

AMIR ROBERTO DE TONI JUNIOR

ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE REGASEIFICAÇÃO DE GÁS
NATURAL LÍQUIDO

Monografia apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica
da Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande
do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do diploma de Engenheiro
Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre
2009



Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Escola de Engenharia

Departamento de Engenharia Mecânica

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE REGASEIFICAÇÃO DE GÁS NATURAL
LÍQUIDO**

AMIR ROBERTO DE TONI JUNIOR

**ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Pedro Barbosa Mello
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. Flávio Tadeu van der Laan
UFRGS / DEMEC**

**Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey
UFRGS / DEMEC**

**Porto Alegre
2009**

O mundo é uma festa
mas o gelo tá acabando.

Nizan Guanaes

DE TONI JR., A. R. **Estudo comparativo entre sistemas de regaseificação de gás natural líquido**. 2009. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre quatro sistemas de regaseificação de gás natural líquido. Os sistemas de regaseificação baseados em trocas térmicas com água do mar e com produtos de combustão de gás natural, utilizados industrialmente, são apresentados e discutidos. Outros dois sistemas alternativos são apresentados, um deles composto por um ciclo de Rankine orgânico e outro recuperando o calor de gases de combustão de outros processos. O parâmetro de comparação entre os sistemas foi estabelecido pela massa de GNL regaseificada, considerada fixa e igual a 1 kg/s. O equacionamento dos trocadores de calor através do método da média logarítmica de diferença de temperatura é solucionado e os resultados do dimensionamento dos equipamentos são apresentados. É apresentada uma avaliação de consumo energético e de emissões atmosféricas decorrentes da operação de cada sistema, demonstrando que os dois sistemas alternativos constituem uma solução mais adequada ambientalmente. Uma análise de sensibilidade de cada sistema à variação da temperatura da corrente quente é realizada. Os resultados obtidos mostram que o sistema proposto neste trabalho emite 7,639 quilogramas de CO₂ por hora de operação, enquanto que o sistema de regaseificação mais utilizado, que utiliza combustão de gás natural, emite mais de 143 quilogramas de CO₂ por hora. Conclui-se que os sistemas alternativos são, à primeira vista, viáveis tecnicamente.

PALAVRAS-CHAVE: Gás Natural Líquido; Terminal de GNL; Regaseificação; Trocadores de calor.

DE TONI JR., A. R. **Comparative Study between liquid natural gas regasification systems**. 2009. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

ABSTRACT

This work presents a comparative study between four liquid natural gas regasification systems. Two systems currently in use, which uses sea water and NG combustion as heat sources, are presented and their main characteristics are described. Two alternative systems are explained, one that incorporates an organic Rankine cycle and another one, proposed on this work, that uses heat recovered from flue gas. The parameter of comparison between systems is the mass flow of LNG, considered as 1kg/s. A numerical modeling of heat exchangers is carried out using the log mean temperature difference method. The resulting equation set is solved and the results are presented. A evaluation of energy consumption and atmospheric emissions resulting from each system is shown, proving that the two alternative system are more environmentally friendly. A sensibility analysis of each system in respect of the inlet temperature of the hot stream is carried out. The system proposed in this work produces 7.639 kilograms of CO₂ per hour while the most applied regasification system, which uses NG combustion as heat source, emits more than 143 kilograms of CO₂ per hour. The conclusions indicate that the alternative systems are, at the first evaluation, technically viable.

KEYWORDS: Liquid Natural Gas; LNG Terminal; Regasification; Heat Exchangers.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	4
4.1. Sistemas Estudados.....	4
4.2. Formulação do Problema.....	7
4.3. Considerações.....	8
5. RESULTADOS E ANÁLISES.....	9
5.1. Análise de Sensibilidade.....	10
6. CONCLUSÕES.....	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	13
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.....	14

1. INTRODUÇÃO

O gás natural (GN) é um combustível fóssil constituído principalmente por metano e outros alcanos mais pesados. Entre todos os combustíveis fósseis, o gás natural é o que emite menos gases de efeito estufa (GHG, do inglês *Greenhouse Gases*) por energia produzida em decorrência de sua queima. Esse fato, somado ao seu relativo baixo custo, impulsionou o crescimento da demanda e das pesquisas na área nos últimos anos.

Usualmente, o gás natural é conduzido, da reserva aos consumidores, por gasodutos. Quando essa alternativa não é viável, o GN é liquefeito para possibilitar o transporte marítimo. O processo de liquefação do gás natural, que inclui a remoção de impurezas e outros gases provenientes da reserva, é muito caro e intensivo em energia. O gás natural líquido (GNL), com volume específico seiscentas vezes menor que o GN, é acondicionado em navios especialmente projetados para seu transporte. Ao chegar ao destino, o GNL é regaseificado para distribuição. A Figura 1.1 ilustra a projeção de crescimento de capacidade mundial de regaseificação de GNL.

