

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

**Utilização da energia “fria” de regaseificação do Gás
Natural Liquefeito em outras aplicações**

Patrícia Wen Shi Liao

Prof. José R. Simões Moreira

São Paulo
2007

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica

**Utilização da energia “fria” de regaseificação do Gás
Natural Liquefeito em outras aplicações**

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

Patrícia Wen Shi Liao

Prof. José R. Simões Moreira

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2007

RESUMO

O texto apresenta a situação atual do gás natural no Brasil, com ênfase para o mesmo na sua forma liquefeita. Realiza um levantamento das tecnologias existentes no processo de regaseificação do gás natural liquefeito, o GNL, meio seguro e eficiente de se armazenar e transportar o gás natural. Fundamentado em pesquisas bibliográficas serão apresentadas simulações da evaporação do GNL com o uso de dois fluidos, a amônia e a mistura água e etilenoglicol, que possuem como ponto principal baixo ponto de congelamento. Análises pertinentes são feitas, focando a reutilização da energia “fria” perdida no processo de vaporização do gás natural, sob o ponto de vista da termodinâmica. Pode-se concluir do presente estudo que existe um mercado crescente para o gás natural, em especial na sua forma liquefeita de armazenagem e transporte. Esse nicho de reutilização da energia “fria” de vaporização ainda se encontra inexplorado no Brasil, resultando em perdas consideráveis de energia “fria”.

ABSTRACT

This work presents an overview of the status of the use and industrial application of liquefied natural gas in Brazil. A survey of the technologies available to vaporize liquefied natural gas, also known as LNG, is presented. LNG is a safe and an effective way to transport and storage natural gas. Based on technical data available in literature, analyses of natural gas vaporization were carried out using two different secondary fluids: ammonia and a mixture of water and ethyleneglicol. These fluids were chosen because of their thermodynamic properties; mainly because they have a low freezing temperature. Studies of the use of the “cold” energy available during the natural gas vaporization process are presented from the thermodynamic point of view. Potential applications of that “cold” energy are analyzed in the context of the Brazilian market. To conclude, the natural gas market is a rising one, especially in its liquid cryogenic form, whose vaporization without any further recovering system implies in a considerable waste of potential useful energy.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo incentivo constante, palavras sábias e amor incondicional, às minhas irmãs pela paciência e suporte de sempre. Sinto-me privilegiada de tê-los na minha vida.

Aos professores do PME, Departamento de Engenharia Mecânica, que tiveram papel fundamental em minha formação, estiveram junto durante toda a trajetória do curso. Em especial ao José R. Simões Moreira, impulsionador e colaborador desse trabalho de conclusão de curso.

Aos grandes e verdadeiros amigos com quem partilhei os todos os momentos, bons e ruins, desses cinco anos de curso. Tenho certeza de que estaremos próximos nessa próxima etapa de nossas vidas.

FICHA CATALOGRÁFICA

Liao, Patrícia Wen Shi

**Utilização da energia “fria” de regaseificação do gás natural
liquefeito em outras aplicações / P.W.S. Liao. -- São Paulo, 2007.
p.98**

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

**1.Gás natural 2.Regaseificação I.Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Mecânica II.t.**

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURA	1
LISTA DE TABELAS.....	3
LISTA DE SÍMBOLOS	6
1. INTRODUÇÃO	8
2. ANÁLISE DO CONTEXTO.....	10
2.1. O Gás Natural no Mundo e no Brasil.....	10
2.2. Gás Natural e a Petrobrás	11
2.3. Situação da Matriz Energética no Brasil.....	13
2.4. Gás Natural Liquefeito no Brasil	14
3. PROPRIEDADES E VANTAGENS DO GÁS NATURAL.....	17
3.1. Propriedades do Gás Natural	17
3.2. Propriedades do Gás Natural Liquefeito	18
3.3. Vantagens do Gás Natural	20
4. CADEIA DE GNL	22
4.1. Processo de liquefação	23
4.2. Armazenamento do GNL	24
4.3. Transporte do GNL	24
4.4. Terminal de Regaseificação	25
5. TECNOLOGIAS DE VAPORIZAÇÃO	28
5.1. Vaporizador com Troca Externa - ORV	29
5.2. Vaporizador de Combustão Imersa – SCV	31
5.3. Trocador de Casco e Tubo – STV	33
5.4. Ciclo Combinado de Unidade de Calor e Energia com Vaporizador de Combustão Imersa - CHP-SCV	33
5.5. Outro tipo – Vaporizadores com Ar como Fluido de Aquecimento	34
6. APLICAÇÕES DO FRIO	35
6.1. Aplicações do Frio da Regaseificação do GNL	36
6.2. Frio de Regaseificação na Indústria Alimentícia	39
7. APLICAÇÃO DA ENERGIA “FRIA”: CASOS A SEREM ANALISADOS	41
8. ABAIXAMENTO DO PONTO DE CONGELAMENTO	46
9. FLUIDOS REFRIGERANTES	47
9.1. Amônia.....	48
9.2. Água e Etilenoglicol	49
10. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	51
10.1. Coeficiente de Convecção em Escoamentos Internos.....	52

10.2.	Coefficiente de Convecção com Mudança de Fase.....	52
11.	SIMULAÇÃO DA TROCA DE CALOR.....	54
11.1.	Vaporização do Gás Natural – Reutilização em Condicionamento de Ambiente	54
12.	ANÁLISE DE RESULTADOS	77
12.1.	Aplicações de Reutilização da Energia “fria”	77
12.2.	Reutilização da Energia “fria”: Análise do Fluxo Mássico Resfriado.....	80
12.3.	Comparação entre Amônia e Etilenoglicol	81
12.4.	Comportamento do comprimento L no caso da amônia	85
13.	CONCLUSÕES	87
14.	ANEXOS	89
15.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96

LISTA DE FIGURA

Figura 1- Participação das Fontes Energéticas Primárias no Consumo Mundial (Projeções de C. Marchetti, com dados até 1980) [1]	10
Figura 2- Evolução Real da Participação das Fontes Energéticas [1].....	11
Figura 3- Píer de dois berços [2]	13
Figura 4- Cadeia de GNL projeto Petrobrás [2].....	13
Figura 5- Caminhão GasLocal	15
Figura 6- Volume ocupado pelo gás natural antes e após a liquefação [2].....	19
Figura 7- Processos de produção do GNL [2].....	22
Figura 8- Transportadora tipo Moss Rosenberg [5].....	25
Figura 9- Transportadora tipo membrana (Technigaz) [6]	25
Figura 10- Embarcações flutuantes de armazenamento e regaseificação [2] ...	26
Figura 11- Terminal de regaseificação [7]	26
Figura 12- Vaporizador atmosférico de gás [7]	27
Figura 13- Processo de vaporização do GNL - Descarga até distribuição [8]..	28
Figura 14- Open Rack Vaporizers – ORV [9]	30
Figura 15- Submerged Combustion Vaporizers –SCV [9]	32
Figura 16- Regaseificação do GNL combinado com Ciclo Brayton [10].....	38
Figura 17- Sistema de reutilização da energia “fria” advinda da vaporização do GNL [11]	40
Figura 18- Funcionamento de um sistema de refrigeração [12]	42
Figura 19- Aspecto de uma máquina de Ar Condicionado [1]	44
Figura 20- Distribuição de temperatura em um trocador de calor	51
Figura 21- Trocador de calor da forma inundado	54
Figura 22- Esquema ilustrativo da troca de calor para reutilização da energia “fria” em condicionamento de ambientes	75
Figura 23- Fluxo mássico resfriado no condicionamento de ambiente em função Q [kw]	76
Figura 24- Gráfico de $L(D)$ para $\dot{m}_{fluido} = 0,01$ [kg/s]	80
Figura 25- Esquema da troca de calor com reutilização em frigoríficos	81

Figura 26- Fluxo mássico de ar resfriado para frigoríficos em função de Q [kw]	81
Figura 27- Comparação de L(D) para $\dot{m}_{fluido} = 0,01$ [kg/s]	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Características do gás natural segundo ANP [3].....	18
Tabela 2- Comparação de nível de emissão de poluentes [4]	20
Tabela 3- Porcentagem de EtilenoGlicol versus Temperatura Congelamento [13]	49
Tabela 4- Propriedades do gás natural [15].....	55
Tabela 5- Propriedades do gás natural [15].....	55
Tabela 6- Valores das constantes c_p, c_0, c_1, c_2, c_3 [16]	56
Tabela 7- Calor específico em função da temperatura [16]	56
Tabela 8- Dados da amônia [13]	57
Tabela 9- Valores utilizados na simulação com a amônia [13]	57
Tabela 10: Ponto de congelamento para diferentes %	57
Tabela 11- Massa específica em função da porcentagem de etilenoglicol [14]	58
Tabela 12- Calor específico em função da porcentagem de etilenoglicol [14].	58
Tabela 13- Condutividade térmica em função da porcentagem de etilenoglicol [14]	59
Tabela 14- Viscosidade em função da porcentagem de etilenoglicol [14]	59
Tabela 15- Parâmetros fixos utilizados	60
Tabela 16- Temperaturas do fluido analisadas.....	60
Tabela 17- Valores do fluxo de calor em função do fluxo mássico de GN	61
Tabela 18- Número de Nu e $h_{e,gas}$ em função do diâmetro.....	62
Tabela 19- Valores de (Q), sendo AMÔNIA fluido de aquecimento	63
Tabela 20- Valores de (Q), etilenoglicol 10% fluido de aquecimento.....	63
Tabela 21- Valores de (Q), sendo etilenoglicol 20% fluido de aquecimento	64
Tabela 22- Valores de (Q), etilenoglicol 30% fluido de aquecimento.....	64
Tabela 23- Valores de (Q), etilenoglicol 40% fluido de aquecimento.....	65
Tabela 24- Valores de (Q), etilenoglicol 50% fluido de aquecimento.....	65
Tabela 25- Valores de (Q), etilenoglicol 60% fluido de aquecimento.....	66
Tabela 26- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=167	

Tabela 27- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=5	67
Tabela 28- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=10	68
Tabela 29- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=20	68
Tabela 30- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=1	69
Tabela 31- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=5	69
Tabela 32- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=10	70
Tabela 33- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=20	70
Tabela 34- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$ – Número de Tubos: N=1.....	71
Tabela 35- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$ – Número de Tubos: N=5.....	71
Tabela 36- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$ – Número de Tubos: N=10.....	71
Tabela 37- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$ – Número de Tubos: N=20.....	72
Tabela 38- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=1.....	72
Tabela 39- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=5.....	73
Tabela 40- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=10.....	73
Tabela 41- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=20.....	73
Tabela 42- Fluido amônia - Comprimento $L(D, \dot{m}_{fluido})$ para N=1	74
Tabela 43- Fluido etilenoglicol 10% - Comprimento $L(D, \dot{m}_{fluido})$ para N=1	74
Tabela 44- Fluido etilenoglicol 50% - Comprimento $L(D, \dot{m}_{fluido})$ para N=1	75

Tabela 45- Resumo dos parâmetros usados na reutilização da energia “fria” ..	75
Tabela 47- Dados utilizados na simulação para frigoríficos	79
Tabela 48- L na Reutilização em Condicionamento de Ambientes ($\Delta T_{lm} = 32,8$ °C)	79
Tabela 49- L para Reutilização em Frigoríficos ($\Delta T_{lm} = 30,05$ °C)	80
Tabela 51- Comprimento L necessário com etilenoglicol 10%	83
Tabela 52- Comprimento L necessário com etilenoglicol 30%	83
Tabela 53- Comprimento L necessário com etilenoglicol 50%	83
Tabela 54- Comprimento L necessário com amônia.....	84
Tabela 55 – Número de Reynolds para mistura água e etilenoglicol 10%	86
Tabela 56- Comprimento L para mistura água e etilenoglicol 10%	86

LISTA DE SÍMBOLOS

A = área	$[m^2]$
c_p = calor específico a pressão constante	$[kJ/kg.K]$
$c_{gas,p}$ = calor específico a pressão constante do gás natural	$[J/kg.K]$
D = diâmetro	$[m]$
i = entalpia	$[kJ/kg]$
g = aceleração da gravidade	$[m/s^2]$
h_{fg} = calor latente de vaporização	$[J/kg]$
$h_{i,fluido}$ = coeficiente de convecção interno do fluido	$[W / m^2 K]$
$h_{e,gas}$ = coeficiente de convecção externo da gás natural	$[W / m^2 K]$
$\dot{m}_{gas}$ = vazão em massa do gás natural	$[kg/s]$
$\dot{m}_{fluido}$ = vazão em massa do fluido	$[kg/s]$
m_x = fração mássica	
Nu = número de Nusselt	
Pr = número de Prandtl	
L = comprimento	$[m]$
Re = número de Reynolds	
$T_{fluido,1}$ = temperatura de entrada do fluido	$[K]$
$T_{fluido,2}$ = temperatura de saída do fluido	$[K]$
$T_{gas,1}$ = temperatura de entrada do gás natural	$[K]$
$T_{gas,2}$ = temperatura de saída do gás natural	$[K]$
T = temperatura	$[K]$
U = coeficiente global de troca de calor	$[W / m^2 K]$
q = taxa de transferência de calor	$[W]$
μ = viscosidade dinâmica	$[Pa.s]$
ρ_l = massa específica na temperatura de saturação	$[kg/m^3]$

ρ_v = massa específica na média aritmética de temperatura de saturação e de superfície $[kg/m^3]$

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o uso de gás natural (GN) é uma importante fonte de energia no cenário internacional. A demanda mundial tem crescido de maneira estável e informações recentes mostram que de 2004 a 2005 a taxa de sua utilização cresceu 2.3%. Como parte do mercado de gás natural, o gás natural liquefeito (GNL) contribui de maneira expressiva.

A utilização do gás natural como fonte energética nos setores industriais e residenciais já é uma realidade no país. Pode-se encontrar o GN como combustível de ônibus, trens, caminhões e carros. É uma opção interessante devido à sua disponibilidade e à atual situação da política do petróleo.

Em várias aplicações o gás natural é uma substância que substitui com vantagem os derivados do petróleo. Isto pois os produtos de combustão do GN resultam em menos poluição atmosférica. Ressalta-se que seu poder calorífico é bastante elevado quando comparado a outros óleos combustíveis. Apesar das vantagens, seu transporte e armazenamento apresentam problemas tecnológicos.

Embora possua poder calorífico 30% superior o óleo combustível, ele ocupa na sua fase gasosa um volume de aproximadamente 1000 vezes maior que um óleo com o mesmo poder calorífico. Por essa razão a maneira mais adequada e econômica de se armazenar e transportar o gás natural é na sua forma líquida, à pressão atmosférica. O gás natural em suas condições criogênicas, isto é, a baixa temperatura de - 162°C, é conhecido como gás natural liquefeito, ou melhor GNL.

Historicamente, a utilização de GNL se deu quando o transporte de gás natural via dutos não era possível, seja por problemas técnicos, seja por problemas econômicos (travessia de países, mares e oceanos estrangeiros). A partir desses obstáculos, apenas grandes plantas de liquefação de gás natural têm sido construídas.

Mais recentemente GNL vem sendo produzido em plantas de liquefação de pequena escala para atender demandas pontuais ou para atingir locais cuja construção de grandes plantas de liquefação não é viável economicamente ou tecnicamente. Uma típica planta de liquefação possui os estágios de pré-tratamento, liquefação, armazenamento e transporte do gás, que ocorre normalmente via mar. No estágio de

pré-tratamento, elimina-se umidade, CO_2 e hidrocarbonetos pesados. Dependendo da origem do gás devem-se também retirar gases ácidos, mercúrio e enxofre.

Principal indutor do desenvolvimento do mercado de gás natural, o GNL representa uma alternativa energética mais limpa, causando menos impacto no meio ambiente, podendo ser usado para fornecimento de calor, geração de eletricidade e de força motriz. Indubitavelmente há vantagens no armazenamento e transporte de GN na sua forma líquida, no entanto o seu consumo se dá apenas na forma gasosa.

No processo de regaseificação do GNL acaba se perdendo esse 'frio' que pode ser aplicado em outra indústria. Isto pois o processo típico de vaporização de GNL consiste em trocadores de calor cujo fluido de aquecimento normalmente é ou o ar, ou a água do mar, que são descarregados com uma temperatura baixa no meio ambiente.

Com o intuito de se utilizar esse 'frio', que é a energia de vaporização somada à energia de aquecimento e sabendo que o GNL é uma fonte de energia que tem crescido de maneira estável que será feito o presente estudo de viabilidade técnico econômico.

2. ANÁLISE DO CONTEXTO

2.1. O Gás Natural no Mundo e no Brasil

A partir dos choques do petróleo que quadruplicaram em 1973 os preços desse combustível e, em 1979, que os triplicaram, os países que não possuíam reservas abundantes foram obrigados a buscarem meios de diminuir sua vulnerabilidade neste segmento, investindo na produção e no uso de outros energéticos. A crise foi o início de um longo processo de modificações relativas ao uso de energéticos, onde se observa um constante investimento em fontes alternativas ao petróleo e seus derivados, fato que tem gerado mudanças significativas no mercado de energia mundial.

O aumento da utilização do gás natural e as reformas nos setores energéticos em diversos países são processos simultâneos, existindo uma relação entre o maior uso do gás natural e a abertura dos mercados de energia no mundo. Na figura 1 e 2 segue uma breve comparação entre a evolução mundial do consumo de petróleo e de gás natural entre os anos de 1850 e 2050.

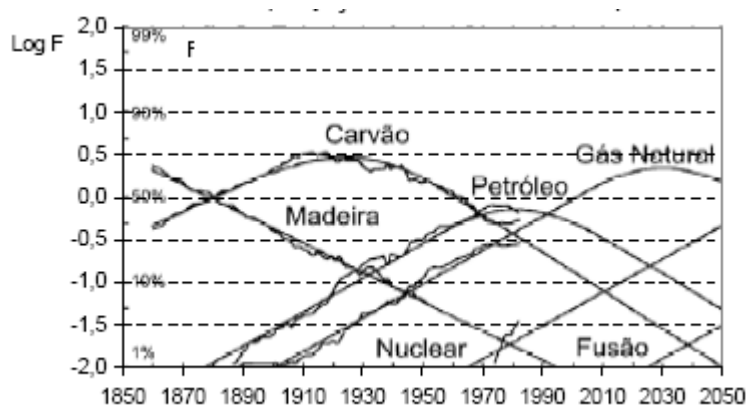


Figura 1- Participação das Fontes Energéticas Primárias no Consumo Mundial (Projeções de C. Marchetti, com dados até 1980) [1]

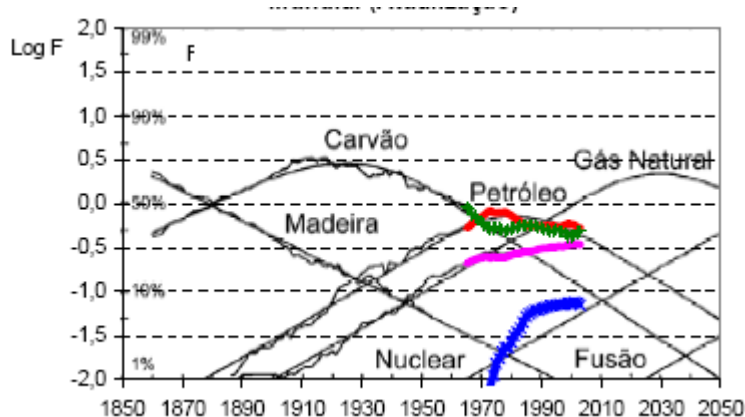


Figura 2- Evolução Real da Participação das Fontes Energéticas [1]

No Brasil o gás natural está se tornando um importante componente na matriz energética pois está sendo utilizado como combustível alternativo em substituição aos derivados do petróleo (óleo combustível, GLP). A participação do gás na matriz energética ainda é pequena, cerca de 2,6% do consumo de energia primária, mas com taxas de crescimento superiores a 8% ao ano.

Em relação à infra-estrutura de transporte e distribuição, o Brasil possui cerca de 4820 km de dutos de distribuição e 4240 km de dutos de transporte, o que não inclui o gasoduto Brasil-Bolívia.

2.2. Gás Natural e a Petrobrás

Com o decreto boliviano em 1º de maio de 2006, que definiu a estatização das empresas de gás e petróleo operantes naquele país e um aumento de taxa de 50% para 82% de seu faturamento, pôde-se perceber a fragilidade da opção brasileira frente à ampliação de insumos importados na matriz energética. Com a finalidade de diminuir essa vulnerabilidade frente ao gás natural importado da Bolívia, de onde a Petrobrás importa diariamente cerca de 25 milhões de metros cúbicos de gás – pouco mais da metade do consumo nacional, no Brasil além de existir projetos que visam a auto-suficiência de gás natural, serão instaladas usinas de regaseificação, o que possibilitará a importação de GN de outros países, como garantia de suprimento de combustível em momentos de escassez.

A Petrobrás lançou o Plano de Antecipação da Produção de Gás (Plangás) com o intuito de priorizar investimentos que levem o Brasil à auto-suficiência. A estatal e seus parceiros estimam investir, de 2007 a 2011, US\$ 22,1 bilhões na cadeia de gás

natural no Brasil. Sendo que parte deste investimento será destinada à exploração e produção, e o restante na ampliação da malha de gasodutos do país.

Atualmente a produção nacional é de cerca de 44 milhões de metros cúbicos, no entanto a estatal só disponibiliza para o mercado nacional cerca de 24 a 25 milhões. Outros 10 a 11 milhões são consumidos pela própria estatal – em suas refinarias – e outro tanto, não especificado, é re-injetado nos próprios poços de petróleo para aumentar a produção.

Paralelamente, através de um memorando com a estatal petrolífera argelina Sonatrach, a Petrobrás objetiva firmar parcerias no fornecimento de gás natural liquefeito (GNL) e na exploração de petróleo no Brasil, Argélia e outros países.

O memorando prevê suprimento de gás natural para atender aos terminais de importação e regaseificação de gás que estão sendo implantados pela Petrobrás em Pecém (CE) e na Baía de Guanabara (RJ). O produto, importado no estado líquido, precisa ser regaseificado para atender às demandas por combustível do mercado industrial e das usinas termelétricas.

Segundo dados da Petrobrás, o terminal flexível de GNL da Baía da Guanabara ficará próximo a três grandes usinas termelétricas fluminenses: Barbosa Lima Sobrinho, Leonel Brizola e Mário Lago. Será implantado um píer de GNL, com dois berços e a operação consistirá no recebimento de GNL do navio supridor, estocagem e regaseificação de GNL à vazão máxima de 14 MM Nm³/d e injeção de GN pressurizado até 100kgf/cm² no anel de gás residual da Reduc, via gasoduto de 16km e 28” de diâmetro. O processo de vaporização do GNL ocorre em navios feitos para essa finalidade, conhecidos como FSRU – Floating Storage and Regaseification ou SRV – Shuttle and Regaseification.

Já o Terminal de Pecém, além do suprimento a usinas termelétricas cearenses, atenderá também parte do mercado industrial da região Nordeste. A operação do Terminal Flexível de GNL de Pecém também consistirá do recebimento de GNL de navio supridor, estocagem e regaseificação de GNL. A diferença se encontra na vazão máxima de 7 MM Nm³/d e injeção de gás natural comprimido até 100 kgf/cm² na via linha aérea de gás de 2 km.

O Terminal Flexível de Pecém compreende duas fases:

- ✓ Fase I – utilização temporária de um píer existente no Porto de Pecém, fazendo sua adaptação para recebimento de GNL.
- ✓ Fase II – Construção de um novo Píer para uso exclusivo e definitivo para operações de GNL.

Segue abaixo a figura 3 e 4, do esquema de Píer com dois berços e de como será a operação, respectivamente.

