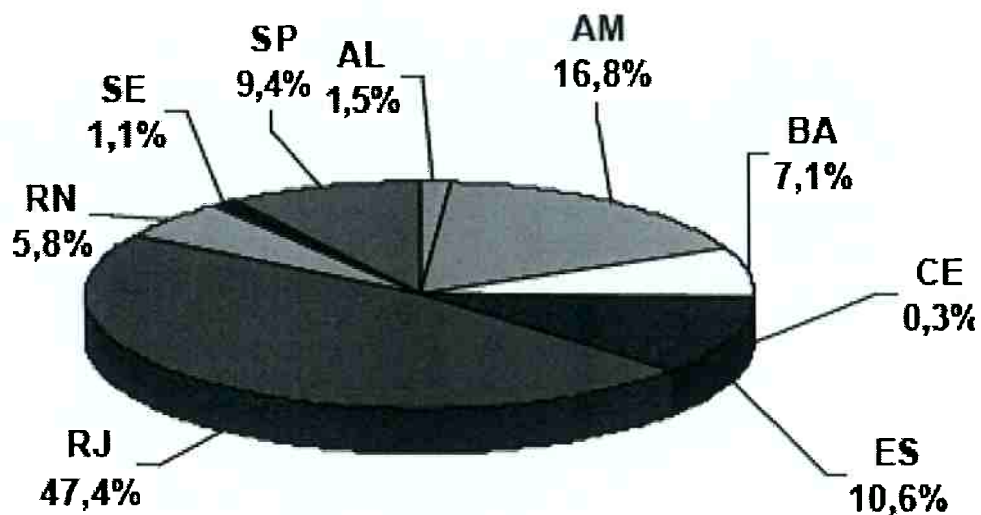


Figura 1.1 – Distribuição Percentual das Reservas Provadas de GN por Estado em 31/12/2005 (PETROBRAS, 2006)

A Figura 1.2 mostra a produção de GN incluindo a importação da Bolívia e a expectativa formulada pela Petrobras até 2010 que considera a complementação do suprimento interno com GNL importado.

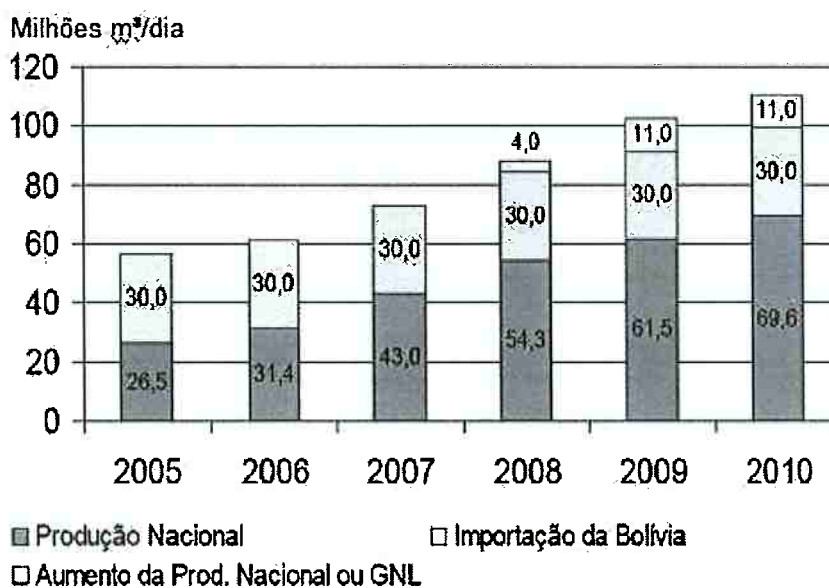


Figura 1.2 – GN Disponibilizado pela Petrobras e sua Projeção até 2010 (PETROBRAS, 2006)

Em 2006, a produção diária de GN pela Petrobras oscilava em torno dos 370.000 BEP/d o que correspondia a 94% do mercado brasileiro.

O consumo de GN no Brasil tem crescido de forma significativa desde o final de 2000 superando, em termos percentuais, os derivados de petróleo como mostra a Figura 1.3 . As principais razões para este crescimento estão na ampliação da infraestrutura logística de fornecimento e devido à pressão cada vez maior pela adoção de combustíveis menos agressivos ao meio ambiente.

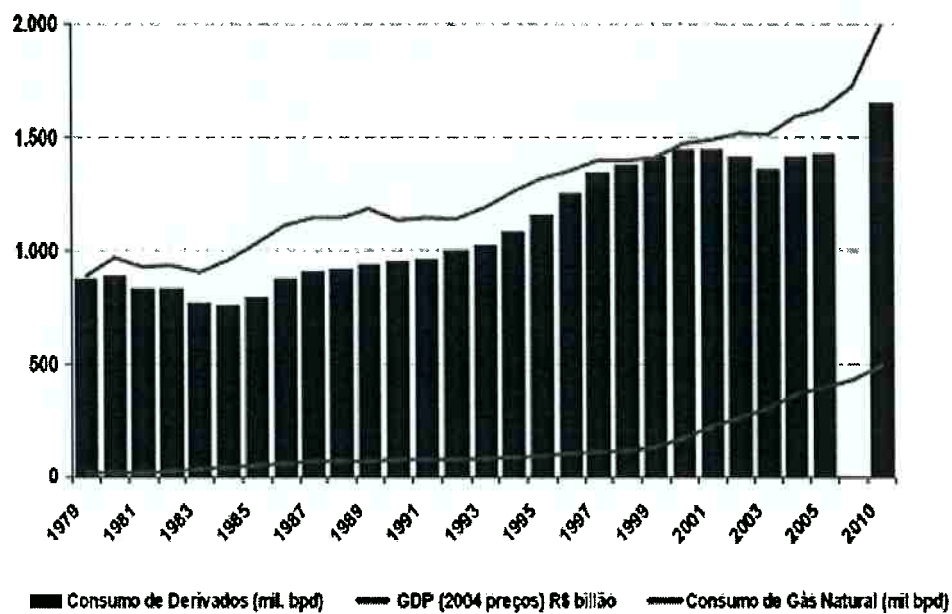


Figura 1.3 – Consumo de Derivados de Petróleo e Gás Natural versus GDP (PETROBRAS, 2006)

A produção de GN pela Petrobras apresenta crescimento significativos, da ordem de 7,5% ao ano, desde 1996. A Figura 1.4 abaixo mostra a evolução da produção brasileira de GN pela Petrobras com destaque para o aumento da participação do gás não associado na produção que é reflexo de sua visão em GN antes tido apenas como um sub-produto da produção de óleo.

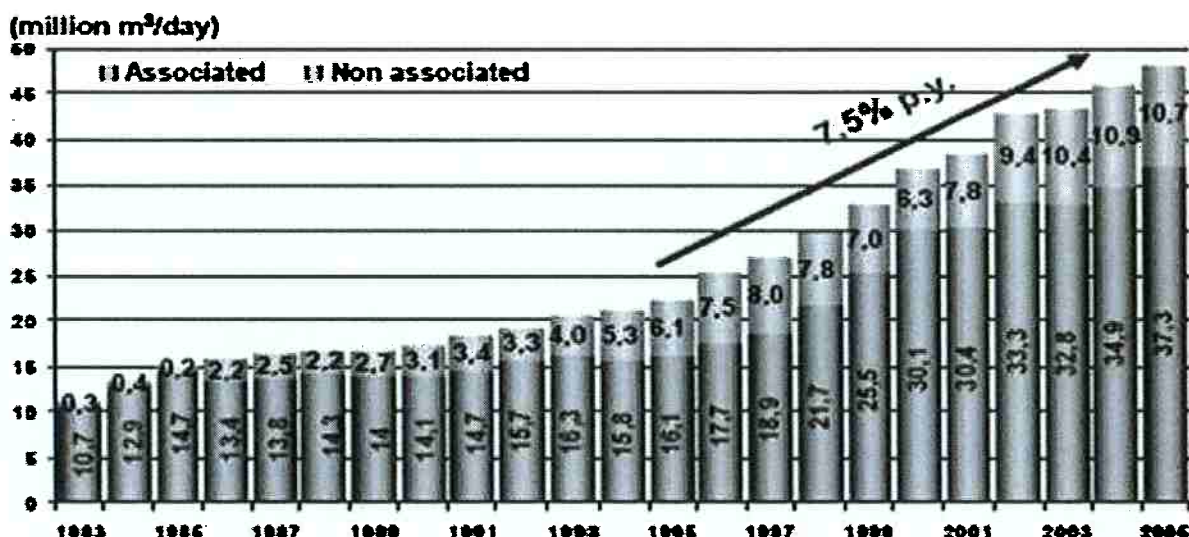


Figura 1.4 – Histórico Evolutivo da Produção de Gás Natural pela Petrobras no Brasil (PETROBRAS, 2006)

Para 2011, a Petrobras projeta uma demanda de 121 milhões de m³ de GN que deverá ser atendida pelo aumento significativo da produção nacional, as importações de gás boliviano e o GNL importado. A Figura 1.5 mostra com mais detalhes a composição da demanda. Essa projeção tem sido considerada otimista por especialistas de mercado que apontam uma oferta esperada para 2011 de 110,1 milhões de m³ sendo que 20 milhões de m³ correspondem ao GNL importados.

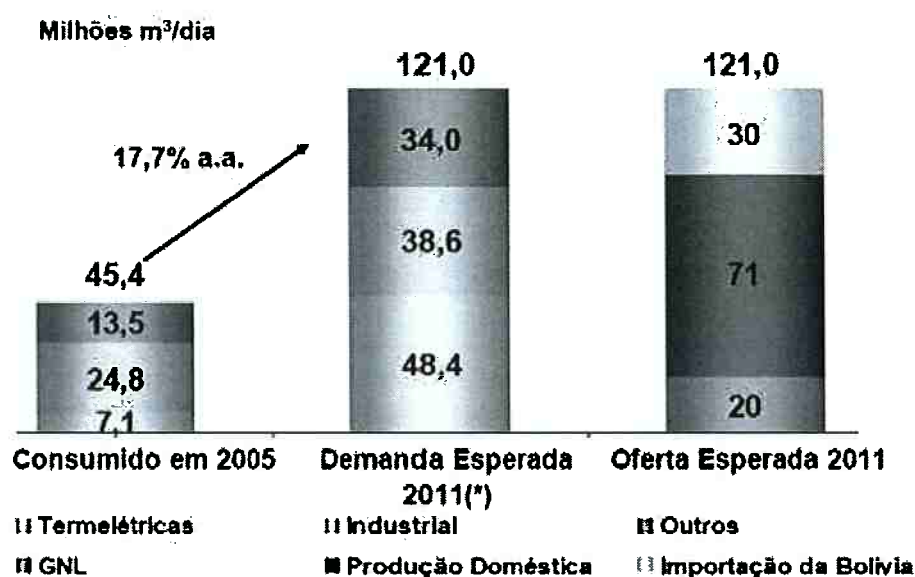


Figura 1.5 – Projeção de Crescimento da Demanda e Oferta Estimada por Fonte para 2011 (PETROBRAS, 2006)

A maior parte do GN consumido no Brasil é utilizado como combustível para indústria, porém esta fatia vem perdendo espaço para a utilização termelétrica que em 2005 foi responsável por 22% do consumo interno enquanto o gás natural industrial ficou com 68%. O Brasil possui a segunda maior frota de veículo a GNV do mundo, sendo que somente a Petrobras tem 1190 postos de abastecimento no Brasil. O aumento da demanda por energia elétrica tem aumentado as pressões pela disponibilização da energia gerada pelas termelétricas ao passo que a oferta crescente de etanol no mercado nacional tem alavancado as vendas de veículos bi-combustíveis. Este cenário sugere a expectativa da manutenção do crescimento superior do consumo de GN pelas termelétricas.

A Petrobras continuará incentivando o uso do GN como combustível veicular, seu uso residencial, industrial e na geração termelétrica. A empresa também está em busca da redução da dependência do gás boliviano e da flexibilização da demanda por meio da conversão de refinarias e termelétricas para multicomcombustível (GNL, óleo diesel e álcool) (PETROBRAS, 2006).

Um aspecto característico do suprimento interno é a dificuldade no atendimento à demandas de natureza distintas baseado quase que exclusivamente na rede de gasodutos e de uma expansão da rede: grande consumidores industriais e termoelétricas ao entrarem em operação introduzem grande perturbação no suprimento aos consumidores de menor porte industriais, comerciais e residenciais uma vez que sua capacidade de reserva limita-se ao volume contido sob pressão ao longo da malha. Para minimizar este impacto, a Petrobras planeja viabilizar terminais de regaseificação de GNL que serviriam como pulmão de gás ao mesmo tempo que reduziria as incertezas quanto à produção dos novos campos de gás descobertos recentemente (DCI , 22/06/06).

Em 2006 entrou em operação a primeira planta para liquefação de gás natural no Brasil advinda da parceria entre a Petrobras e White Martins. A empresa assim formada é a GásLocal e visa o atendimento ao mercado nos estados de São Paulo, Paraná, Minas Gerais, Espírito Santo, Goiás, Distrito Federal e Mato Grosso do Sul. Embora ainda haja pendências em função do vácuo regulatório e jurídico em torno da distribuição e comercialização de GNL (ANP, 2005), contratos de suprimento já foram fechados com a Gasmig (MG), Goiasgás (GO) e CEBgás (DF) (AG ESTADO, 2006). Segundo os empreendedores, o objetivo é suprir a demanda de GN em área

não atendidas pelos gasodutos seja para grandes consumidores ou, até mesmo, para postos de GNV.

Segundo o World Energy Investment Outlook (2003), espera-se que a demanda por GN no Brasil cresça expressivos 7% ao ano por 30 anos puxada principalmente pelo setor elétrico visando a redução da dependência da hidroeletricidade. Com isso, espera-se que, em 2030, o Brasil seja responsável por 20% da demanda de gás da América Latina e desempenhará importante papel nos investimentos em infraestrutura na região.

Dado este cenário, o estudo sobre plantas de liquefação de gás natural associada a uma instalação para armazenamento de sua produção trará maiores subsídios para estruturação de um novo modelo de suprimento de gás para o mercado interno que seja compatível com as necessidades energéticas atuais e futuras, ao mesmo tempo que também evidenciará instrumentos para melhor integração energética intra e inter-regional dando a flexibilidade necessária para responder ao novo cenário geopolítico que se desenha.

1.2.2 Restrições Atuais e Cenário Futuro

No mundo, atualmente, mais de 75% da produção de gás natural é de gás associado. A Petrobras prevê o desenvolvimento da exploração de 11 campos de gás não associado para os próximos anos (TN PETRÓLEO, 2007) e tem direcionado investimentos há alguns anos como mostra Figura 1.4 acima em conjunto com novos campos de óleo e gás para ampliar a oferta como mostra a Figura 1.6.

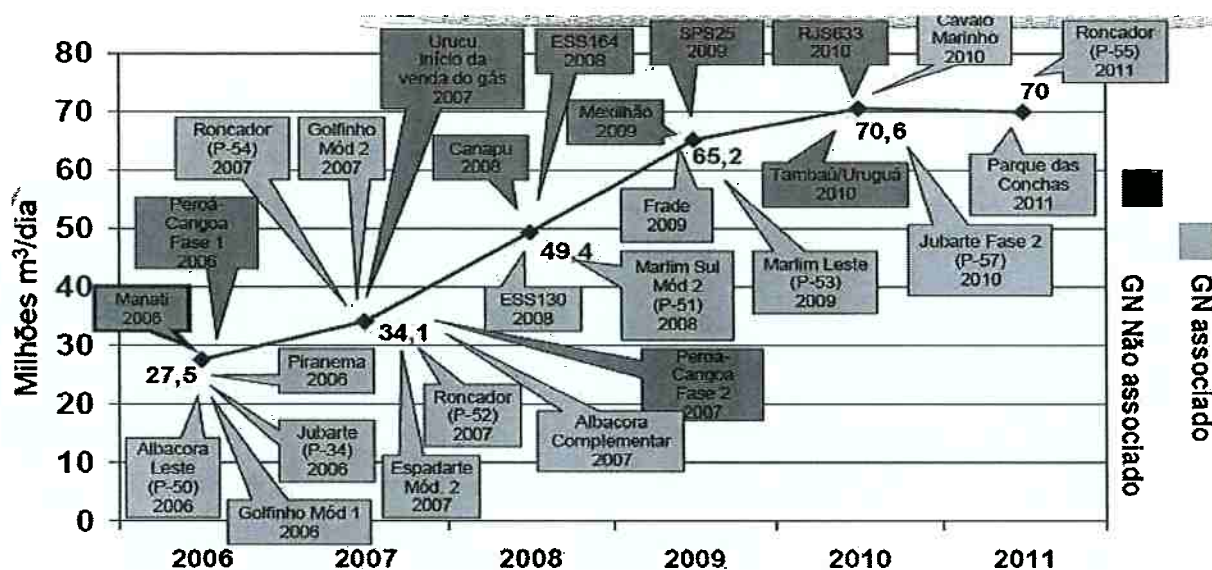


Figura 1.6 – Projetos para Produção de GN pela Petrobras e Previsão da Produção (PETROBRAS, 2006)

Para o aumento da produção nacional, a Petrobras desenvolve a Bacia de Santos com a expectativa otimista de produzir até 30 milhões de m³/dia a partir de 2010. O Projeto Manati deverá suprir 6 milhões de m³/dia na Bahia e por meio do Plangás serão desenvolvidos campos no Espírito Santo e ampliadas a produção no campo de Marlim, na Bacia de Campos, e Merluza, na Bacia de Santos.

Atualmente a Petrobras prevê o investimento de US\$ 6,5 bilhões até 2011 nos seguintes projetos logísticos para expansão da oferta de GN: importação de GNL, GASENE para norte, gasoduto Coari-Manaus, manutenção da infra-estrutura de transporte de GN, malha de gás do sudeste, ampliação do GASBEL e do trecho sul do GASBOL (para escoamento do GNL regaseificado) e expansão da malha de gasodutos no nordeste.

A Figura 1.7 mostra a atual rede de gasodutos no Brasil o que corresponde a um total de 8604 km de dutos.



Figura 1.7 – Rede Atual de Gasodutos no Brasil (PETROBRAS, 2006)

Existem diversos estudos para projetos futuros de gasodutos no longo prazo como mostra a Figura 1.8. Os principais são:

- 1) Gasoduto São Carlos – Belo Horizonte. Terá 550 km de extensão, começa no GASBOL e se interligará no GASBEL que vai até o Rio de Janeiro. Sua capacidade será de 7,5 milhões de m^3 /dia;
- 2) GASUN. Conhecido como Gasoduto da Unificação Nacional, terá 5100 km de extensão e capacidade para 30 milhões de m^3 /dia. Ligará Campo Grande a São Luiz passando por Goiás, Tocantins, Piauí, Pará e Distrito Federal. Conclusão total prevista para 2026. Representa um potencial para atração de 70000 indústrias e geração de empregos ao longo de sua rota devido à

redução de custos operacionais se comparadas a sua posição atual no sul e sudeste (Marcondes, A., 2004).

- 3) Gasoduto Venezuela-Brasil. Conclusão 2024. Ligará Caracas a Manaus.
- 4) Gasoduto Peru-Brasil. Conclusão em 2024. Ligará o Peru a Porto Velho.

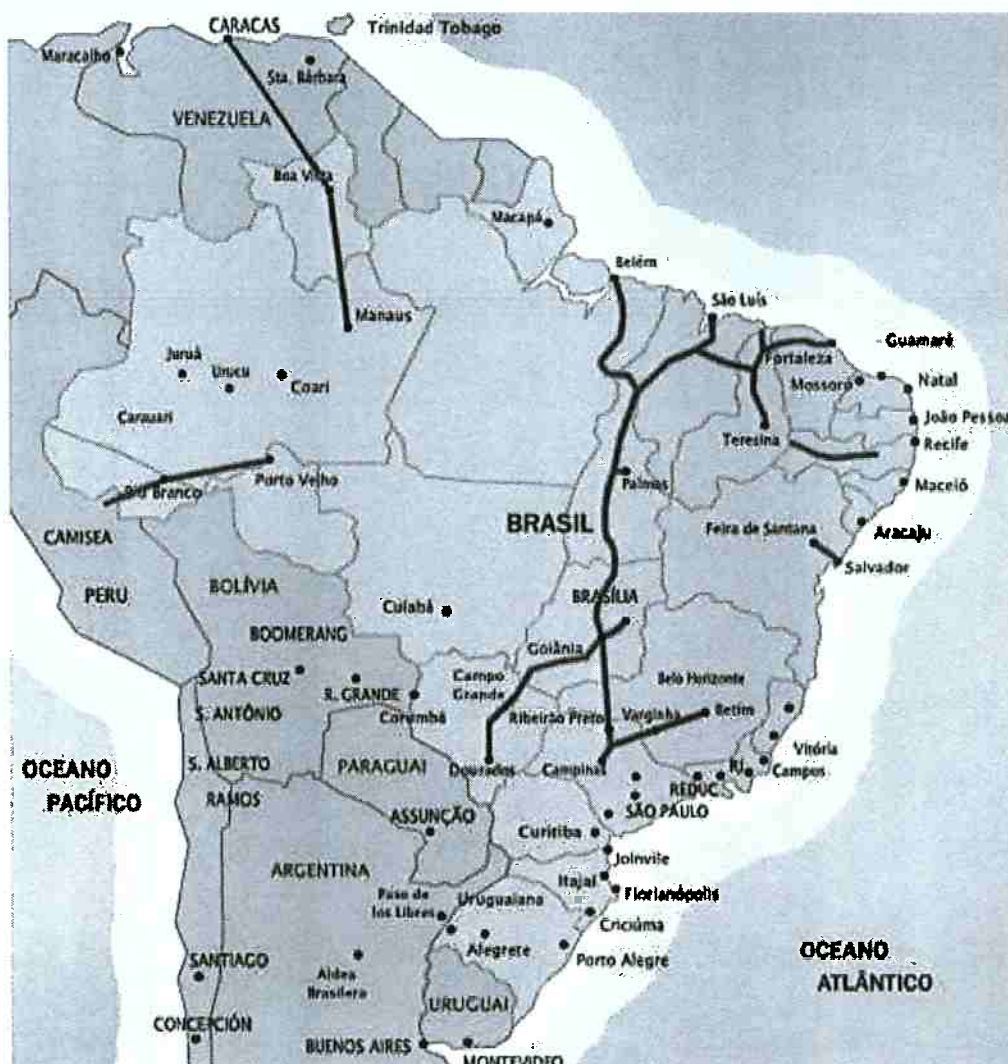


Figura 1.8 – Gasodutos em Estudo (PETROBRAS, 2006)

1.2.3 Cenário Externo

Atualmente o fornecimento de gás natural supre 24% da demanda mundial de energia logo atrás do carvão. Em 2030, o gás natural deverá ultrapassar o petróleo como principal fonte de energia para a indústria no mundo e conquistará espaço na matriz energética dos países em desenvolvimento por ser mais limpo e eficiente do que o carvão, segundo projeções do Departamento de Energia dos EUA (NEWSWEEK SPECIAL ED., 2007).

A demanda mundial por gás natural deverá praticamente dobrar considerando o período 2001-2030 e os investimentos anuais na cadeia do GNL deverão passar dos US\$ 4,0 bilhões registrados na última década para US\$ 9,0 bilhões no período 2021-2030 suportando assim um crescimento de 6 vezes no volume de GNL comercializado (I EA, 2006).

Atualmente o GNL corresponde a 7% do consumo global de gás e a expectativa, segundo a Agência Internacional de Energia, é que esta parcela atinja 40% em 2010. Se esta tendência se confirmar, o mercado de GNL concorrerá com o gás transportado via gasodutos e seu preço será determinado predominantemente pela oferta e demanda do que por pressões de natureza geopolítica (NEWSWEEK SPECIAL ED., 2007).

Espera-se que o Brasil venha a inserir-se no comércio mundial de GNL embora seu posicionamento ainda não esteja totalmente definido. A Petrobras prevê a operação de duas plantas flutuantes de regaseificação de GNL a partir de 2009 sendo, uma com capacidade de 14 milhões de m³/d no Rio de Janeiro e outra, com capacidade de 7 milhões m³/d no Ceará (PIRES E SCHECHTMAN, 2007). Há estudos para contratação de um terceiro navio como parte do Plano de Antecipação da Produção de Gás – PLANGÁS (GAZETA MERCANTIL, 2007).

1.3 Propriedades Físico-Químicas do Gás Natural

1.3.1 O Gás Natural e sua Composição

O gás natural (GN) é uma mistura natural de hidrocarbonetos gasosos e outros não-hidrocarbonetos que normalmente são considerados como impurezas. Frequentemente o GN encontra-se associado a hidrocarbonetos líquidos tais como o óleo cru e condensados.

Os componentes principais do GN são o metano, etano, propano e butano na presença de quantidades muito pequenas de hidrocarbonetos mais pesados e quantidades variáveis de outros gases como nitrogênio, gás carbônico e gás sulfídrico.

A composição admitida do GN tal como comercializado no Brasil está mostrada na Tabela 1.1.

De todos os componentes, aqueles classificados como impurezas são prejudiciais aos equipamentos de produção e transporte, razão pela qual estes são removidos tão logo o gás é extraído de sua fonte natural. Os principais contaminantes são:

- Gases ácidos como o gás sulfídrico e em menor escala o gás carbônico;
- Vapor d'água;
- Toda água livre intrusa na forma de condensado;
- Qualquer líquido no gás tais como óleos lubrificantes, metanol hidrocarbonetos pesados;
- Sólidos quaisquer tais como sílica, produtos de corrosão e sujeira.

Tabela 1.1 – Constituição do Gás Natural (ANP, 2002)

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE (2)(3)		
		Norte	Nordeste	Sul, Sudeste, Centro-Oeste
Poder calorífico superior(4)	kJ/m^3 kWh/m^3	34.000 a 38.400 9,47 a 10,67	35.000 a 42.000 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.	68,0		86,0
Etano, máx.	% vol.	12,0		10,0
Propano, máx.	% vol.	3,0		
Butano e mais pesados, máx.	% vol.	1,5		
Oxigênio, máx.	% vol.	0,8	0,5	
Inertes (N_2 e CO_2), máx.	% vol.	18,0	5,0	4,0
Nitrogênio	% vol.	Anotar		2,0
Enxofre Total, máx.	mg/m^3	70		
Gás Sulfídrico (H_2S), máx.(6)	mg/m^3	10,0	15,0	10,0
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx.	$^{\circ}\text{C}$	-39	-39	-45

Notas:

- (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 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) 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 293,15K, 101,325kPa, 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 .

O gás natural é um fluido homogêneo de baixa densidade, baixa viscosidade e inodoro. É considerado um dos gases inflamáveis mais estáveis (Curry, 1981). É inflamável quando misturado com 5 a 15 % de ar e sua temperatura de ignição varia de 593 °C a 704 °C. Tipicamente seu conteúdo energético é de 37,6 MJ/Nm³ (PCI), parâmetro este normalmente usado para estabelecer seu preço ao invés de sua massa ou volume.

1.3.2 A Ocorrência de Gás Natural em Reservatórios Convencionais²

O gás natural é encontrado em substratos sedimentares formados por *sandstones*, *limestones* e dolomita. Cada poço em um reservatório pode produzir gás de diferentes composições assim como sua composição também pode variar à medida que o poço é esgotado (KUMAR, 1987). Esta característica impacta as instalações de produção e seus equipamentos que precisam adaptar-se às mudanças ao longo de sua vida útil.