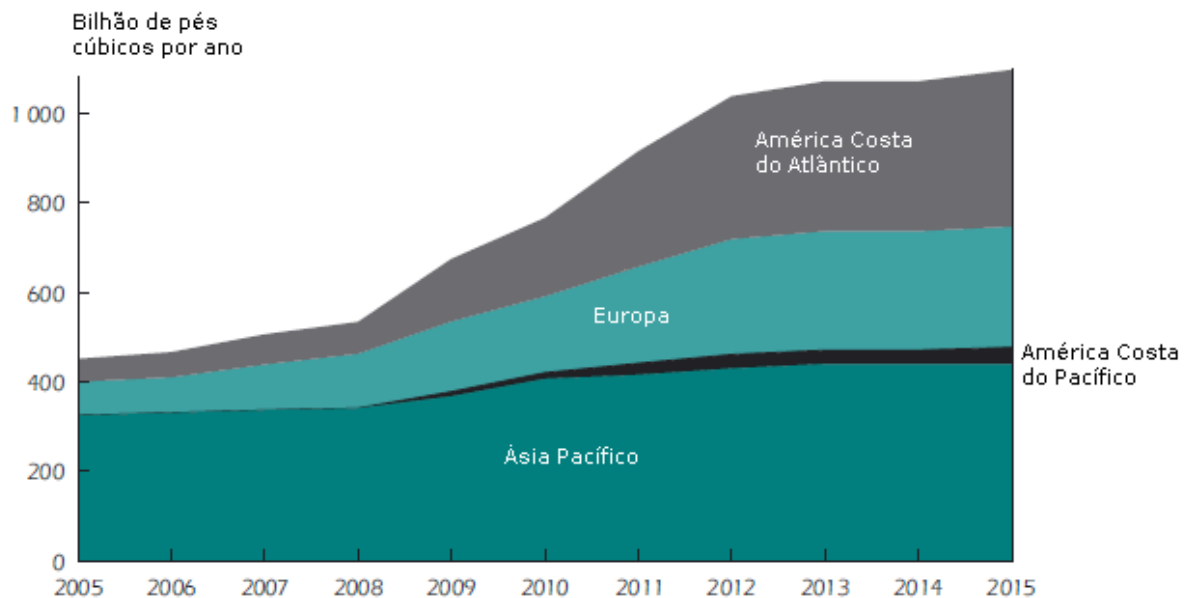


Figura 1.1: Crescimento da capacidade mundial de regaseificação de GNL (Fonte: AIE, 2007)

A Figura 1.1 evidencia a duplicação da capacidade mundial de regaseificação de GNL entre 2005 e 2011 e inserção de novas fronteiras no mercado mundial desse insumo energético, especialmente na América.

A regaseificação do GNL, para posterior consumo, é realizada de duas maneiras. O método mais antigo utiliza a combustão de uma parcela do gás natural importado como fonte de calor para promover a mudança de fase do GNL para GN. Existem cerca de 40 terminais de GNL que aplicam esta tecnologia, com capacidade para regaseificar 330 milhões de toneladas anuais (cerca de 450 bilhões de pés cúbicos por ano).

O método de evaporação alternativo, que surgiu na última década, utiliza água do mar como fluido quente, fornecendo energia para o GNL ao passar por um conjunto de trocadores de calor, instalados em atracadouros ou em navios adaptados para regaseificar e comprimir o gás natural rumo ao continente. Este sistema tornou-se o mais utilizado nos terminais projetados após 2002.

Em ambos os sistemas não há aproveitamento da capacidade do GNL de absorver calor e uma parcela da energia disponível é perdida durante o processo. Além disso, estes processos

geram emissões gasosas e poluição térmica, tanto atmosférica quanto aquática, sendo a segunda muito prejudicial para o equilíbrio ambiental dos biomas.

Tendo em vista a importância da busca por soluções energéticas mais eficientes e ambientalmente mais adequadas, o objetivo deste trabalho é o estudo comparativo de sistemas de regaseificação de GNL, visando avaliar o consumo de energia e os impactos ambientais associados a cada processo. É proposto um sistema que utilize a disponibilidade energética do GNL e que reduza os impactos ambientais decorrentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na busca por ciclos térmicos mais eficientes e por sistemas com maior aproveitamento do trabalho reversível (exergia), diversos estudos propuseram a recuperação de calor em processos para regaseificar GNL. Grande parte destes estudos apresenta plantas baseadas nos ciclos Brayton ou Rankine.

Miayazaki *et al.* (2000) elaboraram uma planta de geração de energia utilizando um ciclo de Rankine orgânico, tendo uma mistura de amônia e água como fluido de trabalho, vaporizando GNL no condensador do ciclo. Comparado com o ciclo convencional, o sistema proposto possui uma eficiência térmica 1,53 vezes maior e uma eficiência exergética 1,43 vezes maior.

Dispenza *et al.* (2008) propuseram, em uma série de artigos, duas plantas de geração de energia a partir de dois ciclos Brayton, um ciclo aberto a ar e outro fechado operando com hélio ou nitrogênio como fluido de trabalho. Em ambos os sistemas, o GNL é vaporizado num trocador de calor que constitui a fonte fria do ciclo fechado. Para cada alternativa, a eficiência exergética das plantas foi de 51 e 53%, respectivamente. A regaseificação do mesmo volume anual de GNL, dois bilhões de metros cúbicos, num sistema de trocadores de calor com água do mar, consumiria, em bombeamento, cerca de 11,7 bilhões de kWh.