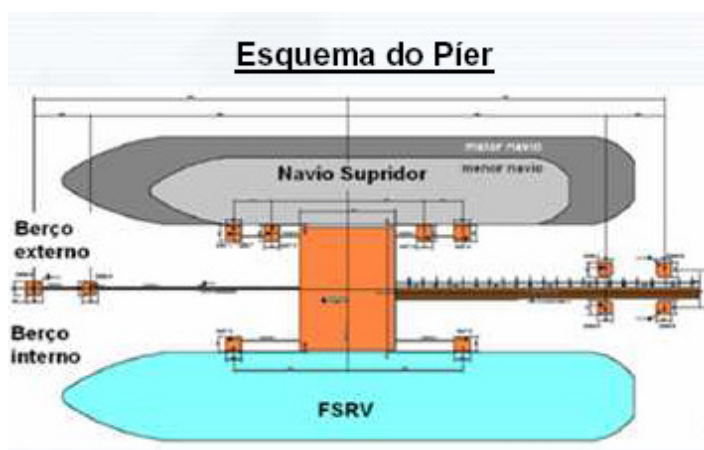


Figura 3- Píer de dois berços [2]

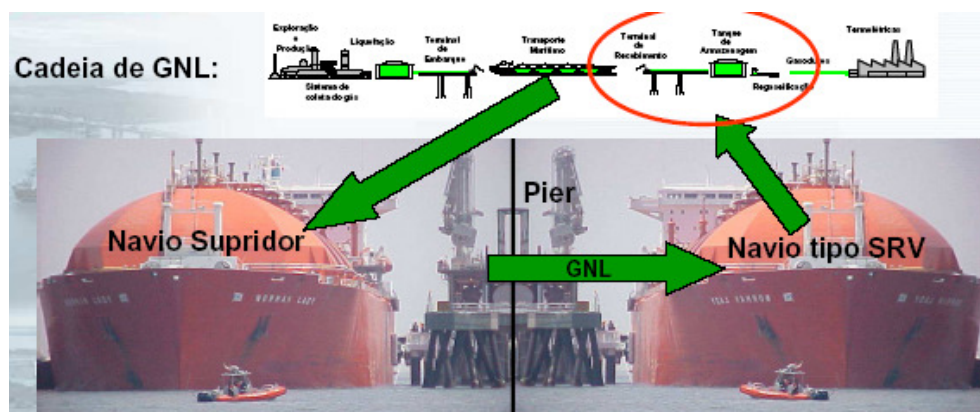


Figura 4- Cadeia de GNL projeto Petrobrás [2]

2.3. Situação da Matriz Energética no Brasil

O anúncio de que o país está próximo de esgotar excedente de energia retrata a importância e urgência de se estudar outras fontes de energia como alternativas a energia hidráulica que alimenta cerca de 90% de todo o país.

Segundo o diretor da Companhia Energética de São Paulo, a Cesp, as curvas de oferta e demanda deverão cruzar a partir de 2008. O excedente de 25% na oferta brasileira de energia elétrica gerado depois do racionamento obrigatório do começo da década, iniciado em julho de 2001 e encerrado em 1º de março de 2002, está próximo de se esgotar. Desde o fim do “apagão”, a oferta de energia cresce em ritmo bem inferior ao do consumo. Atualmente oferta e demanda converge a um ponto de equilíbrio, seguindo para a administração de falta de energia. Para atender a demanda e contornar a previsão de escassez energética, vale-se da produção de energia através de termelétricas, com a queima de gás natural em ascensão.

Tendo em vista o atual cenário brasileiro de energia, cujo anúncio de escassez e o conseqüente aumento do uso de termelétricas com queima de gás natural somados à importação de gás natural como alternativa ao gás boliviano, resulta na importância que se tem em se analisar maneiras de se aproveitar o ‘frio’ perdido no processo de regaseificação do GNL, ressaltando que a importação dos gases se dá na sua forma liquefeita e que seu uso se dá na sua forma gasosa.

O porte mínimo adotado para terminais de GNL, equivalente a 8 – 10 milhões de m³/dia é o maior problema enfrentado por aqueles que desejam a sua construção. A solução é aplicar em mercados incrementais, daí a necessidade de se encontrar alternativas que reduzam os custos de instalação de uma usina de regaseificação.

A proposta desse projeto reside na idéia de vender o ‘frio’ gerado nessas usinas, que no Brasil ainda não são utilizados.

2.4. Gás Natural Liquefeito no Brasil

Para abastecer de gás natural as regiões do Brasil que ainda não são atendidas por gasodutos, a Petrobrás, por intermédio da subsidiária Petrobras Gás S.A. (Gaspetro), associou-se a White Martins e formou a GásLocal, primeira empresa brasileira a transportar gás natural liquefeito (GNL), juntas participam do consórcio Gemini.

A Petrobrás contribui com o suprimento de gás natural, através do gasoduto Bolívia–Brasil, a White Martins com a planta de GNL e a tecnologia de liquefação, armazenagem e distribuição de gases criogênicos, e a Gás Local com os equipamentos e a logística de entrega do produto. Além de ampliar o acesso ao gás natural, o Projeto Gemini permite reduzir as importações de gás liquefeito de

petróleo (GLP) e óleo diesel, ampliando o uso do gás natural na matriz energética do Brasil. Também apresenta o GNL como uma solução para aproximar as fontes produtoras de gás dos mercados consumidores.

Para a realização do Projeto Gemini foi necessário investimento total de US\$ 51 milhões, dos quais US\$ 9,5 milhões serão provenientes da Petrobrás e o restante da White Martins, com 72% de nacionalização de seus equipamentos. A GasLocal, com a qual as duas empresas fazem consórcio, controlada em 60% pela White Martins e 40% pela Petrobrás, administra o projeto e é responsável pela comercialização e distribuição do gás natural, que inclui a implantação de estações de regaseificação para re-convertir o gás ao seu estado normal e possibilitar sua utilização.

A planta de liquefação se encontra na terraplanagem da área em Paulínia (SP) e sua capacidade total de liquefação é de 380 mil m³ de gás natural por dia e pode estocar até 4.500 metros cúbicos. O GNL é produzido por meio de um processo criogênico, que resfria o gás e reduz o seu volume 600 vezes. Isso permite o seu transporte por meio de carretas que percorrem até 935 quilômetros para chegar a seus clientes. O processo é similar ao que a White Martins faz com oxigênio e nitrogênio, e consiste em resfriar o gás a abaixo de 170 graus.

Utiliza tecnologia licenciada da companhia norte-americana Black & Veatch na planta de liquefação e o transporte de GNL ocorre através de caminhões próprios para esta finalidade, que pode ser verificado com a figura 5 abaixo. Com o uso de 20 carretas, a GásLocal prevê transportar mais de 10 milhões de metros cúbicos do combustível ao mês, percorrendo distâncias que variam de 150 quilômetros a 935 quilômetros.



Figura 5- Caminhão GasLocal

O objetivo do projeto é levar gás natural a regiões do Brasil que a malha de gasodutos ainda não atende através de transporte por caminhões de gás liquefeito. As principais regiões-alvo do projeto são: sul de Minas Gerais, São Paulo, Goiás e Distrito Federal e norte do Paraná. Parte do GNL destina-se a indústrias dos ramos alimentício, metalúrgico, cerâmico, químico, postos de GNV e concessionárias estaduais de gás natural canalizado.

A GásLocal já firmou contratos de fornecimento com as concessionárias Gasmig (MG), Goiasgás (GO) e CEBgás (DF), além de algumas indústrias. O consumo contratado significa 80% da capacidade de produção da planta.

O contrato da GásLocal com a Goiasgás, a concessionária do serviço público de distribuição do gás canalizado responsável pelo abastecimento de Goiás, marca início de um novo modal de transporte, e serve de vetor para a interiorização do gás natural, para introduzir o combustível nessas regiões mais distantes. Inicialmente a distribuição no Estado de Goiás ocorrerá no segmento automotivo, com o gás natural veicular (GNV) proveniente do GNL. Com previsão de distribuir 50 mil m³/dia neste segmento ao longo do ano de 2007.

A Gasmig, empresa decorrente da associação entre Cemig e Petrobrás através da venda de 40% do capital social da Gasmig para a Gaspetro (empresa da Petrobrás), atua no fornecimento de gás natural. E o contrato firmado com a GásLocal visa suprir demandas da região de Andradas, Poços de Caldas and Três Corações, em Minas Gerais.

Através do contrato com a GásLocal, a Cebgás oferecerá o gás natural para a indústria automotiva na forma de Gás Natural Veicular (GNV). Deverá abastecer cerca de 3,4 mil taxistas do Distrito Federal e outros 3,6 mil motoristas.

A Cebgás já é o maior cliente da GásLocal, segundo Sérgio Soriano diretor da GasLocal, sendo responsável pela contratação de 24% de sua produção. Se o gás tiver boa aceitação em Brasília, poderá ser ampliado o fornecimento do produto.

3. PROPRIEDADES E VANTAGENS DO GÁS NATURAL

3.1. Propriedades do Gás Natural

O gás natural é um combustível fóssil encontrado em rochas porosas no subsolo. Através do acúmulo de energia solar sobre matérias orgânicas do tempo pré-histórico, soterradas em grandes profundidades, há a formação do gás natural graças à acomodação da crosta terrestre. Pode ser obtido de três maneiras:

- ✓ Da degradação da matéria orgânica por bactérias
- ✓ Da degradação da matéria orgânica
- ✓ Da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos

O gás natural é composto por gases inorgânicos e hidrocarbonetos saturados, predominando o metano e, em menores quantidades o propano e o butano. O metano é um gás incolor, sem odor e apresenta um efeito asfixiante. Ressalta-se que a sua composição varia de uma reserva para outra, não se pode portanto, fornecer uma única tabela com sua composição.

Por apresentar facilidade de combustão o gás natural é importante realizar controle adequado de sua emissão, visando evitar problemas devido a sua inflamabilidade, precavendo contra prejuízos à qualidade do meio ambiente

Segue abaixo as especificações do gás comercializado no Brasil, que atendem à Portaria nº 104, da Agência Nacional do Petróleo, emitida em 8 de Julho de 2002, que estabelece, dentre outras coisas:

- ✓ Poder calorífico superior (PCS) a 20°C e 1 atm: 8.360 a 10.032 kcal/m³;
- ✓ Metano: 86% do volume (mínimo);
- ✓ Etano: 10% do volume (máximo);
- ✓ Propano: 3% do volume (máximo);
- ✓ Butano e mais pesados: 1,5% do volume (máximo);
- ✓ Oxigênio: 0,5% do volume (máximo);
- ✓ Inertes (N₂ + CO₂): 5% do volume (máximo);
- ✓ Nitrogênio: 2% do volume (máximo);
- ✓ Enxofre total: 70 mg/m³ (máximo);
- ✓ Gás Sulfídrico (H₂S): 15 mg/m³ (máximo);

Abaixo segue tabela que contém características do gás natural comercializado brasileiro.

Tabela 1- Características do gás natural segundo ANP [3]

9 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS	
Aspecto	
- Estado físico:	Gasoso.
- Cor:	Incolor.
- Odor:	Artificial ou inodoro.
Temperaturas específicas	
- Ponto de ebulição:	-161,4 °C @ 760 mmHg (para metano puro).
- Ponto de fusão:	-182,6 °C (para 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.
Solubilidade	
- Na água:	Solúvel (0,4 - 2 g/100 g).
- Em solventes orgânicos:	Solúvel.
Parte volátil:	100 %.

Como relatado acima, a composição do gás natural comercializado no Brasil é normalizada por órgãos reguladores. Pode-se encontrar esses dados através da Petrobrás ou da própria Agência Nacional do Petróleo, a ANP, que fornece normas de comercialização .

A Portaria ANP n. 104, de 8 de julho de 2002, estabelece a especificação do gás natural, de origem nacional ou importado, a ser comercializado em todo o território nacional. No seu conteúdo está previsto o envio de dados de análise da qualidade do gás natural realizadas tanto pelo Carregador como pelo Transportador. Seu teor encontra-se em anexo.

3.2. Propriedades do Gás Natural Liquefeito

O gás natural liquefeito, o GNL, é uma forma pura do gás natural que não é cancerígena ou tóxica. Para que ocorra a liquefação do gás é necessário que todas as impurezas sejam removidas, tais como:

- ✓ Enxofre, dióxido de carbono e mercúrio: são corrosivos para os equipamentos utilizados no processo de produção do GNL
- ✓ Água: pode congelar e bloquear passagens (nos equipamentos)
- ✓ Hidrocarbonetos pesados: assim como a água, pode congelar

A remoção desses contaminantes torna o GNL, após a regaseificação no terminal receptor, um gás natural limpo e confiável para processos de resfriamento, aquecimento e energia.

GNL é gás natural na sua forma líquida compacta. Quando o GN é resfriado até a temperatura de 162°C , seu volume reduz para 1/600 do que ocuparia em sua forma gasosa, tornando-se um líquido transparente e não tóxico. Por essas razões que o GNL é um meio de se transportar o gás natural de forma segura e econômica para longas distâncias, fora do alcance dos dutos existentes. A figura 6 mostra uma ilustração da redução em volume do gás natural da sua forma gasosa à sua forma líquida.

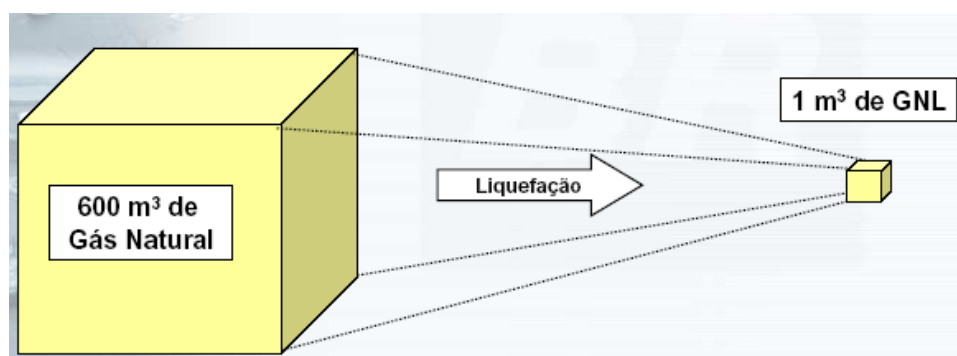


Figura 6- Volume ocupado pelo gás natural antes e após a liquefação [2]

O GNL não é odorizado pois este pode congelar quando o gás natural encontra-se na forma criogênica (162°C), no entanto após a sua regaseificação, o gás natural é odorizado segundo normas governamentais.

Para manter o GNL em sua forma líquida é essencial que a temperatura seja mantida baixa. Para tanto são usados tanques que são capazes de isolar o calor externo e remover o vapor formado dentro do próprio tanque.

Ressalta-se que o GNL não é armazenado sob altas pressões, e se houver ruptura do tanque de armazenamento não ocorrerá grande perda de energia e portanto explosões.

3.3. Vantagens do Gás Natural

Muitos são os ganhos econômicos obtidos pela escolha do gás natural como combustível, porém a principal vantagem é a preservação do meio ambiente. O gás natural é um combustível não-poluinte, isto é, sua combustão é limpa, isenta de fuligem e outros materiais que possam prejudicar o meio ambiente. Geralmente apresenta baixos teores de contaminantes como o nitrogênio, dióxido de carbono, água e compostos de enxofre. Outro ponto a ser notado é que por gerar pouca emissão de poluentes, melhora sensivelmente as condições ambientais, contribuindo para a redução do efeito estufa. O gás natural permanece no estado gasoso, sob pressão atmosférica e temperatura ambiente.

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

Tabela 2- Comparação de nível de emissão de poluentes [4]

Emissão (g/kWh)	Gás Natural	Óleo Diesel	Óleo Pesado
CO_2	183	248	275
Particulados	Mínimo	Baixo	Alto
SO_2	Isento	0.32	0.35

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

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

Nas indústrias o uso de gás natural além de reduzir os custos operacionais, o que evita gastos com manutenção e compra de equipamentos anti-poluição, pode ser útil também na co-geração de energia elétrica e na climatização (ar quente ou frio).

4. CADEIA DE GNL

A produção, armazenamento, transporte e regaseificação de GNL são processos normalizados, e as regulamentações para o seu funcionamento são definidas pela National Fire Protection Association, a NFPA.

Na NFPA 59A: Standard for the Production, Storage and Handling Liquefied Natural Gás, pode-se encontrar normas de como deve ser a produção, armazenagem, transporte e distribuição de gás natural liquefeito.

A produção, transporte, armazenamento e regaseificação de GNL são processos que exigem investimento muito alto. Adiciona-se o fato de ocorrer perdas de 10% a 15% nesse tipo de processo, que se comparado ao transporte feito por gasodutos, esses valores não ultrapassam 2%. Essa diferença entre os valores perdidos faz com que a escolha por GNL se dê quando gasodutos não é uma opção viável tecnicamente (travessia em mares profundos) ou quando as distâncias de transporte tornem os gasodutos antieconômicos.

A cadeia começa com a extração do gás natural e conseqüente liquefação, para que o transporte marítimo, de longas distâncias principalmente onde a rede de dutos não tem alcance, se torne viável. No terminal de recepção do GNL ocorre a armazenagem e conseqüente regaseificação, seguido da distribuição do gás natural para o mercado consumidor.

Segue abaixo, na figura 7, os processos que abrangem uma cadeia de GNL.

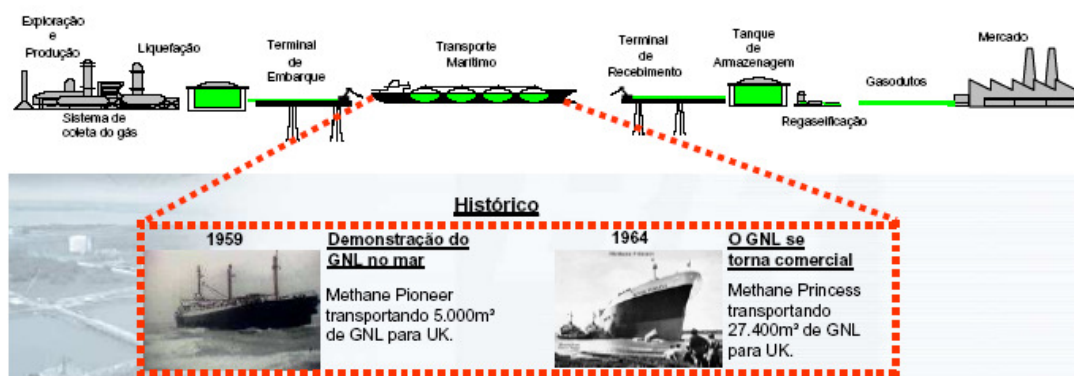


Figura 7- Processos de produção do GNL [2]

Enquanto o aumento na demanda de gás natural contribui para a previsão de crescimento na cadeia de GNL, a economia favorável na indústria de GNL também pode ser considerada uma motivação.

De acordo com o Instituto Tecnológico de Gás, o custo de produção e transporte do GNL caiu 35-50 por cento nos últimos dez anos. O tamanho das plantas de liquefação está diretamente ligado com a redução de custos de produção, uma vez que plantas maiores demandam menos investimentos e custo de manutenção por toneladas produzidas. O tamanho médio de uma planta de liquefação aumentou de 1 milhão de toneladas por ano (MTA), nos anos 60, para 3 MTA em 2000.

O custo do transporte via navios de GNL também decresceu. De um custo médio de \$250 milhões no começo dos anos 90 para aproximadamente \$160-170 milhões atualmente. Paralelamente houve também aumento na quantidade transportas de GNL por embarcações.

4.1. Processo de liquefação

A etapa central de um projeto de GNL é a unidade de liquefação. Nela a temperatura do mesmo cai para -162°C e o seu volume, que inicialmente era de aproximadamente 1000 vezes maior quando comparado a outro combustível com o mesmo poder calorífico, diminui cerca de 600 vezes.

A unidade de liquefação normalmente é construída em locais costeiros, em baías, para que facilite o escoamento da produção por navios. É necessário também que esteja próxima aos campos produtores de GN, pois o seu custo de transporte via gasodutos é também representativo e, dependendo da distância a ser percorrida até a planta, pode prejudicar os custos globais do projeto.

Na unidade de tratamento ocorre a remoção de impurezas do gás vindo dos campos, como o gás carbônico, enxofre, nitrogênio, mercúrio e água. Nesse processo ocorre a separação do gás liquefeito de petróleo (GLP), composto basicamente de propano e butano.

A liquefação do GN ocorre em nos trocadores de calor, que funcionam segundo os mesmo princípios de um refrigerador doméstico. Um gás refrigerante, normalmente propano, extrai o calor do GN nos trocadores de calor. Os trocadores de calor ficam estruturados em conjuntos paralelos, que junto com os demais

equipamentos formam os trens de liquefação, nos quais o GN circula até que atinja a temperatura de -162°C .

Existem diferentes tipos de trocadores de calor, no entanto quase todas as instalações dividem-se em conjuntos paralelos. Os mais recentes ‘trens de liquefação’ tendem a ter dimensões maiores, de maneira a acompanhar as crescentes demandas.

4.2. Armazenamento do GNL

Após a liquefação do gás natural, este é armazenado em tanques capazes de mantê-lo a -162°C , à pressão atmosférica, até o seu embarque. Devido ao alto custo de armazenagem, sua capacidade é calculada por sofisticados processos que consideram a produção de unidade, o número e tamanho dos navios, riscos de atraso entre outras variáveis.

Para manter o gás natural na temperatura e pressão ideais o tanque é provido de um dispositivo de respiro, por onde ocorre o escoamento de gás natural evaporado para o meio externo. O que acarreta em uma perda pequena, mas significativa. Se somados, explicam o alto custo de armazenagem.

Sabe-se que uma porcentagem de gás perdida através do dispositivo de respiro, e que uma parte do GN vaporizado deve-se ao efeito associado à absorção da radiação térmica solar devido à insolação direta. Por essa razão, a superfície externa do tanque deve ter um revestimento adequado que apresente pequena absorvidade na faixa de radiação ultra-violeta, isto é, na região de pequeno comprimento de onda, que caracteriza a radiação emitida pelo sol. O material do revestimento do tanque criogênico deverá ser um material não condutor, não metálico, de tom claro.

4.3. Transporte do GNL

O transporte de GNL pode ser realizado por veículos (continental) e navios metaneiros (extracontinental), sendo os navios o transporte mais comumente utilizado.

Os navios que levam o GNL das unidades de liquefação aos pontos de regaseificação possuem reservatórios isolados capazes de suportar a temperatura do

gás durante o transporte, não havendo refrigeração na viagem. Há uma perda que, mesmo nos mais modernos navios vai de 0,1% ao dia. Ressalta-se que o GNL é normalmente usado como combustível e uma pequena parte volta com o navio para manter os tanques frios.

Há dois tipos básicos de transportadores de GNL, o que armazena o gás em esferas (o tipo Moss Rosenberg), e os que têm tanques nas posições convencionais de petroleiros (tipo membrana, ou Technigaz), apresentados nas figuras 8 e 9, respectivamente. Ambos estão em operação e em construção, e não há diferenças substanciais de custo inicial ou de operação. A capacidade usual por navio é de 125 a 135 mil m³, que corresponde a 55 a 60 mil toneladas de GNL.



Figura 8- Transportadora tipo Moss Rosenberg [5]



Figura 9- Transportadora tipo membrana (Technigaz) [6]

4.4. Terminal de Regaseificação

Grande parte dos terminais de regaseificação existentes se encontra em áreas costeiras, com fácil acesso ao transporte marítimo, preferencialmente perto dos

centros consumidores. Devido às dificuldades na obtenção de licenças de operação, atualmente verifica-se um aumento na utilização de unidades offshore de regaseificação de GNL, conhecido também por Embarcações flutuantes de armazenamento e regaseificação, FSRU – Floating Storage and Regaseification ou SRV – Shuttle and Regaseification.