O gás natural não associado é preferível ao gás dissolvido ou associado assim como aos condensados de gás natural. O primeiro, é mais rico em metano e pobre em componentes pesados o que permite sua produção a altas pressões e reduz a necessidade de instalações de separação e condicionamento.

A

Tabela 1.2 mostra uma estimativa das reservas provadas³ de gás natural.

² Outras fontes de ocorrência de GN são: *tight sands*, *tight shales*, aquíferos geopressurizados e carvão mineral

³ Quantidades obtidas após perfuração do poço. As estimativas são atualizadas a partir do monitoramento do poço pelo seu volume de produção, análise de transientes de pressão e modelagem computacional.

Tabela 1.2 – Reservas de Gás Natural por País (DOE/IEIA, 2003)

País	Reservas Provadas 1/1/2003 (Tcf)	Porcentagem das Reservas Mundiais
TOTAL Mundial	5501.4	100.0%
Países Seleccionados	5097.4	92.7%
Rússia	1680.0	30.5%
Irã	812.3	14.8%
Catar	508.5	9.2%
Arábia Saudita	224.7	4.1%
Emirados Arabes Unidos	212.1	3.9%
EUA	183.5	3.3%
Argélia	159.7	2.9%
Venezuela	148.0	2.7%
Nigéria	124.0	2.3%
Iraque	109.8	2.0%
Indonésia	92.5	1.7%
Australia	90.0	1.6%
Noruega	77.3	1.4%
Malásia	75.0	1.4%
Turcomenistão	71.0	1.3%
Uzbequistão	66.2	1.2%
Kazaquistão	65.0	1.2%
Holanda	62.0	1.1%
Canada	60.1	1.1%
Egito	58.5	1.1%
China	53.3	1.0%
Líbia	46.4	0.8%
Oman	29.3	0.5%
Bolívia	24.0	0.4%
Trinidad & Tobago	23.5	0.4%
Iêmen	16.9	0.3%
Brunei	13.8	0.3%
Peru	8.7	0.2%
Guiné Equatorial	1.3	0.0%
Angola	0.0	0.0%
Restante do Mundo	404.1	7.3%

■ Exportadores de GNL
 ■ Potenciais exportadores de GNL

1.3.3 A cadeia de Produção e Processamento do Gás Natural

A Figura 1.9 abaixo ilustra um sistema típico de produção e processamento de gás natural. Do ponto de vista de projeto, podemos distinguir 9 módulos de cálculo principais:

- 1) Módulo do reservatório: trata do escoamento do gás através do substrato;
- 2) Módulo do fluxo de fluidos: do reservatório até a cabeça do poço;
- 3) Módulo do sistema de coleta: calcula o fluxo através da rede de tubulações a partir das diversas cabeças de poço até a separação e processamento;
- 4) Módulo de separação: calcula as quantidade de gás, óleo e água provenientes do poço e suas respectivas composições;
- 5) Dispositivos de medição de gás e óleo a partir dos separadores;
- 6) Módulo de condicionamento: para remoção dos contaminantes do gás;
- 7) Módulo de recuperação dos líquidos de gás natural;
- 8) Módulo de compressão/liquefação para transporte;
- 9) Módulo de cálculo do fluxo de gás pela tubulação até o consumidor final.

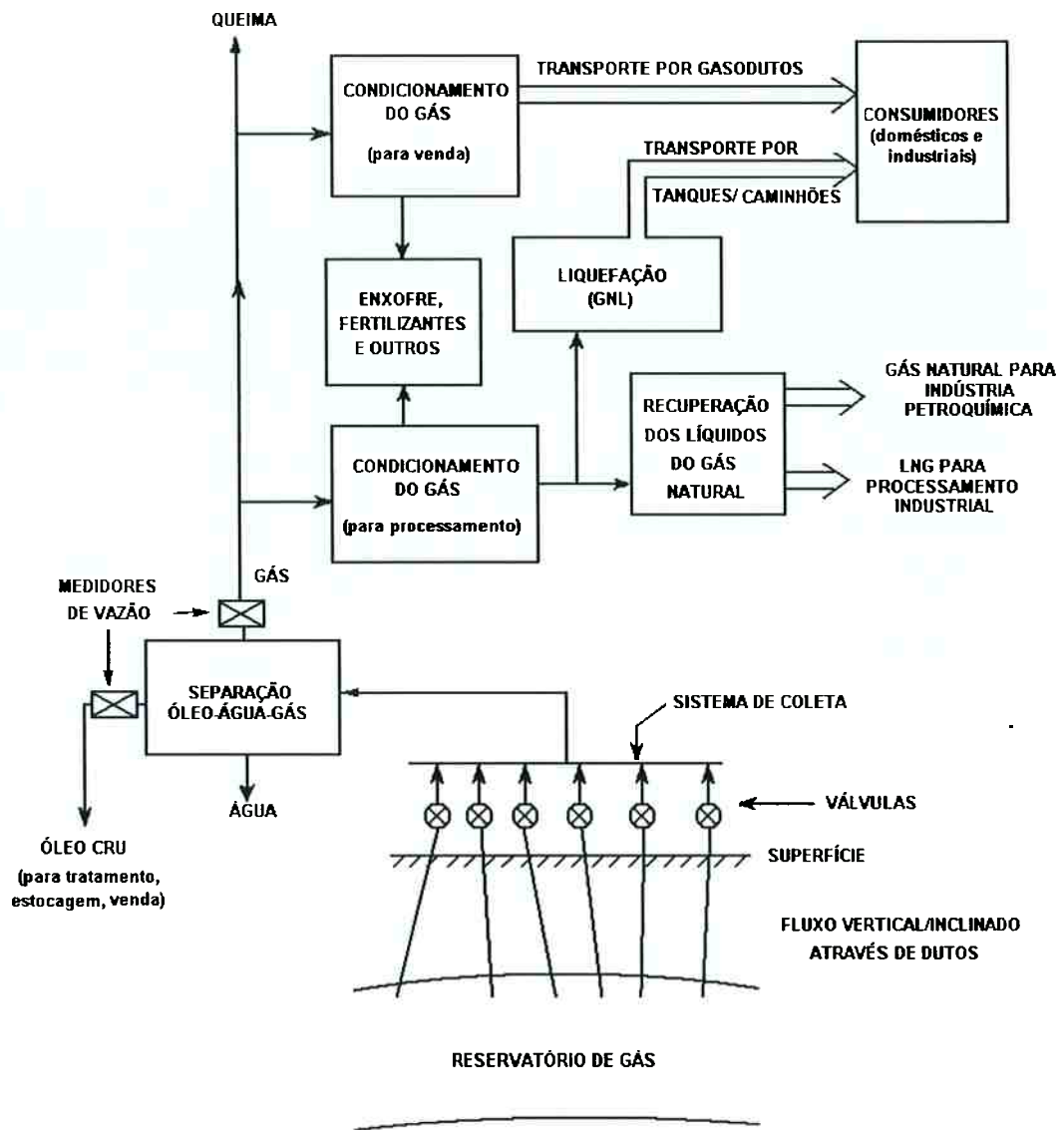


Figura 1.9 – Um Sistema Típico de Produção e Processamento de Gás Natural (KUMAR, 1987)

1.3.4 Propriedades do Gás Natural

A Tabela 1.3 mostra propriedades físico-químicas do GN.

Tabela 1.3 – Propriedades Físico-Químicas do Gás Natural (Petrobras, 2002)

Aspecto	
Estado físico	Gasoso
Cor	Incolor
Odor	Artificial ou inodoro.
Temperaturas específicas	
- Ponto de ebulição	-161,4 °C @ 760 mmHg (metano puro)
- Ponto de fusão:	-182,6 °C (metano puro).
Temperatura de auto-ignição:	482 - 632 °C.
Limites de explosividade no ar	
- Superior (LSE)	17 % v/v
- Inferior (LIE)	6,5 % v/v
Densidade de vapor:	0,60 - 0,81 @ 20 °C e Patm
Solubilidade	
- Na água	Solúvel (0,4 - 2 g/100 g).
- Em solventes orgânicos	Solúvel.
Parte volátil:	100 %

1.4 O Gás Natural Liquefeito (GNL)

O GNL é um líquido incolor e inodoro com ponto de ebulição a -161°C a pressão atmosférica. Traços de contaminantes, especialmente o mercúrio, se não adequadamente removidos podem torná-lo bastante corrosivo. Por ser um produto comercial, está sujeito a rígidas especificações para que seja livre de contaminantes que possam se solidificar e causar danos à instalações e também para ser um combustível ambientalmente aceitável. Contaminantes como o vapor d'água, dióxido de carbono e gás sulfídrico que são encontrados no GN, geralmente não existem no GNL. Também devido ao processo de produção do GNL, as concentrações de hidrocarbonetos mais pesados estão limitadas.

1.4.1 Histórico

Nesta seção é apresentada uma cronologia dos principais acontecimentos relacionados ao desenvolvimento da indústria do GNL. O material apresentado é baseado nas seguintes referências: Lom (1974), Shukri (2004), Finn e outros (1999), Ryan e outros (2001) e Barclay e Denton (2005).

A necessidade de se liquefazer o gás natural e sua aplicação em escala comercial surgiu a partir das redes urbanas de distribuição de gás nas grandes cidades. Estas instalações eram meios ineficientes de distribuição de gás pois eram dimensionadas para atender todas as variações de demanda o que exigia altos investimentos para sua instalação ao mesmo tempo em que operavam de forma subutilizada a maior parte do tempo.

Diversas tentativas foram feitas para se projetar sistemas capazes de atender aos picos de demanda sem comprometerem sua viabilidade econômica. Para isso, basicamente existem duas vias: instalações de produção de gás e de armazenamento. As primeiras, logo tornaram-se obsoletas com a produção e demanda em grande escala. As últimas, para serem econômicas, exigiam a estocagem de gás a altas pressões. A estocagem de GN a 70 atm reduz seu volume por um fator de 70 enquanto que liquefeito este fator é de aproximadamente 600.

As primeiras plantas *peak shaving*, como são conhecidas, começaram a ser construídas na década de 40 nos EUA e a construção de novas plantas foi interrompida pelo acidente seguido de incêndio na planta de armazenagem de GNL em Cleveland.

Em 1947 uma planta de liquefação de GN de grande porte foi construída em Moscou com tecnologia americana. Em 1952 foi feita uma tentativa de viabilizar o transporte de GNL por balsas de Lake Charles, Louisiana, para Chicago via Mississipi mas abortado por razões de segurança.

Foi em 1959, com a adaptação bem-sucedida de um navio petroleiro – o Methane Pioneer - aconteceu o primeiro embarque de GNL de Lake Charles para Canvey Island, no Reino Unido.

Simultaneamente, foram desenvolvidas diversas técnicas para estocagem de GNL em terra para plantas *peak shaving*. Atualmente existem diversas tecnologias solidamente estabelecidas e diversas plantas instaladas nos EUA, Europa e Rússia.

As plantas de liquefação de GN em grande escala, foco deste trabalho, visando o transporte do GNL para regiões consumidoras passou por grande desenvolvimento desde o Methane Pioneer. Os projetos de GNL desta natureza estão inseridos em uma grande cadeia de produção e logística que se inicia na extração do GN de sua fonte natural até sua regaseificação para transporte via gasodutos nos locais de consumo. A Tabela 1.4 trás uma lista de plantas existentes.

Tabela 1.4 – Plantas de Liquefação Existentes em Out/2003 (DOE/EIA, 2003)

	x 10 ⁶ t/ano GNL	Nº trens	Principal Operador	Partida	Comentários
AFRICA					
Argélia					
Arzew GL1Z	7.9	6	Sonatrach	1978	Modernizada 1997
Arzew GL2Z	8.3	6	Sonatrach	1981	Modernizada 1996
Arzew (Camel) GL4Z	0.9	3	Sonatrach	1964	Modernizada 1999
Skikda GL1K Fases I e II	6.0	6	Sonatrach	1972 / 1981	Modernizada 1999
Total Argélia	23,1	21			
Líbia					
Marsa el Brega	0.6	3	NOC	1970	1/4 cap. nom. 2.5 mta
Nigéria					
Bonny Island	6.6	2	Nigerian LNG Ltd	1999	10% acima projetado
Bonny Island Train 3	2.9	1	Nigerian LNG Ltd.	2002	
Total Nigéria	9.5	3			
TOTAL AFRICA	33.2	26			
ASIA/PACIFICO					
Austrália					
Withnell Bay	7.5	3	NWS joint venture	1989	Otimizada 1995
Brunei					
Lumut 1	7.2	5	Brunei LNG	1972	
Indonésia					
Arun Phase I			APT Arun NGL	1978	

continua

continuação da Tabela 1.4

	x 10 ⁶ t/ano GNL	Nº trens	Principal Operador	Partida	Comentários
Arun Phase II			PT Arun NGL	1984	
Arun Phase III	6.8	4	PT Arun NGL	1986	2 trens descomissionados em 2000. Falta de gás limita os volumes embarcados.
Bontang A-H	22.6	8	PT Badak NGL	1977	1977 A/B:1977; C/D:1986; E:1989; F:1993; G:1998; H:1999
Total Indonésia	29.4	12			
Malásia					
Bintulu MLNG 1	7.6	3	MLNG 1	1983	
Bintulu MLNG 2	7.8	3	MLNG 2	1994	
Bintulu MLNG 3	3.4	1	MLNG 3	2003	Um trem desativado em agosto/2003 devido a incêndio. Trem nº 2 opera com menos de 2/3 da capacidade vendida.
Total Malásia	18.8	7			
TOTAL ASIA PACÍFICO	62.9	27.0			
ORIENTE MÉDIO					
Omã					
Qalhat	7.3	2	Oman LNG	2000	Opera 10% acima do projeto e com potencial de aumentar.
Catar					
Ras Laffan	8.3	3	Qatargas	1996	Otimização elevará capacidade para 9.5 mta
Ras Laffan	6.6	2	Ras Laffan LNG Co.	1998	
Total Qatar	14.9	5			
Emirados Árabes Unidos (Abu Dhabi)					
Das Island I, II	5.7	3	ADGAS	1977/1994	
TOTAL ORIENTE MÉDIO	27.9	10			
AMÉRICAS					

continua

continuação da Tabela 1.4

	x 10 ⁶ t/ano GNL	Nºtrens	Principal Operador	Partida	Comentários
Trinidad & Tobago					
Point Fortin	9.9	3	Train 1: Atlantic LNG Co.	19992003	
Estados Unidos					
Kenai	1.4	2	Marathon/Phillips	1969	
TOTAL AMÉRICAS	11.3	3			
TOTAL MUNDIAL	135.3	66			

O GNL produzido é descarregado em terminais de armazenamento e regaseificação ou ainda pode ser regaseificado no próprio navio de transporte. A Tabela 1.5 mostra os terminais existentes.

Tabela 1.5 – Terminais de Importação de GNL Existentes em Out/2003 (DOE/EIA, 2003)

	x 10 ⁶ ton	Estocagem (m ³)	Principal Operador	Partida	Comentários
EUROPA					
Bélgica					
Zeebrugge	4.8	260,000	Fluxys	1987	
França					
Fos-sur-Mer	5.9	150,000	Gaz de France	1972	<i>Revamped</i> 1995- 2000
Montoir-de- Bretagne	8.3	360,000	Gaz de France		
Total França	14.1	510,000			
Grécia					
Revithoussa	1.9	144,000	DEPA	2000	
Itália					
Panigaglia	2.7	100,000	SNAM	1971	
Portugal					
Sines	3.0	240,000	Gas de Portugal	2003	
Espanha					

continua

continuação da Tabela 1.5

	x 10 ⁶ ton	Estocagem (m ³)	Principal Operador	Partida	Comentários
Barcelona	6.4	240,000	Enagas	1968 1996	Expansão planajeda p/ 2005
Huelva	2.9	160,000	Enagas	1988	Expansão planajeda 2005
Cartagena	2.7	160,000	Enagas	1989	Expansão planajeda 2005
Bilbao	2.7	320,000	BP, RepsolYPF, Iberdrola, EVE	2003	Commissionado em agosto 2003
Total Espanha	14.7	880,000			
Turkey					
Marmara Ereğlisi	4.6	255,000	Botas	1994	
Reino Unido					
Canvey Island				1964	Desativado
TOTAL EUROPA	45.8	2,389,000			
ASI/PACIFICO					
Japão					
Chita Kyodo	8.0	300,000	Toho Gas	1977	
Chita	12.0	640,000	Chubu Electric	1983	
Fukuoka	0.6	70,000	Fukuoka Gas	1993	
Futtsu	16.0	860,000	Tokyo Electric	1985	
Hatsukaichi	0.4	170,000	Hiroshima Gas	1996	
Higashi-Ohgishima	14.7	540,000	Tokyo Electric	1984	
Himeji	8.3	520,000	Osaka Gas	1979	
Himeji Joint	4.0	1,440,000	Osaka Gas/ Kansai Electric	1984	
Kagoshima	0.1	36,000	Kagoshima Gas	1996	
Kawagoe	7.7	480,000	Chubu Electric	1997	
Negishi	13.6	1,250,000	Tokyo Gas	1969	
Niigata	17.1	720,000	Tohoku Electric	1984	
Ohgishima	5.1	600,000	Tokyo Gas	1998	
Senboku I	2.5	180,000	Osaka Gas	1972	
Senboku II	13.1	1,510,000	Osaka Gas	1977	
Shin-Minato	8.0	80,000	Sendai Gas	1997	

continua

continuação da Tabela 1.5

	x 10 ⁶ ton	Estocagem (m ³)	Principal Operador	Partida	Comentários
Oita	5.1	460,000	Kyushu Electric	1990	
Sodegaura	27.7	2,660,000	Tokyo Gas	1973	
Sodeshi	6.4	174,300	Shizuoka Gas	1997	
Tobata	6.4	480,000	Kyushu Elec.	1977	
Yanai	2.4	480,000	Chugoku Electric	1990	
Yokkaichi LNG Centre	8.8	320,000	Toho Gas	1987	
Yokkaichi Works	0.6	160,000	Chubu Elec.	1991	
Total Japão	188.3	14,130,300			
Coréia do Sul					
Pyeongtaek	13.3	1,000,000	Korea Gas	1986	
Incheon	22.4	1,000,000	Korea Gas	1996	
Tongyeong	5.0	300,000	Korea Gas	2002	
Total Coréia do Sul	40.7	2,300,000			
Taiwan					
Yung An	7.5	430,000	CPC	1990	Otimizado 2001
TOTAL ASIA	236.4	16,860,300			
AMERICA do NORTE					
Rep. Dominicana					
Andres	2.0	160,000	AES Corp	2003	
Puerto Rico					
Guayanilla Bay (Ecoelectrica LP)	0.7	160,000	Edison Mission	2000	
EUA Continental					
Everett, MA	5.5	155,000	Tractebel	1971	
Lake Charles, LA	7.7	286,200	Southern Trunkline– Livre Acesso	1980, Reaberto 1989	
Elba Island, GA	5.2	118,000	El Paso – Livre Acesso	1978; Reaberto 2002	
Cove Point, MD	7.7	180,000	Dominion Resources– Livre Acesso	1978; Reaberto 2003	
Total EUA Continental	26.0	379,000			
TOTAL AMÉRICA DO NORTE	28.7	699,000			
TOTAL MUNDIAL	310.8	19,948,300			

Todo o transporte do GNL entre as diversas plantas e terminais com rota fixa ou não é feita pelos navios metaneiros. Os 20 mais modernos estão mostrados na Tabela 1.6.

Tabela 1.6 – Navios Metaneiros em Operação em Out./2003 (DOE/EIA, 2003)

Nome	Ano construção	Capacidade (m ³)	Proprietário	Projeto/ Rota	Disponibilidade
N/B Mitsubishi H.I. 2184	Out. 05	138.000	Leif Hoegh/MOL/ Statoil	SNOHVIT LNG	Fixo
N/B Daewoo H.I. 2223	Nov. 05	140.500	Bergesen D.Y. ASA	Nigéria– EUA/Europa	Fixo
N/B Hyundai H.I. 1471	Nov. 05	141.000	Bonny Gas Transport (NLNG)	Nigéria– EUA/Europa	Fixo
N/B Mitsui S.B. 1564	Nov. 05	140.000	K Line/Statoil/lino	SNOHVIT LNG	Fixo
N/B Samsung H.I.	Nov. 05	145.000	MOL/NYK/KLine/ Q-Ship	Ras Laffan para Japão	Fixo
N/B Daewoo H.I.	Nov. 05	145.700	Maran		Disponível
N/B De l'Atlantique	Dez. 05	153.000	Gaz de France GDF		Fixo
NBK Kawasaki H.I. 1562	Dez. 05	145.000	GOSO	Oman-Espanha	Fixo
N/B Daewoo H.I.	Dez. 05	145.700	Maran		Fixo
N/B Mitsubishi H.I. 2185	Jan. 06	138.000	Leif Hoegh/MOL	SNOHVIT LNG	Fixo
N/B Daewoo H.I.	Jan. 06	145.700	Golar LNG		Disponível
N/B Daewoo H.I. 2224	Mar. 06	140.500	Bergesen D.Y. ASA	Nigeria– U.S./Europe	Fixo
N/B Hyundai H.I. 1472	Mar. 06	141.000	Bonny Gas Transport (NLNG)	Nigéria– EUA/Europa	Fixo
N/B Mitsubishi H.I. 2187	Mar. 06	135.000	Tokyo Electric/NYK/ Mitsubihshi		Fixo

continua

continuação da Tabela 1.6

Nome	Ano construção	Capacidade (m ³)	Proprietário	Projeto/ Rota	Disponibilidade
N/B Kawasaki H.I. 1532	Abr. 06	140.000	Kline/Mitsui&Co/St atoil	SNOHVIT LNG	Fixo
N/B Kawasaki H.I. 1545	Sep 06	145.000	Osaka Gas/NYK		Fixo
NBK Kawasaki H.I. 1540	2006	145.000	MOL	Para Japão	Fixo
N/B Samsung H.I.	2006	145.000	BG		Fixo
N/B Samsung H.I.	2006	145.000	BG		Fixo
N/B Samsung H.I.	2006	145.000	BG		Fixo
TOTAL em 2006		25.168.616			Fixo

1.4.2 O GNL na Cadeia do Gás natural

Das diferentes formas de inserção do GNL na cadeia do GN, apresentamos aqui das plantas de base (*base load*) de grande porte destinadas a produção de GNL para transporte marítimo a longas distâncias.

O surgimento das rotas marítimas para transporte de gás natural na forma de GNL tem sua origem à medida que as rotas tradicionais de transporte de gás via gasodutos não são mais suficientes para ligar as regiões produtoras aos grandes centros consumidores. Isso pode acontecer isoladamente ou pela combinação dos seguintes fatores: exaustão das fontes próximas, a baixa confiabilidade de suprimento e alto custo do transporte via gasoduto.

Do ponto de vista político e econômico, algumas características básicas para a formação de uma cadeia de GNL são:

- existência de reservas provadas suficientes para o mínimo de 15 anos até 30 anos de produção;

- demanda local doméstica e industrial de GN ser inexistente ou muito baixa, assim como sua expectativa de crescimento;
- GN local com baixo valor comercial, sem possibilidade de aproveitamento termoelétrico ou como matéria-prima petroquímica;
- clima político local favorável.

Em relação à proximidade relativa ao campo produtor de gás, os elementos essenciais da cadeia podem ser representados esquematicamente como mostra a Figura 1.10:

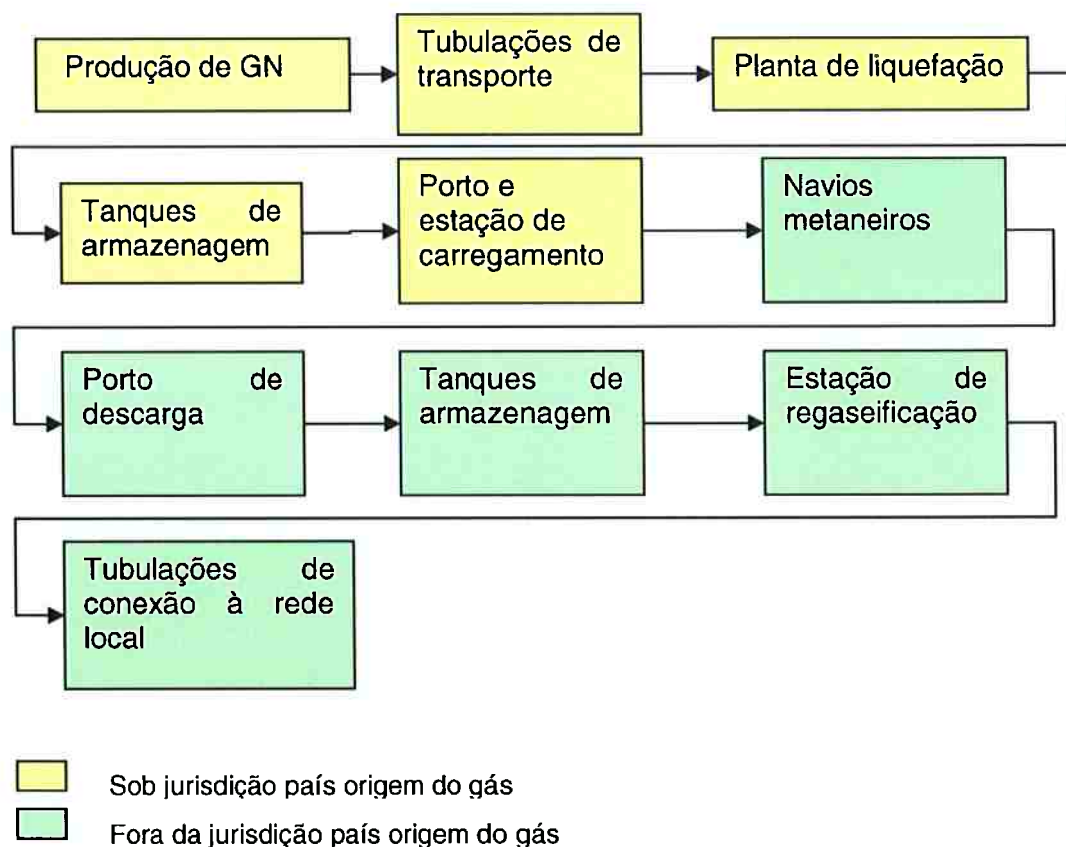


Figura 1.10 – A Cadeia do GNL

2 As Tecnologias para Produção de GNL

2.1 Plantas de Liquefação de Gás Natural

2.1.1 Introdução

As etapas de refrigeração e liquefação do gás natural representam a maior parcela do investimento em um projeto de GNL. A necessidade de compressores de grande capacidade, equipamentos de alta pressão, materiais de construção especiais, trocadores de calor complexos e tancagens de grande capacidade contribuem para os altos investimentos na cadeia do GNL.

2.1.2 Purificação e Condicionamento do Gás

O gás extraído na boca do poço é minimamente purificado antes de ser transportado por gasodutos até a planta mais próxima. Assim, uma série de impurezas presentes tais como água, dióxido de carbono, sulfetos de hidrogênio, hidrocarbonetos pesados e outras fazem com que seja necessária uma limpeza freqüente dos dutos com PIGs raspadores para garantir o fluxo contínuo de gás.