Szargut e Szczygiel (2009) elaboraram ciclos de Rankine orgânicos com etano e eteno, visando gerar energia e vaporizar GNL sem queima adicional de combustível e minimizando perdas exergéticas em função da transferência de calor. Comparada com as termelétricas polonesas a carvão, a planta proposta, gerando energia durante duas mil horas anuais, evitaria a emissão de 31 mil toneladas de CO₂.

Acunha Junior *et al.* (2008) analisaram diversas possibilidades de regaseificação de GNL, entre elas, a utilização deste para reduzir a temperatura do ar de entrada no compressor de uma turbina operando em ciclo Brayton. Os autores concluíram que, para uma vazão volumétrica fixa, é possível elevar a vazão mássica em 4% e a geração de energia em 6%.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Conforme Kakaç e Liu (1997), no estudo de trocadores de calor existem duas principais metodologias de análise destes equipamentos: o método da média logarítmica de diferença de temperatura e o método da efetividade, também conhecido como ε -*NUT*. O método ε -*NUT* pode ser aplicado tanto para o dimensionamento de um trocador de calor quanto para avaliação de desempenho de um trocador existente operando em condições diferentes do projeto original. Esse método é mais usual no projeto de trocadores de calor compactos para aplicações automotivas, aeronáuticas e de climatização.

Neste trabalho adota-se o método da média logarítmica de diferença de temperatura, ou MLDT, que é mais utilizado para o dimensionamento de trocadores de calor, tendo em vista que seu uso para avaliações de desempenho depende de um procedimento de cálculo iterativo.

O projeto de trocadores de calor para plantas petroquímicas, ciclos de potência e demais aplicações de escala industrial constituem o principal campo de aplicação deste método.

A transferência de calor no trocador está diretamente relacionada à diferença de temperatura entre as correntes fluidas. Esta diferença de temperatura varia ao longo do equipamento, sendo conveniente a determinação de um valor médio de diferença de temperatura ΔT_m , em K, que possibilite o cálculo da taxa total de transferência de calor Q , em W, através da Equação 3.1:

$$Q = UA \Delta T_m \quad (3.1)$$

onde A é área total de transferência de calor, em m^2 , e U o coeficiente global de transferência de calor, em W/m^2K . A determinação de ΔT_m é possível aplicando-se o balanço de energia em elementos diferenciais do trocador, conforme a Equação 3.2:

$$dQ = U \Delta T dA \quad (3.2)$$

sendo ΔT a diferença local de temperatura entre as correntes, em K. Integrando-se a expressão anterior para toda a extensão do equipamento e considerando-o como um trocador de calor de correntes contrárias, a diferença de temperatura média apropriada é dada pela Equação 3.3:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (3.3)$$

onde

$$\Delta T_1 = T_{h,e} - T_{c,s} \quad \text{e} \quad \Delta T_2 = T_{h,s} - T_{c,e}$$

denominada média logarítmica da diferença de temperatura. Os subíndices h e c referem-se, respectivamente, às correntes quente e fria que cruzam o trocador de calor, enquanto os subíndices e e s denotam a entrada e a saída da corrente.

Segundo Stoecker (1989), o equacionamento de trocadores de calor para evaporadores e condensadores é diferenciado, tendo em vista que pelo menos um dos fluidos sofre mudança de fase no interior do equipamento. Assim, para uma mudança de fase a temperatura constante T_c pode-se expressar a troca de calor entre os fluidos segundo a Equação 3.4:

$$Q = UA \frac{(T_c - T_e) - (T_c - T_s)}{\ln \left[\frac{(T_c - T_e)}{(T_c - T_s)} \right]} = \dot{m} c_p (T_s - T_e) \quad (3.4)$$

onde T_s e T_e são as temperaturas de saída e entrada do fluido que realiza troca de calor sensível, em K, \dot{m} é a vazão mássica da corrente fluida com troca sensível, em kg/s, e c_p o calor específico desse fluido, em J/kg K. Pode-se reescrever a Equação 3.4 obtendo-se a Equação 3.5:

$$\frac{T_c - T_s}{T_c - T_e} = e^{\left(-U A I m c_p\right)} \quad (3.5)$$

Desta equação salienta-se que a expressão entre parênteses corresponde ao valor negativo do número de unidades de transferência NUT , evidenciando a conexão entre as duas metodologias de cálculo de trocadores de calor.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

4.1. SISTEMAS ESTUDADOS

O GNL é transportado, nos chamados navios metaneiros, em tanques termicamente isolados, permanecendo em temperaturas próximas de -160°C e a pressões manométricas da ordem de 40 kPa. Ao chegar ao terminal de recebimento, o GNL é bombeado, a pressões de cerca de 3 MPa, para ser regaseificado e inserido em gasodutos.

Os primeiros terminais de regaseificação de GNL, inaugurados no final dos anos 1960, utilizam um sistema de regaseificação conhecido como “closed-loop”, ou circuito fechado, em que há consumo de gás natural para gerar calor, promovendo a mudança de fase do GNL para GN. Segundo Whitmore *et al.* (2009), o consumo de gás natural nestes sistemas varia entre 1 e 2% da quantidade de gás importado. Um diagrama esquemático desse sistema de regaseificação pode ser visto na Figura 4.1.