Abaixo se encontra na figura 10 os principais componentes do SRV.



Figura 10- Embarcações flutuantes de armazenamento e regaseificação [2]

Os principais elementos que compõem um terminal de regaseificação, tanto onshore quanto offshore, são os tanques de estocagem e os regaseificadores, além dos aparelhos complementares, conforme mostra a figura 11.

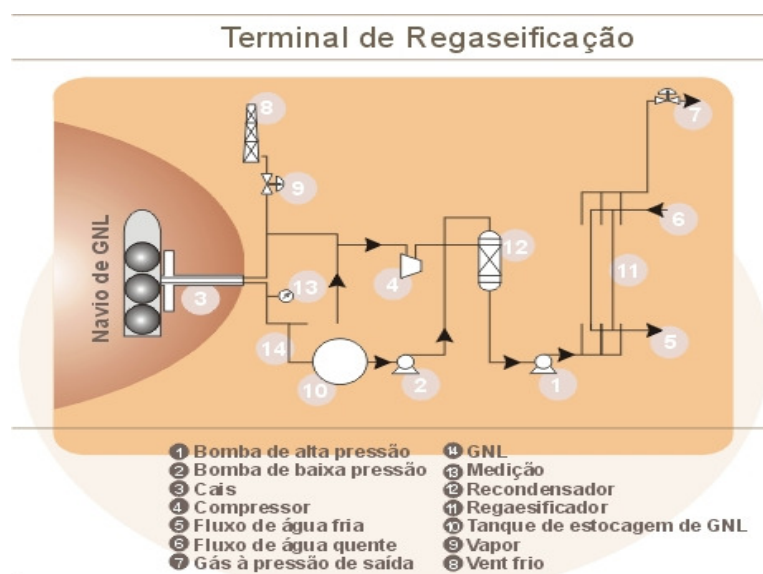


Figura 11- Terminal de regaseificação [7]

Os tanques de estocagem devem ter capacidade de pouco mais que a carga de um navio, pois eventualmente além de absorverem a carga dos navios, o terminal propõe-se a servir de balanceador de picos de consumo e estoque estratégico.

Os regaseificadores podem usar calor do ar ou água do mar para reaquecer o GNL. O primeiro é conhecido como vaporizador atmosférico, e por convecção natural vaporiza-se o gás natural. São construídos em módulos de perfis tubulares extrudados em alumínio, como mostra a figura 12. Em ambos não existe a utilização do ‘frio’ do fluido de refrigeração em outra aplicação.



Figura 12- Vaporizador atmosférico de gás [7]

Nas maneiras apresentadas de se vaporizar o gás natural, há a descarga do fluido de aquecimento, água do mar ou ar atmosférico, no meio ambiente a uma temperatura mais baixa que a de entrada. Essa temperatura é baixa o suficiente para que esse fluido, agora resfriado, possa ser usado em outra aplicação onde ‘frio’ seja necessário. Podendo gerar benefícios para ambos lados: para aqueles que estão regaseificando o GNL através da utilização desse ‘frio’, e pela indústria que estaria recebendo o ‘frio’, através da economia de energia.

No item 6.1., *Aplicação do frio de regaseificação do GNL*, deste relatório serão apresentadas as aplicações existentes para esse frio.

5. TECNOLOGIAS DE VAPORIZAÇÃO

Abaixo segue a figura 13, que ilustra o processo de vaporização, desde a descarga do GNL do navio até o centro de distribuição do gás.

O vaporizador, que é um trocador de calor criogênico, encontra-se em destaque.

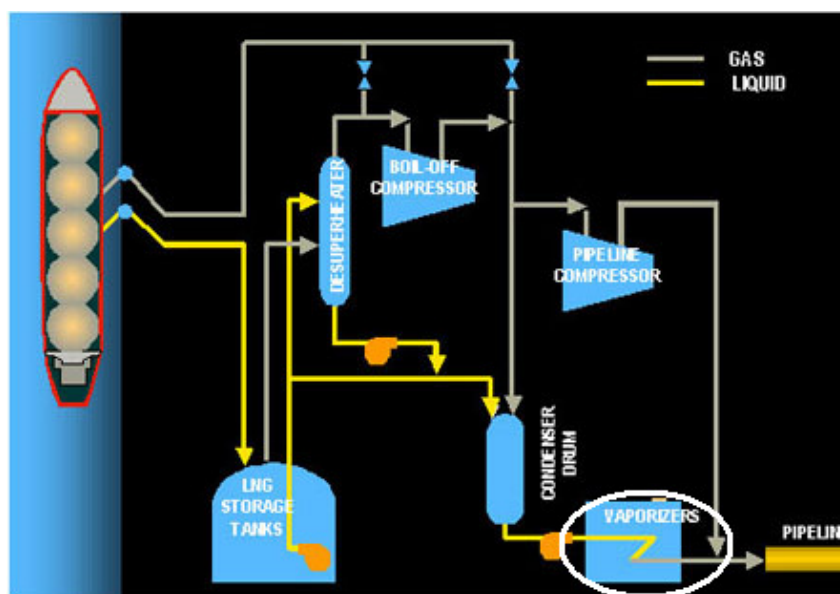


Figura 13- Processo de vaporização do GNL - Descarga até distribuição [8]

O objetivo deste trabalho, como já mencionado anteriormente, é fazer um estudo de possíveis maneiras de se aproveitar o ‘frio’ da vaporização do GNL. Para tanto, a seguir será feito um estudo das tecnologias existentes nesse processo de regaseificação, que consiste do uso de trocadores de calor criogênicos.

A seleção de vaporizadores de GNL nos terminais receptores tem sido recentemente mais rigidamente avaliada por conta do impacto ambiental causado pela descarga de gás e/ou água do mar na natureza.

Existem vários tipos de vaporizadores de GNL comumente usados, os cinco tipos a seguir já foram utilizados ou demonstrados nos terminais de recepção de GNL.

- (a) Vaporizador com troca externa (Open Rack Vaporizers - ORV)
- (b) Vaporizador de combustão imersa (Submerged Combustion Vaporizers - SCV)

(c) Trocador de casco e tubo (Shell and Tube Vaporizers - STV), que inclui projetos modificados, tais como o tipo Reli-Vap

(d) Ciclo combinado de unidade de calor e energia com vaporizador de combustão imersa (Combined Heat and Power unit with Submerged Combustion Vaporizer - CHP-SCV)

(e) Outro tipo de vaporizador – Vaporizador cujo fluido de aquecimento é o ar ambiente

Fatores essenciais para a seleção do tipo de vaporizador são:

- ✓ Disponibilidade e qualidade da água do mar (se o fluido de aquecimento for água do mar)
- ✓ Custo do investimento e do combustível
- ✓ Meio ambiente – descarga de ar e água

Terminais de recepção de GNL normalmente utilizam dois tipos de vaporizadores: o ORV e o SCV, enumerados acima.

5.1. Vaporizador com Troca Externa - ORV

De maneira geral, o sistema ORV usa água do mar como fluido de aquecimento. Seu custo de operação é menor quando comparado aos Vaporizadores de Combustão Imersa (SCV), no entanto requer um investimento inicial maior pois esse tipo de trocador exige o acoplamento de um sistema de sucção/pressão de água, dutos com diâmetros maiores e sistemas de tratamento de água do mar.

A água do mar utilizada pelo sistema ORV tem temperatura ambiente como fonte de troca de calor em um arranjo do tipo filme aberto para vaporizar GNL que passa pelos tubos. Em geral a temperatura da água do mar é sempre maior que 8°C.

As vantagens do ORV são:

- ✓ Baixo custo de operação
- ✓ Fácil construção e manutenção
- ✓ Alta confiabilidade e segurança

Todas as vantagens acima citadas são obtidas com o ORV operando em regime.

Para um terminal com capacidade de 7.5 milhões de toneladas por ano de produção de GNL, por exemplo, pelo menos duas tubulações de água do mar de

diâmetros muito grande, uma para a recepção e outra para a descarga, são necessários. Essas tubulações terão 2 metros de diâmetro e é provável que cause impactos na vida marinha durante a sua construção. Além de existir o impacto ambiental causado pela descarga de água a uma temperatura de 5 à 12°C mais fria que a água de recepção, possivelmente contendo 2 ppm de hipocloreto. Adicionado ao impacto visual no ambiente marinho e regiões, o impacto terrestre também é significativo.

• Descrição Geral

O ORV é feito de liga de alumínio com a finalidade de se obter boas características mecânicas a baixas temperaturas e alta condutividade térmica. Água do mar é introduzida através de um distribuidor na parte superior de um conjunto de tubos. O fluxo de água segue para baixo na parte externa, em direção oposta ao GNL que segue para cima por dentro dos tubos. A água do mar é coletada na parte inferior, por onde é distribuída e descarregada no mar. Na figura 14 segue o funcionamento básico de um ORV.

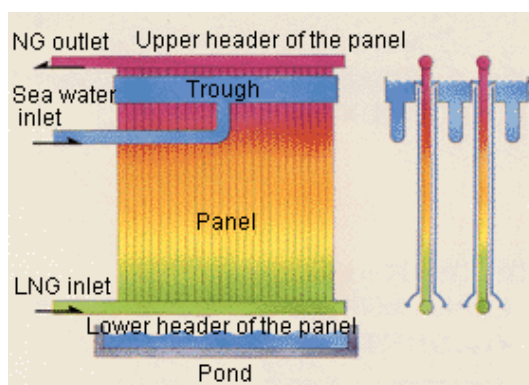


Figura 14- Open Rack Vaporizers – ORV [9]

O painel que contém os tubos por onde a água do mar escorre é revestido externamente por uma liga de zinco, que fornece resistência a corrosão. O ORV exige manutenção regular, normalmente anual, para manter a superfície externa por onde passa a água do mar limpa. Para proteger o painel contra incrustações e crescimento de organismos marinhos, a água do mar passa por um processo em que cloro é adicionado.

• Qualidade da água

A qualidade da água é um requisito crítico para o sucesso operacional do sistema ORV. Segue abaixo as principais condições.

- ✓ Quantidade significativa de água. Pode levar a uma outra condição, que diz respeito a quantidade de vida marinha existente na água de entrada.
- ✓ Adição de cloro na água do mar é desejável, no entanto cloro residual pode impactar de maneira negativa o ambiente marinho.
- ✓ A água não pode conter sólidos de mais de 2mm de diâmetro para garantir homogeneidade de fluxo e evitar entupimento dos tubos do trocador de calor.
- ✓ Água contendo íons metálicos pesados, Cu^{++} , Hg^{++} , não deve ser usada já que esses íons diminuem a vida útil do revestimento de zinco-alumínio.
- ✓ Areia e depósito de lodo presentes na água do mar devem ser insignificantes. Sólidos em suspensão não devem exceder 80 ppm.
- ✓ O pH da água do mar deve estar entre 7.5 e 8.5.
- ✓ Quantidade de íons isolados de cloro (Cl^- ativo) deve ser menor que 0.05 ppm no ponto de junção entre o ORV e o tubo de recebimento da água.

5.2. Vaporizador de Combustão Imersa – SCV

Normalmente o vaporizador do tipo SCV é usado como back-up (reserva) para o ORV. Este usa água quente aquecida por uma câmara de combustão imersa que vaporiza o GNL. Contém internamente tubos de aço inoxidável imersos em água com uma câmara de combustão. Em um típico terminal SCV o combustível na forma de gás é queimado em uma grande câmara de combustão ao invés de ocorrer a queima em pequenos queimadores. Desta maneira, além de ser mais econômico, esse tipo de combustão produz menos NO_x e CO.

O fluxo de gases quentes aquece a água, onde o tubo por onde passa o GNL está localizado. Os SCVs são projetados para utilizar o gás natural de baixa pressão vaporizado. Pode também ser utilizado um gás combustível mais pesado extraído do

próprio GNL. Abaixo segue a figura 15 que ilustra de maneira simplificada o funcionamento do SCV.

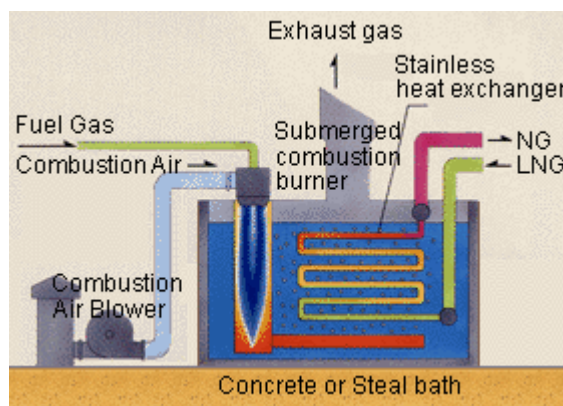


Figura 15- Submerged Combustion Vaporizers – SCV [9]

Os SCVs têm as seguintes vantagens:

- ✓ Baixo custo de construção
- ✓ Partida rápida
- ✓ Grande flutuação de carga

O SCV necessita de combustível para a vaporização de GNL, e o consumo de combustível é de aproximadamente 1.5% da produção de gás natural. Tem custo de operação mais elevado quando comparado ao ORV já que o consumo de combustível tem um peso considerável nas plantas de regaseificação de GNL.

Devida a grande quantidade de gás, existe uma preocupação maior em relação a emissão de NO_x , que deve ser inferior a 46 ppm. O nível de NO_x pode ser diminuído ainda mais utilizando unidades de Reatores Catalisadores Seletivos (SCR), onde o nível de emissão cai para 5 ppm, no entanto aumentando de maneira significativa o custo para o unidade de SCV.

A água de banho adquire acidez conforme os produtos da combustão são absorvidos, e produtos químicos alcalinos devem ser adicionados para controlar o pH da água.

Como a capacidade térmica da água de banho é alta, é possível manter uma operação estável mesmo no caso de súbitas partidas e paradas ou mesmo para oscilações de carga.

5.3. Trocador de Casco e Tubo – STV

Os trocadores de calor do tipo casco e tubo, STV, e os STVs com fluido intermediário são geralmente menores e de custo competitivo comparado aos ORV e SCV. O calor é fornecido ao vaporizador através de um circuito fechado com transferência de calor média. São usados principalmente quando uma fonte de calor compatível é disponível. O projeto desse tipo de vaporizador exige um fluxo de GNL estável, como método de prevenção contra possíveis congelamentos dentro do trocador de calor.

O projeto de STV com dois conjuntos de tubos possui um conjunto de tubo inferior e um superior. Entre o GNL, que circula no conjunto de tubo superior, e a água do mar, ou água doce, que circula nos tubos inferiores utiliza-se um fluido intermediário para efetuar a troca de calor, fluido este podendo ser propano, isobutano, amônia. Um pequeno superaquecedor do tipo casco e tubo é necessário para aquecer o vapor até 5°C.

O projeto usado no terminal US Cove Point usa água doce no lugar de água do mar no conjunto inferior de tubos como fonte de calor. A água doce resfriada é bombeada, circulada e aquecida através dos gases de exaustão da turbina em outro trocador de calor. O fluido usado é o isobutano.

Com o uso de água do mar como fluido de aquecimento, verificam-se os mesmo problemas citados nos tipo ORVs. STV tem uma preocupação adicional no que diz respeito a corrosão e erosão dentro do trocador. Outras desvantagens, temperatura baixa e presença de cloro na descarga, são idênticos aos do sistema ORV.

5.4. Ciclo Combinado de Unidade de Calor e Energia com Vaporizador de Combustão Imersa - CHP-SCV

Com a finalidade de diminuir o autoconsumo de gás nos sistemas SCVs e para aumentar a eficiência e economia do todo o processo de regaseificação, o terminal de recepção pode ser modificado de maneira a utilizar o conceito de cogeração, que oferece economia de energia e vantagens ambientais. O módulo principal do CHP é a turbina a gás. Os gases quentes de exaustão da turbina passam por uma torre de

recuperação de calor e transferem calor para aumentar a temperatura da água em circuito fechado. Essa água quente vai depois circular e ser injetada na água de banho dos vaporizadores e transferir seu calor para regaseificar o GNL.

Um exemplo é o terminal de Zeebrugge, cuja turbina a gás usada é do tipo LM6000 com potência elétrica de 40MW. Em Zeebrugge a conversão de energia da instalação total chega a 106.8% . A economia de energia é de 27.8%, considerando uma eficiência de 50% de uma planta de ciclo combinado e 110% para os queimadores imersos dos vaporizadores de GNL. Além disso ocorre uma redução de 27.8% de CO e 65% de NO_x , quando comparados a produção separada de energia elétrica e calor.

Após as modificações terem sido feitas nos vaporizadores, estes se tornam híbridos podendo operar em três modos:

- ✓ Combustão imersa, como na composição original
- ✓ Com circuito fechado de água quente obtido através da planta de CHP com queimador imerso
- ✓ Com as duas fontes de calor juntas

5.5. Outro tipo – Vaporizadores com Ar como Fluido de Aquecimento

Esse tipo de vaporizador utiliza ar ambiente em seu estado natural ou com convecção forçada como meio de vaporizar o GNL. É usado em climas quentes e com espaço necessário para tal uso. São fabricados por empresas de ar condicionado e tem sido usado no Terminal de GNL no Dahej, India's Petronet.

6. APLICAÇÕES DO FRIO

Neste item segue, de maneira geral, um breve estudo sobre as aplicações do frio usadas atualmente. Estas são inúmeras, o qual é aproveitado praticamente em todos os ramos da atividade humana:

- ✓ Na indústria de alimentos; seja na sua manufatura, tratamento térmico (pasteurização) como na sua armazenagem ou transporte.

Exemplos: Fabricação de bebidas, leite, manteiga, queijos, sorvetes, conservação de produtos agrícolas, produtos do mar, carnes, ...

- ✓ Na fabricação de gelo

Exemplos: Gelo em cubos, gelo seco, pistas de patinação.

- ✓ Na indústria de construção

Exemplos: na cura de grandes estruturas de concreto, como barragens, fundações, no congelamento do solo para abertura de poços e túneis, ou na consolidação de fundações abaladas.

- ✓ Na metalurgia

Exemplos: no tratamento térmico de aços rápidos, na refrigeração de ferramentas de corte, na refrigeração de eletrodos dos fornos elétricos e soldadores elétricos.

- ✓ Na indústria química

Exemplos: na remoção de calor em reações químicas exotérmicas, afim de garantir uma temperatura adequada durante o processo; na solidificação de materiais como ceras, graxas, entre outros; na fabricação de borracha sintética e dos adubos sintéticos; na armazenagem de substâncias sensíveis às temperaturas elevadas, como explosivos, polímeros.

- ✓ No condicionamento de ar

Exemplos: para conforto em residências, escritórios, fábricas, transportes, recreação, hospitais, etc.; para refrigeração de minas profundas; e outros.

- ✓ Na medicina: na conservação de cadáveres; congelamento de peças anatômicas; na conservação de certos vírus; etc.

- ✓ Aplicações diversas: na conservação de vários produtos (flores, grãos, fumos, cigarros); fabricação de bolas de golfe; testes de baixas

temperaturas em laboratórios, nos testes sobre semicondutores e supercondutores; etc.

E estas aplicações de refrigeração podem ser classificadas nas seguintes categorias;

✓ Refrigeração doméstica: a refrigeração doméstica abrange principalmente a fabricação de refrigeradores de uso doméstico e congeladores caseiros. A capacidade dos refrigeradores domésticos varia de 60 l até cerca de 600 l com temperaturas na faixa de $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ no compartimento de congelados e $+2$ a $+7$ no compartimento dos produtos resfriados.

✓ Refrigeração comercial: A refrigeração comercial abrange os refrigeradores especiais ou de grande porte usados em restaurantes, sorveterias, bares, açougues, laboratórios, ... As temperaturas de congelamento e estocagem situam-se, geralmente, entre $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

✓ Refrigeração Marítima e de Transporte: A refrigeração Marítima, naturalmente, refere-se à refrigeração a bordo de embarcações marítimas e inclui a refrigeração para barcos de pesca e para embarcações de transporte de cargas perecíveis. A refrigeração de transporte relaciona-se com equipamentos de refrigeração quando aplicados a caminhões e vagões ferroviários refrigerados.

✓ Refrigeração Industrial: Vias de regra, as aplicações industriais são maiores que as comerciais em tamanho e tem a característica marcante de requererem um operador de serviço. São aplicações típicas industriais: as fábricas de gelo, grandes instalações de empacotamento de gêneros alimentícios (carnes, peixes, aves, ...); cervejarias, fábricas de laticínios e outras.

Sendo Refrigeração Industrial com ênfase em aplicações alimentícias objeto de estudo do presente projeto.

6.1. Aplicações do Frio da Regaseificação do GNL

Uma maneira mais eficiente de se usar o frio do GNL é de se fornecer energia “fria” para terceiros que necessitam de refrigeração em seus produtos. É intuitivo que quanto menor a temperatura, maior o consumo de energia para alcançá-la. Em outras palavras, a utilização do frio do GNL como alternativa de refrigeração, substituindo a

energia elétrica convencional de refrigeração para temperaturas criogênicas, resulta em uma grande economia de energia.

O frio do GNL também é muito utilizado para geração de energia, isto é, a partir da do frio do GNL é possível aumentar o rendimento de turbinas.

- Frio do GNL combinado com Ciclo de Turbina a Gás

No terminal de GNL de Barcelona utiliza-se o frio do GNL combinado com uma turbina a gás, conhecido como CCGT – Combined Cycle Gás Turbine e o objetivo desse tipo de aplicação é de aumentar a eficiência do CCGT.

A eficiência de uma típica planta CCGT é reduzida de acordo com o aumento de temperatura. Normalmente isso ocorre quando há picos na demanda por energia e conseqüentemente esta pode ser vendida a preços mais elevados.

Realizou-se um experimento [6] utilizando trocador de calor do tipo casco e tubo, cuja vaporização do GNL se dá através da troca com um fluido composto 60% de água e 40% de etileno-glicol, fluido este circula pelo ciclo de potência. Fez-se desta maneira a análise do aumento do rendimento do CCGT.

A solução resfriada de água/etileno-glicol é usada em trocador de calor localizado no ciclo de turbina a gás para diminuir a temperatura do ar que entra no compressor. Com a temperatura mais baixa, maior o fluxo mássico que entra no compressor, que é expandido na turbina a gás gerando uma potência maior, aumentando o rendimento da turbina.

A figura 16 mostra o funcionamento deste ciclo combinado.

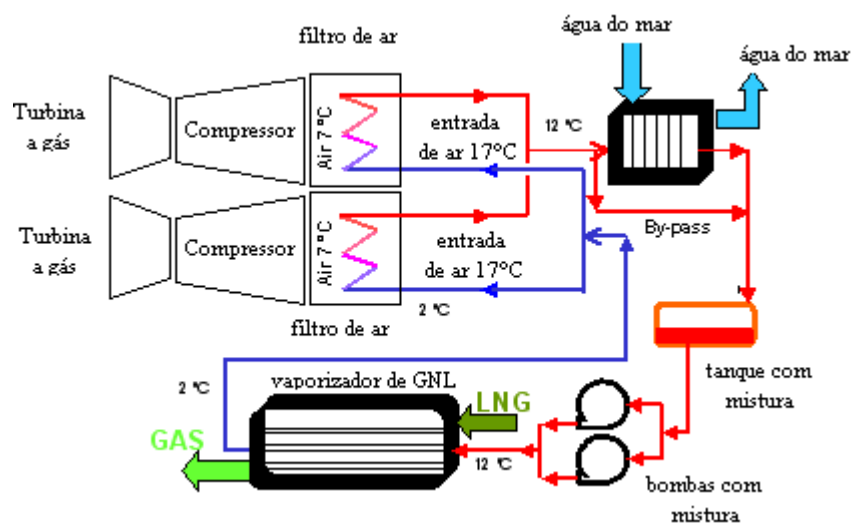


Figura 16- Regaseificação do GNL combinado com Ciclo Brayton [10]

• Frio do GNL para Sistemas de Refrigeração

Uma pequena quantidade de gás natural liquefeito evapora durante o transporte é geralmente usada como combustível ou é combinada com processos diários dentro da própria planta. Embora o transporte seja feito através de cargueiros com alta capacidade de isolar o frio interno, uma pequena quantidade de GNL vaporiza. Este vapor pode ser usado para manter o restante de GNL a temperatura ideal, ou mesmo ser de combustível para o próprio tanque.