A primeira etapa de condicionamento do GN ocorre na unidade de processamento de GN (UPGN) e consiste de processos para remoção de líquidos (*trap* e dispositivos de coleta). Dependendo da temperatura ambiente, da quantidade de água presente no gás e queda de pressão pode ser necessário a adição de glicol ou metanol como anti-congelantes. Estes, por sua vez, são separados das correntes líquidas por meio de destilação a pressão atmosférica.

O próximo passo consiste em resfriar o gás a temperaturas baixas o suficiente para que haja condensação e desta forma água e hidrocarbonetos pesados são separados em um vaso separador (*knock-out drum*).

O processo seguinte remove H_2S e CO_2 promovendo sua suavização (*gas sweetening*).

Após a remoção de impurezas ácidas o gás natural geralmente encontra-se saturado de água que precisa ser removida antes dos processos de liquefação. Para secagem do gás existem três possibilidades: i) por simples refrigeração, em que o

gás é expandido em um turbo-expansor para que a água e hidrocarbonetos pesados sejam removidos em um vaso de *knock out*; ii) desidratação com emprego de glicol (di, tri e tetraetileno glicol) sendo que a concentração de hidrocarbonetos pesados permanece inalterada devendo ser removida posteriormente e iii) por meio de contato com sólidos dissecantes como a alumina, a sílica gel e peneiras moleculares para os casos de baixa concentração de água, hidrocarbonetos, CO₂ e compostos de enxofre.

A concentração de impurezas no gás dependerá do processo de liquefação subsequente e particularmente da susceptibilidade dos trocadores de calor e dispositivos de expansão à restrições de fluxo e entupimento. Geralmente é desejável que a concentração de água não passe de 1 ppm, que a concentração de dióxido de carbono fique entre 50 e 150 ppm e de H₂S entre 30 e 50 ppm embora considerações quanto ao odor, toxicidade e corrosão o limitem a 3 ppm ou menos. Outros hidrocarbonetos não são restritos pois podem ser separados nas plantas de liquefação embora seja mais barato separá-lo antes da liquefação.

2.2 Ciclos Clássicos de Liquefação

2.2.1 Ciclo Cascata

Para refrigerar um gás, calor deve ser retirado do gás comprimido por meio de água de resfriamento, se isto for possível, ou por meio de um refrigerante em evaporação de a temperatura necessária for inferior à ambiente. A tabela 4.2 mostra que apenas o propano pode ser liquefeito trocando calor com água de resfriamento quando em pressões moderadamente altas. Todos os demais necessitam de um refrigerante para liquefazerem.

Um único refrigerante permite um resfriamento em torno de 60 a 90°C e, caso seja necessário atingir temperaturas ainda mais baixas, mais de um refrigerante pode ser necessário para servir de elemento intermediário na transferência de calor do gás resfriado para água ou ar de resfriamento.

O uso de uma série de refrigerantes, ou cascata, para refrigerar gases de baixo ponto de ebulição como o metano dá nome ao processo aplicado para produção de

GNL. Conforme mostra a Figura 2.1 , o ciclo cascata convencional emprega propano, etileno e metano como fluidos refrigerantes.

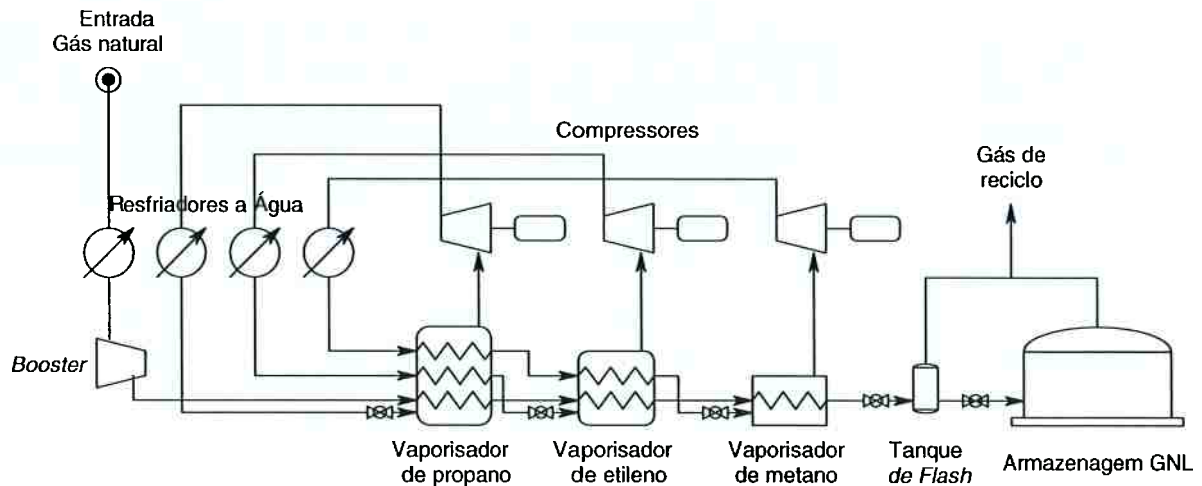


Figura 2.1 – Diagrama Simplificado de um Ciclo Cascata Convencional (LOM, 1974)

As razões para uso do ciclo em cascata ao invés da compressão e expansão de um único refrigerante são várias. Primeiro, a pressão de compressão deveria ser extremamente alta para que fosse possível rejeitar calor para o ambiente e absorvê-lo a -161°C . Por exemplo, o metano deveria ser comprimido a 1200 atm para que fosse possível a liquefação a 1,0 atm. Isso exigiria compressores caríssimos além do fato de que é necessário que a temperatura de condensação seja bastante inferior à crítica para aproveitamento do calor latente na vaporização.

A evaporação do refrigerante a baixas pressões para máxima refrigeração exigiria um vaso de grandes proporções, além de um primeiro estágio de compressão de grandes proporções, itens bastante caros para as baixas temperaturas envolvidas.

Um aspecto importante no projeto de ciclos cascata é a diferença de temperatura entre os dois fluidos nos trocadores de calor. Quanto maior esta diferença, maiores as irreversibilidades do processo e, portanto, maior o consumo de energia. Por outro lado, quanto menor a diferença, maior a área de troca térmica necessária e o custo do trocador. Uma solução de compromisso é claramente necessária.

2.2.2 Ciclos Cascata Modificados

2.2.2.1 Em Ciclo Fechado

Enquanto nos ciclos em cascata convencionais os fluidos refrigerantes são providos de fonte externa e cada um opera em um ciclo fechado, uma forma de ciclo cascata modificado consiste de uma série de trocadores de calor que usam os hidrocarbonetos mais pesados presentes no gás natural como refrigerantes intermediários. Com isso, é possível eliminar o bombeio das correntes de hidrocarbonetos pesados separados durante a liquefação ao mesmo tempo em que é eliminada a necessidade de abastecer a planta com fluido refrigerante externo. A Figura 2.2 mostra, de forma bastante simplificada, os fluxos de um ciclo cascata modificado.

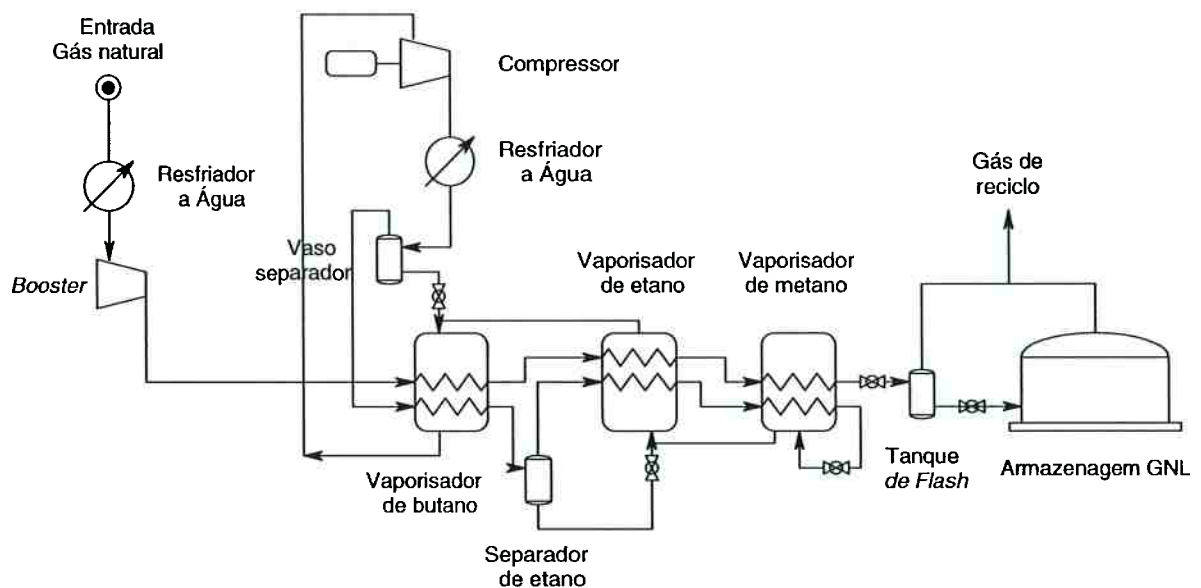


Figura 2.2 – Diagrama de Fluxo Simplificado de um Ciclo Cascata Modificado (LOM, 1974)

Os refrigerantes em cada um dos trocadores de calor são separados do próprio gás natural de alimentação por meio de condensação fracionada a diferentes temperaturas. Os refrigerantes e o gás fornecido não se misturam embora os componentes dos refrigerantes passem todos pelo mesmo compressor sendo, posteriormente, separados em vasos separadores (*knock out drum*).

2.2.2.2 Em Ciclo Aberto

As maiores vantagens dos ciclos cascata modificados se comparados com os convencionais são o menor número de compressores e trocadores de calor necessários. Instrumentação, espaço físico e investimentos tendem a ser reduzidos e o sistema como um todo é bastante simplificado. Também contribui, o fato de não necessitarem suprimento externo de refrigerantes o que elimina a necessidade de vasos para sua estocagem. As perdas no processo podem ser repostas pela extração de componentes pesados do gás de alimentação. Estes sistemas são, no entanto, menos flexíveis que o convencional e seu desempenho depende, em grande parte, de seu projeto processual.

Um ciclo cascata modificado do tipo aberto é mostrado na Figura 2.3 abaixo

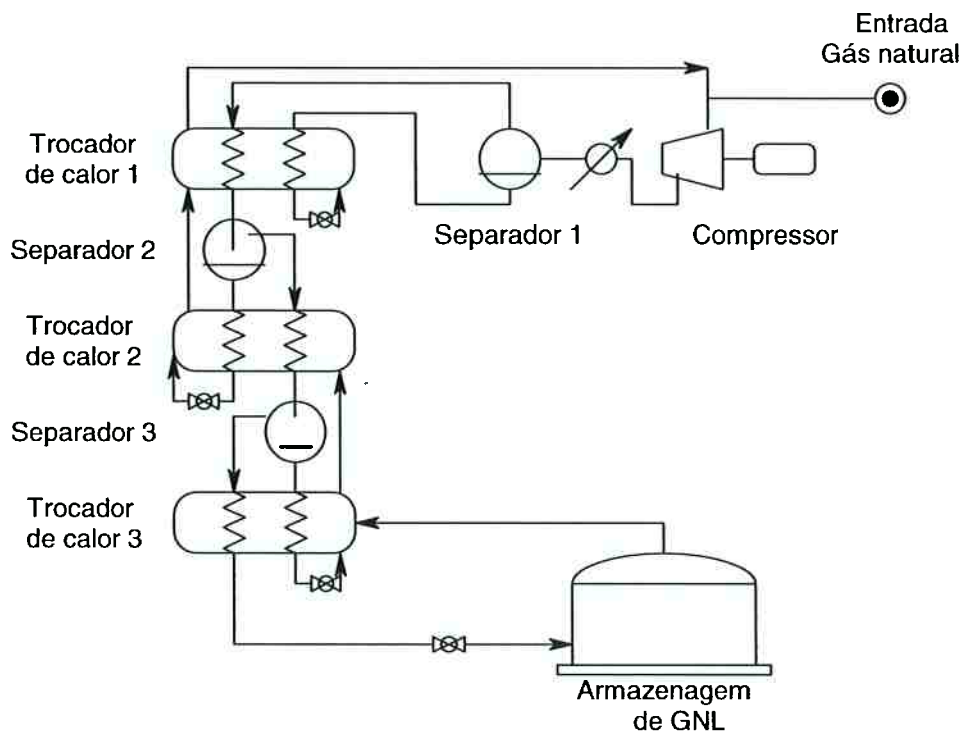


Figura 2.3 – Diagrama de Fluxo Simplificado de um Ciclo Cascata Modificado – Ciclo Aberto (LOM, 1974)

Os ciclos cascata convencionais necessitam de menor potência instalada e permitem partidas e paradas rápidas uma vez que não é necessário preparar os fluidos refrigerantes a partir da alimentação.

2.2.3 MCR

Um sistema híbrido de liquefação em que o gás é pré-resfriado por um sistema de refrigeração a propano idêntico ao usado no primeiro estágio do ciclo cascata convencional e que depois passa num sistema multi-estágio de liquefação a refrigerante misto é bastante usado por ser mais eficiente que o processo a refrigerante misto simples e menos complexo em termos de arranjo e operação que o cascata convencional. O MCR (*modified cascade refrigeration*) pré-resfriado a propano é o sistema mais usado nas plantas de GNL.

A Tabela 2.1 mostra a diversidade dos ciclos de liquefação comerciais. Pequenas variações nos projetos têm impacto significativo nos investimentos e eficiência da planta.

Tabela 2.1 – Trens de Liquefação por Processo (BARCLAY e DENTON, 2005)

Processos (nov/2004)	Detentor da Licença	Número de trens			Partida	% do mercado
		Operando	Em construção	Planejados		
MR pré-resfriado a propano	APCI	55	9	ND	1972	77
Cascata otimizado	Conoco-Phillips	3	4	ND	1999	9
MR (single)	APCI	4	-	-	Déc. 70	5
Cascata clássico	Marathon/Phillips	1	-	-	1969	1
MR Dual-pressure TEAL	Technip / Air Liquide	1	-	-	-	1
PRICO MR único estágio	Black & Veatch	2	-	-	-	2
Processos MR (C3MR e Dual-MR)	Shell	-	3	ND	2005	4
Multifluid Cascade	Linde-Statoil	-	1	ND	2006	1
AP-X	APCI	-	-	3	2007/2008	0

Nota: % do mercado calculada com base no total de trens em operação e construção

A dificuldade de se comparar diferentes plantas de liquefação e seus ciclos se deve ao fato de que nem as condições iniciais nem as finais do gás são as mesmas. Apenas para citar alguns exemplos: a temperatura do gás de entrada pode estar acima ou abaixo da ambiente e sua pressão pode variar em uma ampla faixa, parte do gás suprido de um gasoduto pode ser liquefeito e o restante devolvido a uma rede de mais baixa pressão, a temperatura da água ou ar de resfriamento podem variar em mais de 20°C. Além disso, pode haver variações de operação conforme a finalidade da planta: operação contínua ou de base ou para atendimento de demandas de pico. O produto liquefeito pode ser gerado e simplesmente mantido à pressão atmosférica, pode ser mantido a baixa temperatura por longos períodos ou bombeado a altas pressões. Finalmente a composição química do gás pode variar. Ao invés de comparar diferentes ciclos, faz mais sentido obter a máxima eficiência de cada planta que é equivalente à mínima energia de compressão necessária para liquefazer o gás natural nas condições do ciclo.

A Tabela 2.2 mostra a mínima energia requerida para diferentes temperaturas e pressões de entrada e três diferentes temperaturas ambiente para o caso da liquefação do metano puro a ser mantido em equilíbrio com seu vapor a 1 bar de pressão externa.

Tabela 2.2 - Trabalho Mínimo para Liquefação do Metano (LOM, 1974)

Pressão do gás na entrada (atm)	Temperatura do gás na entrada (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Energia mínima para liquefação (kWh/kg)
1	27	27	0,303
1	41	41	0,330
15	27	27	0,188
30	27	27	0,159
50	27	27	0,137
35	16	16	0,138

operacionalmente menos flexíveis a baixas vazões, este problema pode ser contornado com recirculação parcial e *vanes* ajustáveis na admissão.

Ambos os turbo-compressores apresentam taxas de compressão entre 3 e 10 e o limite máximo do conjunto é dado pela necessidade de resfriamento entre os estágios e a dificuldade de construção de longos rotores e carcaças. A capacidade dos compressores, em geral, está condicionada mais ao porte do acionamento do que por restrições de projeto em si.

Dentre as diversas opções de acionamento existentes, atualmente a tendência é o uso de turbinas a gás de grande porte. O custo deste equipamento foi significativamente reduzido ao longo dos últimos anos, ao mesmo tempo em que apresenta grande flexibilidade operacional e elimina a necessidade de redutores e consegue uma condição de partida satisfatória.

A Tabela 2.3 mostra as condições de operação e os materiais empregados na construção de compressores para plantas de GNL com ciclo cascata e a refrigerante misto.

Tabela 2.3 – Compressores para Plantas de GNL (LOM, 1974)

Refrigerante	Pressão de descarga (atm)	Temperatura de entrada (°C)	Material de construção
Propano	14 - 17	-34 a -36	Aço carbono de grão fino (LCB) ou 2% Ni (LC2)
Etileno	20 - 30	-101 ou -115	Aço carbono 5% Ni ou 4% Ni
Metano	30 - 35	-162 ou -115	2DM Ni resist ou AC 5% Ni
Refr. Misto	25 - 40	-34 a +40	LCB ou WCB

2.2.5 Trocadores de Calor Criogênicos para Produção de GNL

Os trocadores de calor casco-tubo comuns, quando utilizados, são usados no pré-resfriamento de GN com água de resfriamento e em temperaturas acima de -45°C . Os trocadores criogênicos gás-gás do tipo *pipe-within-pipe* propiciam condições ideais de troca em contra-corrente porém, têm custo elevado, grande perda de carga e sofrem com entupimentos.

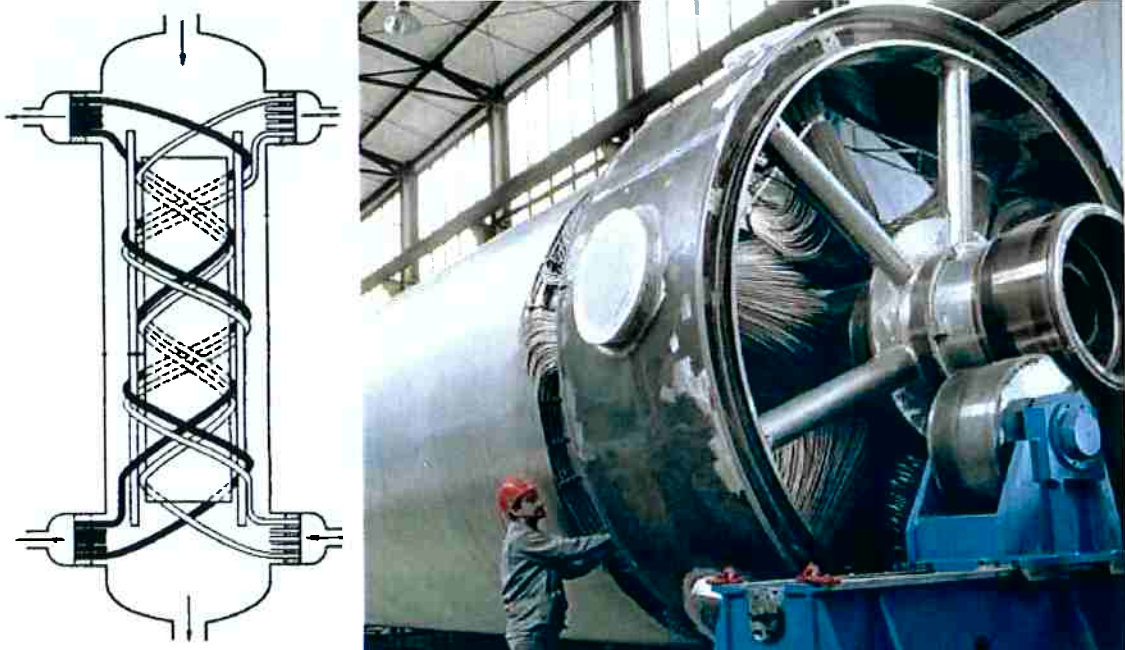


Figura 2.4 – Seção Transversal Trocador *Spiral Wound* (LOM, 1974) e Aspecto Construtivo (LINDE, 2007)

O trocador de calor mais usado nas plantas de GNL de grande porte é o *spiral wound* (SWHE). Os trocadores deste tipo consistem em múltiplas camadas de tubos de pequeno diâmetro enrolados em espiral e formando diversas camadas espaçadas em torno de um tubo central (*mandrel*) cujo conjunto é montado verticalmente no interior de um vaso de pressão conforme mostra a Figura 2.4. São trocadores eficientes, compactos, robustos e pouco sujeito a falhas. Podem ser projetados para uma ampla faixa de pressões e temperaturas assim como podem operar com fluidos mono ou bifásicos. Diversas correntes podem ser inseridas em um único trocador. Os materiais de fabricação mais comuns são alumínio, aço inox e

aço liga contendo níquel. Trocadores com áreas até 40000 m² e pesando 250 t foram construídos (LINDE, 2007).

Outro tipo de trocador de calor muito usado em plantas de GNL, em particular as de pequeno e médio porte, são os *plate-fin* (PFHE). Este trocadores são fabricados em alumínio pela sobreposição de placas planas e corrugadas. Estes últimas formam os canais por onde escoa o fluido de processo. Diversas correntes podem ser combinadas em um único trocador. Coletores tubulares bipartidos formam conduzem o fluido até os bocais de conexão conforme mostra a Figura 2.5.

As principais vantagens deste tipo de trocador são o arranjo compacto e a excelente relação de área de troca *versus* perda de carga. Devido a seu arranjo em um único bloco com pequenas passagens internas, não tolera choques térmicos, solicitações cíclicas de pressão e temperatura, grandes diferenças de temperatura entre fluidos e está sujeito a incrustações (LINDE, 2007).

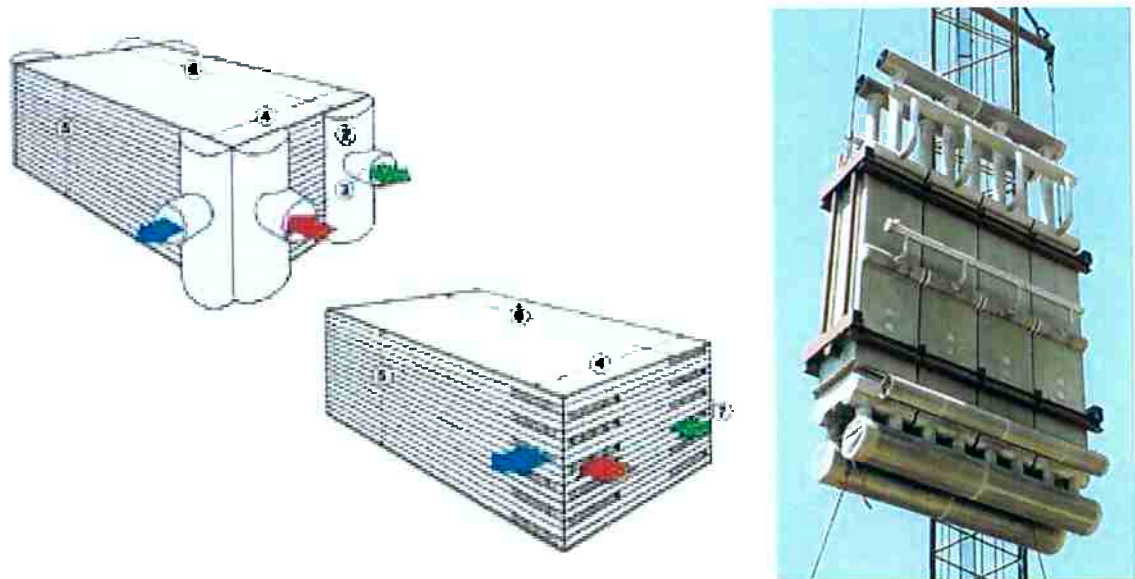


Figura 2.5 – Seção Trocador *Plate-Fin* e Aspecto Externo (LINDE, 2007)

A Tabela 2.4 mostra um comparativo entre os trocadores SWHE e PFHE.

Tabela 2.4 – Comparativo de Trocadores SWHE e PFHE (LINDE, 2007)

	PFHE	SWHE
Características	Extremamente compacto, até 10 correntes	Robustez, compacto
Fluidos	Muito limpos, não corrosivos	-
Área de troca térmica	300 a 1000 m ² /m ³	50 a 150 m ² /m ³
Materiais	Alumínio	Alumínio, aço inox, aço carbono
Temperaturas de projeto	-269 °C a +65 °C	Sem restrições
Aplicações	Operação uniforme, espaço para instalação reduzido	Altos gradientes de temperatura

2.2.6 Válvulas de Controle

Algumas características especiais são necessárias às válvulas criogênicas. A primeira delas, é o emprego de PTFE ou Kel-F, matérias capazes de manter elasticidade suficiente para vedação à baixas temperaturas. Cuidado deve ser tomado para evitar a passagem de sólidos tais como cristais de gelo de podem danificar as vedações.

Os materiais empregados na construção de corpo de válvula e trim devem manter sua ductibilidade a baixas temperaturas e terem coeficientes de expansão térmica similares desde temperatura ambiente até a temperatura de trabalho para evitar vazamentos. Os mais comumente empregados são: ligas de níquel, aços inoxidáveis austeníticos, cobre e alumínio.

A seleção do tipo de válvula a ser empregada dependerá de fatores tais como serviço, requisitos dimensionais e de peso (importantes ao serem resfriadas), estanqueidade, facilidade de manutenção, tendência a cavitação, isolamento térmico e custo.

2.3 Tecnologias para Produção de GNL em Pequena e Média Escala

2.3.1 Processos para Produção de GNL

Tendo em vista que o consumo específico de energia não é um fator desprezível na indústria do GNL, novos processos e melhorias naqueles existentes são as metas de empresas do setor. Outros fatores determinantes para seleção da tecnologia empregada em plantas de pequena e média escala é a eficiência térmica global, a segurança e os custos operacionais.

Muitas das tecnologias aplicadas em plantas de pequena e média escala são derivadas daquelas desenvolvidas originalmente para plantas de grande porte, ou seja, com capacidade acima de 1,5 milhões t/ano e que usavam o princípio da refrigeração em cascata ou simples mistura de fluidos refrigerantes.

Novas tecnologias, como as detalhadas abaixo para produção em pequena e média escala, têm sido objeto de atenção pela flexibilidade operacional, custo e prazos para entrada em operação reduzidos, o que cria alternativas inovadoras para disponibilização de GNL ao mercado. As plantas de pequena escala de produção podem ser disponibilizadas em módulos prontos para serem instaladas e colocadas em operação. Os custos estimados variam entre US\$ 1500/MBTU a US\$ 2500 /MBTU. Uma parcela considerável dos investimentos concentram-se no tratamento do GN (CASCONE, 2005).