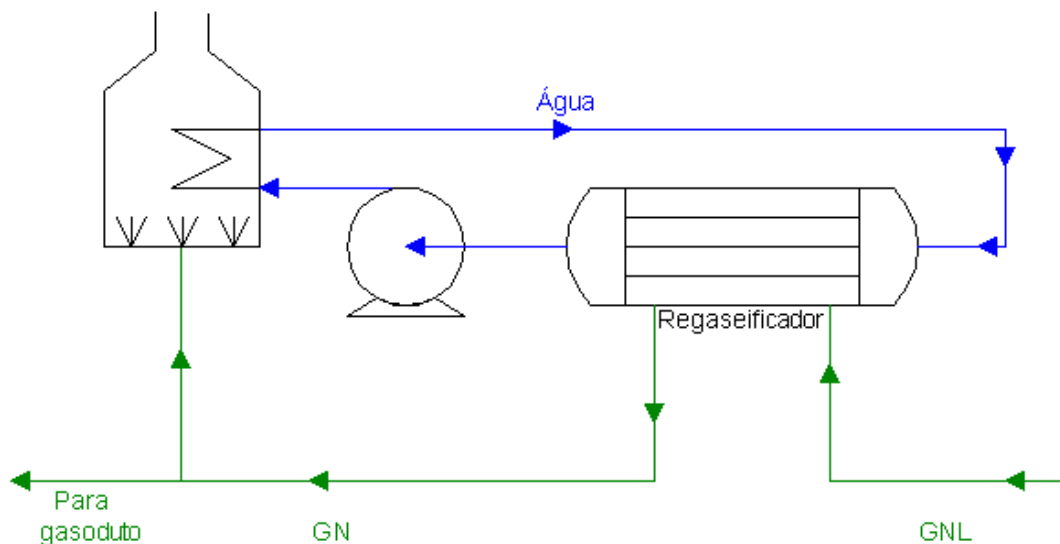


Figura 4.1: Diagrama esquemático de um sistema de regaseificação em circuito fechado.

Nota-se que este sistema consome energia para o bombeamento de água através do aquecedor e do regaseificador, além de gerar emissões gasosas.

Tendo em vista as baixas temperaturas do GNL durante a regaseificação, aproximadamente -96°C a 3 MPa, vislumbrou-se a possibilidade de realizar o processo de evaporação utilizando como fonte de alta temperatura o meio ambiente. Sistemas de regaseificação que utilizam ar ambiente como fluido quente são utilizados em pequenas estações de regaseificação que recebem GNL transportado em caminhões.

Em um terminal marítimo, onde se realiza a vaporização de dezenas de milhares de metros cúbicos de GNL por dia, utiliza-se água do mar como fonte quente nos trocadores de calor, em sistemas conhecidos como “open-loop” ou “open rack”. A Figura 4.2 mostra um esquema básico deste modelo de regaseificador.

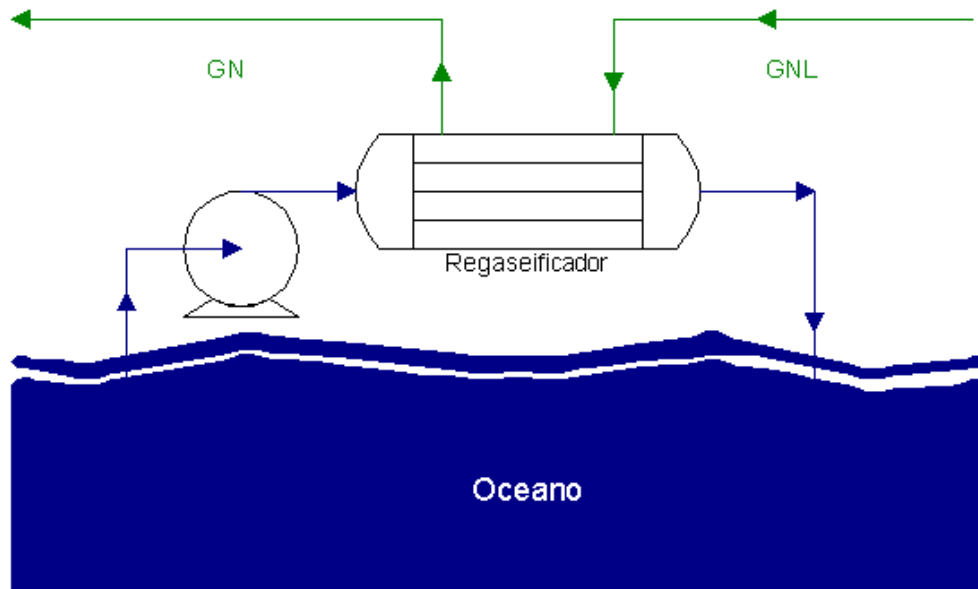


Figura 4.2: Esquema básico de um sistema de regaseificação com água do mar.