Para que esse gás seja entregue na forma líquida, no terminal de regaseificação existe o sistema de re-condensação do gás natural, que consiste de três compressores, um soprador de gás e um re-condensador. O gás passa pelos compressores e depois é direcionado ao re-condensador.

No Japão o sistema de re-condensação baseia-se na economia de energia através da utilização do frio do próprio GNL para liquefazer o GNL vaporizado durante o transporte. Desta maneira pode-se utilizar compressores de menor taxa de compressão, o que acarreta em uma economia de 30-60% de energia, comparado com os sistemas com grande taxa de compressão.

Uma outra aplicação, feita também no Japão, consiste no sistema combinado de separação de ar e liquefação do gás natural.

Diferente dos exemplos anteriores em que o frio de vaporização do GNL é usado em outras aplicações, esse sistema utiliza-se a energia de vaporização do nitrogênio, oxigênio ou argônio líquido para liquefazer o gás natural. De maneira

geral, o nitrogênio líquido obtido da separação do ar é transportado e depois usado na liquefação do gás natural. O nitrogênio, agora gasoso é então usado para melhorar o processo de recuperação de óleo.

Uma terceira aplicação tem sido feita para o frio do GNL, que é através de sistemas de refrigeração de produtos. No Japão por exemplo, tem sido utilizado esse frio em câmaras frigoríficas para manter peixes, insumo muito valorizado, frescos.

No item seguir serão levantados tipos de indústria que necessitam de um sistema de refrigeração, daí a utilização do frio de vaporização do GNL, de grande e pequeno porte.

6.2. Frio de Regaseificação na Indústria Alimentícia

Na indústria alimentícia, destacam-se três aplicações que o ciclo de refrigeração tem importância vital em seu processo. São eles:

- ✓ Frigoríficos, câmaras frigoríficas (armazenamento de alimentos, por exemplo)
- ✓ Laticínios
- ✓ Fábricas de gelo

O que se deseja com este projeto é analisar os mercados de ‘frio’ acima citados, de maneira a aplicar o ‘frio’ gerado a partir da evaporação do GNL nessas indústrias.

Apenas para quantificar a energia “fria” perdida no processo, sabe-se que o processo de vaporização de um quilograma de GNL, consome 502,4kJ na forma de calor latente e 335kJ, na forma de calor sensível. Um terminal de liquefação que produz um fluxo de 15 milhões de metros cúbicos por dia, pode alimentar uma central termelétrica com 107,8MW de capacidade, com custo energético praticamente zero.

Segundo dados do Banco Mundial, um terminal de recebimento somente com instalações de regaseificação, com capacidade para produzir 4,6 milhões de metros cúbicos por dia, custaria em torno de US\$150 milhões.

De maneira geral, os processos industriais que podem usufruir a energia “fria” vinda da regaseificação do GNL o fazem através de um fluido refrigerante intermediário, sendo que apenas este participa ativamente do processo de

7. APLICAÇÃO DA ENERGIA “FRIA”: CASOS A SEREM ANALISADOS

No item anterior foram citados exemplos de aplicações que já são utilizados em outros países, mas para esse projeto iremos focar em possibilidades viáveis no mercado interno. Seja pela proximidade com os consumidores, seja pela existência de consumidores.

Tendo em vista os pontos acima levantados, destacam-se as seguintes aplicações:

- ✓ Refrigeradores (frigoríficos, laticínios)
- ✓ Fabricação de gelo
- ✓ Ar condicionado

A seguir segue breve descrição de seus respectivos funcionamentos e dados de operação.

- Refrigeradores

Os sistemas de refrigeração funcionam com um fluido refrigerante. Exemplos de refrigerantes podem ser; a amônia (NH_3), dióxido de enxofre, hidrocarbonetos halogenados, e o mais conhecido de todos, o freon. Nos últimos anos uma nova geração de compostos não prejudiciais para a camada de Ozônio, tem vindo a ser cada vez mais utilizada.

A figura 18 ilustra de maneira simplificada o funcionamento de um sistema de refrigeração:

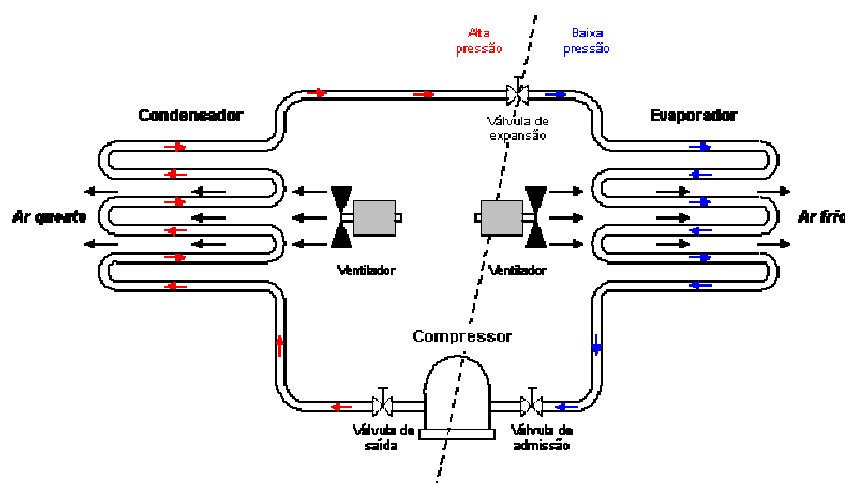


Figura 18- Funcionamento de um sistema de refrigeração [12]

O líquido refrigerante flui da válvula de expansão e atravessa a serpentina do evaporador, onde absorve calor e se transforma em gás ou vapor. Daí passa para o compressor, onde é comprimido até atingir a pressão do condensador. No condensador, o calor é dissipado e o refrigerante torna-se novamente líquido, recomeçando o ciclo.

O refrigerante está sob pressão baixa desde a válvula de expansão até à sucção do compressor. Esta parte do sistema é chamada "lado de baixa pressão". O refrigerante está sob pressão elevada desde a saída do compressor até à válvula de expansão. Esta parte chama-se "lado de alta pressão". Estas pressões variam de sistema para sistema conforme; o refrigerante empregue, a temperatura requerida no evaporador e a temperatura do meio da condensação.

A válvula descompressora (tubo capilar ou válvula de expansão) é simplesmente um dispositivo que liga o condensador ao evaporador, e a sua função é controlar o fluxo de fluido no sistema. No caso de um frigorífico é simplesmente um tubo super fino (tubo capilar), em sistemas grandes é usada a válvula de expansão que ajusta automaticamente a quantidade de fluido que circula pelo sistema, conforme a sua necessidade.

Este sistema é utilizado em inúmeras aplicações, tais como, frigoríficos, arcas congeladoras, balcões frigoríficos e aparelhos de Ar Condicionado.

Para que o sistema apresentado possa transferir o calor para o exterior da área a climatizar, basta que o lado de baixa pressão fique no interior desse espaço, e o lado de alta pressão no exterior do edifício.

- Frigoríficos

Os frigoríficos são grandes refrigeradores que trabalham a baixa temperatura, suficiente para impedir a ação de microorganismos patogênicos, isso pois sua principal função é de conservar o alimento fresco.

Para se evitar infecções e intoxicações alimentares, que são provocadas pelo consumo de alimentos contaminados ou com microorganismos patogênicos ou com as toxinas por eles produzidas a temperatura ideal que deve ser mantido um frigorífico, que é um sistema de refrigeração, é de 3 a 4°C.

A multiplicação de microorganismos, em geral, só ocorre num determinado intervalo de temperaturas, um exemplo são as salmonelas que se multiplicam entre cerca de 7 e 48°C, convém garantir que os alimentos são armazenados a uma temperatura inferior à temperatura mínima a que a maioria dos microorganismos patogênicos se multiplica.

Recomenda-se que o frigorífico esteja a uma temperatura de cerca de 4°C deve-se ao fato de muitos dos microorganismos terem temperaturas mínimas de crescimento entre 6 e 10°C, o que resulta na criação de condições propícias para que estes microorganismos possam crescer ou produzir as suas toxinas. Às temperaturas de frigorífico, o crescimento microbiano e a produção de toxinas estão fortemente diminuídos, o que reduz o risco de toxinfecções alimentares, aumentando a durabilidade dos alimentos.

- Ar Condicionado

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

Os aparelhos de ar condicionado utilizam substâncias químicas que se transformam facilmente de gás para líquido, e de volta para gás de novo. Essa substância química é utilizada para transferir o calor do ar de um espaço para fora.

É constituída de três principais partes: o compressor, o condensador e o evaporador. O compressor e o condensador geralmente se localizam na parte externa do espaço a ser resfriado enquanto o evaporador se encontra no interior.

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

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

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

Segue abaixo, na figura 19, um esquema de ar condicionado.

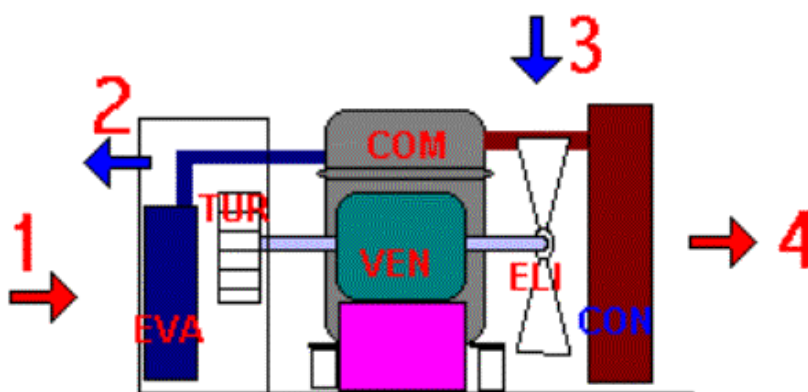


Figura 19- Aspecto de uma máquina de Ar Condicionado [1]

À seta n.º 1 corresponde a entrada de ar quente que vem da sala para o aparelho, esse ar passa pelo evaporador (EVA) que está frio, o ar então perde calor e arrefece voltando para a sala com uma temperatura menor que a da sala (representado no desenho pela seta n.º 2). Enquanto isso o condensador (CON) é

arrefecido pelo ar do exterior, a seta n.º 3 representa a entrada de ar para o condensador, que por sua vez está mais quente que o ar, então o ar ganha calor e é expelido pelo ventilador (VEN) para fora novamente.

Resumindo, o calor do ar no interior da sala é absorvido pelo evaporador e libertado para a rua pelo condensador.

Um aparelho de Ar Condicionado tem de possibilitar não somente a refrigeração, mas também o aquecimento do ambiente. Em alguns casos, o aquecimento do ar é realizado por uma resistência elétrica ligada em frente ao ventilador que insufla ar no ambiente.

Alterando o sistema é possível inverter os lados de baixa e alta pressão permitindo assim bombear o calor do exterior para o interior. Este outro sistema tem o nome de bomba de calor.

- Produção de Gelo

O método de utilização da energia “fria” aproveitada na fabricação de gelo não difere muito do frigorífico. Mas uma diferença essencial consiste na temperatura do ar desejada. No caso da produção de gelo, deve ser menor que o do frigorífico, tendo em vista o ponto de fusão da água.

A energia “fria” de vaporização do GNL também pode ser usada em conjunto com a produção de gelo, aumentando sua eficiência de maneira a esfriar a água de entrada para a produção de gelo.

Segue a seguir valores reais de indústrias de produção de gelo. Segundo o Instituto de desenvolvimento Integrado de Minas Gerais - INDI, com a série perfis industriais, para uma fábrica de gelo moído e em cubos, feito de água filtrada e clorada, a capacidade anual de produção de 600 toneladas ou 2,5 toneladas/dia de gelo, a potência instalada é de 18 kWh ou 103.680 kWh/ano (considerando 1 ano com 240 dias), no terreno de 1.000 m², galpão de 350 m² e câmara isolada: 36 m².

Em termos de matérias-primas e insumos, para uma fábrica com a capacidade anual acima mencionada necessita de 5 t/dia de água ou 1.200 m³/ano.

8. ABAIXAMENTO DO PONTO DE CONGELAMENTO

Para que o fluido refrigerante do processo de vaporização do GNL possa trabalhar como fluido intermediário no fornecimento de energia “fria”, é necessário que este possua um baixo ponto de congelamento. Com o intuito de evitar entupimento de vasos, o fluido que vaporiza o GNL tem como propriedade uma temperatura de congelamento muito baixa.

Quando não é possível a utilização de uma substância cujo ponto de congelamento se adeque ao esperado, utiliza-se misturas, isto pois a temperatura de início de congelamento do solvente de uma solução é sempre menor que a temperatura de início de congelamento do solvente puro.

A água dos oceanos, é uma solução que contém diversos solutos, dentre os quais o cloreto de sódio. Rios e lagos de água doce também possuem solutos, mas em bem menor concentração. Por essa razão a temperatura de início de congelamento das águas dos oceanos é menor que a temperatura de início de congelamento das águas de rios e lagos. A temperatura de início de congelamento de qualquer solução é sempre menor que a do solvente puro, e quanto maior a concentração da solução menor sua temperatura de início de congelamento.

Uma utilidade prática do abaixamento da temperatura de congelamento é a utilização de água e etilenoglicol no radiador de carros de países de clima frio, a mistura pode baixar a temperatura até -35°C , utilizando água pura a temperatura mínima seria de 0°C .

9. FLUIDOS REFRIGERANTES

Em geral, define-se refrigeração como o processo de redução de temperatura de um corpo. O desenvolvimento de tecnologias de refrigeração permitiu o desenvolvimento e tornou-se essencial para a manutenção de uma gama de atividades industriais, entre elas a indústria alimentícia em geral, os frigoríficos, a indústria de pescado, as fábricas de gelo, os laticínios e a indústria de bebidas.

Os sistemas de refrigeração industrial atualmente utilizados em larga escala nesses e em outros setores econômicos fundamentam-se na capacidade de algumas substâncias, denominadas agentes refrigerantes, absorverem grande quantidade de calor quando passam do estado líquido para o gasoso.

As características desejáveis para um agente refrigerante são:

- ✓ ser volátil ou capaz de se evaporar;
- ✓ apresentar calor latente de vaporização elevado;
- ✓ requerer o mínimo de potência para sua compressão à pressão de condensação;
- ✓ apresentar temperatura crítica bem acima da temperatura de condensação;
- ✓ ter pressões de evaporação e condensação razoáveis;
- ✓ produzir o máximo possível de refrigeração para um dado volume de vapor;
- ✓ ser estável, sem tendência a se decompor nas condições de funcionamento;
- ✓ não apresentar efeito prejudicial sobre metais, lubrificantes e outros materiais utilizados nos demais componentes do sistema;
- ✓ não ser combustível ou explosivo nas condições normais de funcionamento;
- ✓ possibilitar que vazamentos sejam detectáveis por verificação simples;
- ✓ ser inofensivo às pessoas;
- ✓ ter um odor que revele a sua presença;
- ✓ ter um custo razoável;
- ✓ existir em abundância para seu emprego comercial;

9.1. Amônia

A amônia atende à quase totalidade destes requisitos, com ressalvas apenas para sua alta toxicidade e por tornar-se explosiva em concentrações de 15 a 30% em volume. No entanto apresenta vantagens como o fato de ser o único fluido refrigerante, natural ecologicamente correto, isto pois não agride a camada de ozônio nem agrava o efeito estufa.

Muito utilizada no passado, a amônia sempre esteve presente no meio industrial, apesar de ter perdido espaço com a introdução dos CFCs no início dos anos 30. Atualmente, em virtude de suas propriedades termodinâmicas e também por apresentar vantagens econômicas, tem se tornado a grande opção em termos de agente refrigerante, conquistando gradualmente novos nichos de mercado.

Em condições normais de temperatura e pressão, amônia é um gás de odor irritante. É bastante solúvel em água: um volume de água a 0°C pode absorver até 1148 volumes de amônia. Tanto o gás quanto a solução não podem ser inalados ou ingeridos ou ter contato com pele e olhos.

O gás é facilmente liquefeito e normalmente é transportado nessa forma pela sua própria pressão de vapor (786 kPa).

Pode ser produzida principalmente pelo processo Haber, que consiste na reação direta dos elementos sob altas pressões e temperaturas (200 atm, 450°C) na presença de um catalisador.

Os sistemas de refrigeração por amônia consistem de uma série de vasos e tubulações interconectados, que comprimem e bombeiam o refrigerante para um ou mais ambientes, com a finalidade de resfriá-los ou congelá-los a uma temperatura específica. Sua complexidade varia de acordo com o tamanho dos ambientes, assim como em função das temperaturas a serem atingidas.

A quantidade de amônia nos sistemas varia de menos de 2000 kg a mais de 100.000 kg, sendo um desafio, porém, calcular a quantidade da substância existente em sistemas antigos, mantidos em funcionamento, às vezes, há décadas. As pressões podem atingir níveis elevados, entre 10 a 15 kg/cm².

Os princípios básicos são compressão, liquefação e expansão de um gás em um sistema fechado. O gás retira o calor do ambiente e dos produtos que nele estiverem contidos ao se expandir.

É usada em instalações de grande porte por ser o gás de maior poder refrigerante. Além da toxicidade, pode formar uma mistura explosiva com o ar. Tais fatores impedem o uso em geladeiras domésticas e comerciais.

Dados da amônia segundo o Ministério do Trabalho e Emprego, Secretaria de Inspeção do Trabalho, Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho

- ✓ Ponto de Ebulição: 33,35 °C Peso Molecular: 17 g/mol
- ✓ Ponto de Fusão: -77,7 °C Densidade 20°C: 0,682 g/cm³
- ✓ Aparência e Odor: Gás comprimido liquefeito, incolor, com odor característico.
- ✓ Ponto de fulgor: Gás na temperatura ambiente Temperatura auto-ignição: 651°C
- ✓ Limite de Tolerância: 20 ppm (NR 15, anexo 11) IPVS 300 ppm

9.2. Água e Etilenoglicol

Para evitar que a água do radiador de carros utilizados em lugares cujo o inverno é muito rigoroso congelasse e deixasse de realizar a sua função, começou uma grande pesquisa no sentido de se encontrar um produto que quando misturado à água resolvesse este problema. Vários foram encontrados, porém o mais indicado foi o Etilenoglicol.

Suas características em relação à mistura e a temperatura de refrigeração estão colocadas abaixo, onde a %vol significa quanto de Etilenoglicol é misturado a água em relação a seu volume, e a Temp °C, se refere ao ponto de congelamento da referida mistura.

Tabela 3- Porcentagem de EtilenoGlicol versus Temperatura Congelamento [13]

% em Volume	Temperatura (°C)
0	-1
10	-5
20	-11
30	-18
40	-26
50	-36
60	-53
68	-69

O valor de -69°C é, portanto um limite para a mistura. Qualquer valor acima deste a água congelará a temperaturas mais elevadas que -69°C por exemplo -50°C . Verificou-se, porém, que ao adicionarmos o Etileno Glicol à água do sistema de refrigeração, ocorria uma melhora em seu ponto de ebulição (fervura). Com os dados acima pode se concluir que a utilização da combinação água e etilenoglicol é benéfico em casos que é necessário um fluido que permaneça em seu estado líquido mesmo a temperaturas muito baixas, como é o caso do trocador de calor que vaporiza o GNL, já que este se encontra na sua fase líquida a uma temperatura de -162°C .

10. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Para simular um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor e grandezas como temperaturas de entrada e saída do fluido, coeficiente global de transferência de calor e a área total da superfície para que ocorra a transferência.

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

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

E a eq. (2) relaciona o fluxo de calor, coeficiente global de troca de calor e as temperaturas de entrada e de saída [14].

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

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

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

onde $\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$, sendo ΔT_1 e ΔT_2 mostrado na figura 20 abaixo.

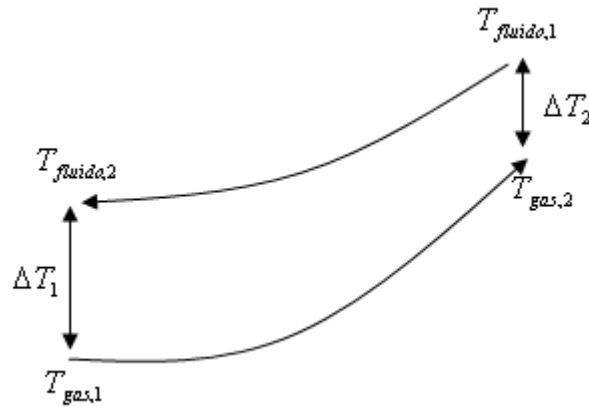


Figura 20- Distribuição de temperatura em um trocador de calor

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

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

10.1. Coeficiente de Convecção em Escoamentos Internos

O coeficiente de convecção de uma mistura ou substância depende de vários fatores; temperatura, fluxo mássico, diâmetro entre outros. E para que seja possível a obtenção de um valor teórico de $h_{i, fluido}$ abaixo segue uma descrição de como foi feito o levantamento desse parâmetro.

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

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

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

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

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

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

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

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

10.2. Coeficiente de Convecção com Mudança de Fase

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

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

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

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

11. SIMULAÇÃO DA TROCA DE CALOR

A vaporização do gás natural será analisada através da troca de calor na forma inundada, isto é, o GNL se encontra na parte externa do trocador, enquanto um fluido de aquecimento passa por dentro dos tubos. Como mostra a figura 21 abaixo:

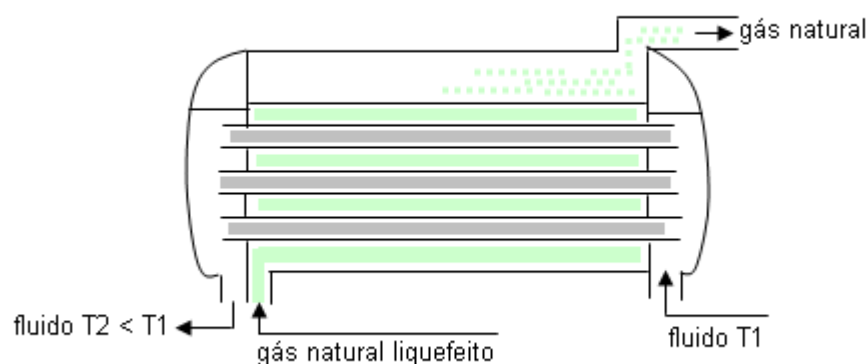


Figura 21- Trocador de calor da forma inundado

A análise da troca de calor será feita através da fixação de parâmetros, no que se refere ao gás natural e ao fluido de aquecimento. Foram feitas análises com duas substâncias cujas propriedades foram descritas no capítulo 9.

Serão feitas as análises pertinentes ao problema, variando os parâmetros de maneira a se obter valores viáveis.

11.1. Vaporização do Gás Natural – Reutilização em Condicionamento de Ambiente

11.1.1. Dados utilizados

a) Gás Natural:

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

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

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

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

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

As composições volumétricas do gás natural que são mostradas na tabela 4 foram utilizadas de acordo com a Portaria n° 104, da Agência Nacional do Petróleo.

Os valores de viscosidade e condutividade térmica referem-se a uma temperatura de 15°C, ou 288 K.