2.3.2 Classificação das Plantas de Pequena Escala

Sob uma ampla perspectiva, as plantas de pequena escala podem ser divididas em dois grupos: as de ciclo aberto, em que o fluido refrigerante é uma parcela do próprio GN fornecido à planta, e, as de ciclo fechado, em que a refrigeração é obtida por um ou mais fluidos refrigerantes que trabalham em sistemas separados. A Tabela 2.5 abaixo mostra um resumo de alguns ciclos comerciais existentes com dados sobre tecnologia, eficiência e capacidade.

Tabela 2.5 –Tecnologias para Liquefação em Pequena e Média Escala (BGAZO e outros, 2006)

Classificação	Ciclo de Refrigeração	Processo de Liquefação	Eficiência (kWd/t GNL)	Capacidade	Fonte
Ciclo fechado	MR	PRICO	16,8	1,3 mta (3570 t/d)	SALOF, 2006
		GTI	(1)	70 t/d	GTI, 2003
		Kryopac PCMR	13,0	210 t/d	SALOF, 2006
	TEX (N ₂)	Hamworthy	33,3	30 a 500 t/d	HAMWORTHY, 2006
	TEX (N ₂ e C ₁)	Pre-cooled Dual TEX (2)	13,0	0,5 mta (1370 t/d)	FOGLIETTA, 2004
Ciclo aberto	TEX	Kryopac EXP	15,5	147 t/d	SALOF, 2006
		Idaho (Letdown)	(1)	700 t/d	CASCONE, 2005
		Stirling	(1)	1,2 t/d a 10 t/d	KIRILLOV, 2004
	Tubo Vórtice	-	(1)	12 t/d	KIRILLOV, 2004

Notas: (1) não disponível; (2) simulado

As plantas a refrigerante misto (MR, do inglês *Mixed Refrigerant*) baseiam-se na idéia do contínuo resfriamento do fluxo de GN pelo uso de uma mistura especialmente projetada de refrigerantes que melhor se aproxima da curva de refrigeração do GN. A mistura geralmente contém metano e outros hidrocarbonetos menos voláteis e um gás não condensável, sendo comum o uso de nitrogênio. As plantas MR são de operação mais complexa que as demais e exigem instalações específicas para recebimento, transferência e estocagem de refrigerantes o que pode aumentar o risco das instalações.

Do ponto de vista termodinâmico, os ciclos com turbo-expansores (TEX) são teoricamente mais eficientes que os mais avançados ciclos a refrigerante misto empregados em plantas de grande porte. Os turbo-expansores modernos podem atingir eficiências superiores a 85% (CASCONE, 2005) enquanto que os mais antigos tinham eficiências entre 60 e 70%. Teoricamente ciclos com dois expansores (*Dual TEX*) são ainda mais eficientes (BARCLAY e DENTON, 2005).

2.3.3 As Principais Tecnologias

Abaixo as tecnologias disponíveis para produção de GNL com potencial para aplicações no Brasil.

2.3.3.1 Black & Veatch PRICO

Neste ciclo MR uma mistura de nitrogênio, metano, etano, propano e iso-pentano (SHUKRY, 2004) é usada para obter a melhor aproximação com a curva de refrigeração do GN. Composição, temperatura e pressão dos refrigerantes são controladas. Líquidos de GN são removidos antes da obtenção de GNL.

A Figura 2.6 mostra o fluxograma de processo.

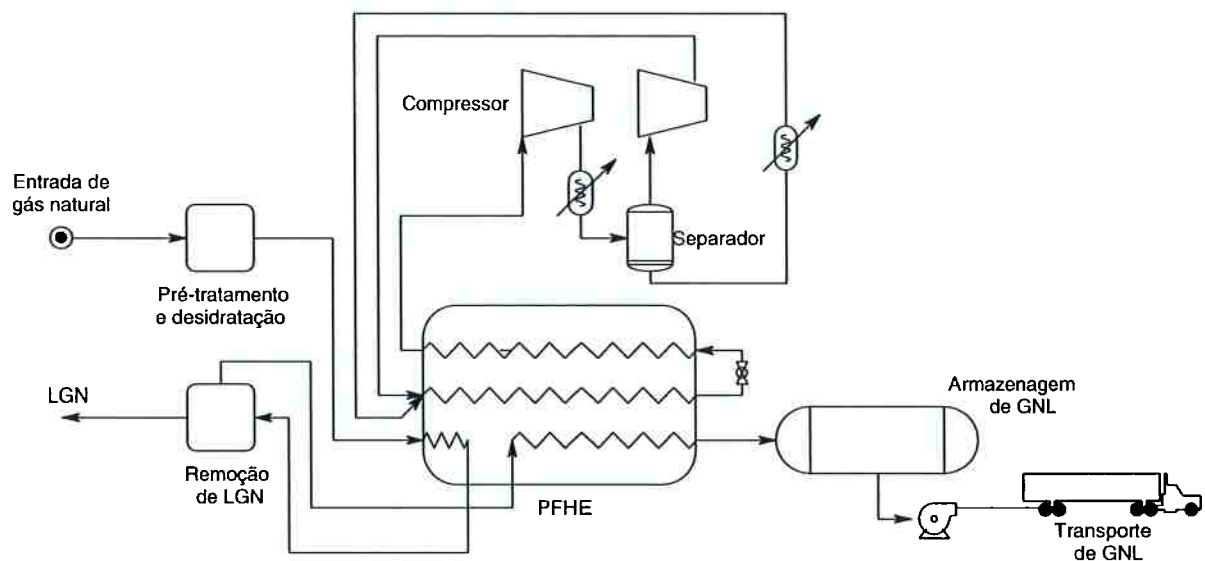


Figura 2.6 – Processo PRICO - *Poly Refrigerant Integrated Cycle Operations* (PRICE, 2005)

O processo PRICO foi desenvolvido inicialmente para plantas de base. Atualmente é pode ser considerado um processo para plantas de médio porte, com capacidade até 1,3 milhão t/ano. O trocador de calor empregado é do tipo PFHE de tecnologia não-proprietária. Um único conjunto compressor é necessário.

2.3.3.2 Ciclo a Refrigerante Misto GTI

O sistema de liquefação de GN desenvolvido pelo GTI consiste de um ciclo de refrigeração simples que opera com uma mistura de fluidos refrigerantes (nitrogênio, metano, etano, iso-butano e iso-pentano) disponível comercialmente no mercado americano. O fluxograma abaixo mostra o processo de liquefação e instalações de limpeza e armazenagem necessários.

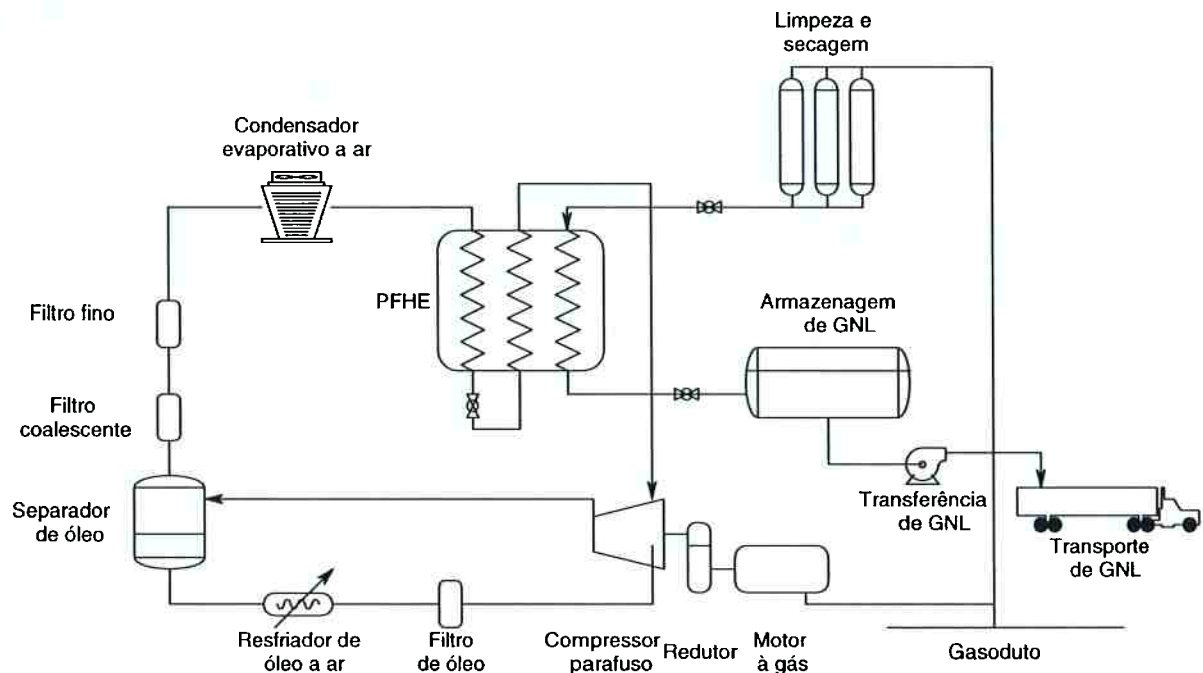


Figura 2.7 – Fluxograma do Sistema para Liquefação de GN (GTI, 2003)

As condições de contorno consideradas no desenvolvimento do sistema são: capacidade para 1,7 t/d de GNL, pressão do GN na entrada do sistema 2,1 kgf/cm² composição do gás natural baseada na média das composições de 10 fontes encontradas nos EUA, ampla faixa de temperaturas ambiente, máximo uso de equipamentos e componentes disponíveis comercialmente podendo ser passíveis de customização.

Após diversos testes a pequena planta apresentou uma eficiência média de 70% quando operando próximo de sua capacidade nominal.

2.3.3.3 Kryopac PCMR System

Este ciclo MR usa uma mistura de nitrogênio, metano, etano, propano, butano e pentano cuja composição é projetada para obter a melhor aproximação com a curva de resfriamento do GN de entrada tornando assim o processo mais eficiente possível. Os trocadores são do tipo PFHE não proprietários em arranjo compacto.

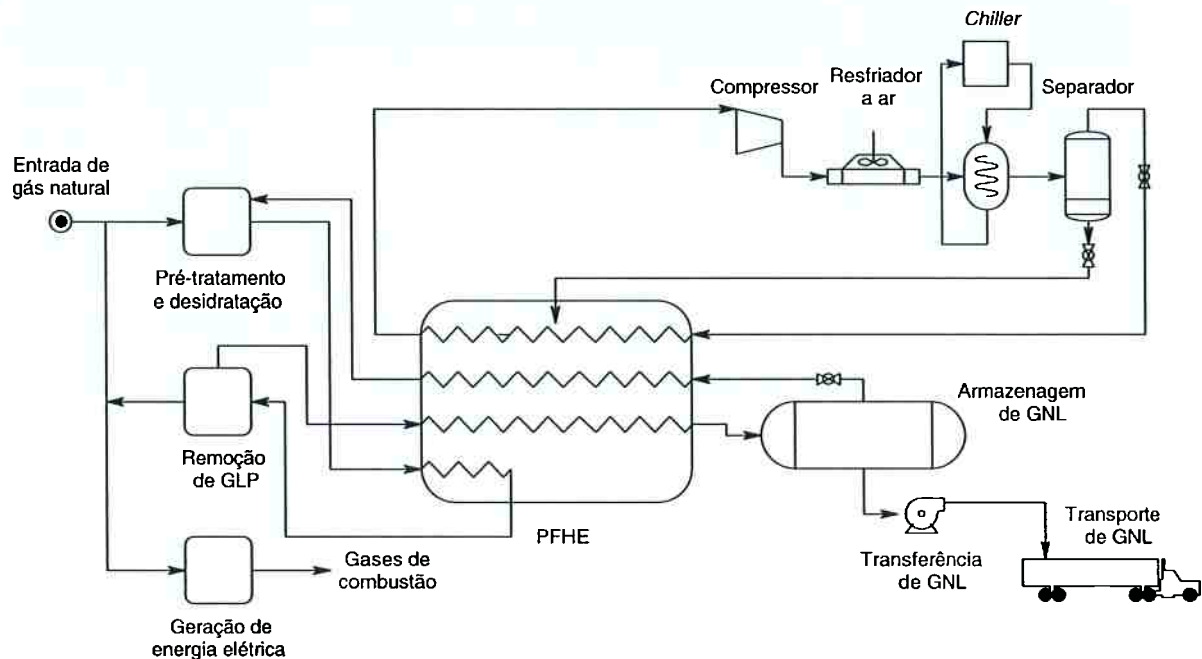


Figura 2.8 – Fluxograma de Processo Kryopac PCMR (KRYOPAC, 2007)

Algumas das características do Kryopac PCMR são:

- principais componentes fornecidos em skids pré-fabricados incluindo compressores e seus acionamentos, resfriadores a ar, separadores, sistemas de lubrificação e interligações;
- admite pequena variação na composição do gás de entrada;
- admite GN a baixa pressão
- operação na base;
- partida rápida se comparado aos ciclos MR;
- refrigerante bi-fásico, sendo necessários separadores, bombas, vasos estocagem e trocadores de calor;
- usa equipamentos comerciais de desempenho comprovado;
- operação totalmente automatizada;
- necessária a separação de hidrocarbonetos pesados presentes no GN de entrada;

2.3.3.4 Ciclo a Nitrogênio Hamworthy

O nitrogênio é usado como fluido refrigerante e é mantido na fase de vapor em todo ciclo. A compressão se dá em três estágios com resfriamento intermediário e posterior a ar. A expansão é feita em um único estágio. Esta tecnologia pode ser usada para produzir plantas com capacidade entre 30 e 500 t/dia.

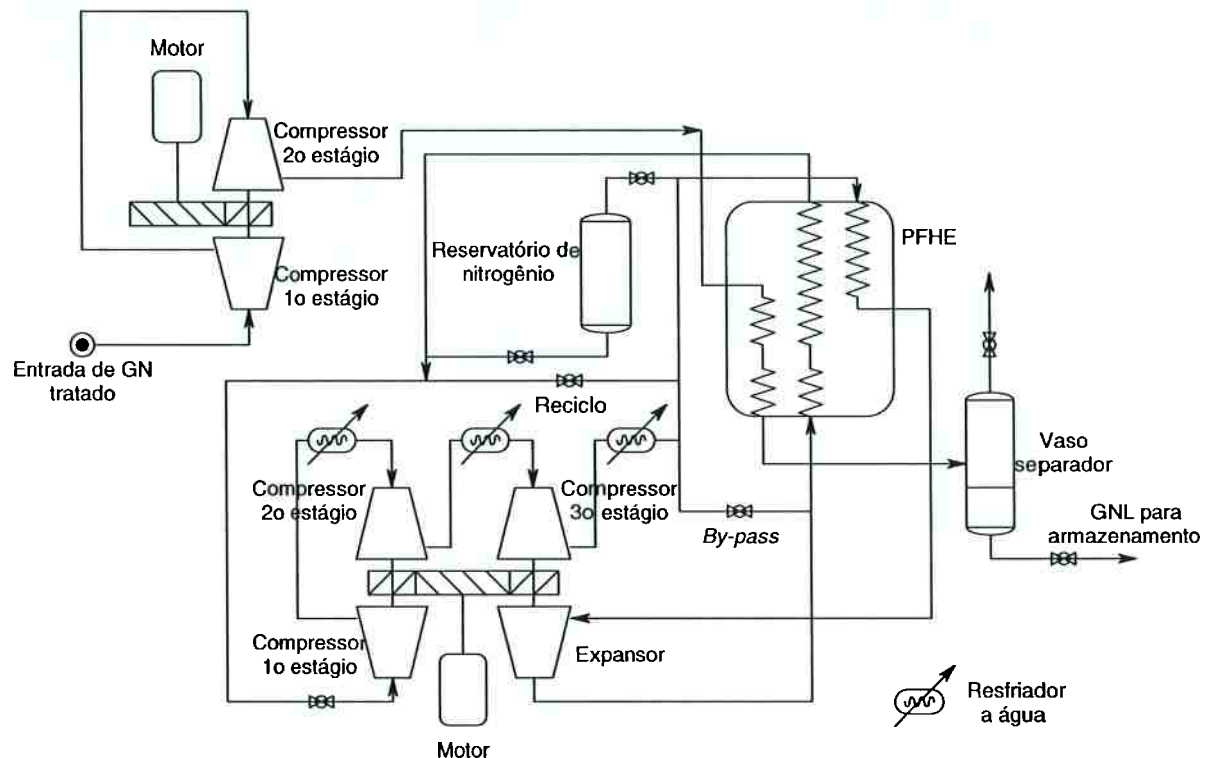


Figura 2.9 – Fluxograma de Processo Ciclo a Nitrogênio Hamworthy (HAMWORTHY, 2006)

É necessário a remoção de contaminantes do GN antes de resfriamento e liquefação. Os componentes típicos de uma instalação são:

- estação de remoção de umidade;
- estação de remoção de CO₂;
- circuito criogênico de resfriamento;
- unidade de liquefação (*cold box*);
- armazenamento e carregamento de carretas.

A operação do sistema é feita de forma totalmente automática. É necessária a presença de operadores para partida e visitas programadas de manutenção.

Existem 2 plantas construídas e operando satisfatoriamente.

2.3.3.5 Pre-Cooled Dual TEX

Neste processo, denominado Pre-Cooled Dual TEX (*Dual Independent Expander Refrigeration Cycles*), o GN previamente tratado e pressurizado a $70 \text{ kgf/cm}^2 \text{ man.}$ é resfriado num trocador do tipo placa aletada de onde sai a uma temperatura de -161°C para então ser expandido isentropicamente para uma pressão de saída de $1,4 \text{ kgf/cm}^2 \text{ man.}$ O GNL produzido é então armazenado e se espera que 2% a 4% seja vaporizado nesta etapa final. A figura Figura 2.10 abaixo mostra o fluxograma do processo.

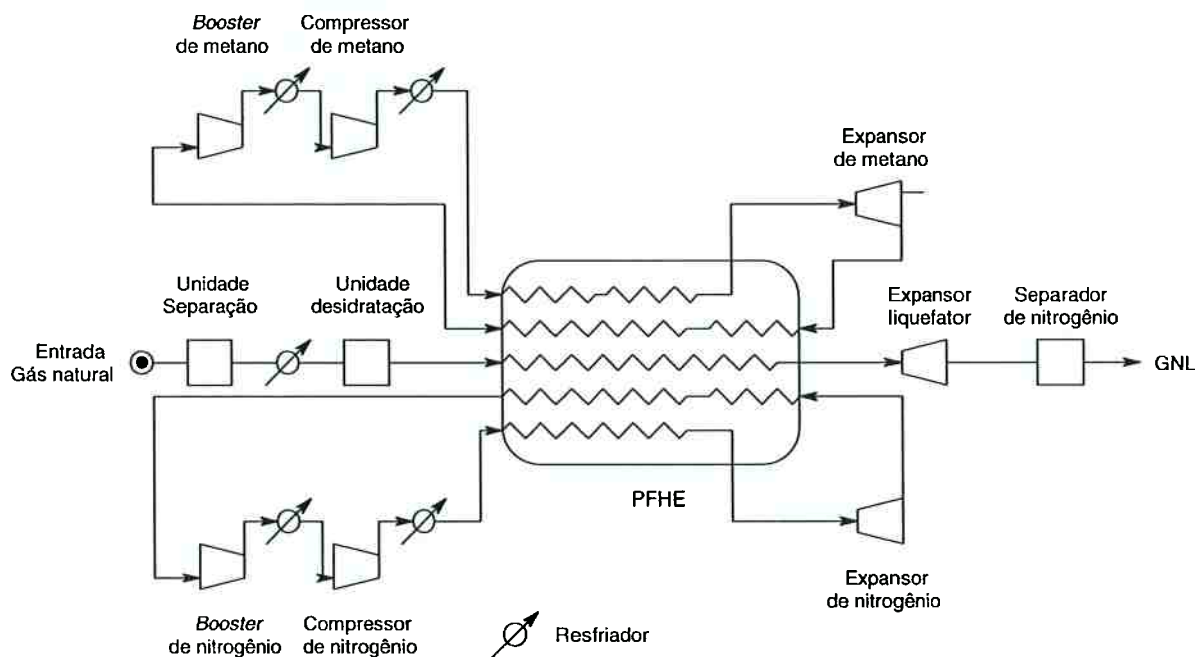


Figura 2.10 – Fluxograma de Processo Pré-Cooled Dual TEX (FOGLIETTA, 2004)

O ciclo de refrigeração representado na parte superior usa como refrigerante o metano obtido do próprio GN fornecido após a remoção de hidrocarbonetos mais pesados. O segundo, usa nitrogênio obtido de uma pequena unidade geradora e que também fornece gás de reposição para as perdas que ocorrem nas selagens dos compressores.

Este sistema de médio porte pode produzir 0,5 mta de GNL, ocupando área de 65 m x 20 m e com peso total estimado em 1450 t.

Algumas das características que o diferenciam dos demais sistemas de porte semelhante são:

- simplicidade processual, física e operacional;
- admite ampla variação na composição do GN de entrada;
- fluidos refrigerantes estão sempre na fase gasosa o que elimina a necessidade de separadores e instalações aumentando a segurança de operação;
- trocadores de calor principal é relativamente simples;
- mínima necessidade de queima em tocha;
- uso de equipamentos comerciais passíveis de adequações de engenharia;
- pequeno espaço para instalação;
- processo não sensível a acelerações laterais como as produzidas em embarcações.

2.3.3.6 Kryopac EXP

Na tecnologia Kryopac EXP a refrigeração é obtida por uma única expansão isentrópica em um circuito semi-fechado como mostra a Figura 2.11 abaixo. O fluido refrigerante é o próprio vapor produzido pelo *boil-off* do GNL armazenado. Por meio do controle de 3 variáveis (vazão de gás recirculado, gás de entrada e pressão do refrigerante) é possível obter uma aproximação ótima da curva de resfriamento do gás e conseqüentemente uma satisfatória eficiência termodinâmica.

O trabalho útil obtido na expansão do refrigerante é usado para recompressão parcial do mesmo. Somado ao efeito da evolução dos expansores cuja eficiência está em torno de 85%, o resultado é um processo tão eficiente quanto os melhores resultados em plantas a refrigerante misto, consideradas referência em plantas de base de grande porte (13,5 a 15,5 kWton-dia *versus* 12,2 a 16,8 kWton-dia).

As plantas podem ter capacidade da ordem de centenas de toneladas por dia de GNL.

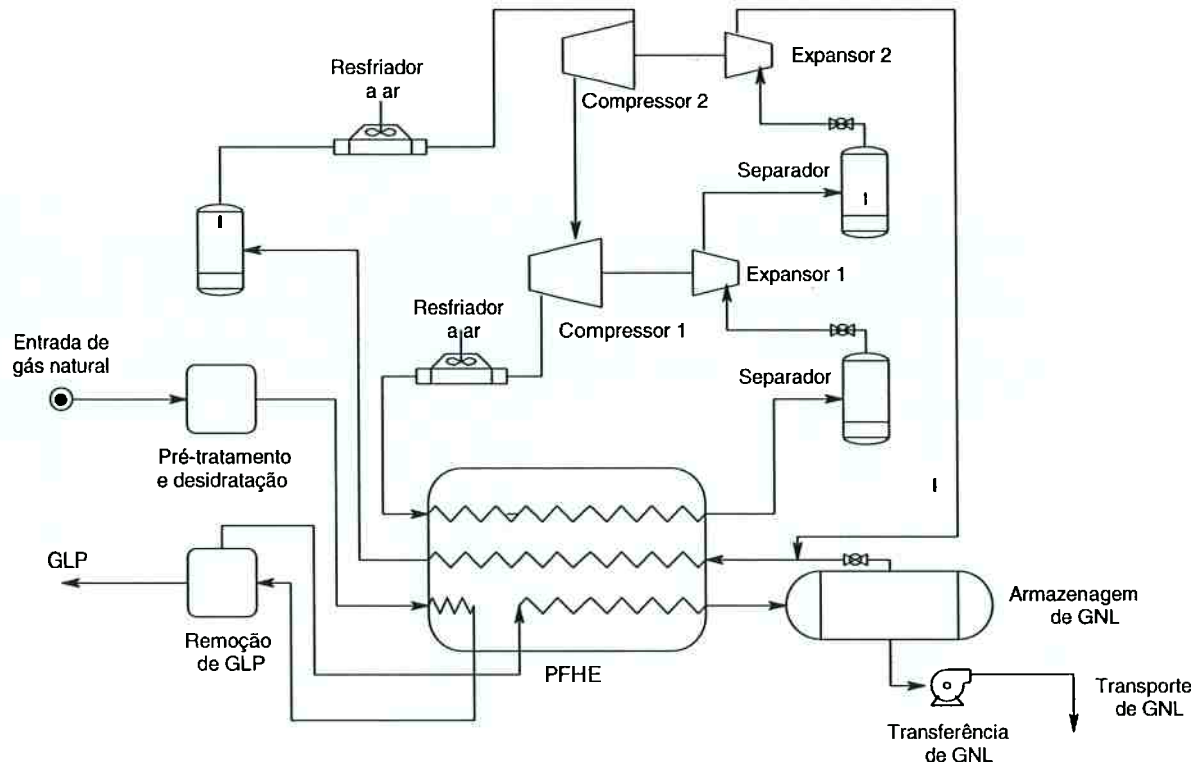


Figura 2.11 – Fluxograma do Processo Kryopac EXP (KRYOPAC, 2007)

Algumas das características do Kryopac EXP são:

- poucos componentes;
- admite variações na composição do gás de entrada;
- refrigerante sempre em fase gasosa, eliminando separadores e simplificando o trocador de calor;
- não usa refrigerantes pré-misturados;
- usa equipamentos comerciais de desempenho comprovado;
- operação totalmente automatizada;
- construção em *skids*.

São requisitos deste sistema:

- gás de entrada a $35,0 \text{ kgf/cm}^2$, livre de CO_2 e H_2S , limpo, seco (ponto de orvalho - $37,8^\circ\text{C}$) e livre de particulados.

2.3.3.7 Sistema Letdown

Este sistema aproveita as altas pressões dos gasodutos de transporte de GN para, através de expansão direta, obter pequenas frações de GNL – na faixa entre 10% a 20% - além de trabalho útil no eixo do expansor (INL, 2006).

O sistema não consome GN que é o próprio fluido refrigerante do processo. O metanol pode ser usado para remoção da umidade e separa CO_2 que se solidifica durante a liquefação do metano. Estes são posteriormente reinjetados no gasoduto de baixa pressão sem alterar o conteúdo energético inicial do GN de entrada.

A planta opera automaticamente e requer apenas supervisão periódica.

Existem 2 plantas em operação com desempenho satisfatório (INL, 2006).

A Figura 2.12 abaixo mostra um fluxograma do processo *let-down*.