Para regaseificar cerca de 32,5 mil metros cúbicos de GNL por dia, o terminal Gulf Gateway, pertencente a Excelerate Energy, bombeia mais de 190 mil litros de água do mar para o sistema de vaporização, devolvendo-a 7,5 °C mais fria para o oceano. A descarga dessa água resfriada é realizada em uma determinada profundidade, dependente do sítio do terminal, onde a temperatura do meio seja próxima da temperatura da água utilizada.

Os dois sistemas descritos acima contemplam toda a capacidade instalada de regaseificação que opera comercialmente no mundo. Contudo, do ponto de vista termodinâmico e ambiental, são processos que desperdiçam um grande potencial energético associado à exergia criogênica do GNL, além de gerarem emissões gasosas e poluição térmica tanto atmosférica quanto marinha.

Um sistema de regaseificação que concilia o aproveitamento da exergia criogênica com a minimização de impactos ambientais foi proposto por Szargut e Szczygiel (2009). O ciclo de Rankine proposto utiliza etano como fluido de trabalho e água do mar como fonte quente. A água a 10 °C entrega calor para a evaporação de etano a -6 °C e retorna ao oceano 2 graus mais fria, enquanto no condensador o etano rejeita calor latente a -88 °C para o GNL, que encontra-se inicialmente como líquido comprimido a -138 °C. Um esquema desse regaseificador pode ser visto na Figura 4.3.

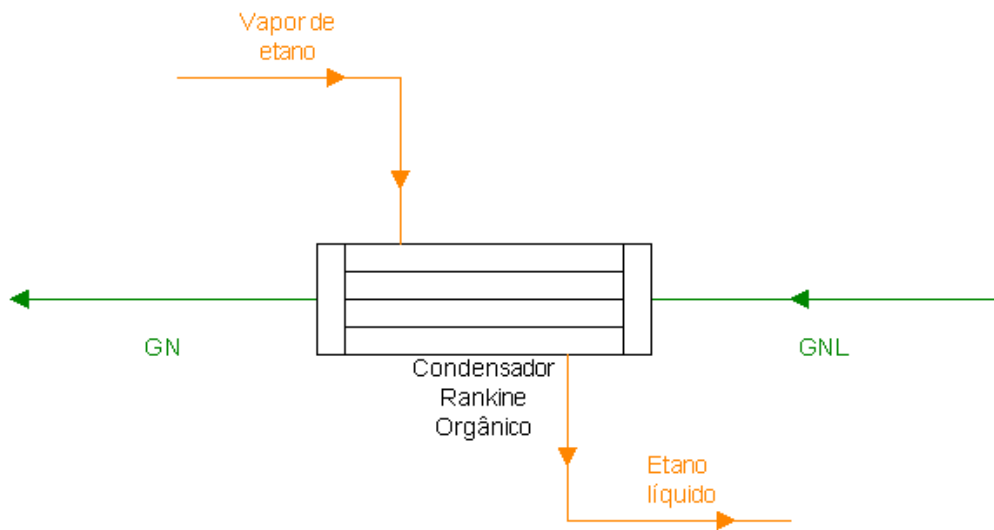


Figura 4.3: Diagrama esquemático do regaseificador com condensação de etano.

A planta foi dimensionada para uma operação de duas mil horas anuais, regaseificando 99,2 kg/s de GNL, com uma geração de energia elétrica de 16,78 MW. Salienta-se que, para promover a condensação do etano, o GNL passa por trocas de calor sensível e latente, deixando o equipamento como gás natural saturado a $-96\text{ }^{\circ}\text{C}$. Isso se deve a hipótese de que o trocador é do tipo casco e tubo e que o fluido em pressão mais alta circula pelos tubos, que é o caso do GNL.

Neste trabalho propõe-se um sistema diferenciado para a regaseificação do GNL, utilizando como fonte quente do processo os gases de combustão provenientes de um ciclo de potência qualquer. A remoção de calor dos gases de combustão para utilização no regaseificador é realizada nas proximidades da exaustão para o ambiente, de modo a reduzir a poluição térmica das emissões gasosas. Uma representação esquemática do sistema proposto pode ser vista na Figura 4.4.