Tabela 4- Propriedades do gás natural [15]

Substância	Viscosidade	Cond. Térmica	%Volume	%Massica	Peso Molecular (g/mol)
	Pa.s	W/(m.K)			
Metano	0,00001027	0,0328	0,85	0,86	16,04
Etano	0,00000855	0,0180	0,09	0,08	30,07
Propano	-	0,0152	0,03	0,03	44,10
Dióxido de Carbono	0,00001372	0,0147	0,02	0,02	44,01
Nitrogênio	0,0000166	0,0240	0,01	0,01	28,01

Tabela 5- Propriedades do gás natural [15]

Substância	Ponto de Ebulição		Gas (T=0)	Liquido (T = P.E)	Liquido
	Celsius	K	Densi [kg/m3]	Densi [kg/m3]	Densi [kg/m3]
Metano	-161,49	111,51	0,68	1,819	422,62
Etano	-88,63	184,37	1,282	2,054	546,49
Propano	-42,04	230,96	1,91	2,423	582,00
Dióxido de Carbono	-78,5	194,5	1,870	2,814	1032,00
Nitrogênio	-195,8	77,2	1,185	4,614	808,607

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

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

onde,

$$\psi = T/1000$$

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

Tabela 6- Valores das constantes c_p, c_0, c_1, c_2, c_3 [16]

gás	fórmula	C0	C1	C2	C3	intervalo K
Metano	CH ₄	1,2	3,25	0,75	-0,71	250-1200
Etano	C ₂ H ₆	0,18	5,92	-2,31	0,29	250-1200
Propano	C ₃ H ₈	-0,096	6,95	-3,6	0,73	250-1200
Dióxido de Carbono	CO ₂	0,45	1,67	-1,27	0,39	250-1200
Nitrogênio	N ₂	1,11	-0,48	0,96	-0,42	250-1200

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

Tabela 7- Calor específico em função da temperatura [16]

Calor Específico em função da temperatura (kJ/kgK)					
Temperatura (K)	Metano	Etano	Propano	CO ₂	N ₂
250	2,05	1,52	1,43	0,79	1,04
300	2,22	1,76	1,68	0,85	1,04
350	2,40	1,98	1,93	0,90	1,04
400	2,57	2,20	2,15	0,94	1,04
450	2,75	2,40	2,37	0,98	1,05
500	2,92	2,60	2,57	1,02	1,06
550	3,10	2,79	2,76	1,05	1,07
600	3,27	2,96	2,94	1,08	1,08
650	3,43	3,13	3,10	1,11	1,09
700	3,60	3,29	3,26	1,13	1,10
750	3,76	3,44	3,40	1,15	1,11
800	3,92	3,59	3,53	1,17	1,13
850	4,07	3,72	3,66	1,19	1,14
900	4,21	3,85	3,78	1,21	1,15
950	4,36	3,97	3,88	1,22	1,16
1000	4,49	4,08	3,98	1,24	1,17
1050	4,62	4,18	4,08	1,25	1,18
1100	4,74	4,28	4,16	1,27	1,18
1150	4,85	4,37	4,25	1,28	1,19
1200	4,95	4,46	4,32	1,30	1,19

b) Amônia

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

Abaixo segue tabela com dados da amônia e valores utilizados na simulação obtidos da literatura [13].

Tabela 8- Dados da amônia [13]

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

Tabela 9- Valores utilizados na simulação com a amônia [13]

	Dados a 1atm e T=290K	
Densidade	0,73	[kg/m³]
Volume Específico	1,41	[m³/kg]
Calor Específico cp	2,17	[kJ/kgK]
Calor Específico cv	1,64	[kJ/kgK]
Viscosidade Dinâmica	0,0000098	[Pa.s]
Condutividade Térmica	0,02219	[w/mK]

c) Etilenoglicol

A adição de etilenoglicol em meio aquoso se dá devida sua propriedade de abaixar o ponto de congelamento da solução. Aumentando-se a porcentagem, volumétrica ou mássica, de etilenoglicol na solução aquosa tem-se uma temperatura de congelamento mais baixa. Como mostra a tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Ponto de congelamento para diferentes % de etilenoglicol [14]

Percentual de Etileno Glicol		Ponto de Congelamento	
massico	volumétrico	°F	°C
0	0	32,0	0,0
5	4,4	29,4	-1,4
10	8,9	26,2	-3,2
15	13,6	22,2	-5,4
20	18,1	17,9	-7,8
25	22,9	12,7	-10,7
30	27,7	6,7	-14,1
35	32,6	-0,2	-17,9
40	37,5	-8,1	-22,3
45	42,5	-17,5	-27,5
50	47,6	-28,9	-33,8
55	52,7	-42,0	-41,1
60	57,8	-54,9	-48,3

A simulação foi realizada com diferentes porcentagens de etilenoglicol adicionados à água, e por essa razão foi necessário o levantamento das propriedades

termodinâmicas nas diferentes porcentagens volumétricas, que se encontram nas tabelas (11 – 14) a seguir.

Os valores de massa específica, calor específico a pressão constante, condutividade e viscosidade térmica usados foram obtidos através da média dos mesmos, dentro da faixa de temperatura que o fluido percorre durante o aquecimento. Ressaltando que a entalpia utilizada refere-se a temperatura em questão.

Tabela 11- Massa específica em função da porcentagem de etilenoglicol [14]

kg/m ³		Massa Específica da mistura água e etileno glicol								
Temperatura		Concentração em volume								
°C	°F	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-17,8	0	0	0	0	1071,52	1086,4	1100,48	1113,92	1126,88	1139,2
-12,2	10	0	0	1054,88	1070,24	1084,8	1098,72	1112	1124,8	1136,96
-6,7	20	0	1037,28	1053,6	1068,8	1083,2	1096,96	1110,08	1122,56	1134,72
-1,1	30	1019,04	1036	1052,16	1067,2	1081,44	1095,04	1108	1120,32	1132,16
4,4	40	1017,76	1034,56	1050,56	1065,44	1079,52	1092,96	1105,6	1117,76	1129,44
10,0	50	1016,32	1032,96	1048,8	1063,52	1077,44	1090,72	1103,2	1115,2	1126,72
15,6	60	1014,72	1031,2	1046,88	1061,44	1075,2	1088,32	1100,64	1112,48	1123,68
21,1	70	1012,96	1029,28	1044,8	1059,2	1072,8	1085,76	1097,92	1109,6	1120,64

Tabela 12- Calor específico em função da porcentagem de etilenoglicol [14]

kj/kg.k		Calor Específico da mistura água e etileno glicol								
Temperatura		Concentração em volume								
°C	°F	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-17,8	0	0,00	0,00	0,00	3,34	3,13	2,92	2,69	2,46	2,22
-12,2	10	0,00	0,00	3,55	3,36	3,15	2,94	2,72	2,49	2,25
-6,7	20	0,00	3,75	3,57	3,38	3,18	2,97	2,75	2,52	2,28
-1,1	30	3,93	3,77	3,59	3,40	3,20	2,99	2,78	2,55	2,31
4,4	40	3,95	3,78	3,60	3,41	3,22	3,02	2,80	2,58	2,35
10,0	50	3,95	3,79	3,61	3,44	3,24	3,04	2,83	2,61	2,38
15,6	60	3,96	3,80	3,63	3,45	3,26	3,06	2,86	2,64	2,41
21,1	70	3,97	3,82	3,65	3,47	3,28	3,09	2,88	2,67	2,44

Tabela 13- Condutividade térmica em função da porcentagem de etilenoglicol [14]

w/m.k		Condutividade Térmica da mistura água e etileno glicol								
Temperatura		Concentração em volume								
°C	°F	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-17,8	0	0,00	0,00	0,00	0,37	0,35	0,32	0,30	0,28	0,26
-12,2	10	0,00	0,00	0,41	0,38	0,35	0,33	0,30	0,28	0,27
-6,7	20	0,00	0,46	0,42	0,39	0,36	0,33	0,31	0,29	0,27
-1,1	30	0,51	0,47	0,43	0,39	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27
4,4	40	0,52	0,47	0,43	0,40	0,37	0,34	0,32	0,29	0,27
10,0	50	0,53	0,48	0,44	0,41	0,37	0,34	0,32	0,29	0,27
15,6	60	0,54	0,49	0,45	0,41	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28
21,1	70	0,55	0,50	0,46	0,42	0,38	0,35	0,32	0,30	0,28

Tabela 14- Viscosidade em função da porcentagem de etilenoglicol [14]

Pa.s		Viscosidade da mistura água e etileno glicol								
Temperatura		Concentração em volume								
°C	°F	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
-17,8	0	0	0	0	0,01376	0,01934	0,03008	0,04558	0,06504	0,10777
-12,2	10	0	0	0,00638	0,01013	0,01426	0,02206	0,03331	0,04689	0,07187
-6,7	20	0	0,0039	0,00538	0,00774	0,01085	0,01656	0,02479	0,03448	0,04994
-1,1	30	0,00216	0,00314	0,00433	0,00609	0,00848	0,01268	0,01877	0,02584	0,03591
4,4	40	0,00182	0,00259	0,00354	0,00491	0,00677	0,00999	0,01445	0,01971	0,02659
10,0	50	0,00156	0,00218	0,00295	0,00404	0,00555	0,00785	0,01131	0,01529	0,02018
15,6	60	0,00135	0,00186	0,00249	0,00338	0,00455	0,00633	0,00897	0,01205	0,01565
21,1	70	0,00118	0,00161	0,00213	0,00287	0,00381	0,00517	0,00722	0,00962	0,01237

11.1.2. Parâmetros Fixados

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

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

Na simulação realizada, os parâmetros $T_{gas,2}$, $T_{gas,1}$, $c_{gas,p}$ e h_{fg} foram fixados, assim a energia necessária de vaporização depende apenas da vazão mássica do gás natural. Na tabela 15 abaixo, encontram-se os valores utilizados, lembrando que a pressão em questão permanece constante e igual a 100 kPa.

Tabela 15- Parâmetros fixos utilizados

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

Os parâmetros pertinentes ao fluido de vaporização foram determinados de tal forma que apenas as suas características termodinâmicas serão analisadas.

Determinou-se que a temperatura de entrada e de saída, $T_{fluido,1}$ e $T_{fluido,2}$ respectivamente, são as mesmas independente do fluido, e que estas referem-se a reutilização da energia “fria” no condicionamento de ambientes (ar condicionado). No caso da mistura água e etilenoglicol, com os valores de temperatura, sabe-se também o valor da entalpia naquelas condições e fica fácil calcular o fluxo mássico necessário.

A tabela 16 mostra os valores usados na análise.

Tabela 16- Temperaturas do fluido analisadas

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

A seguinte equação de energia foi feita para o fluido de aquecimento, ressaltando que a taxa de transferência de calor q é a mesma necessária para a vaporização do gás natural, isto é:

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

No caso da amônia fica:

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

Observando a equação acima, verifica-se que variando o valor de $\dot{m}_{gas}$ o valor de $\dot{m}_{fluido}$ necessariamente irá mudar, já que todos os outros parâmetros são determinados no problema.

11.1.3. Resultados da Simulação

Determinou-se o fluxo de calor necessário para diferentes valores de fluxo mássico de gás natural, valores estes mostrados na tabela 17 abaixo.

Tabela 17- Valores do fluxo de calor em função do fluxo mássico de GN

Fluxo Mássico [kg/s]	Q [kw]	Fluxo Mássico [kg/s]	Q [kw]	Fluxo Mássico [kg/s]	Q [kw]
0,001	0,9	0,700	622,3	8,000	7112,1
0,002	1,8	0,750	666,8	8,500	7556,6
0,003	2,7	0,800	711,2	9,000	8001,1
0,004	3,6	0,850	755,7	9,500	8445,6
0,005	4,4	0,900	800,1	10,000	8890,1
0,006	5,3	0,950	844,6	12,000	10668,2
0,007	6,2	1,000	889,0	14,000	12446,2
0,008	7,1	1,200	1066,8	16,000	14224,2
0,009	8,0	1,400	1244,6	18,000	16002,3
0,010	8,9	1,600	1422,4	20,000	17780,3
0,020	17,8	1,800	1600,2	25,000	22225,4
0,030	26,7	2,000	1778,0	30,000	26670,4
0,040	35,6	2,200	1955,8	35,000	31115,5
0,050	44,5	2,400	2133,6	40,000	35560,6
0,100	88,9	2,600	2311,4	45,000	40005,7
0,150	133,4	2,800	2489,2	50,000	44450,7
0,200	177,8	3,000	2667,0	55,000	48895,8
0,250	222,3	3,500	3111,6	60,000	53340,9
0,300	266,7	4,000	3556,1	65,000	57785,9
0,350	311,2	4,500	4000,6	70,000	62231,0
0,400	355,6	5,000	4445,1	75,000	66676,1
0,450	400,1	5,500	4889,6	80,000	71121,2
0,500	444,5	6,000	5334,1	85,000	75566,2
0,550	489,0	6,500	5778,6	90,000	80011,3
0,600	533,4	7,000	6223,1	95,000	84456,4
0,650	577,9	7,500	6667,6		

E com o uso das equações apresentadas no cap 10 chegou-se aos valores do número de Nusselt em função do diâmetro, $Nu(D)$, e conseqüente coeficiente de convecção do gás natural, $h_{e,gas}(D)$, que também é função do diâmetro, ambos apresentados na tabela 18.

Com o valor de $h_{e,gas}(D)$ pode-se calcular o coeficiente global de transferência de calor e assim determinar o comprimento necessário de tubo para que a

vaporização de tal fluxo mássico ocorra. Este valor deve estar dentro de uma faixa esperada, devido a restrições construtivas e econômicas.

Tabela 18- Número de Nu e $h_{e,gas}$ em função do diâmetro

Diâmetro [m]	Nu(D)	hgas [w/m2k]	Diâmetro [m]	Nu(D)	hgas [w/m2k]
0,03	119	130	0,20	493	81
0,04	148	121	0,21	512	80
0,05	174	114	0,22	530	79
0,06	200	109	0,23	548	78
0,07	224	105	0,24	566	77
0,08	248	102	0,25	583	77
0,09	271	99	0,26	601	76
0,10	293	96	0,27	618	75
0,11	315	94	0,28	635	74
0,12	336	92	0,29	652	74
0,13	357	90	0,30	669	73
0,14	377	88	0,31	685	73
0,15	398	87	0,32	702	72
0,16	417	86	0,33	718	71
0,17	437	84	0,34	734	71
0,18	456	83	0,35	751	70
0,19	475	82			

A partir dos resultados da tabela 17 de fluxo de calor para diferentes fluxos mássicos de gás natural, foram calculados $\dot{m}_{fluido}$ necessários para que tal transferência ocorra.

Os diferentes percentuais de etilenoglicol em meio aquoso refletem nas diferenças de valores de entalpia na entrada e saída, fixas as temperaturas. Essa diferença diminui com o aumento da porcentagem volumétrica da mistura, fazendo com que o fluxo mássico correspondente aumente, uma vez fixa a taxa de transferência de calor.

Segue abaixo os valores de $\dot{m}_{fluido}(Q)$ para a amônia e etilenoglicol (10% à 60% volume em água).

Tabela 19- Valores de (Q), sendo AMÔNIA fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,017	133,4	2,557	800,1	15,345	4000,6	76,723
1,8	0,034	177,8	3,410	844,6	16,197	4445,1	85,247
2,7	0,051	222,3	4,262	889,0	17,049	4889,6	93,772
3,6	0,068	266,7	5,115	1066,8	20,459	5334,1	102,297
4,4	0,085	311,2	5,967	1244,6	23,869	5778,6	110,821
5,3	0,102	355,6	6,820	1422,4	27,279	6223,1	119,346
6,2	0,119	400,1	7,672	1600,2	30,689	6667,6	127,871
7,1	0,136	444,5	8,525	1778,0	34,099	7112,1	136,396
8,0	0,153	489,0	9,377	1955,8	37,509	7556,6	144,920
8,9	0,170	533,4	10,230	2133,6	40,919	8001,1	153,445
17,8	0,341	577,9	11,082	2311,4	44,329	8445,6	161,970
26,7	0,511	622,3	11,935	2489,2	47,738	8890,1	170,495
35,6	0,682	666,8	12,787	2667,0	51,148	10668,2	204,593
44,5	0,852	711,2	13,640	3111,6	59,673	12446,2	238,692
88,9	1,705	755,7	14,492	3556,1	68,198		

Tabela 20- Valores de (Q), etilenoglicol 10% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,009	133,4	1,407	800,1	8,440	4000,6	42,200
1,8	0,019	177,8	1,876	844,6	8,909	4445,1	46,889
2,7	0,028	222,3	2,344	889,0	9,378	4889,6	51,578
3,6	0,038	266,7	2,813	1066,8	11,253	5334,1	56,267
4,4	0,047	311,2	3,282	1244,6	13,129	5778,6	60,956
5,3	0,056	355,6	3,751	1422,4	15,004	6223,1	65,645
6,2	0,066	400,1	4,220	1600,2	16,880	6667,6	70,333
7,1	0,075	444,5	4,689	1778,0	18,756	7112,1	75,022
8,0	0,084	489,0	5,158	1955,8	20,631	7556,6	79,711
8,9	0,094	533,4	5,627	2133,6	22,507	8001,1	84,400
17,8	0,188	577,9	6,096	2311,4	24,382	8445,6	89,089
26,7	0,281	622,3	6,564	2489,2	26,258	8890,1	93,778
35,6	0,375	666,8	7,033	2667,0	28,133	10668,2	112,533
44,5	0,469	711,2	7,502	3111,6	32,822	12446,2	131,289
88,9	0,938	755,7	7,971	3556,1	37,511		

Tabela 21- Valores de (Q), sendo etilenoglicol 20% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,010	133,4	1,470	800,1	8,820	4000,6	44,098
1,8	0,020	177,8	1,960	844,6	9,310	4445,1	48,998
2,7	0,029	222,3	2,450	889,0	9,800	4889,6	53,897
3,6	0,039	266,7	2,940	1066,8	11,759	5334,1	58,797
4,4	0,049	311,2	3,430	1244,6	13,719	5778,6	63,697
5,3	0,059	355,6	3,920	1422,4	15,679	6223,1	68,597
6,2	0,069	400,1	4,410	1600,2	17,639	6667,6	73,497
7,1	0,078	444,5	4,900	1778,0	19,599	7112,1	78,396
8,0	0,088	489,0	5,390	1955,8	21,559	7556,6	83,296
8,9	0,098	533,4	5,880	2133,6	23,519	8001,1	88,196
17,8	0,196	577,9	6,370	2311,4	25,479	8445,6	93,096
26,7	0,294	622,3	6,860	2489,2	27,439	8890,1	97,995
35,6	0,392	666,8	7,350	2667,0	29,399	10668,2	117,595
44,5	0,490	711,2	7,840	3111,6	34,298	12446,2	137,194
88,9	0,980	755,7	8,330	3556,1	39,198		

Tabela 22- Valores de (Q), etilenoglicol 30% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,010	133,4	1,539	800,1	9,235	4000,6	46,175
1,8	0,021	177,8	2,052	844,6	9,748	4445,1	51,305
2,7	0,031	222,3	2,565	889,0	10,261	4889,6	56,436
3,6	0,041	266,7	3,078	1066,8	12,313	5334,1	61,566
4,4	0,051	311,2	3,591	1244,6	14,365	5778,6	66,697
5,3	0,062	355,6	4,104	1422,4	16,418	6223,1	71,827
6,2	0,072	400,1	4,617	1600,2	18,470	6667,6	76,958
7,1	0,082	444,5	5,131	1778,0	20,522	7112,1	82,088
8,0	0,092	489,0	5,644	1955,8	22,574	7556,6	87,219
8,9	0,103	533,4	6,157	2133,6	24,626	8001,1	92,349
17,8	0,205	577,9	6,670	2311,4	26,679	8445,6	97,480
26,7	0,308	622,3	7,183	2489,2	28,731	8890,1	102,610
35,6	0,410	666,8	7,696	2667,0	30,783	10668,2	123,132
44,5	0,513	711,2	8,209	3111,6	35,914	12446,2	143,654
88,9	1,026	755,7	8,722	3556,1	41,044		

Tabela 23- Valores de (Q), etilenoglicol 40% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,011	133,4	1,625	800,1	9,748	4000,6	48,740
1,8	0,022	177,8	2,166	844,6	10,290	4445,1	54,155
2,7	0,032	222,3	2,708	889,0	10,831	4889,6	59,571
3,6	0,043	266,7	3,249	1066,8	12,997	5334,1	64,986
4,4	0,054	311,2	3,791	1244,6	15,164	5778,6	70,402
5,3	0,065	355,6	4,332	1422,4	17,330	6223,1	75,818
6,2	0,076	400,1	4,874	1600,2	19,496	6667,6	81,233
7,1	0,087	444,5	5,416	1778,0	21,662	7112,1	86,649
8,0	0,097	489,0	5,957	1955,8	23,828	7556,6	92,064
8,9	0,108	533,4	6,499	2133,6	25,995	8001,1	97,480
17,8	0,217	577,9	7,040	2311,4	28,161	8445,6	102,895
26,7	0,325	622,3	7,582	2489,2	30,327	8890,1	108,311
35,6	0,433	666,8	8,123	2667,0	32,493	10668,2	129,973
44,5	0,542	711,2	8,665	3111,6	37,909	12446,2	151,635
88,9	1,083	755,7	9,206	3556,1	43,324		

Tabela 24- Valores de (Q), etilenoglicol 50% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,011	133,4	1,720	800,1	10,321	4000,6	51,607
1,8	0,023	177,8	2,294	844,6	10,895	4445,1	57,341
2,7	0,034	222,3	2,867	889,0	11,468	4889,6	63,075
3,6	0,046	266,7	3,440	1066,8	13,762	5334,1	68,809
4,4	0,057	311,2	4,014	1244,6	16,055	5778,6	74,543
5,3	0,069	355,6	4,587	1422,4	18,349	6223,1	80,277
6,2	0,080	400,1	5,161	1600,2	20,643	6667,6	86,011
7,1	0,092	444,5	5,734	1778,0	22,936	7112,1	91,746
8,0	0,103	489,0	6,308	1955,8	25,230	7556,6	97,480
8,9	0,115	533,4	6,881	2133,6	27,524	8001,1	103,214
17,8	0,229	577,9	7,454	2311,4	29,817	8445,6	108,948
26,7	0,344	622,3	8,028	2489,2	32,111	8890,1	114,682
35,6	0,459	666,8	8,601	2667,0	34,405	10668,2	137,618
44,5	0,573	711,2	9,175	3111,6	40,139	12446,2	160,555
88,9	1,147	755,7	9,748	3556,1	45,873		

Tabela 25- Valores de (Q), etilenoglicol 60% fluido de aquecimento

Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]	Q [kw]	m [kg/s]
0,9	0,013	133,4	1,970	800,1	11,822	4000,6	59,110
1,8	0,026	177,8	2,627	844,6	12,479	4445,1	65,678
2,7	0,039	222,3	3,284	889,0	13,136	4889,6	72,246
3,6	0,053	266,7	3,941	1066,8	15,763	5334,1	78,813
4,4	0,066	311,2	4,597	1244,6	18,390	5778,6	85,381
5,3	0,079	355,6	5,254	1422,4	21,017	6223,1	91,949
6,2	0,092	400,1	5,911	1600,2	23,644	6667,6	98,517
7,1	0,105	444,5	6,568	1778,0	26,271	7112,1	105,084
8,0	0,118	489,0	7,225	1955,8	28,898	7556,6	111,652
8,9	0,131	533,4	7,881	2133,6	31,525	8001,1	118,220
17,8	0,263	577,9	8,538	2311,4	34,152	8445,6	124,788
26,7	0,394	622,3	9,195	2489,2	36,780	8890,1	131,356
35,6	0,525	666,8	9,852	2667,0	39,407	10668,2	157,627
44,5	0,657	711,2	10,508	3111,6	45,974	12446,2	183,898
88,9	1,314	755,7	11,165	3556,1	52,542		

Para se obter o coeficiente de convecção da amônia e das misturas de etilenoglicol calculou-se os valores do número de Reynolds em função dos fluxos mássicos e do diâmetro dos tubos, $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$.