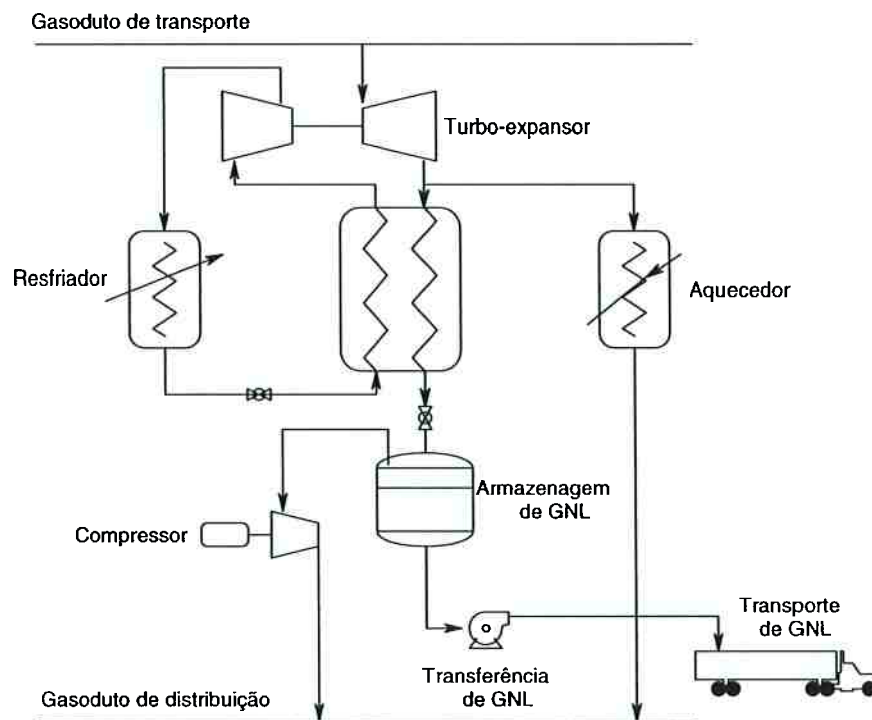


Figura 2.12 – Fluxograma de Processo Let Down (SHEN e outros, 2006)

2.3.4 Outras Tecnologias

Abaixo, encontra-se outras tecnologias menos expressivas no momento mas com potencial de desenvolvimento.

2.3.4.1 Sistema Stirling

Sistema baseado em Máquinas Criogênicas a Gás que operam conforme ciclo Stirling, estas podem liquefazer 100% do GN fornecido (KIRILOV, 2004) e operam com eficiência em torno de 50%.

2.3.4.2 Sistema Tubo Vórtice

Sistema mecanicamente simples baseado no princípio do tubo de Ranque-Hilsh ou tubo de vórtice. Opera aproveitando as altas pressões do gasoduto de transporte (*letdown*) sem consumo extra de energia. Produz pequenas frações de GNL: entre 2 e 4%.

2.4 Armazenagem e Disponibilização

Instalações de pequeno e médio porte podem ser bastante similares no que tange ao sistema de liquefação. Porém, estas plantas podem ser significativamente diferentes em termos das instalações de armazenagem e disponibilização dependendo de sua finalidade (PRICE, 2003).

Os tanques de armazenagem constituem parcela significativa do custo das instalações e desempenham papel central na segurança das instalações. Para uma planta que atende demandas de pico, grandes tanques atmosféricos API-620, com capacidades típicas entre 50.000 m³ e 100.000m³, são necessários e materiais como o aço inox e aço a 9% Ni são aplicáveis.

O projeto de tanques passou por considerável progresso em função do desenvolvimento de requisitos de segurança. Os tanques modernos são construídos com paredes externas menos suscetíveis a falhas se submetidos a temperaturas criogênicas ao mesmo tempo que podem ser construídos dentro de diques altos, com estas medidas o vazamento de GNL por grandes áreas é bastante minimizado o que inibe a formação de perigosas nuvens de vapor (densas nuvens de GN que

podem se movimentar por longas distâncias e entrar em ignição, provocando grandes danos).

Considerações adicionais visando a proteção contra impactos externos levaram à construção de tanques internos e externos estruturalmente independentes sendo, os últimos, construídos em paredes reforçadas de concreto revestidas internamente de aço inoxidável. Uma proteção adicional é dada por diques de mesma altura dos tanques e que fornecem proteção extra em caso de ruptura do tanque central.

Para plantas com menor necessidade de armazenagem tanques API-620 atmosféricos são aplicáveis e também vasos criogênicos isolados e para operação sob pressão a $7,0 \text{ kgf/cm}^2$ a $-10,5 \text{ kgf/cm}^2$ projetados conforme código ASME.

2.5 Transporte – Tanques Criogênicos

O GNL pode ser transportado pela rota rodoviária, ferroviária e marítimo-fluvial.

Na rota marítima, são empregados tradicionalmente os navios metaneiros com capacidade para transportar até 145.000 m^3 de GNL. Há basicamente 3 tipos de navios-tanque: tanques esféricos apoiados sobre um anel circular; tanque-membrana e tanques prismáticos.

No Brasil, o transporte de GNL por meio de chatas fluviais equipadas com tanques cilíndricos horizontais isolados com perlita expandida foi proposto em estudo para disponibilização do GN de Urucu (POULALLION e DOMINGUEZ, 1996).

Para o transporte ferroviário e rodoviário o transporte pode ser feito por meio de tanques criogênicos adaptados ao chassi de um vagão ou reboque. Estes tanques são formados por um tanque interno em aço inoxidável e um externo em aço-carbono. O isolamento é por meio de perlita sob alto vácuo e quebra-ondas são instalados para minimizar o efeito da superfície livre quando o transporte é feito a cargas parciais (SALLA, 1997).

3 Aplicações da Cadeia de GNL para o Brasil e Seus Benefícios

O uso de cadeias de GNL no Brasil representa uma importante alternativa de solução para disponibilização de GN para múltiplos usos e com máximo benefício de suas características técnicas. Este capítulo apresenta quais problemas podem ser resolvidos por meio do uso das novas tecnologias para produção e disponibilização de GNL que tem alcançado notável progresso e redução de custos recentemente.

Pelo lado da demanda, cadeias de GNL encontram aplicações que vão do atacado ao varejo, em empresas tais como distribuidoras e transportadoras, postos de combustível e usuários finais. Conforme a aplicação, podem operar em regime contínuo (base) ou intermitente (pico).

Fatores como preço, busca pelo aumento de competitividade por meio de insumos e processos de alto conteúdo tecnológico, a necessidade de mitigação de riscos e demandas ambientais podem ser atendidos por meio da produção de GNL (INEEL, 2004).

Em mercados com maior grau de liberalização, como o americano, cresce a importância e o número de plantas de pequeno e médio porte como fator para mitigação de riscos contratuais e de preço. Em todo o mundo as plantas de pequeno e médio porte para atender demandas de pico ultrapassam as 240 unidades em operação (CASCON, 2005).

As plantas de pequeno e médio porte oferecem a oportunidade para o desenvolvimento de mercados e expansão da fronteira do GN para localidades e consumidores que, de outra forma, não poderiam dispor deste insumo por ser inviável o suprimento via gasodutos. As alternativas de transporte incluem a malha rodoviária, ferroviária e marítima (COSTA, 2004). Dessa forma, o GNL contribuirá para o desenvolvimento regional e redução de custos de produção assim como oportunidades de emprego e renda (CRUZ, 2005).

O GNL é opção para o mercado de combustíveis veiculares. Por meio do GNL é possível criar pulmões de GN em pontos estratégicos da malha de gasodutos para otimização da capacidade dos mesmos e redução dos riscos de não atendimento da demanda. O GNL é alternativa para o aproveitamento de GN em campos de menor atratividade econômica como é o caso de campos remotos, campos com gás associado como os explorados na plataforma continental com elevados níveis de

queima em tocha (*flaring*) e mesmo campos de gás não associado. É possível também produzir GNL a partir do biogás gerado em aterros sanitários.

Grande parte do uso comercial bem-sucedido das cadeias de GNL no mundo está associada a plantas de grande porte que operam na base para exportação via navios metaneiros e plantas de médio porte para atendimento de demanda de pico em países do hemisfério norte. Estas plantas têm projetos de detalhamento específicos e demandam elevados investimentos. Em contraste, há pouca experiência com plantas com capacidade inferior a 75 m³/d de GNL (GTI, 2003) e aplicações de média escala, em torno de 1 milhão t/ano, têm sido desenvolvidas (SHEFFIELD, 2005). O desenvolvimento tecnológico acelerado tem alcançado sucesso em superar desafios da redução de escala de produção e redução ou eliminação dos custos de transporte do GNL.

Abaixo, são apresentadas alternativas de aplicações e discutidos seus benefícios. Para cada aplicação, as necessidades envolvidas são identificadas assim como requisitos e/ou restrições. Este conjunto de dados forma a entrada para uma análise funcional e que resulta em uma arquitetura funcional necessária para satisfação das mesmas.

Independente da aplicação, os seguintes benefícios seriam obtidos com a aplicação de cadeias de GNL no Brasil: desenvolvimento dos mecanismos de comercialização de GN, desenvolvimento da indústria criogênica brasileira, aumento da integração energética brasileira, estímulo à competição em mercados em desenvolvimento, estímulo ao desenvolvimento tecnológico nacional em plantas criogênicas e estímulo ao uso racional de energia pelo aproveitamento do frio.

3.1 GNL como Combustível para Transporte

Existem dois meios para o abastecimento de veículos usando o GNL. O primeiro deles consiste no enchimento de cilindro em fase gasosa, como no caso do GNV com a utilização de uma bomba criogênica de pequeno porte e potência fabricada no Brasil que substituiria os compressores atualmente usados que consomem muita energia e são muito mais caros (COSTA, 2004). Esta alternativa já está em curso no Brasil onde um posto está instalado em Goiânia – região não atendida por gasodutos - e outros três postos estão previstos para região pela Goiásgás para 2007 com capacidade total de 50.000 m³/d (GÁS BRASIL, 2007).

O segundo meio consiste no abastecimento do veículo diretamente com GNL. Neste caso os veículos devem ser providos de tanques criogênicos e dispositivos de regaseificação. Além das vantagens intrínsecas do uso do GN como combustível, esta modalidade oferece maior autonomia e redução de peso, pois o GNL é armazenado à pressão pouco maior que atmosférica e o aproveitamento do frio para refrigeração e ar-condicionado. Neste caso há uma restrição no caso de o veículo permanecer dias sem utilização obrigaria a liberação de gás através da válvula de segurança (COSTA, 2004). A experiência norte-americana aponta para a competitividade econômico-ambiental do GNL em relação ao diesel, gás natural comprimido (GNC), biodiesel e híbridos (CASCON, 2005). No Brasil, esta alternativa ainda carece de estudos específicos, porém é possível indicar oportunidades para aplicações em frotas de ônibus e transporte em rotas definidas para deslocamento do óleo diesel.

Neste estudo é considerado o primeiro modal a partir do qual é possível identificar os seguintes requisitos e/ou restrições:

- disponibilidade de energia elétrica para alimentar motor de até 20 CV no posto;
- operação simples com medidor vazão;
- pequeno espaço para armazenagem e recebimento GNL;
- pequeno espaço para regaseificação e abastecimento semelhantes às instalações de O₂ e N₂ usadas na indústria em menor escala;
- formação de mão-de-obra especializada para manuseio do GNL;
- transporte do GNL por carretas;
- disponibilização de GNL a distâncias economicamente viáveis;
- instalações padrão, modulares e certificadas;

- não aproveitamento de LGN;
- liquefação contínua e de pequena capacidade;
- vida útil 10 anos para posto e 20 anos para liquefação;
- abastecimento de automóveis a caminhões;
- duas ou mais unidade de liquefação (opções suprimento);
- mínima capacidade de armazenagem na unidade produção de GNL.

As seguintes funções a serem entregues pela cadeia podem ser identificadas:

- liquefação parcial ou total de GN a partir gasoduto;
- reinjeção de impurezas;
- armazenagem junto à unidade liquefação;
- armazenagem no posto;
- distribuição de GNL;
- regaseificação controlada;
- odorização.

O seguinte diagrama funcional e respectivas interfaces pode então ser proposto:

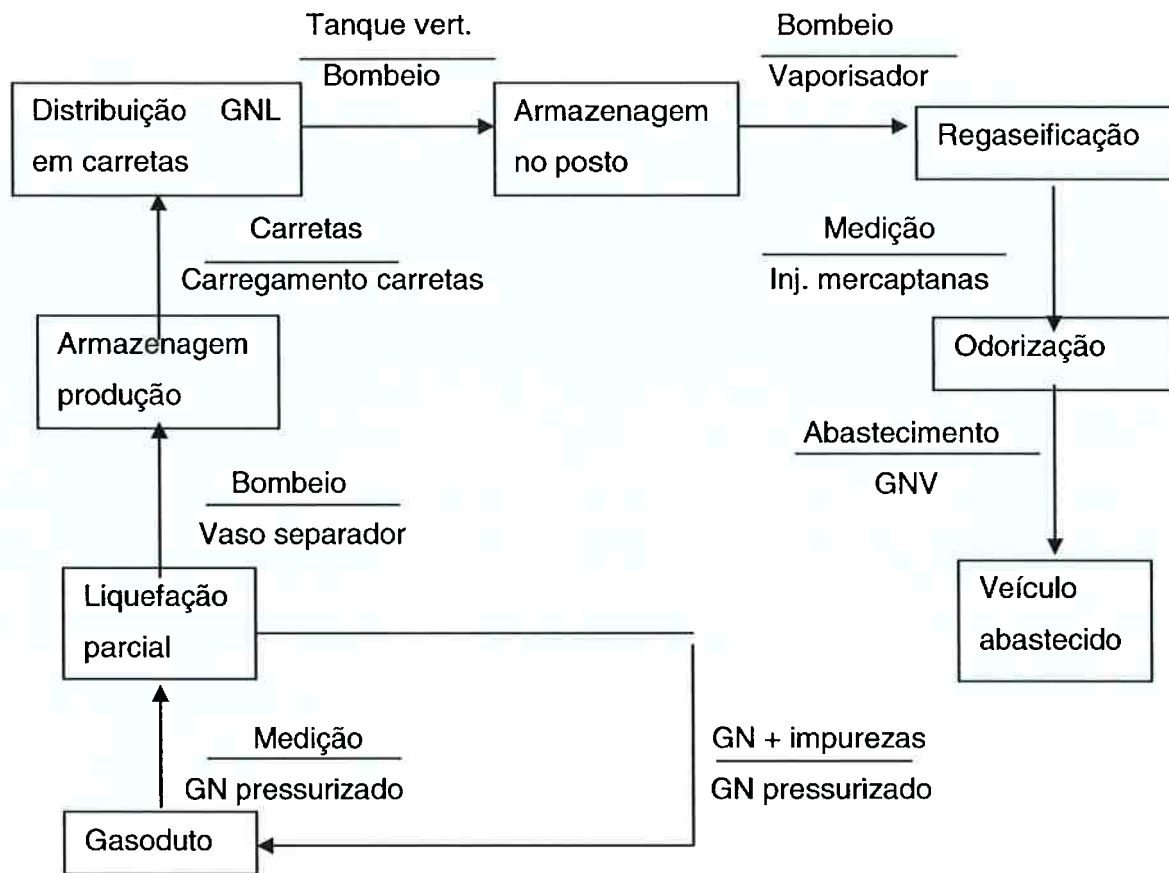


Figura 3.1 – Diagrama Funcional para Uso Veicular

3.2 Aproveitamento de Campos *Offshore*

A aplicação de sistemas de liquefação embarcados é objeto de estudo e desenvolvimento há mais de 25 anos (KENNETT e outros, 1981). O desenvolvimento dos FPSOs (*Floating Production Storage and Off-Loading*) para produção de óleo e, mais recentemente, para produção de GLP aponta para uma tendência natural do lançamento dos primeiros FPSOs para produção de GNL.

Há diversas iniciativas em curso tais como desenvolvimentos da Shell para processamento de gás e gás associado, conceitos batizados respectivamente de *Floating LNG (FLNG)* e *Floating Oil and Natural Gas (FONG)*, Chevron e BHP Billington.

No Brasil, a Petrobras tem experiência suficientemente madura com desenvolvimento e operação de FPSOs para óleo sendo que muitos dos conceitos e requisitos podem ser aplicados na construção de um FPSO para GN ou misto.

A produção de GNL demanda grande quantidade de energia (50 MW para 1 milhão t/ano) e as condições criogênicas de processo impõem restrições ao arranjo de tubulação em áreas congestionadas (SHEFFIELD, 2005). A operação dos tanques criogênicos a cargas parciais representa condição crítica de projeto.

A grande vantagem desta arquitetura de produção é que ela elimina a necessidade das instalações em terra assim como o correspondente gasoduto submarino. O aumento do aproveitamento do gás associado na plataforma continental brasileira, a produção de LGN e a exportação de GNL são outras vertentes a serem exploradas.

Existe assim, a oportunidade para a redução dos níveis de queima em tocha e de reinjeção de gás. Reservas de GN não associado que estejam em águas profundas (mais de 1000 m da linha d'água e 250 km de distância da costa) poderão ser exploradas (SHEFFIELD, 2005).

Assim como para as grandes plantas de base, a eficiência termodinâmica do ciclo de liquefação é um dos principais fatores considerados no desenvolvimento de plantas flutuantes. Outros fatores, no entanto, passam a ser igualmente demandantes tais como arranjo compacto, facilidade de operação e segurança processual (BARCLAY e DENTON, 2005).

Os seguintes requisitos e/ou restrições para esta aplicação podem ser assim sumarizados:

- baixo consumo energético;
- poucos componentes;
- arranjo compacto;
- baixo peso;
- alto grau de automação;
- remover impurezas do GN;
- processar GN de composição variável;
- processar 100% do GN recebido;
- capacidade de produção de até 1,5 milhão t/ano de GNL (maximização escala produção);
- vida útil de 20 anos;
- tolerar movimento das ondas;
- partidas e paradas rápidas;
- resfriamento com água do mar;
- tolerar falhas mecânicas e de controle;

- diagnóstico de falhas;
- construção modular;
- resistente à influência marítima;
- mínima necessidade de consumíveis e peças reserva;
- mínima necessidade de intervenção de operadores;
- mínima queima em tocha ou sua eliminação;
- armazenagem de GNL a cargas parciais;
- desempenho deve ser mensurável segundo normas usadas na indústria de petróleo e gás (API, ASME, ASTM e outras);
- desempenho deve ser garantido;
- minimização do consumo de utilidades;
- ser transportável;
- uso de equipamentos específicos para indústria do petróleo, com desempenho comprovado em aplicações similares;
- eliminação de instalações para separação e armazenagem de fluidos refrigerantes;
- máxima segurança operacional.

As funções a serem entregues por um sistema para produção de GNL *offshore* são bem mais extensas e complexas que os de um FPSO típico:

- recepção de gás e separação condensados;
- purificação do gás;
- secagem GN;
- tratamento de rejeitos;
- liquefação do gás;
- armazenagem do GNL e dos LGN;
- transferência dos GNL e LGN;
- disponibilização das utilidades consumidas.

O seguinte diagrama funcional e respectivas interfaces pode então ser proposto:

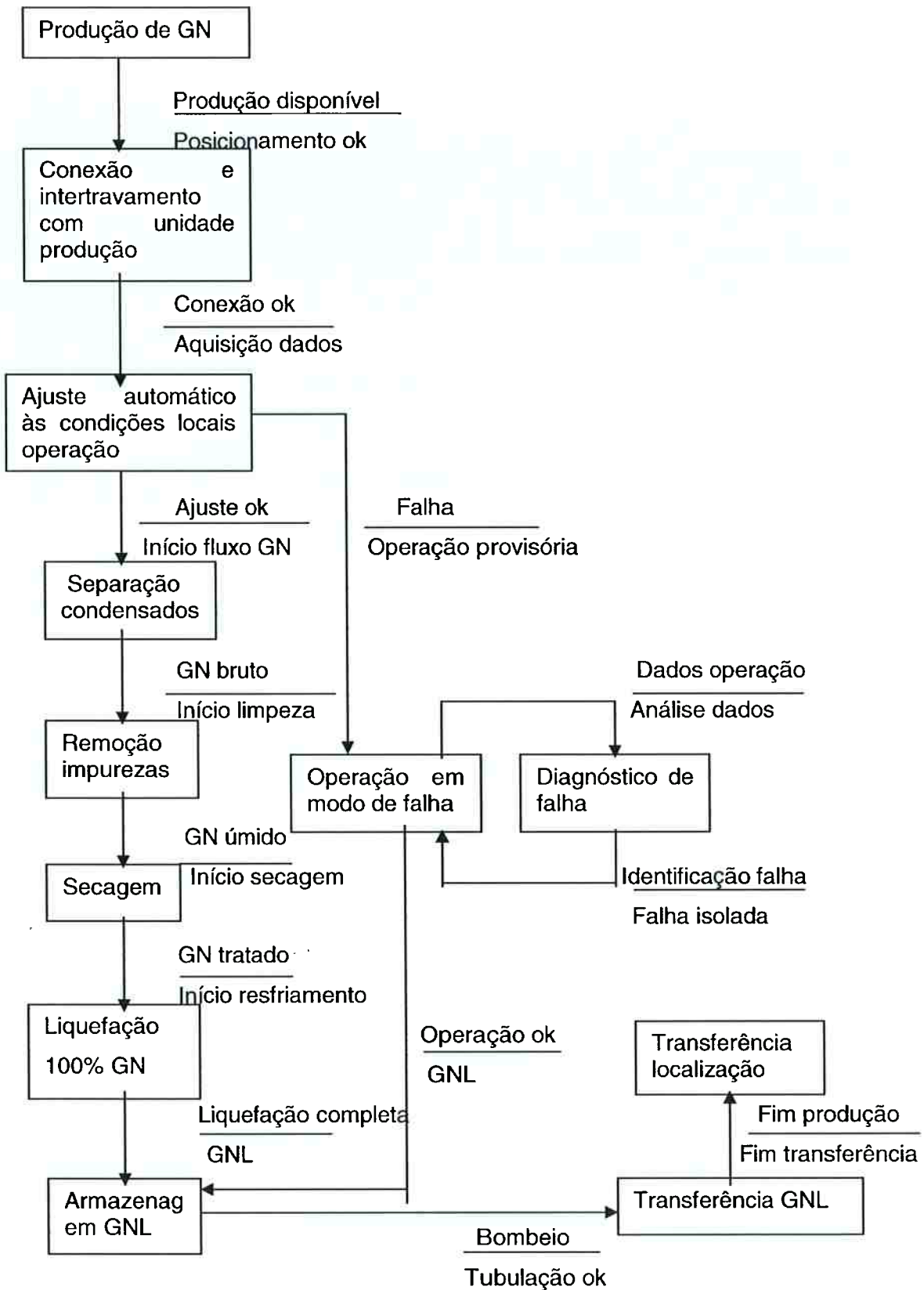


Figura 3.2 – Diagrama Funcional para Aproveitamento Campos *Offshore*

3.3 Aproveitamento de Campos Remotos e Fontes Não-Convencionais

À medida que a demanda brasileira por GN se confirma com altas taxas de crescimento e o preço do insumo não dá sinais de queda, pelo contrário, sofre pressões de aumento, o interesse pela monetização de reservas não tradicionais cresce a cada dia.

As reservas não tradicionais (ou campos marginais) são aqueles reservatórios cuja exploração econômica tradicional comprovou-se não atrativa por uma ampla gama de fatores tais como pequeno volume provado, distância e variações na composição. 60% de todas as reservas provadas mundiais de GN podem ser classificadas como remotas (GTI, 2003).

Como fontes não-convencionais, temos o biogás gerado pelos aterros sanitários e localizados no entorno das grandes cidades brasileiras. O biogás oferece potencial para produção de GNL por ser rico em metano (55% metano, 45% gás carbônico) e pode ser explorado por pelo menos 20 anos.

Para o aproveitamento de reservas não tradicionais, os seguintes requisitos e/ou restrições podem ser identificados:

- fluido refrigerante deve ser preferencialmente o próprio GN ou alguns de seus componentes;
- insumo energético deve ser o próprio GN;
- produção de até 1,5 milhão t/ano;
- processar GN bruto;
- processar GN de diversas fontes ou de diferentes composições;
- instalação ao tempo em climas variados;
- opção para separar LGN;
- alto grau de automação;
- operação contínua (base);
- tolerar falhas mecânicas e de controle;
- rápido diagnóstico de falhas;
- construção em módulos padronizados;
- mínima necessidade de consumíveis e peças reserva;
- mínima necessidade de intervenção de operadores;
- desempenho deve ser mensurável segundo normas da indústria petróleo (API, ASME, ASTM e outras);

- desempenho deve ser garantido;
- minimização consumos de utilidades;
- uso de equipamentos específicos para indústria do petróleo, com desempenho comprovado em aplicações similares;

As funções a serem entregues por um sistema para produção de GNL em campos remotos são:

- purificação do gás;
- secagem do gás;
- separação de hidrocarbonetos pesados;
- tratamento de rejeitos;
- liquefação do gás;
- armazenagem do GNL dos LGN;
- transferência dos GNL e LGN;
- disponibilização das utilidades consumidas.

O seguinte diagrama funcional e suas respectivas interfaces pode então ser proposto:

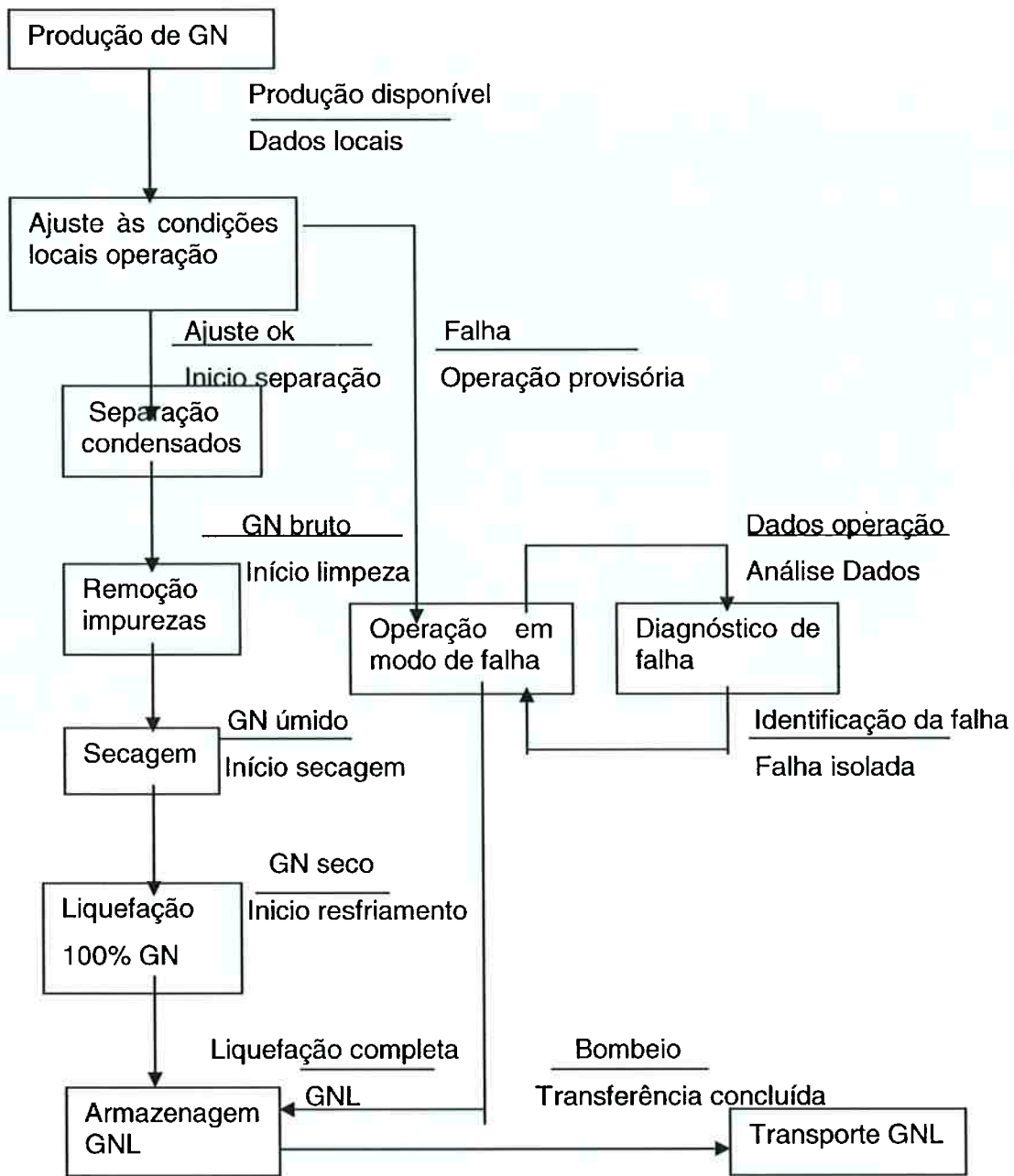


Figura 3.3 – Diagrama Funcional para Aproveitamento Campos Remotos

3.4 Demandas de Pico e Pulmões de GN.

Plantas estrategicamente instaladas ao longo da rede de gasodutos ou próximo de grandes consumidores oferecem potencial para: aumento da segurança de suprimento, otimização da capacidade instalada de gasodutos, consolidação do deslocamento do diesel, GLP e outros combustíveis pela eliminação da necessidade de conversões multi-combustível, fôlego para expansão do setor produtivo com menor risco de escassez de energia (CRUZ, 2005) e proteção contra oscilação de preços na medida da liberalização do mercado (*price hedging*) (CASCON, 2005).