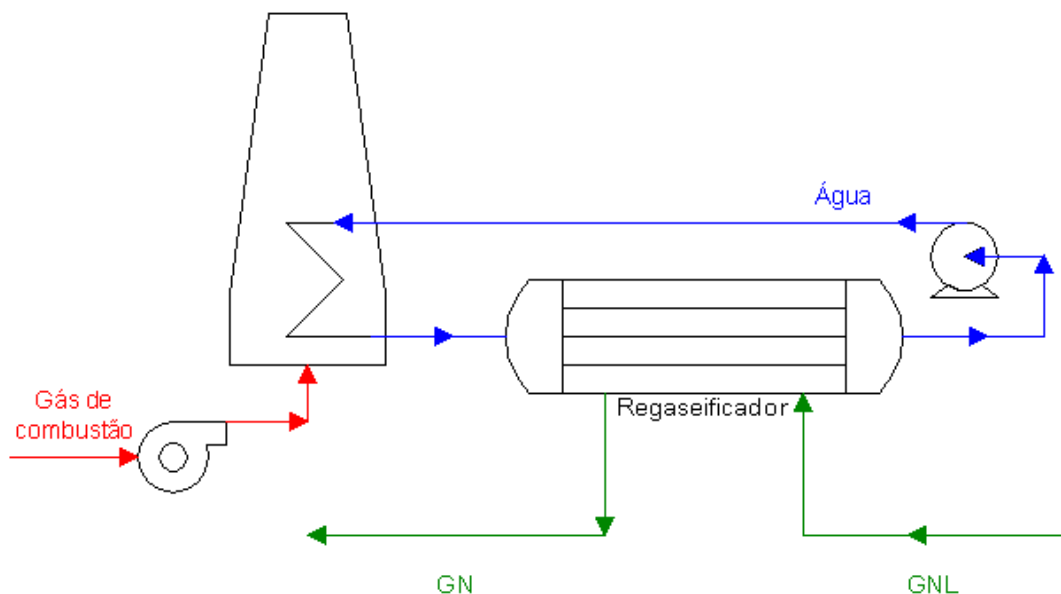


Figura 4.4: Esquema básico do sistema de regaseificação proposto.

Uma das vantagens do acoplamento proposto está na independência operacional do ciclo de potência. Muitos sistemas de regaseificação apresentados na literatura propõem o acoplamento do sistema de regaseificação ao condensador de ciclos de Rankine, convencional ou orgânico, tornando a eficiência da planta, ou mesmo a sua operação, dependente do abastecimento de GNL. Além disso, a operação do ciclo de potência precisa ser bastante estável, pois uma breve redução de carga poderia provocar grandes danos ao condensador devido ao congelamento do fluido de trabalho.

4.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Para solucionar o sistema de equações decorrente da modelagem dos quatro sistemas de regaseificação utilizou-se o software computacional *EES – Engineering Equation Solver*, desenvolvido por S. A. Klein, que possui uma ampla base de dados sobre propriedades termodinâmicas de fluidos. O erro máximo da solução dada pelo programa é de 1,0E-6.

Todos os sistemas de regaseificação foram calculados para uma mesma taxa de evaporação de GNL igual a 1 kg/s. Conforme o banco de dados do software de solução, o calor de vaporização do GNL a 3 MPa é de 270,42 kJ/kg. Para o superaquecimento do gás natural até – 65 °C são necessários 113,7 kJ/kg.

Os trocadores de calor foram considerados com duas seções bem distintas, sendo uma responsável pela evaporação do GNL e outra pelo superaquecimento do GN. O equacionamento desse equipamento depende de três temperaturas da corrente quente, a saber: temperatura de entrada no evaporador, temperatura de saída do evaporador/entrada do superaquecedor e temperatura de saída do superaquecedor.

Apenas as temperaturas de entrada no evaporador e de saída do superaquecedor são definidas, de modo que a solução do dimensionamento estabelece as dimensões de cada superfície de troca térmica, além da temperatura intermediária e da vazão mássica da corrente quente. Com os dados de vazão da corrente quente calcula-se o consumo energético de operação do sistema, composto basicamente pelo trabalho de bombeamento W_p , dado em W, pela equação 4.1.

$$W_p = \frac{\dot{m} \Delta p}{\rho \eta_p} \quad (4.1)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica, em kg/s, Δp o incremento de pressão, em Pa, ρ a massa específica do fluido, em kg/m³ e η_p a eficiência da bomba ou ventilador.

Tendo em vista que o sistema com água do mar descarrega a água resfriada numa dada profundidade, o trabalho de bombeamento mínimo é dependente dessa profundidade. Como caso geral para os sistemas que utilizam água como fluido da corrente quente estabeleceu-se um incremento de pressão de 500 kPa e um rendimento da bomba de 75%. Para o ventilador de gases de combustão presente no sistema proposto considerou-se um incremento de pressão de 0,98 kPa (100 mmCA) e um rendimento de 70%.

O impacto ambiental da operação de cada sistema pode ser avaliado pelo consumo energético dos equipamentos auxiliares e pelas emissões atmosféricas geradas. O sistema de regaseificação em circuito fechado consome GN para o aquecimento da água da corrente quente, de modo que esse sistema gera emissões gasosas diretamente. Para o cálculo das emissões deste sistema considerou-se uma combustão estequiométrica do gás natural.

O consumo energético dos equipamentos auxiliares pode ser convertido em emissões de CO₂ equivalente, possibilitando uma comparação mais ampla entre os sistemas. A Figura 4.5

apresenta informações sobre as taxas de emissão de CO₂ em função da geração de energia elétrica para diversos países.