Valeu-se também de trocadores de calor com número de tubos $N = 1, 5, 10$ e 20 , que afeta diretamente Re e $h_{i, fluido}$. Quanto maior N , menor o $\dot{m}_{fluido}$ por tubo, assim menor Re .

Para cada caso, isto é, para cada $\dot{m}_{fluido}$ da amônia e do etilenoglicol foi simulado o valor de Re para $0,03 < D < 0,20$ m. Como os resultados consiste em tabelas muito extensas não iremos apresentá-las todas aqui, no entanto as observações feitas são válidas também para o etilenoglicol. Seguem os resultados com o fluido amônia.

Tabela 26- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=1

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Re em função do Diâmetro D [m] - N=1 tubo								
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15
0,030	73837	147674	221511	295348	369184	443021	516858	590695	664532
0,040	55378	110755	166133	221511	276888	332266	387644	443021	498399
0,050	44302	88604	132906	177209	221511	265813	310115	354417	398719
0,060	36918	73837	110755	147674	184592	221511	258429	295348	332266
0,070	31644	63289	94933	126578	158222	189866	221511	253155	284799
0,080	27689	55378	83066	110755	138444	166133	193822	221511	249199
0,090	24612	49225	73837	98449	123061	147674	172286	196898	221511
0,100	22151	44302	66453	88604	110755	132906	155057	177209	199360
0,110	20137	40275	60412	80549	100687	120824	140961	161099	181236
0,120	18459	36918	55378	73837	92296	110755	129215	147674	166133
0,130	17039	34079	51118	68157	85196	102236	119275	136314	153354
0,140	15822	31644	47467	63289	79111	94933	110755	126578	142400
0,150	14767	29535	44302	59070	73837	88604	103372	118139	132906
0,160	13844	27689	41533	55378	69222	83066	96911	110755	124600
0,170	13030	26060	39090	52120	65150	78180	91210	104240	117270
0,180	12306	24612	36918	49225	61531	73837	86143	98449	110755
0,190	11658	23317	34975	46634	58292	69951	81609	93268	104926
0,200	11076	22151	33227	44302	55378	66453	77529	88604	99680

Tabela 27- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=5

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Re em função do Diâmetro D [m] - N=5 tubos								
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15
0,030	14767	29535	44302	59070	73837	88604	103372	118139	132906
0,040	11076	22151	33227	44302	55378	66453	77529	88604	99680
0,050	8860	17721	26581	35442	44302	53163	62023	70883	79744
0,060	7384	14767	22151	29535	36918	44302	51686	59070	66453
0,070	6329	12658	18987	25316	31644	37973	44302	50631	56960
0,080	5538	11076	16613	22151	27689	33227	38764	44302	49840
0,090	4922	9845	14767	19690	24612	29535	34457	39380	44302
0,100	4430	8860	13291	17721	22151	26581	31011	35442	39872
0,110	4027	8055	12082	16110	20137	24165	28192	32220	36247
0,120	3692	7384	11076	14767	18459	22151	25843	29535	33227
0,130	3408	6816	10224	13631	17039	20447	23855	27263	30671
0,140	3164	6329	9493	12658	15822	18987	22151	25316	28480
0,150	2953	5907	8860	11814	14767	17721	20674	23628	26581
0,160	2769	5538	8307	11076	13844	16613	19382	22151	24920
0,170	2606	5212	7818	10424	13030	15636	18242	20848	23454
0,180	2461	4922	7384	9845	12306	14767	17229	19690	22151
0,190	2332	4663	6995	9327	11658	13990	16322	18654	20985
0,200	2215	4430	6645	8860	11076	13291	15506	17721	19936

Tabela 28- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=10

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Re em função do Diâmetro D [m] - N=10 tubos								
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,15
0,030	7384	14767	22151	29535	36918	44302	51686	59070	66453
0,040	5538	11076	16613	22151	27689	33227	38764	44302	49840
0,050	4430	8860	13291	17721	22151	26581	31011	35442	39872
0,060	3692	7384	11076	14767	18459	22151	25843	29535	33227
0,070	3164	6329	9493	12658	15822	18987	22151	25316	28480
0,080	2769	5538	8307	11076	13844	16613	19382	22151	24920
0,090	2461	4922	7384	9845	12306	14767	17229	19690	22151
0,100	2215	4430	6645	8860	11076	13291	15506	17721	19936
0,110	2014	4027	6041	8055	10069	12082	14096	16110	18124
0,120	1846	3692	5538	7384	9230	11076	12921	14767	16613
0,130	1704	3408	5112	6816	8520	10224	11927	13631	15335
0,140	1582	3164	4747	6329	7911	9493	11076	12658	14240
0,150	1477	2953	4430	5907	7384	8860	10337	11814	13291
0,160	1384	2769	4153	5538	6922	8307	9691	11076	12460
0,170	1303	2606	3909	5212	6515	7818	9121	10424	11727
0,180	1231	2461	3692	4922	6153	7384	8614	9845	11076
0,190	1166	2332	3498	4663	5829	6995	8161	9327	10493
0,200	1108	2215	3323	4430	5538	6645	7753	8860	9968

Tabela 29- Fluido amônia –Valor de $Re(\dot{m}_{fluido}, D)$ – Número de Tubos: N=20

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Re em função do Diâmetro D [m] - N=20 tubos								
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,15
0,030	3692	7384	11076	14767	18459	22151	25843	29535	33227
0,040	2769	5538	8307	11076	13844	16613	19382	22151	24920
0,050	2215	4430	6645	8860	11076	13291	15506	17721	19936
0,060	1846	3692	5538	7384	9230	11076	12921	14767	16613
0,070	1582	3164	4747	6329	7911	9493	11076	12658	14240
0,080	1384	2769	4153	5538	6922	8307	9691	11076	12460
0,090	1231	2461	3692	4922	6153	7384	8614	9845	11076
0,100	1108	2215	3323	4430	5538	6645	7753	8860	9968
0,110	1007	2014	3021	4027	5034	6041	7048	8055	9062
0,120	923	1846	2769	3692	4615	5538	6461	7384	8307
0,130	852	1704	2556	3408	4260	5112	5964	6816	7668
0,140	791	1582	2373	3164	3956	4747	5538	6329	7120
0,150	738	1477	2215	2953	3692	4430	5169	5907	6645
0,160	692	1384	2077	2769	3461	4153	4846	5538	6230
0,170	652	1303	1955	2606	3258	3909	4561	5212	5864
0,180	615	1231	1846	2461	3077	3692	4307	4922	5538
0,190	583	1166	1749	2332	2915	3498	4080	4663	5246
0,200	554	1108	1661	2215	2769	3323	3876	4430	4984

Percebe-se que o aumento de $\dot{m}_{\text{fluido}}$, para um mesmo valor de D, reflete no aumento de Re. Fixando $\dot{m}_{\text{fluido}}$ e aumentando o valor de D, diminui-se o valor de Re. Isso pode ser facilmente visto através da equação de obtenção de Re para escoamento interno. Podemos notar também que o maior número de N, resulta no menor valor de Re.

O escoamento laminar ($Re < 2300$) é destacado na cor amarela, a transição entre laminar e turbulento na cor verde e turbulento na cor azul.

Com os valores de $Re(\dot{m}_{\text{fluido}}, D)$ calculou-se os respectivos valores de Nu, que para escoamento laminar é uma constante $Nu = 4,36$ e para escoamentos turbulentos $Nu(Re)$.

Tabela 30- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=1

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Nu em função de Re - N=1 tubo												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	175	305	422	531	635	735	831	925	1017	1106	1926	2664	
0,040	139	242	335	422	505	584	661	735	808	879	1530	2116	
0,050	116	203	281	353	422	488	553	615	676	735	1280	1770	
0,060	101	175	242	305	365	422	478	531	584	635	1106	1530	
0,070	89	155	214	270	323	373	422	470	516	562	978	1352	
0,080	80	139	193	242	290	335	379	422	464	505	879	1215	
0,090	73	127	175	221	264	305	345	384	422	459	800	1106	
0,100	67	116	161	203	242	281	317	353	388	422	735	1017	
0,110	62	108	149	188	225	260	294	327	360	391	681	942	
0,120	58	101	139	175	210	242	274	305	335	365	635	879	

Tabela 31- Fluido amônia –Valor de $Nu(Re)$ – Número de Tubos: N=5

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Nu em função de Re - N=5 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	48	84	116	147	175	203	229	255	281	305	531	735	
0,040	38	67	93	116	139	161	182	203	223	242	422	584	
0,050	31	56	77	97	116	135	152	170	186	203	353	488	
0,060	26	48	67	84	101	116	132	147	161	175	305	422	
0,070	23	43	59	74	89	103	116	130	142	155	270	373	
0,080	20	38	53	67	80	93	105	116	128	139	242	335	
0,090	18	33	48	61	73	84	95	106	116	127	221	305	
0,100	17	31	44	56	67	77	88	97	107	116	203	281	
0,110	15	28	41	52	62	72	81	90	99	108	188	260	
0,120	14	26	38	48	58	67	76	84	93	101	175	242	

Tabela 32- Fluido amônia –Valor de Nu(Re) – Número de Tubos: N=10

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Nu em função de Re - N=10 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	26	48	67	84	101	116	132	147	161	175	305	422	
0,040	20	38	53	67	80	93	105	116	128	139	242	335	
0,050	17	31	44	56	67	77	88	97	107	116	203	281	
0,060	14	26	38	48	58	67	76	84	93	101	175	242	
0,070	12	23	32	43	51	59	67	74	82	89	155	214	
0,080	10	20	29	38	46	53	60	67	74	80	139	193	
0,090	9	18	26	33	42	48	55	61	67	73	127	175	
0,100	4	17	24	31	38	44	50	56	61	67	116	161	
0,110	4	15	22	28	36	41	47	52	57	62	108	149	
0,120	4	14	20	26	32	38	43	48	53	58	101	139	

Tabela 33- Fluido amônia –Valor de Nu(Re) – Número de Tubos: N=20

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Cálculo do Nu em função de Re - N=20 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	14	26	38	48	58	67	76	84	93	101	175	242	
0,040	10	20	29	38	46	53	60	67	74	80	139	193	
0,050	4	17	24	31	38	44	50	56	61	67	116	161	
0,060	4	14	20	26	32	38	43	48	53	58	101	139	
0,070	4	12	18	23	28	32	38	43	47	51	89	123	
0,080	4	10	16	20	25	29	33	38	42	46	80	111	
0,090	4	9	14	18	22	26	30	33	38	42	73	101	
0,100	4	4	12	17	20	24	27	31	34	38	67	93	
0,110	4	4	11	15	19	22	25	28	31	36	62	86	
0,120	4	4	10	14	17	20	23	26	29	32	58	80	

E como já mostrado no capítulo de fundamentos teóricos através de Nu calcula-se o valor teórico do coeficiente de convecção, $h_{i,fluido}(\dot{m}_{fluido}, D, N)$.

Através do aumento do D, e fixando $\dot{m}_{fluido}$ há uma diminuição do valor de $h_{i,fluido}$. Por outro lado, aumentando $\dot{m}_{fluido}$ e fixando D há um aumento no valor de $h_{i,fluido}$. Novamente pode-se notar que o maior número de N acarreta em um menor coeficiente de convecção interno.

Tabela 34- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}$ ($\dot{m}_{fluido}$, D, N) – Número de Tubos: N=1

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de h_i em função do valor de Nu - N=1 tubo												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	130	226	312	393	470	544	615	684	752	818	1424	1970	
0,040	77	135	186	234	280	324	366	408	448	487	849	1174	
0,050	52	90	125	157	187	217	245	273	300	326	568	786	
0,060	37	65	90	113	135	156	177	197	216	235	409	566	
0,070	28	49	68	86	102	118	134	149	164	178	310	429	
0,080	22	39	53	67	80	93	105	117	129	140	244	337	
0,090	18	31	43	54	65	75	85	95	104	113	197	273	
0,100	15	26	36	45	54	62	70	78	86	94	163	226	
0,110	13	22	30	38	45	52	59	66	73	79	137	190	
0,120	11	19	26	32	39	45	51	56	62	67	117	162	

Tabela 35- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}$ ($\dot{m}_{fluido}$, D, N) – Número de Tubos: N=5

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de h_i em função do valor de Nu - N=5 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	36	62	86	108	130	150	170	189	208	226	393	544	
0,040	21	37	51	65	77	89	101	113	124	135	234	324	
0,050	14	25	34	43	52	60	68	75	83	90	157	217	
0,060	10	18	25	31	37	43	49	54	60	65	113	156	
0,070	7	14	19	24	28	33	37	41	45	49	86	118	
0,080	6	11	15	19	22	26	29	32	36	39	67	93	
0,090	5	8	12	15	18	21	23	26	29	31	54	75	
0,100	4	7	10	12	15	17	19	22	24	26	45	62	
0,110	3	6	8	10	13	14	16	18	20	22	38	52	
0,120	3	5	7	9	11	12	14	16	17	19	32	45	

Tabela 36- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}$ ($\dot{m}_{fluido}$, D, N) – Número de Tubos: N=10

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de h_i em função do valor de Nu - N=10 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	19	36	49	62	74	86	97	108	119	130	226	312	
0,040	11	21	29	37	44	51	58	65	71	77	135	186	
0,050	7	14	20	25	30	34	39	43	48	52	90	125	
0,060	5	10	14	18	21	25	28	31	34	37	65	90	
0,070	4	7	10	14	16	19	21	24	26	28	49	68	
0,080	3	6	8	11	13	15	17	19	20	22	39	53	
0,090	2	5	6	8	10	12	13	15	16	18	31	43	
0,100	1	4	5	7	9	10	11	12	14	15	26	36	
0,110	1	3	4	6	7	8	9	10	11	13	22	30	
0,120	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	19	26	

Tabela 37- Fluido amônia –Valor de $h_{i,fluido}$ ($\dot{m}_{fluido}$, D, N) – Número de Tubos: N=20

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de h_i em função do valor de Nu - N=20 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	10	19	28	36	43	49	56	62	68	74	130	179	
0,040	6	11	16	21	25	29	33	37	41	44	77	107	
0,050	2	7	11	14	17	20	22	25	27	30	52	72	
0,060	2	5	8	10	12	14	16	18	20	21	37	52	
0,070	1	4	6	7	9	10	12	14	15	16	28	39	
0,080	1	3	4	6	7	8	9	11	12	13	22	31	
0,090	1	2	3	5	6	6	7	8	9	10	18	25	
0,100	1	1	3	4	5	5	6	7	7	9	15	21	
0,110	1	1	2	3	4	4	5	6	6	7	13	17	
0,120	1	1	2	3	3	4	4	5	5	6	11	15	

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

Tabela 38- Fluido amônia – Valor de U ($h_{i,fluido}$, $h_{e,gas}$) – Número de Tubos: N=1

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de U em função dos h_i e h_{gas} - N=1 tubo												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	65	83	92	98	102	105	107	109	111	112	119	122	
0,040	47	64	73	80	84	88	91	93	95	97	106	110	
0,050	36	50	60	66	71	75	78	81	83	85	95	100	
0,060	28	41	49	56	60	64	68	70	73	75	86	92	
0,070	22	33	41	47	52	56	59	62	64	66	79	84	
0,080	18	28	35	40	45	49	52	54	57	59	72	78	
0,090	15	24	30	35	39	43	46	48	51	53	66	73	
0,100	13	20	26	31	35	38	41	43	45	47	61	67	
0,110	11	18	23	27	31	34	36	39	41	43	56	63	
0,120	10	15	20	24	27	30	33	35	37	39	52	59	

Tabela 39- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=5

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de U em função dos h_i e h_{gas} - N=5 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	28	42	52	59	65	70	74	77	80	83	98	105	
0,040	18	28	36	42	47	51	55	58	61	64	80	88	
0,050	12	20	26	31	36	39	43	45	48	50	66	75	
0,060	9	15	20	24	28	31	34	36	39	41	56	64	
0,070	7	12	16	19	22	25	27	30	32	33	47	56	
0,080	5	10	13	16	18	20	23	25	26	28	40	49	
0,090	4	8	11	13	15	17	19	21	22	24	35	43	
0,100	4	6	9	11	13	15	16	18	19	20	31	38	
0,110	3	5	8	9	11	13	14	15	16	18	27	34	
0,120	2	5	7	8	10	11	12	13	14	15	24	30	

Tabela 40- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=10

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de U em função dos h_i e h_{gas} - N=10 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	17	28	36	42	47	52	56	59	62	65	83	92	
0,040	10	18	24	28	32	36	39	42	45	47	64	73	
0,050	7	12	17	20	24	26	29	31	34	36	50	60	
0,060	5	9	13	15	18	20	22	24	26	28	41	49	
0,070	4	7	9	12	14	16	18	19	21	22	33	41	
0,080	3	5	7	10	11	13	14	16	17	18	28	35	
0,090	2	4	6	8	9	11	12	13	14	15	24	30	
0,100	1	4	5	6	8	9	10	11	12	13	20	26	
0,110	1	3	4	5	7	8	9	9	10	11	18	23	
0,120	1	2	4	5	6	7	7	8	9	10	15	20	

Tabela 41- Fluido amônia – Valor de $U(h_{i,fluido}, h_{e,gas})$ – Número de Tubos: N=20

Fluxo Mássico Total [kg/s]	Valor de U em função dos h_i e h_{gas} - N=20 tubos												
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51	
0,030	9	17	23	28	32	36	39	42	45	47	65	75	
0,040	5	10	14	18	21	24	26	28	31	32	47	57	
0,050	2	7	10	12	15	17	19	20	22	24	36	44	
0,060	2	5	7	9	11	13	14	15	17	18	28	35	
0,070	1	4	5	7	8	9	11	12	13	14	22	28	
0,080	1	3	4	5	6	7	8	10	11	11	18	24	
0,090	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	15	20	
0,100	1	1	3	4	4	5	6	6	7	8	13	17	
0,110	1	1	2	3	4	4	5	5	6	7	11	15	
0,120	1	1	2	2	3	4	4	5	5	6	10	13	

Finalmente podemos então calcular o comprimento L necessário para que ocorra a transferência de calor com os parâmetros impostos (D , Q , $\dot{m}_{\text{fluido}}$). Nesse ponto houve divergência quanto aos valores encontrados para os dois fluidos.

Quando se trabalha com a amônia, fixando o valor de $\dot{m}_{\text{fluido}}$ e aumentando o valor de D , percebe-se que L também aumenta. No entanto quando o fluido em questão é o etilenoglicol, em qualquer percentagem volumétrica, o contrário ocorre, isto é, L diminui.

Segue as tabelas comparativas entre os resultados de L para a amônia e para o etilenoglicol.

Tabela 42- Fluido amônia - Comprimento $L(D, \dot{m}_{\text{fluido}})$ para $N=1$

Fluxo Total [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - $N=1$ tubo											
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,09	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,34	0,51
0,030	2,7	4,3	5,8	7,3	8,7	10,2	11,6	13,0	14,5	15,9	29,9	43,8
0,040	2,8	4,2	5,5	6,7	7,9	9,1	10,3	11,5	12,6	13,8	25,2	36,6
0,050	3,0	4,2	5,4	6,5	7,5	8,6	9,6	10,6	11,6	12,6	22,5	32,1
0,060	3,2	4,4	5,4	6,4	7,4	8,3	9,2	10,1	11,0	11,9	20,7	29,2
0,070	3,4	4,6	5,6	6,5	7,4	8,2	9,1	9,9	10,7	11,6	19,4	27,1
0,080	3,7	4,8	5,7	6,6	7,4	8,3	9,0	9,8	10,6	11,3	18,6	25,7
0,090	3,9	5,0	5,9	6,8	7,6	8,3	9,1	9,8	10,5	11,3	18,1	24,6
0,100	4,2	5,2	6,2	7,0	7,7	8,5	9,2	9,9	10,6	11,3	17,7	23,8
0,110	4,4	5,5	6,4	7,2	7,9	8,7	9,4	10,0	10,7	11,3	17,4	23,2
0,120	4,7	5,8	6,6	7,4	8,2	8,9	9,5	10,2	10,8	11,4	17,3	22,8

Tabela 43- Fluido etilenoglicol 10% - Comprimento $L(D, \dot{m}_{\text{fluido}})$ para $N=1$

Fluxo Total 10% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - $N=1$ tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	3,7	7,5	11,2	14,9	18,6	22,4	26,1	29,8	33,6	19,1
0,040	3,5	6,9	10,4	13,9	17,3	20,8	24,2	27,7	31,2	34,6
0,050	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,0	26,3	29,6	32,9
0,060	3,2	6,3	9,5	12,7	15,9	19,0	22,2	25,4	28,6	31,7
0,070	3,1	6,2	9,3	12,3	15,4	18,5	21,6	24,7	27,8	30,8
0,080	3,0	6,0	9,0	12,1	15,1	18,1	21,1	24,1	27,1	30,1
0,090	3,0	5,9	8,9	11,8	14,8	17,8	20,7	23,7	26,6	29,6
0,100	2,9	5,8	8,7	11,7	14,6	17,5	20,4	23,3	26,2	29,1
0,110	2,9	5,8	8,6	11,5	14,4	17,3	20,1	23,0	25,9	28,8
0,120	2,8	5,7	8,5	11,4	14,2	17,1	19,9	22,7	25,6	28,4

Tabela 44- Fluido etilenoglicol 50% - Comprimento L(D, $\dot{m}_{\text{fluido}}$) para N=1

Fluxo Total 50% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo											
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,22	
0,030	4,7	9,4	14,1	18,7	23,4	28,1	32,8	37,5	42,2	46,8	93,7	
0,040	4,4	8,8	13,3	17,7	22,1	26,5	30,9	35,3	39,8	44,2	88,4	
0,050	4,2	8,5	12,7	17,0	21,2	25,5	29,7	34,0	38,2	42,5	85,0	
0,060	4,1	8,3	12,4	16,5	20,6	24,8	28,9	33,0	37,2	41,3	82,6	
0,070	4,0	8,1	12,1	16,2	20,2	24,2	28,3	32,3	36,4	40,4	80,8	
0,080	4,0	7,9	11,9	15,9	19,9	23,8	27,8	31,8	35,7	39,7	79,4	
0,090	3,9	7,8	11,7	15,7	19,6	23,5	27,4	31,3	35,2	39,2	78,3	
0,100	3,9	7,7	11,6	15,5	19,3	23,2	27,1	31,0	34,8	38,7	77,4	
0,110	3,8	7,7	11,5	15,3	19,2	23,0	26,8	30,7	34,5	38,3	76,6	
0,120	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,8	26,6	30,4	34,2	38,0	76,0	

A reutilização da energia “fria” que o fluido de trabalho carrega se dá através do esquema abaixo, figura 22, e seus parâmetros resumem-se na tabela 45.

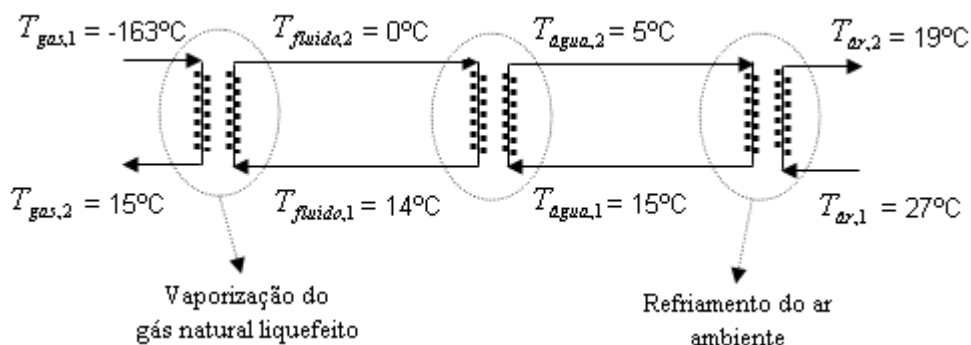


Figura 22- Esquema ilustrativo da troca de calor para reutilização da energia “fria” em condicionamento de ambientes

Tabela 45- Resumo dos parâmetros usados na reutilização da energia “fria”

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

Desta maneira, como o mesmo valor de Q de vaporização do gás natural calcula-se pela equação de energia o fluxo mássico de ar que pode ser resfriado.