As plantas de GNL são capazes de fornecer GN suplementar (*stand-by*) para consumidores industriais, termelétricas, plantas de co-geração e geração distribuída. Dessa forma, reduzem ou eliminam a necessidade da compra de “gás firme” e a necessidade do uso de outros combustíveis substitutos, tais como o óleo diesel, o GLP ou óleo pesado.

Nesta aplicação, a formação de um pulmão energético demanda instalações significativas de armazenamento e disponibilização (*send-out*).

Os seguintes requisitos e/ou restrições podem ser identificados neste caso:

- operação contínua durante 80% do ano (admitido);
- capacidade de armazenar a produção total por 2 meses (admitido);
- alta capacidade de regaseificação, produção do ano em 1 mês (admitido);
- minimização das perdas por evaporação na armazenagem (*boil-off*);
- GN de entrada a partir de rede distribuição ou gasoduto de transporte;
- odorização;
- assistência técnica e garantia de fornecimento de peças reserva;
- admite paradas para manutenção e limpeza;
- capacidade para até 0,5 milhão t/ano (admitido);
- mínimo investimento inicial;
- equipamentos padrão de projeto do fabricante são aceitáveis;
- alta confiabilidade de armazenagem e regaseificação;
- baixo consumo energético;
- preferência pelo GN ou seus componentes como refrigerante;
- operação simplificada com baixa especialização de operadores;

As seguintes funções são esperadas nesta aplicação:

- remover CO₂ e H₂O;
- liquefação parcial ou total de GN tratado;
- reinjeção de impurezas removidas na liquefação (CO₂ e H₂O);
- armazenagem de GNL;
- regaseificação;
- minimizar perdas de GN (supressão *boil-off*);
- odorizar o GN regaseificado.

O seguinte diagrama funcional e suas respectivas interfaces pode então ser proposto:

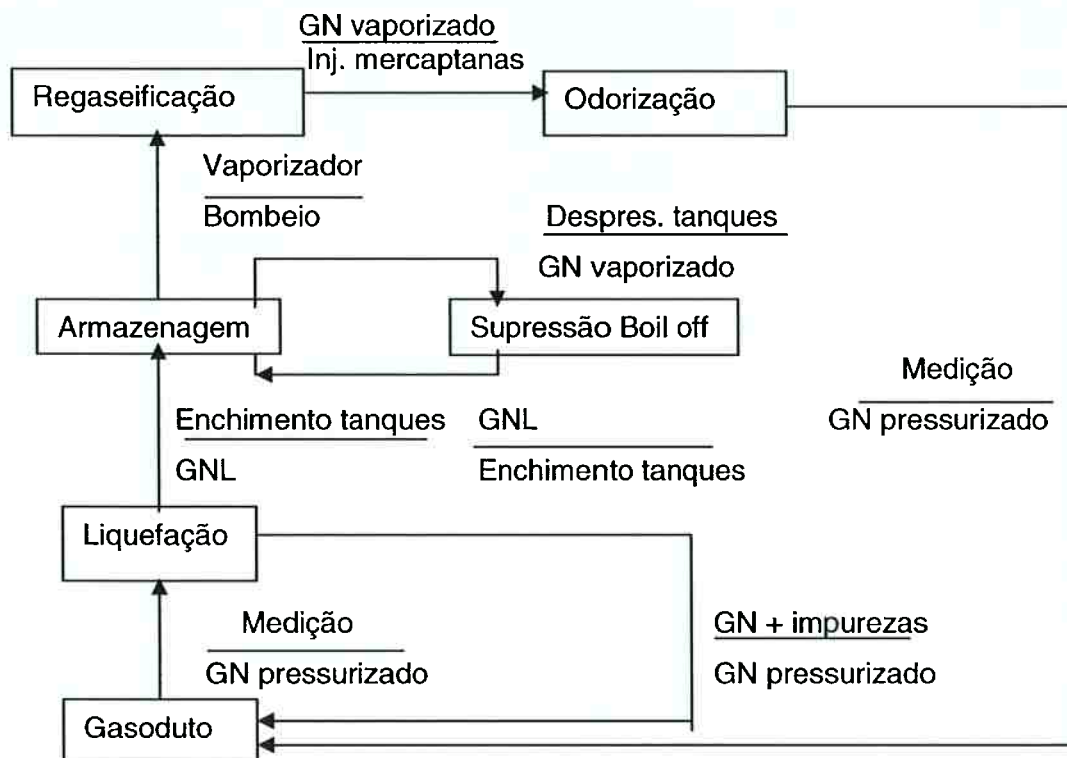


Figura 3.4 – Diagrama Funcional para Demandas de Pico e Formação de Pulmão de GNL

4 Propriedades das Cadeias de GNL Consideradas na Seleção de Tecnologias

As propriedades abaixo indicadas não são exclusivas em si de sistemas que compõem a cadeia do GNL. Dentre uma gama ainda maior de propriedades atribuíveis a sistemas de engenharia em geral estas foram selecionadas e desenvolvidas para o caso particular em foco neste estudo, as plantas de liquefação de GNL de pequeno e médio porte. Assim, faz-se necessária por razões de clareza a conceituação de cada atributo como é mostrado abaixo. Cada seção também explicita as razões pela qual é relevante trabalhar tal propriedade. De uma maneira geral, estas propriedades, neste trabalho, são operadores através dos quais é possível construir um painel de decisão entre as diversas tecnologias existentes e a aplicação para a qual seria a mais indicada. Estes operadores ou propriedades são também os meios através dos quais é possível disponibilizar dados e realizar análises funcionais que possibilitam a síntese de uma cadeia de GNL para cada caso específico. Esta dissertação cobre os passos até que a fase de síntese possa ser realizada e não tem como escopo avançar neste campo em diante. Em outras palavras, este trabalho trata dos aspectos funcionais das diversas tecnologias para liquefação de GN tendo como ponto de vista a satisfação de necessidades identificadas no contexto brasileiro. Não é aqui abordado a síntese de plantas de liquefação ou o detalhamento de como devem operar para satisfação das necessidades identificadas. Este escopo pode ser objeto de estudos complementares ou desenvolvimento de projeto de detalhamento de uma planta de liquefação. Neste último caso, variáveis específicas derivadas do local de instalação, da tecnologia selecionada e da matéria-prima deverão ser considerados.

4.1 Confiabilidade

É a probabilidade de sucesso de um sistema em executar suas funções. A capacidade de um sistema entregar suas funções com sucesso sempre envolve algum grau de incerteza. Assim, os aspectos determinantes da confiabilidade de uma planta a ser usada para uma dada aplicação são diferentes de uma planta semelhante que tem uma aplicação bastante diferente.

A Tabela 4.1 abaixo mostra a correlação entre as tecnologias apresentadas e as aplicações em estudo em relação à confiabilidade.

Tabela 4.1 – Confiabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Sensível ao movimento das ondas. Histórico aplicações comerciais favorável em aplicações <i>onshore</i>
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Em fase de desenvolvimento
Hamworthy	Média	Média	Média	Média	Histórico comercial favorável desde 2003
Kryopac PCMR	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Pouco tolerante a variações composição GN
Pré-cooled Dual TEX	Médio	Médio	Médio	Alta	Projeto e expansores confiáveis. Histórico comercial a ser desenvolvido
Kryopac EXP	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Equipamentos padrão
Let-down	Média	Baixa	Baixa	Média	Pequena quantidade equipamentos aumenta confiabilidade. Histórico comercial a ser desenvolvido

4.2 Disponibilidade

É a qualidade da planta de estar pronta para executar sua função ou conjunto de funções quando solicitada. É uma propriedade particularmente importante em plantas que não dispõem de tanques de estocagem. Decisões de projeto tal como critérios de redundância e de seleção de equipamentos também afetam a disponibilidade. Este item é ainda mais sensível em plantas com menor robustez processual, ou seja, dependem de entradas específicas para o sucesso de sua operação como, por exemplo, composição do gás na entrada.

A disponibilidade também depende da capacidade da planta de realizar auto-diagnóstico de suas falhas e ações corretivas. Está é a capacidade do sistema de identificar e apresentar dados que efetivamente contribuem para redução do tempo médio entre falhas e o tempo médio de reparo.

Tabela 4.2 – Disponibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Problemas iniciais foram resolvidos e otimizações incorporadas ao longo seu histórico
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Em desenvolvimento
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Sistemas de reliquefação similares usados em navios apresentam 99,98% de disponibilidade. (HAMWORTHY, 2006)
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Baixa	Média	Equipamentos padronizados. Falta comprovação comercial.
Pré-cooled Dual TEX	Média	Média	Média	Alta	Projeto e seleção equipamentos. Falta comprovação comercial.
Kryopac EXP	Média	Baixa	Baixa	Média	Compatível com exigências industriais comuns.
Let-down	Alta	Baixa	Baixa	Baixa	Poucos componentes favorecem disponibilidade

4.3 Manutenibilidade

A manutenibilidade de uma planta de GNL é a capacidade que esta apresenta de se manter ou ser reconduzida a determinadas condições de operação por meio da manutenção realizada por mão-de-obra qualificada. Este fator requer grande atenção pois algumas tecnologias não dispõem de mão-de-obra e ou peças para reposição que sejam encontrados no Brasil ou ainda que sejam muito caras ou difíceis de formar.

Uma outra vertente da manutenibilidade pode ser medida pelo tempo necessário para que a planta possa estar pronta para operar após parada para manutenção. Tecnologias que empregam, por exemplo, trocadores do tipo SWHE requerem maiores cuidados para inspeção de rotina e limpeza, o que diminui seu desempenho em termos de manutenibilidade.

Tabela 4.3 – Manutenibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto e fornecedores típicos indústria do petróleo em classe mundial
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Fornecedores não disponíveis no Brasil
Hamworthy	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto e fornecedores em escala mundial. Diversas representações na europa, EUA e Ásia
Kryopac PCMR	Média	Média	Média	Média	Projeto e fornecedores industriais de alcance moderado.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto e fornecedores típicos indústria do petróleo em classe mundial
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Projeto e fornecedores industriais de alcance moderado.
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Fornecedores e serviços a serem, desenvolvidos

4.4 Sustentabilidade

Por sustentabilidade, entende-se os fatores relacionados à fabricação, construção, operação e disposição das plantas que afetem o grau de risco a danos ambientais, de saúde e segurança.

A característica de sustentabilidade oferecida por determinada tecnologia está relacionada ao potencial para implementação visando:

- minimização de resíduos gerados;
- reuso;
- reciclagem;
- transformação;
- descarte de resíduos não poluentes e não perigosos;
- segurança.

Tabela 4.4 – Sustentabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Mistura de refrigerantes passível de condensação: maior complexidade e risco
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Mistura de refrigerantes condensáveis: maior risco.
Hamworthy	Alta	Alta	Alta	Alta	Uso de N ₂ como único refrigerante: simplicidade e baixo risco.
Kryopac PCMR	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Manuseio de mistura de refrigerantes com instalações de padrão industrial.
Pré-cooled Dual TEX	Média	Média	Média	Média	Refrigerantes puros e gasosos reduzem complexidade e risco. Uso de N ₂
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Refrigerante é o próprio GN
Let-down	Alta	Alta	Alta	Alta	Máx. aproveitamento energético com poucos equipamentos e sem a necessidade de manuseio de refrigerantes

4.5 Adaptabilidade

Está relacionada à capacidade da planta de se adaptar a novas condições de funcionamento e condições ambientais. O grau de adaptação de uma planta é determinado por decisões de projeto respeitando os limites inerentes à tecnologia que está sendo aplicada. É uma propriedade bastante relevante para plantas construídas em base móvel como é o caso das flutuantes.

Em termos de tecnologias, a adaptabilidade também está relacionada à capacidade da sua concepção original de ser tropicalizada.

Tabela 4.5 – Adaptabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Média	Alta	Tropicalização possível. Adaptável a composições locais de GN de pouca variação.
GTI	Média	Baixa	Baixa	Média	Tropicalização não desenvolvida
Hamworthy	Média	Baixa	Baixa	Média	Tropicalização não desenvolvida porém provável
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Baixa	Média	Projeto padrão, tropicalização pode ser parcial.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto segundo normas indústria petróleo. Processo admite variações composição e pressão na entrada.
Kryopac EXP	Média	Baixa	Baixa	Média	Projeto padrão, tropicalização pode ser parcial.
Let-down	Média	Baixa	Baixa	Média	A ser demonstrada

4.6 Operabilidade e Interoperabilidade

A operabilidade é a propriedade do sistema de ser operável. Sistemas complexos tendem a oferecer menor operabilidade, no entanto, o grau de automação, a sofisticação e confiabilidade dos sistemas de controle assim como o treinamento que pode ser disponibilizado aumentam a operabilidade.

A operabilidade também depende de fatores externos ao sistema. Um mesmo sistema pode ter maior ou menor operabilidade dependendo da maior ou menor afinidade com a cultura operacional da organização que o adquire.

A interoperabilidade está relacionada à capacidade do sistema de ter interfaces desenvolvidas para operação com diversos sistemas diferentes. O sistema deve ser capaz de receber, processar e responder informações com sistemas de informação e controle de características distintas.

Tabela 4.6 – Interoperabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Projeto de detalhamento pode considerar as mais diversas condições de operação e interface
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Não disponível comercialmente
Hamworthy	Média	Média	Média	Média	Sistemas similares usados em navios operando em interface com sistemas variados
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Adequações de engenharia são limitadas. Projeto padrão industrial.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto de detalhamento pode considerar as mais diversas condições de operação e interface
Kryopac EXP	Média	Baixa	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Sistema é concebido para operar sob condições específicas

4.7 Estabilidade

A estabilidade de um sistema é sua capacidade de manter estável suas funções mesmo quando submetido a entradas variáveis.

As plantas de liquefação de GN estão sujeitas a variações na composição do gás que recebem na entrada. Certos ciclos são pouco tolerantes a estas variações e exigem manobras operacionais para estabilização do funcionamento. Por outro lado, há sistema que toleram variações de entrada significativas sem que para isso exijam medidas operacionais.

Tabela 4.7 – Estabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Média	Alta	Processo a refrigerante misto, pouco tolerante a variações na composição do gás de entrada
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Apresentou grande variação de desempenho em função da composição do gás de entrada (GTI, 2003).
Hamworthy	Alta	Média	Média	Alta	Substância simples (N ₂) como refrigerante
Kryopac PCMR	Alta	Baixa	Média	Alta	Idem ao PRICO
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Expansor confere estabilidade
Kryopac EXP	Alta	Baixa	Média	Alta	Expansor confere estabilidade
Let-down	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Uso expansor admite variações na composição do gás a partir gasoduto.

4.8 Substitubilidade e Itercambialidade

É a capacidade de uma planta de manter a entrega de suas funções originais por meio da substituição de suas partes ou componentes seja por uma gama significativa de opções de mercado, seja pela possibilidade de intercambiar partes reserva em uma ampla gama de funções.

Tabela 4.8 – Intercambialidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	<i>Offshore</i>	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Média	Baixa	Média	Média	Projeto pode ser desenvolvido visando intercambialidade e fornecimento de peças reserva críticas
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Rede de fornecedores é limitada.
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Idem PRICO com a vantagem de usar menos componentes
Kryopac PCMR	Média	Média	Média	Média	Componentes padronizados, rede de fornecedores desenvolvida
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Média	Média	Média	Média	Rede de fornecedores é limitada.

4.9 Maturidade Comercial e Tecnológica

A maturidade comercial e tecnológica de plantas de liquefação pode ser identificada pelo histórico de unidades construídas em escala experimental e industrial, pelo número de unidades que operam comercialmente de forma satisfatória e, por fim, observando a trajetória do custo unitário da capacidade instalada que tende a ser decrescente ao longo do tempo.

As tecnologias consideradas “provadas”, ou seja, com um histórico mínimo de 3 a 5 plantas comerciais com desempenho satisfatório tendem a ser opções mais prováveis de escolha pois não adicionam risco de retorno financeiro aos projetos (FOGLIETTA, 2004).

Com o avanço da maturidade espera-se que seja acompanhada pelo avanço da previsibilidade e repetibilidade na entrega das funções previstas em projeto.

Tabela 4.9 – Maturidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Longo histórico comercial
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Em fase inicial de desenvolvimento.
Hamworthy	Média	Média	Média	Média	Operação comercial desde 2003, aplicações similares em navios para reliquefação é satisfatória com diversas unidades em operação (HAMWORTHY, 2006)
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Diversas plantas em operação em escala comercial.
Pré-cooled Dual TEX	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Simulações e projeto detalhado avançado e consistentes foram desenvolvidos. Histórico comercial a ser desenvolvido.
Kryopac EXP	Média	Baixa	Média	Média	Uso comercial em expansão.
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Primeiras unidades comerciais em início operação

4.10 Obsolescência

O grau de obsolescência de uma tecnologia pode ser verificada por meio de *benchmarks* ou referências comerciais amplamente reconhecidas. A obsolescência é uma característica que depende das propriedades eleitas para comparação e da disponibilidade de informações confiáveis e significativas para comparação.

Tabela 4.10 – Obsolescência: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Alta	Baixa	Média	Embora sua concepção date a década de 60 passou por diversas melhorias e seu desempenho é satisfatório.
GTI	Média	Alta	Alta	Média	Uso componentes industriais comuns
Hamworthy	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Uso de <i>companders</i> de desenvolvimento recente
Kryopac PCMR	Baixa	Alta	Média	Baixa	<i>Skids</i> não visam operação <i>offshore</i>
Pré-cooled Dual TEX	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Turboexpansores tiveram grande desenvolvimento recente.
Kryopac EXP	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Uso de expansores de desenvolvimento recente GE Rotoflow (SALOF, 2006)
Let-down	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Uso de expansores de desenvolvimento recente

4.11 Revampeabilidade

Relacionado à capacidade de uma determinada planta de sofrer modernizações, ampliações e adequações de forma a estender e/ou melhorar sua capacidade de entrega de suas funções. A revampeabilidade tem laços que são inerentes à tecnologia empregada mas muitas vezes também é afetada por decisões de concepção do projeto.

Tabela 4.11 – Revampeabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Plantas existentes reformadas e vida estendida.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Em fase inicial de desenvolvimento
Hamworthy	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Projeto de detalhamento passível de adequações ao longo da vida útil
Kryopac PCMR	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Projeto com alto grau padronização favorece substituição.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Idem Hamworthy
Kryopac EXP	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Poucos componentes e simplicidade

4.12 Derivabilidade

A derivabilidade é uma propriedade de forte conteúdo estratégico associada a uma tecnologia e também tem diversas vertentes de valor a serem exploradas.

A primeira delas é a derivabilidade de funções. Esta é a capacidade da tecnologia de, por meio de desenvolvimentos complementares, entregar novas funções (por exemplo, sistemas que usam turbo-expansores podem sofrer adaptações para gerar energia elétrica ou acionar um eixo)

Há a derivabilidade de sistemas que, embora entreguem funções semelhantes, podem ser implementados por meio de múltiplas arquiteturas (por exemplo, sistemas com expansores podem usar expansores centrífugos ou alternativos)

Por fim, há a derivabilidade de produtos. Há tecnologias das quais é possível a entrega de uma ampla gama de produtos tais como GNL com diferentes níveis de pureza assim como LGN ou GN a baixa pressão.

Há também outros fatores derivados da opção por uma tecnologia tais como recursos humanos especializados e expansão da rede de fornecedores

Derivabilidade interna e externa. Interna: de dentro para fora do sistema, ou seja, a oportunidade de expansão de competências para outras áreas já maduras a partir do investimento na tecnologia. Externa, por exemplo: aproveitamento da expertise em operação de FPSO na operação de FLNG.

Tabela 4.12 – Derivabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Média	Alta	Alta	Múltiplas arquiteturas físicas são possíveis como arranjo de compressores e acionamentos. Extração de LGN e seu fracionamento é alternativa.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Um único sistema foi desenvolvido.
Hamworthy	Média	Média	Média	Média	Há sistemas similares desenvolvidos para recuperação de voláteis, reliquefação de GLP e GNL <i>offshore</i> .
Kryopac PCMR	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Projeto industrial padronizado
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Potencial para múltiplas arquiteturas físicas e arranjos de expansores.
Kryopac EXP	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Poucos sistemas foram construídos com grande similaridade.

4.13 Suportabilidade (Suporte Logístico Integrado)

Algumas das propriedades associadas à uma solução tecnológica são derivadas das organizações que licenciam o uso ou fornecem diretamente os equipamentos, software e serviços associados. A suportabilidade é uma destas propriedades e está diretamente relacionada com os seguintes fatores:

- operação, manutenção e treinamento;
- ciclo de vida planejado para o sistema para que este atenda a seu propósito;
- aspectos possíveis de serem implementados no projeto visando a suportabilidade da planta;
- desenvolvimento de uma estrutura integrada de suporte;
- necessidade intrínsecas de suporte tais como componentes, software, informações, recursos humanos, materiais e meios de acesso.
- determinação de requisitos para execução de substituição de consumíveis, reparos, concertos e inspeções.

Dentre as tecnologias para produção de GNL em análise verificamos:

- quais podem ser adequadamente suportáveis por meio da capacidade de atender a requisitos de projeto para cada aplicação analisada;
- quais os meios de suporte economicamente viáveis podem ser identificados para uso após a fase de instalação da planta;
- quais oferecem meios de se planejar o suporte à operação após as atividades de fabricação dos componentes do sistema cessar.

O **grau de nacionalização** pode oferecer maior suportabilidade à planta uma vez que os sub-fornecedores nacionais podem fazer pronto uso de sua estrutura local sem aumento de custos.

Tabela 4.13 – Suportabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Suporte Black & Veacht – escala mundial
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Fornecedores locais (EUA)
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Suporte Hamworthy – escala mundial
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Suporte Kryopac – escala mundial
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Suporte ABB Lummus – escala mundial
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Suporte Kryopac – escala regional
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Suporte local (EUA)

4.14 Escalabilidade

A escalabilidade é a propriedade de um sistema de poder ter seus limites físicos ampliados de forma a obter correspondente aumento de capacidade sem perda significativa de suas demais características. A escalabilidade também está associada ao aspecto econômico: nem sempre o aumento de escala físico está associado a uma redução do custo unitário da capacidade disponibilizada.

Tabela 4.14 – Escalabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	<i>Offshore</i>	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Projetos de detalhamento para ampla faixa de capacidades pode ser desenvolvido com uso de COTS
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Uma planta com componentes específicos foi desenvolvida em escala experimental.
Hamworthy	Média	Média	Média	Média	Unidades em diversas capacidades foram construídas
Kryopac PCMR	Alta	Baixa	Alta	Alta	Módulos de diversas capacidades disponíveis
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac EXP	Alta	Baixa	Alta	Alta	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Adequado para pequenas capacidades

4.15 Flexibilidade

Flexibilidade é a capacidade da planta de ser reconfigurável de forma a expandir ou suportar novas funcionalidades.

Tabela 4.15 – Flexibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Admite diversos níveis de pressão, separação de LGN, arranjos diversos de compressores e acionamentos. Projeto sob encomenda.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Somente uma unidade com componentes específicos foi desenvolvida
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Projeto sob encomenda.
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Projeto padronizado
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto sob encomenda.
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Projeto padronizado
Let-down	Alta	Baixa	Baixa	Média	Configuração pré-definida

4.16 Modularidade

A modularidade ou grau de abertura de uma arquitetura é a capacidade de um sistema de aceitar a substituição de peças e/ou componentes baseado em especificações de interface. Este recurso, conhecido como “caixa-preta”, é um instrumento importante para realização de estudos de alternativas de fornecimento visando otimização de custo e condições gerais de fornecimento.

Tabela 4.16 – Modularidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Requisitos específicos para aplicação <i>offshore</i> reduzem abertura de arquitetura.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	A ser desenvolvido
Hamworthy	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Uso de <i>companders</i> e PFHE limita substituições
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Projeto padronizado com rede de fornecedores desenvolvida
Pré-cooled Dual TEX	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Projeto sob encomenda limita componentes tipo “caixa preta”
Kryopac EXP	Média	Baixa	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	A ser desenvolvido

4.17 Pré-Fabricação e Montagem

Níveis diferentes de pré-fabricação e montagem podem ser obtidos em função da arquitetura física da planta, porte, tecnologia empregada e concepção de projeto. O maior grau de pré-fabricação e montagem é obtido em unidades construídas em *skids*⁴. Os *skids* reduzem o tempo de instalação e partida, contribuem para redução de riscos de falha e desempenho e entregam maior qualidade.

Tabela 4.17 – Pré-Fabricação: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	Projetos sob encomenda
GTI	Alto	Baixo	Baixo	Médio	Pouco número de componentes e porte favorece construção modular.
Hamworthy	Alto	Alto	Alto	Médio	Projeto sob encomenda, pode ter construção modular tais como os modelos similares embarcados em navios
Kryopac PCMR	Alto	Médio	Médio	Alto	Construção modular padronizada
Pré-cooled Dual TEX	Alto	Alto	Alto	Médio	Projeto sob encomenda, pode ter construção modular
Kryopac EXP	Alto	Médio	Médio	Alto	Construção modular padronizada
Let-down	Alto	Baixo	Baixo	Médio	Pela simplicidade pode ser construído em módulos.

⁴ *Skid*: conceito de fornecimento para conjunto integrado de equipamentos e sistema de controle (*software*) em que estes são fornecidos em um único módulo completo pronto para operação, sendo necessário apenas de sua colocação sobre base e interligação nos limites de bateria.

4.18 Robustez

Robustez é a capacidade de uma planta de ajustar sua operação mantendo a entrega de suas funções tolerando a ocorrência de falhas internas ou externas e eventos inesperados que possam afetar seu conjunto mecânico ou seu sistema de controle. Há aspectos da robustez intrínsecos à tecnologia adotada, relacionado ao processo de liquefação, e outros que podem ser bastante alterados em função de decisões de projeto, seleção de materiais, espessuras de parede e seleção de equipamentos.