Gráfico – Taxa de emissão de CO₂ por MWh de energia elétrica gerada em diversos países

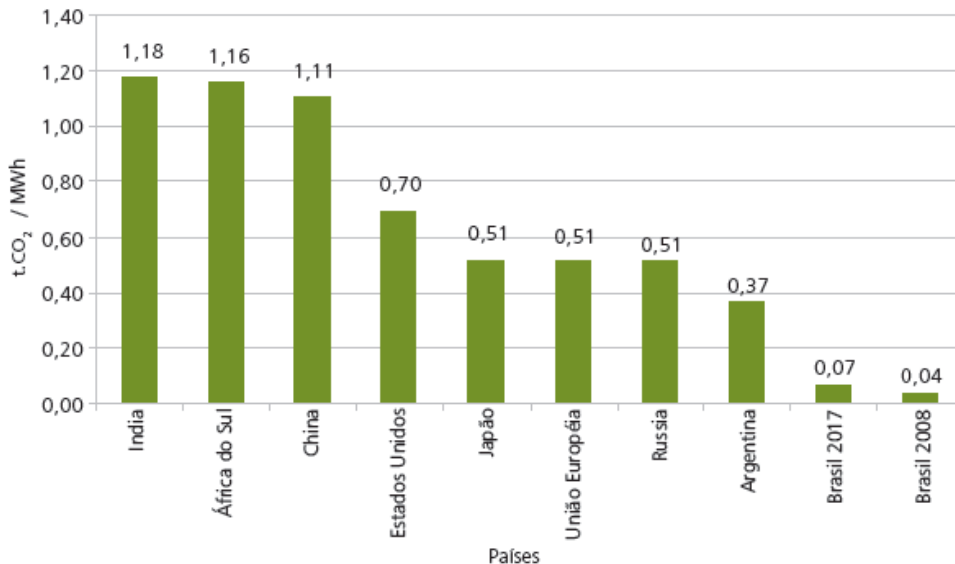


Figura 4.5: Emissão de CO₂ em função da geração de energia elétrica (Fonte: EPE, 2009).

Observa-se que as emissões brasileiras de CO₂, decorrentes da geração de energia elétrica, estão em um patamar muito inferior aos demais países relacionados. Isso se deve, entre outros fatores, à ampla capacidade hidrelétrica instalada no país, cujas emissões relativas são contabilizadas como nulas.

Assim, para traçar um comparativo de emissões entre os sistemas estudados, consideram-se as emissões diretas, quando for o caso, e as emissões relativas ao consumo energético de operação do sistema. Tendo em vista os dados apresentados na figura anterior, considerou-se uma taxa de emissão de 0,5 tCO₂/MWh.

4.3. CONSIDERAÇÕES

Para estabelecer uma comparação entre os quatro sistemas de regaseificação em estudo, foram elaboradas as seguintes hipóteses: a composição do GNL é tida como sendo metano (CH₄) puro; o regaseificador recebe GNL saturado a 3 MPa e o aquece até o estado de vapor superaquecido a -65 °C; perdas de carga pelo lado do GNL são negligenciadas. O referencial de comparação entre os sistemas é estabelecido pela quantidade de GNL evaporada, considerada constante e igual a um quilograma por segundo.

Entre os sistemas analisados, apenas aquele proposto por Szargut em um ciclo de Rankine orgânico não utiliza água como fluido da corrente quente no trocador de calor. A utilização da água como fluido quente fornecendo calor para o gás natural em temperaturas abaixo de -60 °C demanda algum cuidado com a possibilidade de congelamento da água. Para o sistema que utiliza água do mar a temperatura de saída da água é determinada pela profundidade na qual ela será descarregada. Os valores considerados para esse sistema foram de 15 °C para água admitida e 7,5 °C para a água resfriada, conforme a literatura.

No sistema de circuito fechado e no sistema proposto neste trabalho considerou-se uma variação da temperatura da água muito maior que aquela do sistema com água do mar. Estabeleceu-se a temperatura de saída da água do evaporador como 20 °C para ambos os

sistemas, sendo este um valor próximo da temperatura ambiente e que oferece uma margem de segurança em relação ao congelamento da água. Considerando as informações de Whitmore *et al.* (2009), definiu-se que a massa de gás natural consumida no sistema de circuito fechado é de 0,9 mol/s, que corresponde a 1,44 % da massa de GNL regaseificada. O aquecedor de água considerado tem eficiência de 85%, de modo que a água sofre um incremento de temperatura de 60 graus Celsius.

Para o sistema de regaseificação que utiliza calor proveniente de gases de combustão o dimensionamento do trocador gás / água baseou-se em dados de economizadores, dadas as condições de serviço bastante semelhantes. Assim, para este trocador de calor, a temperatura dos gases de combustão se reduz em cerca de noventa graus para um incremento de trinta e cinco graus na temperatura da água. A temperatura de exaustão dos gases de combustão em uma planta termelétrica é de aproximadamente 150 °C, sendo definida uma temperatura de 127 °C (400 K) para os gases que chegam ao trocador de calor.

Tendo em vista as condições de transferência de calor intrínsecas ao processo, foram utilizados coeficientes globais de transferência de calor U obtidos na literatura. Para a área de troca onde ocorre mudança de fase do GNL considerou-se U igual a 1100 W/m²K e para a superfície de superaquecimento estabeleceu-se U igual a 150 W/m²K. Esses valores são representativos da ordem de grandeza do coeficiente de transferência de calor para as situações em estudo, a saber: líquido / líquido com mudança de fase e líquido / gás em alta pressão.

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados obtidos na simulação dos sistemas de regaseificação para os parâmetros estabelecidos podem ser vistos na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Resultados do dimensionamento dos sistemas de regaseificação.