Como nessa análise apenas o fluxo de calor do processo de vaporização do gás entra na equação, o fluido de aquecimento não interfere nos resultados.

$$q = \dot{m}_{gas} c_{gas,p} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} = \dot{m}_{fluido} (i_{fluido,2} - i_{fluido,1})$$
 (no caso da mistura líquida de etilenoglicol e água).

Onde o índice $_{fluido}$ pode ser a amônia, o etilenoglicol, água ou ar. Os valores são apresentados abaixo.

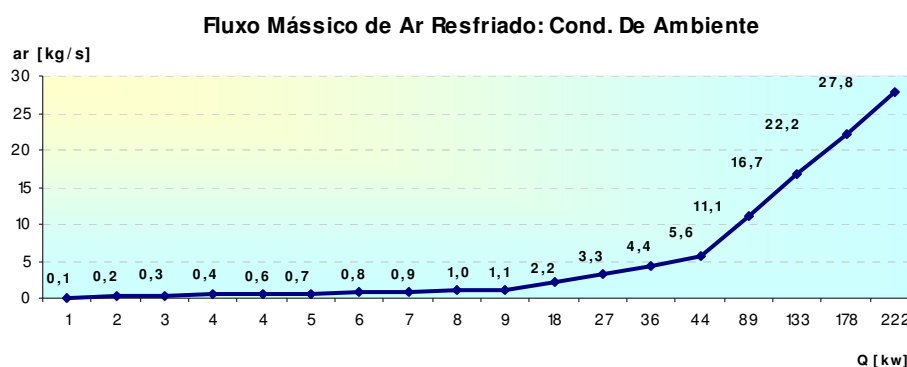


Figura 23- Fluxo mássico resfriado no condicionamento de ambiente em função Q [kw]

12. ANÁLISE DE RESULTADOS

12.1. Aplicações de Reutilização da Energia “fria”

Através da análise da equação (6) verifica-se que a energia “fria” depende apenas do fluxo mássico de gás natural a ser vaporizado, isto é, fixando $T_{gas,2}$ o fluxo de calor depende apenas de $\dot{m}_{gas}$.

Desta maneira a reutilização da energia “fria” para diferentes aplicações onde é necessário maior ou menor resfriamento do fluido de aquecimento, que também pode ser considerado fluido intermediário, irá afetar diretamente no fluxo mássico do mesmo.

Considerando a equação (14) abaixo e fixando o $q[w]$ teremos:

$$q = \dot{m}_{gas} c_{gas,p} (T_{gas,2} - T_{gas,1}) + \dot{m}_{gas} h_{fg} = \dot{m}_{fluido} (\Delta i) \quad (14)$$

$$(q = cte) = (\dot{m}_{fluido} \downarrow)(\Delta i \uparrow) ou (\dot{m}_{fluido} \downarrow) c_{fluido,p} (\Delta T \uparrow) \quad (15)$$

O aumento do valor de ΔT reflete no aumento de Δi , o que implica necessariamente uma diminuição de $\dot{m}_{fluido}$, o que quer dizer que uma menor quantidade será resfriada de ΔT .

A diminuição de $\dot{m}_{fluido}$ reflete no número de Re. Se o mesmo permanece < 2300 , isto é, permanece dentro da faixa de escoamento laminar, $h_{i,fluido}$ é uma constante para uma mesmo diâmetro. No entanto, se Re é um valor de transição entre escoamento laminar e turbulento ou turbulento haverá uma diminuição do valor de Nu. Como pode ser verificado nas equações (16 - 17) abaixo.

$$(\downarrow Re) = \frac{4(\dot{m} \downarrow)}{\pi(D = cte)\mu} \quad (16)$$

Para escoamento laminar, $h_{i,fluido}$ é uma constante para um mesmo diâmetro:

$$Nu = \frac{h_{i,fluido} D}{k} = 4,36 \Rightarrow h_{i,fluido} = \frac{4,36k}{(D = cte)} \Rightarrow h_{i,fluido} = cte \quad (17)$$

Para escoamento em transição entre laminar e turbulento, a diminuição do número de Re implica na diminuição do número de Nu, e conseqüente diminuição de $h_{i,fluido}$.

$$(Nu \downarrow) = \frac{(f/8)((Re \downarrow) - 1000) Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \Rightarrow (h_{i, fluido} \downarrow) = \frac{(Nu \downarrow)k}{(D = cte)} \quad (18)$$

$$(Nu \downarrow) = 0,023(Re \downarrow)^{4/5} Pr^{0,3} \Rightarrow (h_{i, fluido} \downarrow) = \frac{(Nu \downarrow)k}{(D = cte)} \quad (19)$$

Analisando a equação do coeficiente global de calor, U, perceber-se que uma diminuição no coeficiente de convecção do fluido diminui também U.

$$(U \downarrow) = \frac{1}{\left(\frac{1}{(h_{i, fluido} \downarrow)} \right) + \left(\frac{1}{(h_{e, gas} = cte)} \right)} \quad (20)$$

O que resulta num impacto no comprimento para que a área de troca de calor seja suficiente. Como estamos analisando um aumento de ΔT , esse aumento pode se dar na elevação de $T_{fluido,1}$, na diminuição de $T_{fluido,2}$, ou nos dois, essa diferença afeta o ΔT_{lm} de maneira diferente.

Se diminuirmos $T_{fluido,2}$ e mantermos $T_{fluido,1}$, ΔT_{lm} também diminui de tal maneira que L aumente.

$$L = \frac{Q}{U \pi D N \Delta T_{lm}} = C \cdot \frac{1}{(U \downarrow)(\Delta T_{lm} \downarrow)} \therefore (L \uparrow) \quad (21)$$

Por outro lado, se aumentarmos $T_{fluido,1}$ e mantermos $T_{fluido,2}$, o valor de ΔT_{lm} aumenta. Quanto ao comprimento L, só podemos afirmar se este aumenta ou diminui analisando o produto da multiplicação $U \cdot \Delta T_{lm}$ antes e depois da alteração de ΔT .

$$L = C \cdot \frac{1}{(U \downarrow)(\Delta T_{lm} \uparrow)} \quad (22)$$

O último caso é a mudança de ΔT tanto por conta do aumento de $T_{fluido,1}$ quanto pela diminuição de $T_{fluido,2}$. O resultado L dependerá do ΔT_{lm} .

Para ilustrar esse ponto, foi feita uma simulação onde a energia “fria” é reutilizada em frigoríficos, onde a temperatura de uso é mais baixa se comparada

com o uso em condicionamento interno (ΔT é maior), e por essa razão o fluido de vaporização do gás natural deve ser esfriado até uma temperatura mais baixa.

Os dados de entrada dessa simulação encontram-se abaixo.

Tabela 46- Dados utilizados na simulação para frigoríficos

	Temp. Entrada		Temp. Saída		Delta	Calor Específico
	Celsius	Kelvin	Celsius	Kelvin		[kJ/kg K]
gás natural	-163	110	15	288	-178	2,13
amônia	16	289	-10	263	26	2,17

Para essas temperaturas de entrada e saída, o valor de $\Delta T_{lm} = 30,05$ °C, enquanto que no caso da reutilização em ar condicionado $\Delta T_{lm} = 32,8$ °C.

Os dados de comprimento L são apresentados abaixo e pode-se notar que, conforme esperado, com a diminuição de ΔT_{lm} ocorre um aumento no comprimento L necessário, independente do fluido em análise.

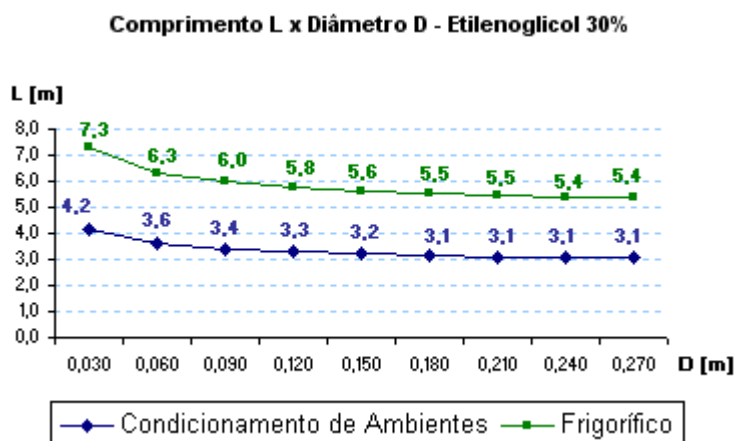
Tabela 47- L na Reutilização em Condicionamento de Ambientes ($\Delta T_{lm} = 32,8$ °C)

ETILENO 30% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo								
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	4,2	8,3	12,5	16,6	20,8	24,9	29,1	33,3	37,4
0,040	3,9	7,8	11,7	15,6	19,5	23,3	27,2	31,1	35,0
0,050	3,7	7,4	11,2	14,9	18,6	22,3	26,0	29,8	33,5
0,060	3,6	7,2	10,8	14,4	18,0	21,6	25,2	28,8	32,4
0,070	3,5	7,0	10,5	14,1	17,6	21,1	24,6	28,1	31,6
0,080	3,4	6,9	10,3	13,8	17,2	20,7	24,1	27,5	31,0
0,090	3,4	6,8	10,2	13,6	16,9	20,3	23,7	27,1	30,5
0,100	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7	20,1	23,4	26,7	30,1
0,110	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	26,4	29,7
0,120	3,3	6,5	9,8	13,1	16,4	19,6	22,9	26,2	29,4
0,130	3,2	6,5	9,7	13,0	16,2	19,5	22,7	25,9	29,2

Tabela 48- L para Reutilização em Frigoríficos ($\Delta T_{lm} = 30,05\text{ }^{\circ}\text{C}$)

ETILENO 30% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo								
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	7,3	14,6	22,0	29,3	36,6	43,9	51,3	58,6	65,9
0,040	6,9	13,7	20,6	27,4	34,3	41,1	48,0	54,8	61,7
0,050	6,6	13,1	19,7	26,2	32,8	39,3	45,9	52,4	59,0
0,060	6,3	12,7	19,0	25,4	31,7	38,1	44,4	50,7	57,1
0,070	6,2	12,4	18,6	24,7	30,9	37,1	43,3	49,5	55,7
0,080	6,1	12,1	18,2	24,3	30,3	36,4	42,5	48,5	54,6
0,090	6,0	11,9	17,9	23,9	29,8	35,8	41,8	47,7	53,7
0,100	5,9	11,8	17,7	23,5	29,4	35,3	41,2	47,1	53,0
0,110	5,8	11,6	17,5	23,3	29,1	34,9	40,7	46,6	52,4
0,120	5,8	11,5	17,3	23,0	28,8	34,6	40,3	46,1	51,9
0,130	5,7	11,4	17,1	22,8	28,6	34,3	40,0	45,7	51,4

Na figura 24 mostra-se a comparação da evolução da variação do comprimento necessário, fixo o fluxo mássico, para diferentes diâmetros. Sendo a linha azul o comprimento necessário na reutilização em condicionamento de ambientes ($\Delta T_{lm} = 32,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), e a linha verde em frigoríficos ($\Delta T_{lm} = 30,05\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figura 24- Gráfico de L(D) para $\dot{m}_{fluido} = 0,01\text{ [kg/s]}$

12.2. Reutilização da Energia “fria”: Análise do Fluxo Mássico Resfriado

Como já mencionado anteriormente, o fluxo mássico total que pode ser resfriado a partir da troca de calor entre o mesmo e o fluido vaporizador do gás natural vai depender do seu calor específico apenas, uma vez fixa a temperatura de entrada e saída.

Os resultados obtidos para a água e o ar no condicionamento de ambiente já foram apresentados anteriormente. Segue um esquema ilustrativo dessa troca de calor na figura 25, assim como os resultados para aplicação em frigoríficos, representados na figura 26 através do gráfico da evolução de $\dot{m}_{fluido}$ (D).

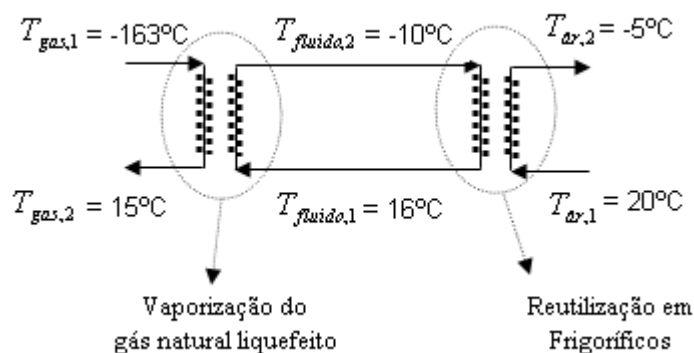


Figura 25- Esquema da troca de calor com reutilização em frigoríficos

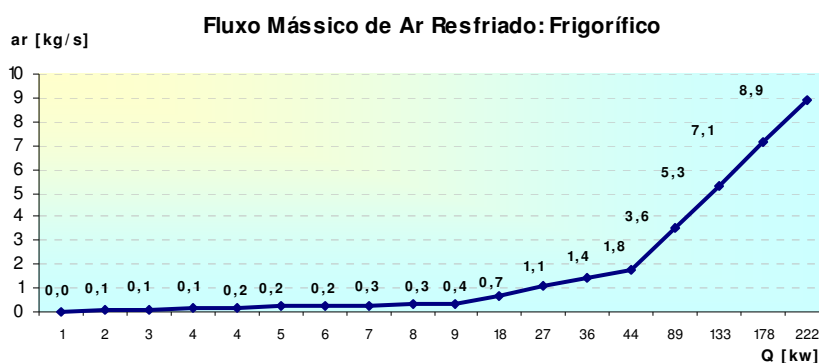


Figura 26- Fluxo mássico de ar resfriado para frigoríficos em função de Q [kw]

12.3. Comparação entre Amônia e Etilenoglicol

Visto que para ambos fluidos de trabalho as condições de entrada e saída são as mesmas, o que os difere na análise é suas propriedades termodinâmicas.

Comparando as diferentes porcentagens de etilenoglicol na mistura de água, percebe-se que para Δi menores, maiores os valores de $\dot{m}_{fluido}$, mais fluido é resfriado de $T_{fluido,1}$ até $T_{fluido,2}$.

$$q = (\dot{m}_{fluido} \uparrow)(\Delta i \downarrow) \quad (23)$$

Para um dado valor de diâmetro D , quanto maior $\dot{m}_{fluido}$, o valor de Reynolds depende da viscosidade dinâmica, que aumenta com a diminuição do calor específico da mistura. Desta maneira, o seu maior ou menor valor depende da divisão $\frac{\dot{m}}{\mu}$. De maneira análoga, o número de Reynolds para um menor $\dot{m}_{fluido}$ depende de $\frac{\dot{m}}{\mu}$. Facilmente observado da equação de obtenção do número de Re.

$$(?Re) = \frac{4(\dot{m} \downarrow)}{\pi(D = cte)\mu(\downarrow)} \text{ e o inverso } (?Re) = \frac{4(\dot{m} \uparrow)}{\pi(D = cte)\mu(\uparrow)}$$

Para o caso de escoamento laminar, $Re < 2300$, $h_{i,fluido}$ não muda pois é função apenas de D , que é uma constante. Se o número de aumenta, conseqüente Nu , $h_{i,fluido}$ e U . O inverso também é verdadeiro, um menor valor de Re resulta em um menor número de Nu , $h_{i,fluido}$ e U .

E analisando a equação (24) abaixo se constata que um menor valor de U implica em na necessidade de um L maior e vice-versa, pois eles são inversamente proporcionais.

$$Q = (L \uparrow).(U \downarrow).\pi.D.\Delta T_{lm} \Rightarrow Q(L,U) \quad (24)$$

Em suma, quando se compara dois valores de c_p , deve-se verificar também como variam as outras propriedades termodinâmicas do fluido. Pode-se apenas afirmar que:

$$(\uparrow Re, Nu_{turbulento}, h_{fluido}, U) \Rightarrow (\downarrow L) \text{ e que } (\downarrow Re, Nu_{turbulento}, h_{fluido}, U) \Rightarrow (\uparrow L)$$

Comparando os resultados para o entre o etilenoglicol, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 %, notamos que a diferença de entalpia da mistura água e etilenoglicol 10% é o maior, seguido pela mistura a 20, 30, 40, 50, 60 e 70%. Neste caso, para Δi maiores, menor o valor de L , considerando o mesmo Q , D , N e ΔT , como pode ser observado nas tabelas abaixo.

Tabela 49- Comprimento L necessário com etilenoglicol 10%

ETILENO 10% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	3,7	7,5	11,2	14,9	18,6	22,4	26,1	29,8	33,6	19,1
0,040	3,5	6,9	10,4	13,9	17,3	20,8	24,2	27,7	31,2	34,6
0,050	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,0	26,3	29,6	32,9
0,060	3,2	6,3	9,5	12,7	15,9	19,0	22,2	25,4	28,6	31,7
0,070	3,1	6,2	9,3	12,3	15,4	18,5	21,6	24,7	27,8	30,8
0,080	3,0	6,0	9,0	12,1	15,1	18,1	21,1	24,1	27,1	30,1
0,090	3,0	5,9	8,9	11,8	14,8	17,8	20,7	23,7	26,6	29,6
0,100	2,9	5,8	8,7	11,7	14,6	17,5	20,4	23,3	26,2	29,1
0,110	2,9	5,8	8,6	11,5	14,4	17,3	20,1	23,0	25,9	28,8
0,120	2,8	5,7	8,5	11,4	14,2	17,1	19,9	22,7	25,6	28,4
0,130	2,8	5,6	8,4	11,3	14,1	16,9	19,7	22,5	25,3	28,1

Tabela 50- Comprimento L necessário com etilenoglicol 30%

ETILENO 30% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	
0,030	4,2	8,3	12,5	16,6	20,8	24,9	29,1	33,3	37,4	
0,040	3,9	7,8	11,7	15,6	19,5	23,3	27,2	31,1	35,0	
0,050	3,7	7,4	11,2	14,9	18,6	22,3	26,0	29,8	33,5	
0,060	3,6	7,2	10,8	14,4	18,0	21,6	25,2	28,8	32,4	
0,070	3,5	7,0	10,5	14,1	17,6	21,1	24,6	28,1	31,6	
0,080	3,4	6,9	10,3	13,8	17,2	20,7	24,1	27,5	31,0	
0,090	3,4	6,8	10,2	13,6	16,9	20,3	23,7	27,1	30,5	
0,100	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7	20,1	23,4	26,7	30,1	
0,110	3,3	6,6	9,9	13,2	16,5	19,8	23,1	26,4	29,7	
0,120	3,3	6,5	9,8	13,1	16,4	19,6	22,9	26,2	29,4	
0,130	3,2	6,5	9,7	13,0	16,2	19,5	22,7	25,9	29,2	

Tabela 51- Comprimento L necessário com etilenoglicol 50%

ETILENO 50% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,06	0,07	0,08	0,09		
0,030	4,7	9,4	14,1	18,7	23,4	28,1	32,8	37,5		
0,040	4,4	8,8	13,3	17,7	22,1	26,5	30,9	35,3		
0,050	4,2	8,5	12,7	17,0	21,2	25,5	29,7	34,0		
0,060	4,1	8,3	12,4	16,5	20,6	24,8	28,9	33,0		
0,070	4,0	8,1	12,1	16,2	20,2	24,2	28,3	32,3		
0,080	4,0	7,9	11,9	15,9	19,9	23,8	27,8	31,8		
0,090	3,9	7,8	11,7	15,7	19,6	23,5	27,4	31,3		
0,100	3,9	7,7	11,6	15,5	19,3	23,2	27,1	31,0		
0,110	3,8	7,7	11,5	15,3	19,2	23,0	26,8	30,7		
0,120	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0	22,8	26,6	30,4		
0,130	3,8	7,5	11,3	15,1	18,9	22,6	26,4	30,2		

Na figura 27 pode-se observar melhor a diferença de comprimento necessário para cada mistura de etilenoglicol, sendo que $\Delta i_{10\%} > \Delta i_{30\%} > \Delta i_{50\%}$ e inversamente $L_{10\%} < L_{30\%} < L_{50\%}$.

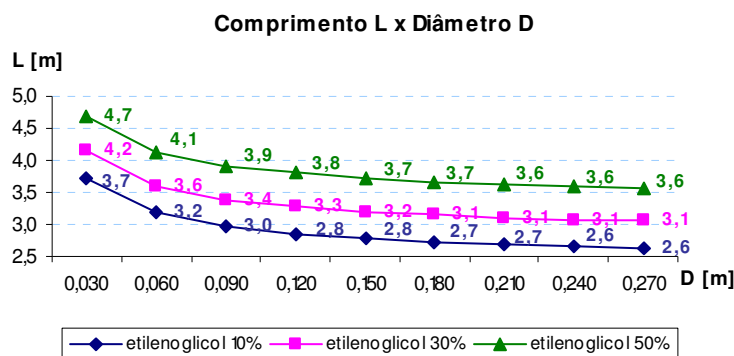


Figura 27- Comparação de L(D) para $\dot{m}_{fluido} = 0,01$ [kg/s]

No entanto, ao se analisar os resultados obtidos da simulação com a amônia, comparando a multiplicação de $c_p \Delta T$ do gás amônia e $\Delta i_{etilenoglicol 50\%}$, para um dado fluxo de calor Q, temos que L resultante é menor. Isto pois a análise feita só é válida pra misturas com a mesma substância, cujas propriedades termodinâmicas (μ, ρ) se comportam da mesma maneira, como ocorre com o etilenoglicol adicionado à água.

No caso da amônia, que possui características termodinâmicas próprias o raciocínio não é válido.

Tabela 52- Comprimento L necessário com amônia

AMÔNIA [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo								
Diâmetro [m]	0,02	0,03	0,05	0,07	0,08	0,10	0,11	0,13	0,15
0,030	3	4	6	7	9	10	12	13	14
0,040	3	4	5	7	8	9	10	11	13
0,050	3	4	5	6	8	9	10	11	12
0,060	3	4	5	6	7	8	9	10	11
0,070	3	5	6	6	7	8	9	10	11
0,080	4	5	6	7	7	8	9	10	11
0,090	4	5	6	7	8	8	9	10	11
0,100	4	5	6	7	8	8	9	10	11
0,110	4	5	6	7	8	9	9	10	11
0,120	5	6	7	7	8	9	10	10	11
0,130	5	6	7	8	8	9	10	10	11
0,140	5	6	7	8	9	9	10	11	11
0,150	5	7	7	8	9	10	10	11	11

Tendo em vista que um menor comprimento L é desejável tanto do ponto de vista de construção, quanto do ponto de vista econômico, nesta simulação a utilização da amônia como fluido de trabalho é a melhor opção pois requer menor comprimento L.

12.4. Comportamento do comprimento L no caso da amônia

Quando o fluido de vaporização é a amônia, o comportamento do comprimento L difere da mistura etilenoglicol. Para um dado $\dot{m}_{fluido}$ da amônia, mantendo o número de tubos constante, ao aumentar o valor do diâmetro, aumenta-se também o comprimento L. No caso do etilenoglicol o inverso ocorre, diminuindo o valor de L.

Considerando $\dot{m}_{fluido}$ constante, o valor de U é função apenas de D. Desta maneira o aumento de D implica na diminuição de $h_{i,fluido}$ e também de U.