Tabela 4.18 – Robustez: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Média	Baixa	Média	Média	Ciclo a refrigerante misto restringe robustez processual. Critério de projeto, redundância e seleção de equipamentos podem elevar robustez
GTI	Média	Baixa	Baixa	Média	Demonstrou robustez processual com perda de desempenho
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Ciclo a nitrogênio gasoso e expansores conferem robustez. Adequações de projeto podem aumentar esta característica.
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Baixa	Média	Ciclo a refrigerante misto e padronização de projeto podem ser restritivos.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Uso de expansores e metano como fluido refrigerante aumentam robustez processual. Critérios de projeto, redundância e seleção equipamentos também contribuem.
Kryopac EXP	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Padronização pode ser restritiva
Let-down	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Simplicidade processual contribui para robustez.

4.19 Transparência

A transparência é o grau de interatividade com a arquitetura da planta sem que seja necessário o conhecimento pleno de sua arquitetura física. A transparência reflete diretamente no domínio operacional da planta. Sistema com alto grau de transparência em geral são passíveis de maior instrumentação e incluem softwares de monitoramento e diagnóstico avançados, o resultado é a maximização da entrega das funções da planta e minimização de custos operacionais ao longo de sua vida útil.

Tabela 4.19 – Transparência: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Média	Alta	Alta	Projeto sob encomenda pode conferir elevada transparência.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Em fase inicial de desenvolvimento
Hamworthy	Alta	Alta	Alta	Alta	Projeto sob encomenda pode conferir elevada transparência.
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Interface operacional padronizada
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Idem Hamworthy
Kryopac EXP	Média	Baixa	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Média	Baixa	Média	Média	Interface operacional simples desenvolvimento/vida.

4.20 Vulnerabilidade

A vulnerabilidade é a propriedade de uma planta de não ter suas funções afetadas por ameaças externas, ou seja, do ambiente em que deverá desempenhar suas funções. A vulnerabilidade é particularmente importante para plantas a serem instaladas em ambientes agressivos tais como os sob influência marítima e de localização remota. Plantas com grande capacidade de armazenagem e transferência de GNL exigem requisitos de projetos específicos para limitar sua vulnerabilidade.

Tabela 4.20 – Vulnerabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Alta	Média	Baixa	Projeto sob encomenda reduz vulnerabilidade
GTI	Alta	Alta	Alta	Alta	Somente uma unidade operando em condições não comerciais
Hamworthy	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Diversas unidades similares construídas e operando inclusive em ambiente marítimo
Kryopac PCMR	Baixa	Alta	Alta	Média	Padronização pode gerar grande vulnerabilidade em ambientes não previstos em projeto.
Pré-cooled Dual TEX	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Projeto sob encomenda reduz vulnerabilidade
Kryopac EXP	Baixa	Alta	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Não desenvolvido para ambiente marítimo ou aplicações remotas.

4.21 Similaridade e Afinidade

Similaridade e afinidade são propriedades com forte conteúdo subjetivo e dependem das características da organização usuária da planta. Uma empresa com histórico de projeto, instalação, testes e operação de sistema criogênicos poderá identificar aspectos de similaridade e afinidade com suas operações e objetivos estratégicos de forma a influenciar nos requisitos a serem aplicáveis em sua planta de produção de GNL.

Tabela 4.21 – Similaridade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Média	Alta	Alta	Admitido usuário indústria do petróleo
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Admitido usuário industrial
Hamworthy	Média	Baixa	Baixa	Média	Idem acima
Kryopac PCMR	Alta	Baixa	Média	Alta	Idem acima
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Média	Alta	Alta	Admitido usuário indústria do petróleo
Kryopac EXP	Alta	Baixa	Média	Alta	Admitido usuário industrial
Let-down	Média	Baixa	Baixa	Média	Idem acima

4.22 Outras Propriedades

Simplicidade: grau em que a planta pode ser objetivamente projetada, fabricada, instalada e operada; de fácil compreensão aos envolvidos ao longo de seu ciclo de vida. A Simplicidade envolve a producibilidade que é a facilidade de fabricação, montagem e inspeção e testes.

Tabela 4.22 – Simplicidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	<i>Offshore</i>	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Uso de mistura condensável de refrigerantes eleva complexidade
GTI	Média	Baixa	Baixa	Média	Aparentemente simples porém não atingiu maturidade comercial
Hamworthy	Alta	Alta	Alta	Alta	Poucos componentes, refrigerante substância simples em fase gasosa.
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Modular, padronizada
Pré-cooled Dual TEX	Média	Média	Média	Média	Expansores conferem simplicidade aliado ao uso de refrigerantes gasosos o que elimina vasos separadores, bombas e armazenamento.
Kryopac EXP	Alta	Alta	Alta	Alta	Modular, padronizada
Let-down	Alta	Baixa	Baixa	Alta	Poucos componentes favorecem simplicidade

Testabilidade: propriedade de grande importância em ativos de infra-estrutura de alto desempenho técnico-econômico. A testabilidade é o grau em que os requisitos de uma planta podem ser definidos de forma que se possa associar rotinas de testes – de preferência normalizadas e de ampla aceitação - e critérios de desempenho para determinar o cumprimento dos mesmos e conseqüentemente avançar uma etapa para aceitação do sistema.

A testabilidade é afetada pelo grau de maturidade da indústria em que a tecnologia é aplicada. Assim, para caracterizar a aceitação de uma planta na indústria petrolífera são exigidos testes, procedimentos e critérios normalmente distintos de uma aplicação em um usuário final, por exemplo.

Tabela 4.23 – Testabilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Alta	Alta	Conforme normas indústria petróleo: ASME, API, ASTM e outras.
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Testes não comerciais realizados
Hamworthy	Alta	Alta	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Conforme procedimentos padrão estabelecidos pelo fabricante
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac EXP	Média	Média	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Idem GTI

Vida útil: uma vertente da vida útil é a tecnológica e, portanto, associada à obsolescência da planta: potencial para que esta seja substituída em função de desenvolvimentos tecnológicos concorrentes. A outra vertente é aquela relacionada à durabilidade/percibilidade das funções processuais e mecânicas da planta. Esta característica é determinada por requisitos de projeto que impliquem na seleção e critérios de projeto de equipamentos tais como sobressessuras de corrosão e uso de bombas API em vez de ANSI.

Tabela 4.24 – Extensão Ciclo de Vida: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	<i>Offshore</i>	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Alta	Baixa	Média	Alta	Projeto conforme normas da indústria do petróleo garantem vida útil por 20 anos
GTI	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Sistema em fase inicial de desenvolvimento
Hamworthy	Alta	Média	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac PCMR	Média	Baixa	Média	Média	Projeto padrão industrial. Expectativa de vida útil mínima 10 anos.
Pré-cooled Dual TEX	Alta	Alta	Alta	Alta	Idem PRICO
Kryopac EXP	Média	Baixa	Média	Média	Idem PCMR
Let-down	Média	Baixa	Baixa	Média	Vida útil média de 10 anos.

Intervencibilidade: capacidade da planta de operar e manter a entrega de suas funções sem a intervenção externa e de seus operadores. Há sistemas capazes de alterar seu modo de operação para manutenção de suas funções seja por razões processuais, mecânicas ou devido a seu sistema de controle.

Tabela 4.25 – Intervencibilidade: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	<i>Offshore</i>	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Variações na composição do gás tornam operação mais complexa e problemática
GTI	Alta	Alta	Alta	Alta	Sistema em fase de desenvolvimento
Hamworthy	Baixa	Média	Baixa	Baixa	Plantas construídas operam de forma automática com visitas periódicas de inspeção (HAMWORTHY, 2006)
Kryopac PCMR	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Operadores aptos a operar com treinamento padrão em condições uniformes de operação
Pré-cooled Dual TEX	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	Projeto pode maximizar a automação. Expansores requer poucas manobras operacionais.
Kryopac EXP	Baixa	Média	Média	Baixa	Idem PCMR
Let-down	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Operação simples em condições uniforme de operação.

Tempo de resposta (*responsivity*): Tempo necessário para obter a entrega necessária das funções do sistema a partir de uma entrada específica, seja esta um comando de partida, por exemplo, ou uma variação nas condições do GN de entrada, ou ainda ambientais e de operação.

Tabela 4.26 – Tempo de Resposta: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Rápido	Lento	Moderado	Rápido	Complexidade operacional pode retardar resposta satisfatória.
GTI	Lento	Lento	Lento	Lento	Em desenvolvimento.
Hamworthy	Rápido	Moderado	Moderado	Rápido	Simplicidade operacional aliado a projeto sob encomenda favorece respostas rápidas
Kryopac PCMR	Rápido	Lento	Moderado	Rápido	Ciclo a refrigerante misto pode não oferecer resposta satisfatória quando sujeito a variações de entrada
Pré-cooled Dual TEX	Rápido	Moderado	Moderado	Rápido	Idem Hamworthy
Kryopac EXP	Rápido	Moderado	Moderado	Rápido	Simplicidade operacional favorece respostas rápidas com eventuais limitações de projeto padronizado
Let-down	Rápido	Lento	Lento	Rápido	Rapidez em situações de variações controladas.

Transportabilidade: capacidade da planta de se deslocar por meio de reboque, propulsão própria ou por meio de barcaças, ferrovias ou transporte rodoviário.

Potencial de mercado: relacionado ao potencial de domínio do mercado. Tecnologias com alta capacidade de satisfação de suas funções básicas podem ser a segunda opção quando uma outra alternativa se torna dominante no mercado.

Tabela 4.27 – Potencial: Uma Correlação entre Tecnologias e Aplicações

	Combustível transporte	Offshore	Campos remotos	Pulmão	Comentários
PRICO	Baixo	Baixo	Alto	Alto	Mercado maduro para média capacidade e operação de base.
GTI	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	No atual estágio de desenvolvimento
Hamworthy	Médio	Alto	Alto	Alto	Aplicações <i>offshore</i> e especiais
Kryopac PCMR	Médio	Baixo	Médio	Médio	Aplicações em condições industriais
Pré-cooled Dual TEX	Médio	Alto	Alto	Médio	Potencial para instalações embarcadas com alto grau especialização e desenvolvimento de projeto detalhado na indústria de petróleo.
Kryopac EXP	Médio	Baixo	Médio	Médio	Aplicações em condições industriais com alguma exigência por desempenho
Let-down	Alto	Baixo	Baixo	Baixo	Interesse inicial para pequena escala de produção visando abastecimento de veículos (INL, 2006)

Eficiência: o grau de eficiência de uma planta aqui adotado é a quantidade de GNL produzida em relação à quantidade de energia consumida pelo sistema. A Tabela 2.5 apresentada mostra um comparativo referencial das eficiências para cada tecnologia apresentada. A eficiência é um parâmetro clássico para comparação de sistemas, seu valor real é refinado à medida que as fases de projeto avançam para o detalhamento. A eficiência sofre grande influência das condições ambiente da instalação e da composição do GN processado.

5 Painéis de Decisão – A Aplicação das Tecnologias para Uso do GNL no Brasil

5.1 Introdução

Neste Capítulo é proposta, por meio das propriedades apresentadas no capítulo anterior, uma correlação entre as tecnologias para produção de GNL e as oportunidades para seu uso no Brasil discutidas anteriormente. Por meio de uma seqüência lógica estruturada as necessidades identificadas anteriormente são transformadas em uma configuração ou arquitetura física preferencial de um sistema de liquefação por meio da indicação da tecnologia com maior chance de obter êxito no desempenho de suas funções (VALERIANO, 1998, p.119).

A tecnologia do sistema de liquefação tem maior influência no custo total da cadeia de GNL, correspondendo por aproximadamente 50% do custo da planta de liquefação (CASCONI, 2005). Por esta razão, um peso menor é atribuído aos demais componentes da arquitetura tais como armazenagem e disponibilização (*send-out*), tratamento do gás, separação de condensados e utilidades. Uma análise econômica em uma fase posterior e que considere as características específicas dos locais de instalação e condições de operação próprias das organizações envolvidas pode indicar rotas para um possível compromisso de soluções porém, sem alterar a arquitetura principal apontada nesta fase.

É necessário aqui tornar explícito um aspecto referente a uma definição do que é apropriado ou não no julgamento das aplicações. Na cadeia do GNL existem naturalmente um amplo espectro de interessados – pessoas físicas ou jurídicas e instituições da esfera pública que são, de alguma forma, afetados pela implementação da operação da cadeia do GNL no Brasil – e, portanto, um caráter nem sempre convergente de opiniões.

5.2 Metodologia

Este capítulo apresenta, para cada aplicação discutida, um painel de decisão que relaciona a(s) tecnologia(s) com maior probabilidade de êxito na entrega de suas funções em cada caso.

Cada painel é um resumo das propriedades apresentadas e discutidas até aqui. Para isso se vale de uma representação numérica facilitando a operacionalização até obtenção do resultado. A tabela também traz pesos associados a cada propriedade que indicam, para cada aplicação discutida, a maior ou menor relevância para entrega das funções atribuída a cada uma das propriedades. Assim, o peso de valor 3 é atribuído à propriedade considerada muito relevante para desempenho das funções, peso de valor 2 quando a propriedade é relevante e valor 1 quando pouco relevante.

Além dos pesos, para cada propriedade e tecnologia é atribuído valor numérico que pode ser 5, 3 ou 1. 5 indica que aquela tecnologia é muito capaz de entregar as funções necessárias por meio daquela propriedade em questão, 3 indica capacidade moderada e 1 indica que é pouco provável o desempenho das funções fazendo uso da propriedade em questão. Estes valores foram assim escolhidos por possibilitarem uma adequada discretização que, ao final, quando somadas e ponderadas pelos respectivos pesos possibilitam extrair conclusão e dados para análise.

Os painéis de decisão assim apresentados embutem o julgamento do autor sobre cada aspecto analisado. O autor faz uso de sua própria experiência como engenheiro que participa do desenvolvimento de sistemas de engenharia, particularmente nas áreas de infra-estrutura em energia e indústrias. A metodologia apresentada, no entanto, disponibiliza os meios para que, em outros ambientes de análise, diferentes perspectivas sejam consideradas e integradas segundo o julgamento de um ou mais interessados envolvidos.

Os dados apresentados nos painéis de decisão e a forma como foram construídos desde a identificação da necessidade, os requisitos e funções necessárias, bem como as propriedades relevantes dos sistemas que compõem a cadeia do GNL permitem a realização de estudos de sensibilidade e de trocas de compromisso, conhecidas como *trade-offs*. Nos estudos de sensibilidade, um ou mais aspectos considerados chave no processo decisório podem ser variados de cada vez mantendo todos os demais constantes para que seja possível a observação de seu

impacto no resultado final obtido. As trocas de compromisso consistem na maximização de um ou mais parâmetros de análise em detrimento de outros com valor inicial de mesma proporção. O objetivo é compor cenários que possam subsidiar a maximização do valor percebido, ou seja, o aumento na certeza de êxito no desempenho das funções a serem entregues pelo sistema.

5.3 Painéis de Decisão e Resultados

5.3.1 Aplicação *Offshore*

Em função dos elevados requisitos operacionais e a alta complexidade funcional apresentados anteriormente, esta aplicação é aquela que conseqüentemente demanda intensamente e de forma simultânea a maioria das propriedades discutidas para sistemas de produção de GNL. O alto peso atribuído na tabela abaixo reflete esta característica esperada de plantas para produção *offshore* de GNL.

Nesta aplicação, não são consideradas as tecnologias GTI e *Let-down* por sua escala de produção não ser compatível com os volumes esperados neste caso.

A Tabela 5.1 mostra os valores atribuídos a cada propriedade comparada para cada tecnologia e, na última linha, está destacado em negrito aquela opção que é a mais recomendada para aplicação *offshore* que é a Pre-cooled Dual TEX.

O desenvolvimento de campos *offshore* está intimamente ligado às atividades desenvolvidas no âmbito da indústria do petróleo o que conseqüentemente é um fator que favorece as tecnologias orientadas para esta indústria como é o caso da PRICO e *Pre-cooled Dual TEX*. Apesar disso, os ciclos Hamworthy e Kryopak EXP foram respectivamente classificados em segundo e terceiro lugares. Nas duas últimas colocações estão os ciclos PRICO e Kryopak PCMR

Tabela 5.1 – Painel de Decisão para Aplicação *Offshore*

	PESO	PRICO	Hamworthy	Kryopac PCMR	Pre-cooled Dual TEX	Kryopac EXP
Confiabilidade	3	1	5	1	5	3
Disponibilidade	3	1	5	1	5	3
Manutenibilidade	2	3	5	1	5	3
Sustentabilidade	3	1	5	1	5	5
Adaptabilidade	3	1	5	1	5	3
Operabilidade	3	5	5	3	5	3
Estabilidade	3	1	3	1	5	3
Itercambialidade	2	5	3	3	5	3
Maturidade	3	5	3	3	3	3
Obsolescência	1	3	5	3	5	5
Revampeabilidade	2	5	3	3	5	3
Derivabilidade	1	1	3	1	5	1
Suportabilidade	2	5	3	3	5	3
Escalabilidade	3	5	3	3	5	3
Flexibilidade	3	1	5	1	5	3
Modularidade	2	1	5	5	5	5
Pré-Fabricação	3	1	3	5	3	5
Robustez	3	1	3	1	5	3
Transparência	3	3	5	3	5	3
Vulnerabilidade	3	1	5	1	5	3
Similaridade	2	3	3	1	3	1
Simplicidade	2	1	5	1	3	5
Testabilidade	3	5	5	3	5	3
Vida útil	3	3	5	3	5	3
Intervencibilidade	3	1	5	1	5	5
Tempo de resposta	3	1	5	3	5	5
Transportabilidade	3	1	5	3	5	5
Potencial mercado	2	1	5	1	5	3
Eficiência	3	1	5	1	5	3
TOTAL		169	327	157	355	259

Os resultados assim obtidos são compatíveis com a expectativa apontada pela literatura de que os ciclos que usam expansores são aqueles mais prováveis para aplicação *offshore* enquanto que aqueles a refrigerante misto dificilmente serão exeqüíveis. As primeiras duas tecnologias se destacam com uma vantagem ligeiramente significativa do ciclo *Pre-cooled Dual TEX* o que pode ser atribuído às seguintes propriedades com maior peso: estabilidade, escalabilidade e robustez. Esta vantagem está associada à capacidade desenvolvimento de projetos sob encomenda que considere ampla gama de expansores recentemente desenvolvidos considerando padrões compatíveis com as normas praticadas na indústria de petróleo enquanto que o uso dos *companders*, embora bastante promissor, necessita ser mais difundido para uma aceitação mais ampla.

5.3.2 Aplicação Demandas de Pico e Pulmão

A aplicação de sistemas de produção e disponibilização de GNL para formação de pulmões estratégicos e atendimento à demanda de pico pode encontrar aplicações que vão além das fronteiras da indústria do petróleo e encontrar usuários em diversos ramos industriais e do setor de energia. Propriedades relacionadas à operação e suporte à operação tem relevância significativa.

A Tabela 5.2 mostra o painel comparativo das diversas tecnologias e indica a tecnologia Kryopac EXP como a recomendada para a aplicação.

O ciclo aberto baseado em expansores desenvolvido pelo Kryopac leva significativa vantagem sobre o Hamworthy e o *Let-down*, respectivamente o segundo e terceiro colocados, por ser capaz de entregar o conjunto de funções necessárias para aplicação tão bem quanto as alternativas mais bem colocadas com a vantagem de um projeto padronizado compatível com o nível exigido pela indústria em geral e onde sobressai a sua simplicidade e similaridade operacional com padrão tipicamente industrial.

Tabela 5.2 – Painel de Decisão para Aplicação como Pulmão Energético

	PESO	PRICO	GTI	Hamworthy	Kryopac PCMR	Pré-cooled Dual TEX	Kryopac EXP	Let-down
Confiabilidade	2	5	1	5	5	5	5	3
Disponibilidade	2	5	1	5	5	5	5	3
Manutenabilidade	1	5	1	3	3	5	3	3
Sustentabilidade	3	1	3	5	3	3	5	5
Adaptabilidade	1	5	3	5	3	5	5	5
Operabilidade	3	3	1	5	5	3	5	5
Estabilidade	2	5	3	5	3	5	5	5
Itercambialidade	2	3	1	3	5	3	5	5
Maturidade	3	5	1	5	5	3	5	3
Obsolescência	1	3	3	3	3	5	5	5
Revampeabilidade	2	5	1	3	3	5	3	5
Derivabilidade	2	1	3	3	3	1	3	3
Suportabilidade	3	5	1	3	3	5	3	3
Escalabilidade	3	5	1	5	5	5	5	3
Flexibilidade	1	1	3	5	3	5	5	3
Modularidade	1	1	3	3	5	3	5	5
Pré-Fabricação	1	1	3	5	5	3	5	5
Robustez	2	5	1	5	5	5	5	3
Transparência	3	3	1	5	3	3	5	5
Vulnerabilidade	1	5	1	5	3	5	5	5
Similaridade	3	1	3	3	3	3	5	5
Simplicidade	3	1	3	3	3	3	5	5
Testabilidade	2	5	1	5	5	5	5	5
Vida útil	2	5	3	5	5	5	5	5
Intervencibilidade	2	3	1	5	3	3	5	3
Tempo de resposta	1	3	1	5	3	5	5	5
Transportabilidade	1	1	3	5	5	3	5	5
Potencial mercado	3	3	3	5	5	3	5	5
Eficiência	2	1	3	5	1	5	3	5
TOTAL		192	110	254	224	226	270	248

Os demais ciclos com expansores demonstram vantagem sobre os ciclos a refrigerante misto, mais complexos e que exigem maior especialização operacional e suporte logístico.

5.3.3 Aplicação da produção de GNL como Combustível Veicular

A produção e distribuição de GNL para disponibilização de combustível veicular é a aplicação com menor complexidade funcional dentre as apresentadas neste trabalho e também aquela com requisitos menos restritivos. Por esta razão, a satisfação das necessidades envolvidas nesta aplicação, dependem de forma menos crítica de um conjunto extenso de propriedades o que reflete nos pesos considerados.

A Tabela 5.3 mostra o comparativo das tecnologias e aponta o ciclo a nitrogênio Hamworthy como o de maior chance de êxito na disponibilização de GN como combustível veicular.

O ciclo Hamworthy é capaz de desempenhar as funções exigidas para a aplicação valendo-se das propriedades consideradas mais relevantes tão bem quanto às duas outras alternativas mais recomendáveis, a Let-down e a Kryopac EXP. A vantagem demonstrada pelo ciclo Hamworthy advém das propriedades consideradas como de média relevância: adaptabilidade, estabilidade, revampeabilidade, suportabilidade, flexibilidade, robustez, testabilidade e eficiência. O bom desempenho na quase totalidade destas propriedades está relacionado à realização do projeto sob encomenda que é capaz de melhorar a forma como as funções são entregues pelo sistema sem prejuízo à propriedades inerentes à sua concepção básica.

Tabela 5.3 – Painel de Decisão para Aplicação como Combustível Veicular

	PESO	PRICO	GTI	Hamworthy	PCMR	Dual TEX	EXP	Let-down
Confiabilidade	2	5	1	5	5	5	5	3
Disponibilidade	2	5	3	5	3	5	5	5
Manutenabilidade	2	5	1	5	5	5	5	5
Sustentabilidade	3	1	3	5	3	3	5	5
Adaptabilidade	1	3	3	5	1	3	3	5
Operabilidade	1	5	1	5	3	3	5	5
Estabilidade	2	3	1	5	3	3	3	5
Itercambialidade	1	1	1	3	5	3	5	3
Maturidade	3	5	1	3	3	1	3	3
Obsolescência	1	3	3	5	3	5	5	5
Revampeabilidade	2	5	1	5	3	5	3	5
Derivabilidade	1	3	1	5	3	5	3	5
Suportabilidade	2	5	1	5	3	5	3	3
Escalabilidade	1	5	1	5	3	5	3	3
Flexibilidade	2	3	3	5	3	5	5	3
Modularidade	3	1	3	5	5	3	5	5
Pré-Fabricação	3	1	3	5	5	3	5	5
Robustez	2	3	1	5	3	5	5	3
Transparência	3	3	1	5	3	3	5	5
Vulnerabilidade	1	5	1	5	3	5	5	5
Similaridade	1	1	3	1	3	1	3	3
Simplicidade	3	1	3	5	3	3	5	5
Testabilidade	2	5	1	5	3	5	3	3
Vida útil	2	5	3	5	5	5	5	5
Intervencibilidade	2	3	3	5	5	5	5	5
Tempo de resposta	1	5	3	5	5	5	5	5
Transportabilidade	1	1	3	5	3	3	5	5
Potencial mercado	3	5	1	3	3	3	5	5
Eficiência	2	1	3	5	1	5	3	5
TOTAL		179	109	257	191	211	241	243

5.3.4 Aplicação Campos Remotos

A aplicação do GNL no desenvolvimento de campo remotos também é uma atividade a ser desenvolvida no âmbito da indústria petrolífera. Por esta razão, muitos dos requisitos aplicáveis são os mesmos da aplicação *offshore* porém, atenuados pelo fato das instalações serem em terra o que reduziu o peso de algumas propriedades.

As tecnologias *Let-down* e GTI não foram consideradas em função da escala de produção incompatível com a aplicação.

A Tabela 5.4 mostra o comparativo entre as tecnologias sob a ótica dos campos remotos e mostra que opção mais recomendada é a Pre-cooled Dual TEX por uma pequena margem em relação ao ciclo a nitrogênio Hamworthy.

Os resultados mostram que os dois primeiros ciclos têm chance significativa de ocupar espaço no desenvolvimento de campos não tradicionais e que o ciclo PRICO, a opção mais conservadora a mão da indústria, terá pouca chance de viabilizar novas oportunidades na exploração e disponibilização de GN além daquelas para os quais foi tradicionalmente aplicado ao longo sua trajetória comercial.

A decisão entre o ciclo Hamworthy e o Pre-cooled Dual TEX depende em maior grau, nas condições da análise, de um balanço de compromisso (*trade-off*) das propriedades de confiabilidade, manutenibilidade, intercambialidade, maturidade, escalabilidade e eficiência. O ciclo Hamworthy demonstra maior maturidade por seus resultados comerciais satisfatórios, inclusive grande capacidade de entrega de suas funções com alta eficiência energética o que o coloca ligeiramente à frente da segunda opção. Aspectos de escalabilidade podem ser mais facilmente contornados em instalações em terra sem grande comprometimento da confiabilidade, manutenibilidade e intercambialidade.

Tabela 5.4 – Painel de Decisão para Desenvolvimento de Campos Não Convencionais

	PESO	PRICO	Hamworthy	PCMR	Dual TEX	EXP
Confiabilidade	3	3	5	1	3	3
Disponibilidade	3	3	5	1	5	3
Manutenabilidade	3	5	3	1	5	1
Sustentabilidade	3	1	5	1	5	5
Adaptabilidade	2	3	5	3	5	3
Operabilidade	1	5	5	3	5	3
Estabilidade	2	3	5	1	5	3
Itercambialidade	3	3	3	5	5	5
Maturidade	3	5	5	3	3	3
Obsolescência	1	3	5	3	5	3
Revampeabilidade	1	5	3	1	5	1
Derivabilidade	1	5	3	1	5	1
Suportabilidade	2	5	5	3	5	3
Escalabilidade	3	5	3	3	5	3
Flexibilidade	2	1	5	3	5	3
Modularidade	1	1	5	5	3	5
Pré-Fabricação	2	1	5	5	3	5
Robustez	3	3	5	3	5	3
Transparência	2	3	5	3	5	3
Vulnerabilidade	3	3	5	1	5	3
Similaridade	2	5	3	1	5	1
Simplicidade	1	1	5	3	3	5
Testabilidade	3	5	5	3	5	3
Vida útil	3	5	5	3	5	3
Intervencibilidade	3	1	5	1	5	3
Tempo de resposta	1	1	5	1	5	3
Transportabilidade	2	1	5	3	3	5
Potencial mercado	2	5	5	1	5	3
Eficiência	3	1	5	1	3	3
TOTAL		204	294	144	290	202

6 Conclusão

Esta dissertação apresenta uma metodologia cujo objetivo é indicar a tecnologia com maior chance de ser bem sucedida quando aplicada em um sistema para produção de GNL em cada uma das quatro aplicações identificados como relevantes no cenário energético brasileiro deste início do século XXI.

No capítulo introdutório, estão identificados os aspectos relevantes do contexto energético brasileiro relacionados ao gás natural e as razões pelas quais é interessante a utilização do GNL.

No segundo capítulo, é apresentada a perspectiva histórica do desenvolvimento da indústria de GNL no mundo. Os ciclos clássicos de liquefação e os principais equipamentos das plantas de GNL são apresentados abrindo caminho para as novas tecnologias para produção de GNL em pequena e média escala. O leitor tem contato o estado da arte para produção de GNL disponível na literatura científica atual. No final do capítulo há uma breve apresentação dos meios de armazenagem e transporte que integram a cadeia do GNL.

O terceiro capítulo discute as aplicações da cadeia do GNL no Brasil e seus benefícios. Quatro possíveis aplicações são consideradas: o GNL como meio para disponibilização de combustível para transporte, o aproveitamento de campos *offshore*, o aproveitamento de campos remotos e atendimento a demandas de pico e pulmões energéticos. Para cada caso, os requisitos e/ou restrições a serem considerados e as funções a serem desempenhas pelo sistema para satisfação da necessidade são identificados. Estas informações são o ponto de partida para determinação do possível sucesso de um sistema de produção de GNL na satisfação das necessidades identificadas.

O quarto capítulo pretende contribuir com a identificação e desenvolvimento de propriedades relevantes, não tradicionais, que podem ser atribuídas aos sistemas para produção e disponibilização de GNL. Estas propriedades podem ser entendidas como a expressão do valor disponibilizado pelo sistema na entrega das funções para as quais pode ser empregado. Dessa forma se constitui um conjunto de operadores por meio dos quais é possível construção de um painel estruturado de decisão onde as tecnologias são comparadas entre si. Cada propriedade é conceituada e uma

correlação fundamentada é apresentada entre cada tecnologia e a respectiva aplicação.

O quinto capítulo apresenta os painéis de decisão por meio dos quais é possível indicar qual tecnologia tem maior chance de obter sucesso quando usada em cada uma das quatro aplicações discutidas no capítulo 3. Uma discussão dos resultados é apresentada. O painel de decisão é estruturado com base nos conceitos de Engenharia de Sistemas.

Com base nos capítulos anteriores e principalmente nos resultados discutidos no capítulo anterior, retoma-se aqui a pergunta formulada no início desta dissertação:

- Quais propriedades funcionais como confiabilidade, disponibilidade, sustentabilidade, flexibilidade, robustez, escalabilidade, durabilidade, reciclabilidade e adaptabilidade contribuem para viabilizar a inserção do GNL no Brasil ?

Podemos afirmar que não há uma propriedade, ou conjunto delas, que determine a inserção do GNL no Brasil. É possível constatar que, para atender às necessidades identificadas no contexto energético brasileiro e usufruir de seus benefícios há tecnologias com grande chance de sucesso no desempenho das funções identificadas para tal. Dentre estas tecnologias, pode-se dizer que os ciclos com expansores demonstram maior chance de obter êxito em suprir os desafios que despontam em função das novas necessidades em termos da disponibilização e uso do GN no Brasil. Esta constatação marca uma tendência para uma nova arquitetura de soluções na indústria do GNL até aqui dominada pelos ciclos a refrigerante misto e o princípio de refrigeração baseado no efeito Joule-Thomson e na expansão isoentalpica.

É possível também apontar a tendência para o desenvolvimento de sistemas mais sustentáveis o que se manifesta por meio da busca pela simplicidade processual, a racionalização do uso de componentes e materiais, a maior eficiência energética e a menor periculosidade operacional e ambiental com uso de refrigerantes inertes ou o próprio metano do GN.

A tecnologia de produção e disponibilização é o elemento mais importante da cadeia porém, o ambiente em que é desenvolvida e a forma como é disponibilizada são fatores determinantes para sua aplicação e desempenho de suas funções nos ambientes e organizações que as adquirem.

Nesta Dissertação podemos concluir que as tecnologias disponíveis e em desenvolvimento para produção de GNL podem ser empregadas satisfatoriamente para elevar a oferta de GN e seu conteúdo de benefício tecnológico atendendo demandas que hoje encontram-se reprimidas no atual estágio de desenvolvimento do mercado de gás no Brasil. Vimos que rotas promissoras para aproveitamento de fontes e reservas que não são atrativas no modelo de exploração atual podem ser viabilizadas por meio das novas tecnologias disponíveis ou em desenvolvimento para produção de GNL.

A partir dos resultados obtidos nesta dissertação, é possível desenvolver a síntese de soluções para uma aplicação específica. Este processo responderá como a tecnologia indicada desempenhará suas funções para satisfação das necessidades.

Concomitante a este processo, estudos de viabilidade econômica considerando as peculiaridades do modelo de negócios que estará inserido, das diretrizes organizacionais e do ambiente regulatório em que estarão inseridos devem ser considerados.

Esta seqüência de desenvolvimento de um sistema a ser operado no Brasil é iterativa e dados gerados num processo posterior podem gerar novas entrada para o anterior gerando uma melhor aproximação dos dados de saída.

É importante mencionar que a dificuldade na obtenção de referências bibliográficas com conteúdo substancial para embasar uma análise mais aprofundada em muitos casos restringiu a capacidade de julgamento sobre determinados elementos apresentados ao longo do texto. Algumas tecnologias reconhecidamente destacadas para produção de GNL em pequena e média escala não foram incluídas na análise devido a quase inexistência de publicações técnicas. Dentre estas tecnologias estão as desenvolvidas pelas Linde AG (Alemanha), BOC (Reino Unido), Chart Industries Inc. e Chicago Bridge & Iron Co. (EUA).

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Considerações da SCM/ANP Quanto à Implantação da Unidade de Liquefação de Gás Natural no Município de Paulínea/SP – Projeto Gemini.** Fev/2005. (disponível em: http://www.anp.gov.br/gas/projeto_gemini.asp)

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Portaria ANP Nº 104, DE 08/07/2002 - DOU 09/07/2002: estabelece a especificação do gás natural, de origem nacional ou importada, a ser comercializada em todo o território nacional.**

AZEVEDO, J. S. G. **Brazilian Oil and Gas Perspectives: A National Oil Company Approach.** Presented at the 23rd World Gas Conference. Amsterdam: June, 9th 2006. Available at www.petrobras.com.br

BARCLAY, M.; DENTON, N. **Selecting Offshore LNG Processes.** Foster Wheeler Energy Limited, UK. LNG Journal. October 2005. Page 34 – 36.

BARRON, R. F. **Cryogenic Systems.** New York, USA: Mc Graw-Hill Book Company, 1966. 678 pp.

BGAZO, C. D. T.; CARVALHO, E. C.; SIMÕES-MOREIRA, J. R. **Small Scale LNG Plant Technologies.** SISEA – Alternative Energy Systems Laboratory. Mechanical Engineering Dept. at Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. November 2006.

BEJAN, A. **Advanced Engineering Thermodynamics.** EUA: Hardcover, 1986.

BEZERRA, V. **GÁS NATURAL: Ainda Há Espaço para Crescer.** Gás Brasil. 07/03/2007. Disponível em: <http://www.gasbrasil.com.br/atualidades>. Acesso em 11/08/07.

BRIGHTWELL, M. A. **The Selection of Compressors for Industry,** Paper 21. Inst. Mech. Eng. Conference on Compressors. 1970. (em Lom,1974).

CASCONE, R. **Advances in Small Scale LNG Technology Provide User Options.** Nexant Inc. : Oil & Gas Journal, April-June, Vol. 2, p. 15. 2005

COSTA, F. C. **Gás Natural Liquefeito.** Disponível no site www.gasbrasil.com.br acesso em 19/05/07.

CRUZ, O. C. A. **O Papel do GNL como Gerador de Novas Oportunidades de Negócio.** Disponível em www.gasbrasil.com.br acesso em 19/05/07.

FINN, A. J.; JOHNSON, G. L.; TOMLINSON, T. R. **Developments in Natural Gas Liquefaction.** Costain Oil, Gas & Process Limited, Manchester: Hydrocarbon Processing, April 1999 V78 i4. 11 pp.

FINN, A. J.; JOHNSON, G. L.; TOMLINSON, T. R. **LNG Technology for Offshore and Mid-Scale Plants.** Costain Oil, Gas & Process Limited, Manchester.

FOGLIETTA, J. H. **Consider Dual Independent Expander Refrigeration for LNG Production.** ABB Lummus Global-Randall Gas Technologies, Houston: Hydrocarbon Processing, Jan. 2004, pp. 39-44.

HAMWORTHY GAS SYSTEMS. **Small Scale & Mini LNG Liquefaction System.** Available at: http://www.hamworthy.com/products/products.asp?strareano=27_3. Accessed in Nov. 2006.

HARROLD, D. **Important Factors to Consider When Planning an FPSO.** KBR, London: Hydrocarbon Processing, July 2004. pp. 47-51.

IEA - International Energy Agency. **World Energy Investment Outlook – 2003 / Insights.** Paris, France: IEA Publications, 2003. 511 pp.

INCOSE – Internacional Council on Systems Engineering, **Systems Engineering Handbook.** Version 2a. USA: INCOSE, 1st June, 2004.

INL – IDAHO NATIONAL LABORATORIES. **Natural Gas Technologies: Small-Scale Methane Liquefaction Plant.** Available at <http://www.inl.gov/lng/projects/liquefactionplant.shtml>. Accessed in Nov., 2006.

INVESTIMENTO da Petrobras aumenta 66% para US\$ 87 bi. Gazeta Mercantil. 03/07/2006.

KENNETT, A.; LIMB, D.; CZARNECKI, B. **Off-Shore Liquefaction of Associated Gas: a Suitable Process for the North Sea.** Off-Shore Technology Conference. May, 1981.

KIRILLOV, N. G. **Analysis of Modern Natural Gas Liquefaction Technologies**. Chemical and Petroleum Engineering, V. 40, N. 7-8. 2004

KOUNTZ, K. et alli. **Development of a Small-Scale Natural Gas Liquefier**. Final report GTI project 65943, Gas Technology Institute, 2003.

KUMAR, S. **Gas Production Engineering** (Contributions in Petroleum Geology and Engineering, V. 4). Houston, Texas USA: Gulf Publishing Company, 1987. 646 pp.

LINDE AG Engineering Division. **“Spiral Wound” versus “Plate Fin” Heat Exchangers**. Available at: www.linde.com. Access in September, 2007. 14 pp.

LOM, W. L. **Liquefied Natural Gas**. London: Applied Science Publishers Ltd, 1974. 178 pp.

MARCONDES, A. **Um País Movido a Gás**, 2004. Disponível em: <http://www.tierramerica.net/2004/0126/pacentos.shtml> acesso em 19/05/07.

MOSES, J. **Foundational Issues in Engineering Systems: a Framing Paper**. MIT Engineering Systems Symposium. March 29-31, 2004. MIT, Cambridge – Mass.

NEWSWEEK SPECIAL ED. **The Great Gas Game**. Dez/jan/fev/2007

PETROBRAS **Estuda Investir em Um Terceiro Navio de GNL, diz José Gabrielli**. Gazeta Mercantil. 14/06/2007.

PETROBRAS: **Destaques Operacionais, Gás e Energia**. Disponível em www.petrobras.com.br . Acesso em fevereiro, 2007.

PETROBRAS: **GásLocal fornecerá GNL para Gasmig, Goiásgás e CEB Gás**. Agência Estado. 21/08/06.

PETROBRAS **Muda os Planos para Suprimento de Gás**. DCI. 22/06/06

PETROBRAS: **Plano Estratégico 2015**. Disponível em www.petrobras.com.br . Acesso em fevereiro, 2007.

PETROBRAS: Plano de Negócios 2007 – 2011. Disponível em www.petrobras.com.br . Acesso em fevereiro, 2007.

PIRES, A.; SCHECHTMAN, R. **Reflexos da Crise do Gás sobre o Futuro do Setor Elétrico.** Valor Econômico – 08/06/2007.

POULALLION, P.; DOMINGUEZ, J. L. R. **Gás Natural Liquefeito: Uma Alternativa de Transporte com Vantagens Ambientais.** Apresentado no XII Encontro de Produtores e Consumidores de Oxigênio da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). Vitória – ES: 02 a 04 de setembro de 1997.

PRICE, B. C. **Small Scale LNG Facility Development.** Gas Processing Developments Special Report. Hydrocarbon Processing, Jan 2003, pp 37-39.

RYAN, R. G.; BOWKLEY, C.; BARUCH, P. **Technology, Commercial Developments: Speed Changes in World's LNG Industry.** Oklahoma, USA: Oil & Gas Journal, July – 2001. 7 pp.

SALLA, C.T. **Sistema de Liquefação, Distribuição e Vaporização de Gás Natural.** Apresentado no XI Encontro de Produtores e Consumidores de Oxigênio da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM). Belo Horizonte – MG: 1996.

SALOF COMPANIES, 2006, **LNG Processes**, Available in http://www.kryopak.com/kryopak_refrigeration_processes.php - Accessed in Nov. 10, 2006.

SANTOS, E. M; ZAMALLOA, G. C.; VILLANUEVA, L. D.; FAGÁ, M. T. W. **Gás Natural: Estratégias Para Uma Energia Nova no Brasil.** 1ª ed. São Paulo: Annablume Editora, 2002. 352 p.

SHEFFIELD, J. A. **Offshore LNG Production: How to Make it Happen.** Gas Processors Association Europe LNG Working Party: Business Briefing in LNG Review. 2005. pp. 21-23.

SHEN, D. M., FERNANDEZ, F., SIMÕES-MOREIRA, J. R., , **Using Gas Pipeline Pressure to Liquefy Natural Gas or Generate Electricity,** Hydrocarbon Processing, Jan., pp. 47-50. 2006

SHUKRI, T. **LNG Technology Selection.** Foster Wheeler, UK: Hydrocarbon Engineering, Feb. 2004.

VALERIANO, D. L. **Gerência em Projetos: Pesquisa, Desenvolvimento e Engenharia**. Makron Books do Brasil Editora Ltda. São Paulo – SP. 1998.

WALDIE, B. **Effects of Tilt and Motion on LNG and GTL Process Equipment for Floating Production**. GPA Europe Annual Conference. Rome, Italy. Sept. 2002.

WASSON, C. S. **System Analysis, Design, and Development : Concepts, Principles, and Practices**. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey -USA. 2006.

GLOSSÁRIO

Arquitetura: arranjo dos elementos e sub-sistemas de um sistema e a alocação de funções aos mesmos de forma a atender aos requisitos do sistema (INCOSE, 2004).

Ciclo de vida de um sistema: período que se estende do início das atividades de desenvolvimento de um sistema, com a identificação das necessidades e objetivos, até sua retirada de operação e disponibilização final de seus elementos (INCOSE, 2004).

Cold box: arranjo compacto em que vários trocadores de calor alocados um próximo ao outro são isolados em conjunto, formando uma única “caixa” isolada. Com isso, procura-se reduzir a área de troca térmica e maximizar o aproveitamento do isolamento.

Compander. do inglês *compressor-expander*, equipamento que acopla um ou mais estágios de compressão e expansão por meio de um único sistema de transmissão. Usado nos ciclos a nitrogênio Hamworthy.

Engenharia de Sistemas: segundo INCOSE (2004), é uma abordagem multidisciplinar para tornar possível a realização de sistemas bem-sucedidos. A engenharia de sistemas: a) engloba esforços científicos e de engenharia relacionados ao desenvolvimento, fabricação, verificação, instalação, operação, suporte e descarte de sistemas produtos ou processos; b) desenvolve equipamentos, procedimentos e conteúdo para treinamento de usuários de sistemas; c) desenvolve e mantém o gerenciamento de configurações de um sistema; d) desenvolve estruturas analíticas de projeto e declarações de escopo e e) provê informações para decisões gerenciais.

Funções Primárias: conjunto essencial de atividades, tarefas e ações que devem obrigatoriamente ser cumpridas para que o sistema satisfaça a(s) necessidade(s) para o qual foi criado sob a perspectiva de seu ciclo de vida (INCOSE, 2004)

Gás Natural Associado: gás natural produzido de jazida onde ele é encontrado dissolvido no petróleo ou em contato com petróleo subjacente saturado de gás.

Gás Natural Não-Associado: gás natural produzido de jazida de gás seco ou de jazida de gás e condensado.

Gás Natural Veicular (GNV): mistura combustível gasosa, tipicamente proveniente do gás natural e biogás, destinada ao uso veicular e cujo componente principal é o metano, observadas as especificações estabelecidas pela ANP.

Operação de Base (*base load*): operação contínua e maximizando o fator de utilização da planta.

Operação de Pico (*peak shaving*): liquefação intermitente ou contínua durante um período definido para: i) maximizar o aproveitamento da capacidade instalada de um gasoduto e ii) gerar um volume de GNL armazenado destinado a atender um aumento temporário na demanda de GN.

Requisitos: fatos e hipóteses declarados de forma a definir as expectativas em relação à finalidade, objetivos, restrições e mensuração da efetividade de um sistema (INCOSE, 2004).

Reservas Possíveis: reservas de petróleo e gás natural cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas prováveis.

Reservas Provadas: reservas de petróleo e gás natural que, com base na análise de dados geológicos e de engenharia, se estima recuperar comercialmente de reservatórios descobertos e avaliados, com elevado grau de certeza, e cuja estimativa considere as condições econômicas vigentes, os métodos operacionais usualmente viáveis e os regulamentos instituídos pelas legislações petrolífera e tributária brasileiras.

Reservas Prováveis: reservas de petróleo e gás natural cuja análise dos dados geológicos e de engenharia indica uma maior incerteza na sua recuperação quando comparada com a estimativa de reservas provadas.

Reservas Totais: soma das reservas provadas, prováveis e possíveis.

Restrições de projeto: são as condições de contorno que obrigatoriamente devem ser observadas na fase de desenvolvimento de um sistema para alocação de requisitos de desempenho e síntese dos elementos do sistema. Podem ser internas, decisões já tomadas e que restringem o desenvolvimento de alternativas de projeto, ou externas, por exemplo, de segurança ou ambientais (INCOSE, 2004).

Síntese: processo em que requisitos e funções são transformados em soluções possíveis (recursos e técnicas) satisfazendo os requisitos básicos de entrada (INCOSE, 2004).

Sistema: uma combinação interativa de elementos para atingir um objetivo definido. Os sistemas englobam hardware, software, firmware, pessoas, informações, técnicas, instalações, serviços, e outros elementos de suporte (INCOSE, 2004).

Apêndice A - Ferramentas para Otimização Técnico-Econômica da Cadeia do GNL

Análise Exergética.

É ferramenta de projeto fundamental para redução dos custos de investimento em plantas de liquefação. Finn e outros (1999) têm empregado a análise exergética global e eficiência típica de 40% para determinar, em uma fase precursora do projeto conceitual, o consumo energético de determinado processo.

Na fase de projeto conceitual, a análise exergética pode ser usada para estabelecer um fluxograma de processo aproximadamente ótimo que leva a um menor custo operacional assim como mais baixo custo de investimento.

A construção de balanços exergéticos é um método rigoroso, que exige tempo para ser desenvolvido e, muitas vezes, gera resultados difíceis de interpretar. Como resultado, esta ferramenta tende a ser sub-utilizada.

Tecnologia Pinch

Metodologias de projeto baseadas nos princípios termodinâmicos foram desenvolvidas. Um método gráfico baseado na plotagem do “fator de Carnot” num gráfico entalpia *versus* temperatura oferece a possibilidade de investigar num curto espaço de tempo várias configurações de processo possíveis.

Seleção de Equipamentos Rotativos

Os custos com equipamentos em plantas de liquefação são relativamente altos e costumam representar 40% do custo total da planta.

Os compressores centrífugos tem sido a alternativa mais econômica para plantas de liquefação embora compressores axiais podem ser usados como primeiro estágio de compressão devido a sua alta eficiência para alto volume e baixa pressão.

Pelo lado do acionamento, as turbinas a gás tem sido frequentemente empregadas nas plantas mais modernas por serem competitivas em custo, não requerem instalações para geração de vapor e os sistemas de resfriamento da planta são consideravelmente reduzidos. Além disso, têm maior eficiência térmica, são compactas, propiciam partidas relativamente rápidas e podem ser fabricadas e instaladas em prazo inferior às turbinas a vapor.

As turbinas de duplo eixo de 26 MW GE Frame 5 têm sido usadas com sucesso em plantas base-load pela sua flexibilidade. Turbinas de eixo único de 38 MW Frame 6 e 78 MW Frame 7 não têm, até 1999, histórico de aplicação embora tenham potencial devido à economia de escala que oferecem.

As turbinas aero-derivativas devem ser consideradas pois oferecem algumas vantagens: requerem menor tempo de parada para manutenção se comparada às turbinas industriais e são mais compactas (ideais para aplicação offshore). Há turbinas de duplo eixo de maior potência e mais eficientes que a Frame 5 porém não usadas até 1999.

Redução de Custos

As tecnologias para liquefação de gás natural são consideradas relativamente maduras, razão pela qual espera-se que a redução no custo das plantas se dê por uma série de melhorias ao invés de ser por meio de uma tecnologia disruptiva.

A seleção de máquinas rotativas confiáveis aliada a uma filosofia de redundância e sobressalentes otimizada pode resultar em impacto mais significativo no custo global da planta do que melhorias na eficiência do ciclo no projeto processual. A disponibilidade de bases de dados sobre os equipamentos torna possível uma completa análise de confiabilidade, operabilidade e manutenibilidade (sigla em inglês: ROM) que destaca pontos de baixa disponibilidade para um projeto em questão. A análise do impacto da indisponibilidade da planta versus o custo dos equipamentos redundantes leva a otimizações das redundância e parte reserva, dentro de um critério estabelecido.

Para seleção das turbinas a gás deve passar um criteriosa especificação das condições ambientais, principalmente a temperatura do ar, uma vez que estes equipamentos são sensíveis a estas condições. Desta forma evita-se deficiências de performance assim como o superdimensionamento do acionamento.

A recuperação do calor na descarga dos gases da turbina pode ser feito num ciclo de refrigeração de absorção que poderia substituir o pré-resfriamento convencional com propano.

Redução nos custos pode ser obtida pela seleção criteriosa de equipamentos padronizados o que demanda experiência e cuidado para que não haja prejuízo na confiabilidade, segurança e operacionalidade.

O emprego de técnica de Engenharia do Valor pode levar a modificações ou mesmo a eliminação de equipamentos trazendo vantagens econômicas. A técnica consiste em dividir a planta segundo suas funções que afetam sua operacionalidade, disponibilidade e flexibilidade e custos são atribuídos a estas funções na perspectiva de seu ciclo de vida para então obter-se um painel com oportunidades de redução de custos.

O entendimento adequado das margens de projeto é importante para otimização da planta e avaliação dos custos. Margens adequadas garantem a performance dos equipamentos e operação satisfatória da planta, o que demanda alguma experiência. Com isso obtém-se custos minimizados ao mesmo tempo em que é possível conviver, por exemplo, com variações na composição do gás de alimentação e variações de temperatura.

A filosofia para seleção dos materiais tem efeito significativo nos custos especialmente se for possível a redução dos requisitos de sua classificação com relação a baixas temperaturas. Isso é possível procurando garantir situações de baixa temperatura ocorra simultaneamente com altas pressões.

O emprego de arranjos modulares pode compensar os custos adicionais com materiais de fabricação e engenharia de projeto se comparado com a construção *onsite* se este for um produto padrão da empresa de projetos ou contratada.

O investimento com a engenharia dos módulos em geral leva a redução nos custos de mão-de-obra direta de fabricação e mão-de-obra indireta na construção. Redução dos custos de construção são obtidos pela redução do número de profissionais envolvidos na montagem, na infra-estrutura do site e no tempo de montagem. É possível uma redução de até 10% no custo total da planta com emprego de técnicas de construção modulares sendo que também há ganhos pela redução do prazo para partida da unidade.

Onde locais onde o custo da mão-de-obra é baixo os argumentos a favor de construções modulares diminuem. É conveniente considerar os custos de mão-de-obra *versus* produtividade bem como a necessidade de supervisores estrangeiros, restrições de prazo e muitos outros ao definir a estratégia de projeto e construção.

Grandes reduções nos custos da fase de construção são obtidos com a minimização de refazimentos. Para isso, tem contribuído o uso de ferramentas tais como modelagem 3D integrada a sistemas para geração automática de listas de material e P&IDs inteligentes.

Apêndice B - Conversões Práticas Usuais de Unidades

<i>Base</i>		1 MMBTU	≅ 27 Nm ³ gás
1 Nm ³ de gás natural	= 9400kcal		= 1000 SCF
1 ano	= 365 dias		= 0,183 BEP
1 atmosfera-padrão	= 101,325 kPa		= 0,025 TEP
Condições "Standard"	= 60 °F (15,6 °C) e		= 0,252 Gcal
	1 atm padrão		= 293 kWh (calorífica)
Condições Normais	= 0 °C e 1 atm		= 103 kWh (energética)
	padrão		
		1 MTEP/ano	= 20000 BEPD
			= 3,0 MNm ³ /dia
<i>Volumes</i>			
1 Nm ³	= 37,30 SCF	1 MSCFD	= 9,8 MNm ³ /ano (gás)
1 m ³ GNL	= 600 m ³ gás		= 26800 Nm ³ /dia (gás)
1 t GNL	= 1350 m ³ gás		= 176 BEPD
1 m ³ GNL	= 0,445 t GNL		
1 barril	= 159 litros	10 Mcal/Nm ³	= 11,67 kWh/Nm ³
1 SCF	= 26,8.10 ⁻³ Nm ³		= 1068 BTU/SCF
1 MSCFD	= 1117 Nm ³ /hora		
1000 m ³ gás	= 0,741 t GNL	1000 Nm ³ gás	= 0,9 TEP
			= 1,35 t carvão
			= 10500 kWh
			= 35,8 MMBTU
<i>Equivalência Energética</i>			
1 TEP	= 1,5 t carvão		
	= 1100 m ³ gás	1 m ³ GNL	= 24 MMBTU
	= 7,3 BEP		
	= 11670 kWh	1 t GNL	= 54 MMBTU
	= 10 Gcal		
	= 39,7 MBTU	1 BEP	= 1600 kWh