Analisando a equação que determina L temos:

$$Q = L.U.\pi.D.\Delta T_{lm} \Rightarrow Q = C.U.D.L \quad (25)$$

Dois resultados são possíveis, o primeiro descrito pela eq. (26) indica que o aumento de D implica em uma pequena variação de U. O segundo, ilustrado pela eq. (27) mostra que um aumento de D resulta em uma grande variação de U.

$$U.D.L = (U \downarrow)(D \uparrow)(L \downarrow) \quad (26)$$

$$U.D.L = (U \downarrow)(D \uparrow)(L \uparrow) \quad (27)$$

Fazendo análise do impacto do aumento de D para escoamento laminar temos que $h_{i,fluido}$ é inversamente proporcional a D assim como U.

$$h_{fluido} = \frac{Nu.k}{D} \Rightarrow h_{fluido} \propto \frac{1}{D}$$

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{fluido}}\right) + \left(\frac{1}{h_{gas}}\right)} \Rightarrow U \propto \frac{1}{D}$$

Por outro lado, em escoamentos turbulentos temos:

$$Re \propto \frac{1}{D}$$

$$Nu = 0,023 Re^{4/5} Pr^{0,3} \Rightarrow Nu \propto \left(\frac{1}{D}\right)^{4/5}$$

$$h_{fluido} = \frac{Nu.k}{D} \Rightarrow h_{fluido} \propto \frac{1}{D} \cdot \left(\frac{1}{D}\right)^{4/5} \Rightarrow h_{fluido} \propto \left(\frac{1}{D^{9/5}}\right) \therefore U \propto \frac{1}{D^{9/5}}$$

Comparando os dois escoamentos verifica-se que em escoamentos turbulentos uma mudança de D acarreta no impacto maior no coeficiente de convecção $h_{i,fluido}$ e coeficiente global de transferência de calor. O que pode ser verificado na simulação da amônia, que possui escoamento turbulento na maior parte dos parâmetros simulados, cujo L aumenta com o aumento de D.

No caso do etilenoglicol é interessante notar nas tabelas 55 e 56 que para $\dot{m}_{fluido} = 0,09 \text{ kg/s}$ Re indica ser um escoamento em transição, não mais laminar, que reflete no valor L menor.

Tabela 53 – Número de Reynolds para mistura água e etilenoglicol 10%

Etileno 10% [kg/s]	Cálculo do Re em função do Diâmetro D [m] - N=1 tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	213	426	639	852	1065	1278	1491	1704	1917	2130
0,040	160	319	479	639	799	958	1118	1278	1438	1597
0,050	128	256	383	511	639	767	895	1022	1150	1278
0,060	106	213	319	426	532	639	745	852	958	1065
0,070	91	183	274	365	456	548	639	730	821	913
0,080	80	160	240	319	399	479	559	639	719	799
0,090	71	142	213	284	355	426	497	568	639	710
0,100	64	128	192	256	319	383	447	511	575	639
0,110	58	116	174	232	290	349	407	465	523	581
0,120	53	106	160	213	266	319	373	426	479	532

Tabela 54- Comprimento L para mistura água e etilenoglicol 10%

ETILENO 10% [kg/s]	Valor de L em função do fluxo da amônia e o D - N=1 tubo									
Diâmetro [m]	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,030	6,6	13,1	19,7	26,3	32,8	39,4	46,0	52,5	59,1	65,7
0,040	6,1	12,2	18,3	24,4	30,5	36,6	42,7	48,8	54,9	61,0
0,050	5,8	11,6	17,4	23,2	29,0	34,8	40,6	46,4	52,2	58,0
0,060	5,6	11,2	16,8	22,4	27,9	33,5	39,1	44,7	50,3	55,9
0,070	5,4	10,9	16,3	21,7	27,2	32,6	38,0	43,5	48,9	54,3
0,080	5,3	10,6	15,9	21,2	26,5	31,9	37,2	42,5	47,8	53,1
0,090	5,2	10,4	15,6	20,8	26,1	31,3	36,5	41,7	46,9	52,1
0,100	5,1	10,3	15,4	20,5	25,7	30,8	35,9	41,1	46,2	51,3
0,110	5,1	10,1	15,2	20,3	25,3	30,4	35,4	40,5	45,6	50,6
0,120	5,0	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,1	45,1	50,1

13. CONCLUSÕES

Através das pesquisas bibliográficas feitas pode-se concluir que existe um mercado crescente para o gás natural, na sua forma liquefeita. O gás natural liquefeito é um meio seguro e eficiente de se fazer o transporte, sendo que no Brasil, o seu uso tem tido grande aceitação dos consumidores.

A crise energética anunciada pelo diretor da Companhia Energética de São Paulo, a Cesp, somada aos crescentes investimentos feitos pela Petrobrás no setor de gás natural, indica ser este um setor estável para o estudo de aprimoramento na cadeia de gás natural.

Quanto às tecnologias existentes no processo de vaporização do GNL, verifica-se que os trocadores de calor criogênicos mais utilizados são os do tipo Open Rack Vaporizers ORV, ressaltando que o tipo SCV é muito usado como ‘back-up’. O primeiro usa água do mar como fluido de aquecimento, verificando-se portanto o desperdício do ‘frio’ de regaseificação do GNL.

Após as análises termodinâmicas realizadas, pode-se dizer que o estudo depende essencialmente de dois pontos: do fluido de vaporização e do fluxo mássico ou volumétrico de gás natural que se deseja produzir a partir da vaporização do GNL.

A área de troca de calor está diretamente ligada às propriedades termodinâmicas do fluido de vaporização. O seu calor específico indica quanto de energia é necessário fornecer para que um quilograma aumente um kelvin, e quanto menor o seu valor mais fluido será resfriado. O maior fluxo mássico implica um maior número de Reynolds e o estudo mostrou que em escoamentos turbulentos o coeficiente de convecção é maior, aumentando assim o coeficiente global de troca de calor. Como resultado temos que a área necessária para que ocorra a troca de calor é menor. Ressaltando que a comparação entre dois fluidos deve ser feita tendo em vista não somente o calor específico do mesmo, como também a sua viscosidade dinâmica, condutividade térmica, que afetam também o coeficiente de convecção do fluido. Em termos econômicos trocador de dimensões menores implica em menor custo inicial.

Outro ponto importante do trocador de calor é o fluxo, mássico ou volumétrico, de gás natural que se quer vaporizar. Um fluxo elevado requer uma área de troca grande, de maneira análoga um fluxo baixo necessita uma área menor.

Usando informações contidas nesse relatório, temos que a Gás local pretende transportar 10 milhões m^3 /mês de combustível, que corresponde a um fluxo mássico de 4,8 kg/s. Para esse valor é necessário fornecer aproximadamente 4223 kw. A área necessária para que a vaporização desse fluxo mássico ocorra não é pequena, por outro lado, reutilizando essa energia “fria” é possível resfriar 168,913 kg/s de ar, de um $\Delta T = 25$ (situação considerada para aplicações em frigoríficos) e 527,85 kg/s de ar, para $\Delta T = 8$ (no caso de condicionamento de ambiente).

Outro exemplo seria a informação de que a planta de liquefação localizada em Paulínia tem capacidade de liquefazer 380 mil m^3 /dia, o que equivale a 5,5 kg/s. Para de vaporizar esse fluxo mássico de gás natural liquefeito são necessários 4890 kw. Essa energia pode resfriar 611,2 kg/s de ar de $\Delta T = 8$ e 195,6 kg/s de ar de um $\Delta T = 25$.

Os valores acima apresentados mostram quanto se perde ao não reutilizar essa energia “fria”. Tendo em vista o mercado crescente do GNL como meio de transporte do gás natural, existe um nicho ainda não explorado no Brasil, o da utilização dessa energia “fria” em outras aplicações. Sob o ponto de vista econômico é uma maneira real de se conter custos (ar condicionado), como também é possível a obtenção de algum retorno financeiro através de parcerias com indústrias cuja energia “fria” é essencial (frigoríficos, fábrica de gelo).

14. ANEXOS

Segue as codificações ANP do carregador, transportador e instalações de análise, indicadas no art.7º

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS

PORTARIA Nº 118, DE 11.7.2000 - DOU 12.7.2000

Regulamenta as atividades de distribuição de gás natural liquefeito (GNL) a granel e de construção, ampliação e operação das centrais de distribuição de GNL.

O DIRETOR-GERAL da AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO - ANP, no uso de suas atribuições legais, com base na Resolução de Diretoria nº 399, de 11 de julho de 2000, torna público o seguinte ato:

Das Disposições Gerais

Art. 1º. Ficam regulamentadas, através da presente Portaria, as atividades de distribuição de gás natural liquefeito (GNL) a granel e de construção, ampliação e operação das centrais de distribuição de GNL.

Parágrafo único. As atividades mencionadas no caput deste artigo serão executadas de acordo com o disposto nesta Portaria e em conformidade com as normas técnicas, estaduais e federais, pertinentes à matéria, as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), as recomendações da OIML (International Organization of Legal Metrology), ISO (International Organization of Standardization), NFPA 59-A ((National Fire Protection Association) e em especial as discriminadas no quadro abaixo:

Norma/Regulamento Técnico	Título
ABNT/NBR 7500	Símbolo de risco e manuseio para o transporte e armazenamento de materiais.

INMETRO RT 6	Transporte rodoviário de cargas ou produtos perigosos.
INMETRO RTQ 5	Veículo destinado ao transporte de produtos perigosos - inspeção.
INMETRO RTQ 32	Veículo rodoviário destinado ao transporte de produtos perigosos - construção, instalação e inspeção de pára-choque traseiro.

Das Definições

Art. 2º. Para fins desta portaria, ficam estabelecidas as seguintes definições:

I - Gás Natural (GN) ou Gás: todo hidrocarboneto que permaneça em estado gasoso nas condições atmosféricas normais, extraído diretamente a partir de reservatórios petrolíferos ou gasíferos, incluindo gases úmidos, secos, residuais e gases raros;

II - Gás Natural Liquefeito (GNL): fluido no estado líquido em condições criogênicas, composto predominantemente de metano e que pode conter quantidades mínimas de etano, propano, nitrogênio ou outros componentes normalmente encontrados no gás natural;

III - Distribuição de GNL a granel: compreende as atividades de aquisição ou recepção, armazenamento, transvasamento, controle de qualidade, e comercialização do GNL, através de transporte próprio ou contratado, podendo também exercer a atividade de liquefação de gás natural, que serão realizadas por pessoas jurídicas constituídas sob as leis brasileiras, com sede e administração no País.

IV - Veículo Transportador: veículo que dispõe de tanque criogênico, especialmente projetado e utilizado para o transporte e Transvasamento de GNL, construído e operado com observância do disposto no Parágrafo único do art. 1º desta Portaria e devidamente certificado pelo INMETRO;

V - Recipiente: recipiente criogênico estacionário construído e operado com observância do disposto no Parágrafo único do art. 1º desta Portaria e devidamente certificado pelo INMETRO;

VI - Transvasamento: qualquer operação de carga e descarga do GNL entre recipientes e veículos transportadores, podendo ser realizada nas unidades de liquificação, nas distribuidoras ou nas unidades consumidoras finais;

VII - Central de Distribuição de GNL: área devidamente delimitada que contém os Recipientes destinados ao recebimento, armazenamento e transvasamento de GNL, construída e operada de acordo com as normas internacionalmente adotadas;

Da Atividade de Distribuição de Gás Natural Liquefeito

Art. 3º. A autorização para o exercício da atividade de distribuição de GNL a granel será solicitada em requerimento à ANP, na forma da legislação em vigor, acompanhada da seguinte documentação:

I - ato constitutivo, estatuto ou contrato social em vigor, devidamente registrado na Junta Comercial, em se tratando de sociedades comerciais e, no caso de sociedades por ações, acompanhado de documentos de eleição de seus administradores ou diretores;

II - comprovação de inscrição nas Fazendas Federal e Estadual;

III - inscrição no Sistema de Cadastramento Unificado de Fornecedores (SICAF);

IV - comprovação de propriedade de central de distribuição de GNL própria ou de terceiros, devidamente autorizada pela ANP a operar, para receber do produtor ou de outra fonte supridora o volume de GNL correspondente aos contratos para distribuição;

V - comprovação de propriedade, no mínimo, de 2 (dois) veículos transportadores, que poderão ser próprios, fretados ou arrendados, adequados ao transporte de carga perigosa, nos termos do Regulamento Técnico INMETRO RT 6.

Art. 4º. A ANP terá o prazo de 60 (sessenta) dias para se manifestar sobre o requerimento de que trata o artigo anterior, contados da data do seu protocolo.

Parágrafo único. A ANP poderá solicitar documentos ou informações adicionais, sendo que nessa hipótese o prazo de que trata o caput deste artigo será contado a partir do protocolo dos documentos ou informações solicitadas.

Art. 5º. As pessoas jurídicas autorizadas a exercer a atividade de distribuição de GNL a granel ficam obrigadas a:

I - informar mensalmente à ANP os volumes e respectivo Poder Calorífico Superior (Kcal/m³), das aquisições ou recebimentos, estoque inicial, estoque final e vendas ou entregas de GNL realizadas no mês anterior, em formulário próprio que se encontra disponível no Escritório Central da ANP ou em seu website;

II - informar à ANP, com antecedência mínima de 30 (trinta) dias, a data em que pretende encerrar suas atividades;

III - elaborar manual de procedimentos para situações de emergência;

IV - dispor de materiais e de meios de comunicação para orientação aos consumidores;

V - promover inspeções anuais, que serão realizadas por empresas credenciadas pelo INMETRO, em todos os equipamentos por eles instalados e operados, conforme métodos e prazos estabelecidos nas normas pertinentes ou em normas internacionais, encaminhando os respectivos laudos à ANP, no prazo máximo de 30 (trinta) dias contados da data da sua conclusão.

Art. 6º. As pessoas jurídicas autorizadas a exercer a atividade de distribuição de GNL a granel são responsáveis pelos procedimentos de segurança nas operações de transvasamento, ficando obrigadas a orientar os consumidores quanto às normas de segurança que devam ser obedecidas, em especial aquelas relacionadas com o correto posicionamento, desligamento, travamento e aterramento do veículo transportador, bem como do acionamento das luzes de alerta, sinalização de extintores, dentre outros procedimentos que se façam necessários.

Parágrafo único. No caso de impedimento de área livre para manobra, estacionamento e escape rápido do veículo dentro do imóvel do consumidor, não será permitida a operação em via pública.

Da Construção e Ampliação de Centrais de Distribuição de GNL

Art. 7º. A autorização para construção e ampliação de Centrais de Distribuição de GNL será solicitada em requerimento à ANP, acompanhada da seguinte documentação:

I - Ato constitutivo, estatuto ou contrato social em vigor, devidamente registrado na Junta Comercial, em se tratando de sociedades comerciais e, no caso de

sociedades por ações, acompanhado de documentos de eleição de seus administradores ou diretores;

II - Comprovação de inscrição nas Fazendas Federal e Estadual;

III - Projeto básico completo da instalação, apresentando o serviço pretendido, a capacidade de armazenagem discriminada para cada etapa de implantação do projeto, além de dados técnicos básicos pertinentes a cada tipo de instalação;

IV - Cronograma físico-financeiro de implantação do empreendimento;

V - Licença de Instalação (LI) expedida pelo órgão ambiental competente; e

VI - Licenças de Construção Expedidas pelos órgãos municipais e estaduais.

Art. 8º. A ANP terá o prazo de 60 (sessenta) dias para se manifestar sobre o requerimento de que trata o artigo anterior, contados da data do seu protocolo.

Parágrafo único. A ANP poderá solicitar documentos ou informações adicionais, sendo que nessa hipótese o prazo de que trata o caput deste artigo será contado a partir do protocolo dos documentos ou informações solicitadas.

Art. 9º. O projeto para a construção de Centrais de Distribuição de GNL identificará na planta baixa o local de operação do veículo transportador numa área externa às edificações, dentro da área delimitada da Central, de acordo com as exigências da NFPA 59-A.

Art. 10. A construção de Centrais de Distribuição de GNL obedecerá, rigorosamente, às especificações do projeto apresentado à ANP, sendo que quaisquer modificações no projeto deverão ser previamente aprovadas pela ANP.

Art. 11. As pessoas jurídicas autorizadas a construir ou ampliar as Centrais de Distribuição de GNL a granel ficam responsáveis perante a ANP pela execução dos serviços de instalação e construção, ainda que tenham contratado empresa prestadora de serviço especializado.

Da Operação de Centrais de Distribuição de GNL

Art. 12. A autorização para operação de Centrais de Distribuição de GNL será solicitada em requerimento à ANP, acompanhada da seguinte documentação:

I - Licença de Operação (LO) expedida pelo órgão ambiental competente;

II - Atestado de Comissionamento da obra expedido por entidade técnica especializada, societariamente independente da empresa solicitante, enfocando a segurança das instalações e certificando que as mesmas foram construídas segundo as técnicas adequadas;

III - sumário do Plano de Manutenção das instalações e do Sistema de Garantia de Qualidade para a fase de operação.

Art. 13. A ANP terá o prazo de 30 (trinta) dias para se manifestar sobre o requerimento de que trata o artigo anterior, contados da data do seu protocolo.

Parágrafo único. A ANP poderá solicitar documentos ou informações adicionais, sendo que nessa hipótese o prazo de que trata o caput deste artigo será contado a partir do protocolo dos documentos ou informações solicitadas.

Art. 14. A pessoa jurídica autorizada a operar Central de Distribuição de GNL manterá atualizados o Plano de Manutenção das instalações e o Sistema de Garantia de Qualidade, visando a operação segura de suas instalações, que poderão ser fiscalizados a qualquer tempo pela ANP ou, por solicitação dessa através de entidade técnica especializada, societariamente independente da pessoa jurídica autorizada.

Parágrafo único. A pessoa jurídica autorizada a operar Central de Distribuição de GNL manterá os registros das manutenções periódicas realizadas nas instalações.

Art. 15. A pessoa jurídica autorizada a operar Central de Distribuição de GNL comunicará a ANP sobre a ocorrência de qualquer evento decorrente do exercício das suas atividades que possa acarretar riscos à saúde pública, à segurança de terceiros e ao meio ambiente, indicando as causas de sua origem, bem como as medidas tomadas para sanar ou reduzir o seu impacto, de acordo com os termos da legislação pertinente.

Art. 16. As pessoas jurídicas que estejam construindo ou ampliando Centrais de Distribuição de GNL na data da publicação da presente Portaria, ficam obrigadas a adequar-se à mesma, antes de solicitar a respectiva Autorização de Operação.

Art. 17. As autorizações de que trata esta Portaria serão revogadas nos seguintes casos:

I - liquidação ou falência homologada ou decretada;

II - a requerimento da pessoa jurídica autorizada;

III - por descumprimento das obrigações de que trata esta Portaria e de outras disposições legais aplicáveis.

Art. 18. As autorizações concedidas nos termos desta Portaria não eximem a pessoa jurídica de obter as demais autorizações e licenças de competência de outros órgãos federais, estaduais e municipais.

Art. 19. O não cumprimento do disposto nesta portaria sujeitará o infrator às penalidades previstas na Lei nº 9.847, de 26 de outubro de 1999, e legislações complementares.

Art. 20. Esta portaria entra em vigor na data de sua publicação.

15. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] www.energyquest.ca.gov/how_it_works/air_conditioner.html (acessado em maio/07)
- [2] Projeto Terminal de GNL – Seminário ABRAGERT
www.zonaeletrica.com.br/downloads/seminario_abraget/Seminario_Abraget_Apresentacao_Edio_Rodenheber.pdf (acessado: mai/07)
- [3] Petrobrás, www2.petrobras.com.br/ (acessado: abr/07)
- [4] Santos, D. B. Santos, R. R. “*Instrumentação e controle de uma bancada de testes de compressores na fase vapor superaquecido*” (2006), trabalho de formatura da Universidade de Brasília. Curso de Engenharia Mecatrônica.
- [5] www.lda.fr (acessado: mai/07)
- [6] www.abal.org.br (acessado: mai/07)
- [7] www.cogeneration.net/stranded_gas.htm (acessado em: março/07)
- [8] www.sempralng2.com/Pages/About/Regas.htm (acessado: mai/07)
- [9] www.spp.co.jp/English/jigyoku/ekika-e.html (acessado: abr/07)
- [10] Ripoll, R. P. & Abad, J. G. & Estrada, J. A. “*Integration of a new CCGT plant and an existing LNG Terminal at Barcelone Port*”(2006)
- [11] Mustang Engineering (2007)
www.oilonline.com/oece/oeaa/2007/presentations/mustang_lngsmartvap.pdf
(acessado: abr/07)
- [12]
www.cedet.isel.ipl.pt/seccoes/sea/proj/TrabRealizados/ContrDigArCondicionado/HTML/func_sist_refrigeracao.htm (acessado: abr/07)
- [13] Rosa, E.S. Apresentação Universidade de Campinas
www.fem.unicamp.br/~im450/Textos&Transparencias/aula-6/aula-6.pdf
(acessado: abr/07)
- [14] Incropera, F. P.; Dewitt, D.P. “*Transferência de Calor e de Massa*”. Editora LTC.
- [15] ASHRAE Handbook – Fundamentals (1997). Editora LTC
- [16] Wylen, V. Sonntag, R. Borgnakke, C. “*Fundamentos da Termodinâmica*” (2003). Editora Edgard Blucher

- [17] Larrazabal, M. L. G. “*Análise termo econômica do emprego de cogeração com gás natural na indústria colombiana de laticínios*” (2001), dissertação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Mecânica.
- [18] Szego, G. G. “*Análise e Simulação de redes de transportes e distribuição de gás*” (2001), trabalho de formatura da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Engenharia Mecânica.
- [19] Begazo, C.T.; Carvalho, E. C.; Simões-Moreira, J.R. “*Small scale LNG plant technologies*”. Hydrocarbon World (2006)
- [20] www.gasnet.com.br (acessado em: março/07)
- [21] www.radiobras.gov.br/abr (acessado em: março/07)
- [22] Criotec - www.criotec.com/uk/vaporization.htm (acessado em: março/07)
- [23] Sociedade Portuguesa de Inovações - www.spi.pt/documents/books/hortofruticolas (acessado: mar/07)
- [24] www.fea.unicamp.br/alimentarium (acessado: mar/07)
- [25] www.fem.unicamp.br/~em672/Ciclo_Refrigeracao_Refrigerantes.doc
- [26] Princípios de Sistemas de Refrigeração (frigoríficos) - www.em.pucrs.br/~tavares/frigorificos.PDF (acessado: abr/07)
- [27] <http://clipping.planejamento.gov.br/Noticias.asp?NOTCod=263676>
- [28] www.agenciabrasil.gov.br/ (acessado: abr/07)
- [29] www.sgg.go.gov.br/index.php?idMateria=8098 (acessado: abr/07)
- [30] NFPA 59A Liquefied Natural Gás - www.nfpa.org/assets/files/PDF/CodesStandards/TIAErrataFI/FI59A-2006.pdf
- [31] NFPA, www.nfpa.org (acessado: mai/07)
- [32] World Energy Source - www.worldenergysource.com (acessado: mai/07)
- [33] Yang, C.C.; Huang, Z.; “*Lower Emission LNG Vaporization*”, LNG Journal, Foster Wheeler North América Corporation (2004) www.fwc.com/publications/tech_papers/files/Lower%20Emission%20LNG%20Vap.pdf (acessado: mai/07)
- [34] <http://noticias.uol.com.br/economia/ultnot/efe> (acessado: mai/07)
- [35] www.downeastlng.com/docs/SustainableEconomicDevelopment.pdf

[36] Osaka Gás Co.,Ltd “*Boil-off gas liquefaction system using cold energy storage*” (1997)

<http://gasunie.eldoc.ub.rug.nl/root/1997/2039890/?pFullItemRecord=ON>

[37] Sundyne Corporation -

www.sundyne.com/ind/details/1,,CL11_DIV92_ETI8038,00.html (acessado: mai/07)

[38] Vargas, J.I. “*Preço do Petróleo:O terceiro choque?*” Economia & Energia No.47. (2005)