	Circuito Fechado	Água do Mar	Condensador Etano	Sistema Proposto
Área de troca para evaporação [m²]	1,60	2,27	7,11	1,78
Área de troca para superaquecimento [m²]	19,32	128,5	6,24	28,95
Vazão de fluido quente [kg/s]	1,53	12,25	3,37	2,62
Temperatura do fluido quente entre as seções do trocador de calor [°C]	37,8	9,7	-74,7	30,4
Consumo energético de operação [kW]	1,020	8,164	--	7,639
Emissões atmosféricas totais [kgCO₂/h]	143,070	4,082	--	3,820

Cabe salientar que o sistema proposto neste trabalho possui uma superfície de troca de calor não referenciada na tabela, onde os gases de combustão aquecem água, cuja área de troca térmica possui 253,6 metros quadrados.

Nota-se que o resultado do dimensionamento para o sistema com condensação de etano apresenta uma superfície de troca para evaporação de GNL maior que a superfície para superaquecimento. Contudo, observa-se que neste sistema ocorre mudança de fase em ambas as correntes fluidas que passam pelo trocador de calor e que os resultados obtidos por Szargut e Szczygiel apresentam a mesma característica.

O consumo energético de operação e as emissões atmosféricas totais do sistema com condensação de etano foram considerados nulos porque a regaseificação do GNL está associada à geração de energia elétrica no ciclo de Rankine orgânico, que é superior ao seu consumo interno dos equipamentos.

5.1. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Conduziu-se uma análise de sensibilidade dos sistemas de regaseificação à variação da máxima temperatura do fluido da corrente quente. Para cada sistema, alterou-se a temperatura de entrada em um intervalo centrado na temperatura de projeto. A Figura 5.1 mostra a influência dessa variação no dimensionamento do trocador.

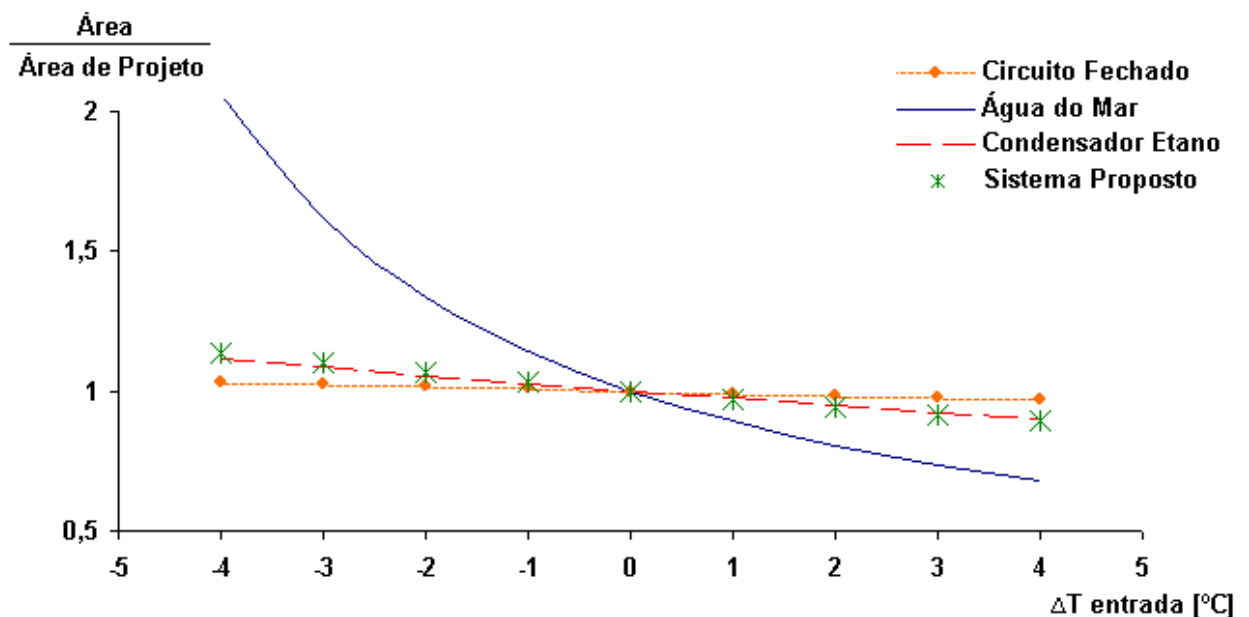


Figura 5.1: Variação da área do regaseificador de GNL em função da temperatura de entrada do fluido quente.

Na figura acima nota-se que o sistema de regaseificação com água do mar é muito sensível à variação de temperatura de entrada da corrente quente, pois se a temperatura da água admitida for três graus mais fria que a temperatura considerada no projeto, a superfície de troca térmica precisa ser 50% maior. Este comportamento está associado à pequena variação de temperatura da corrente quente neste processo, que resulta numa vazão mássica muito elevada para produzir a mesma troca térmica dos demais sistemas.

Verificou-se também a influência da temperatura de entrada do fluido quente no consumo energético de operação do sistema. A Figura 5.2 apresenta os resultados desta avaliação.

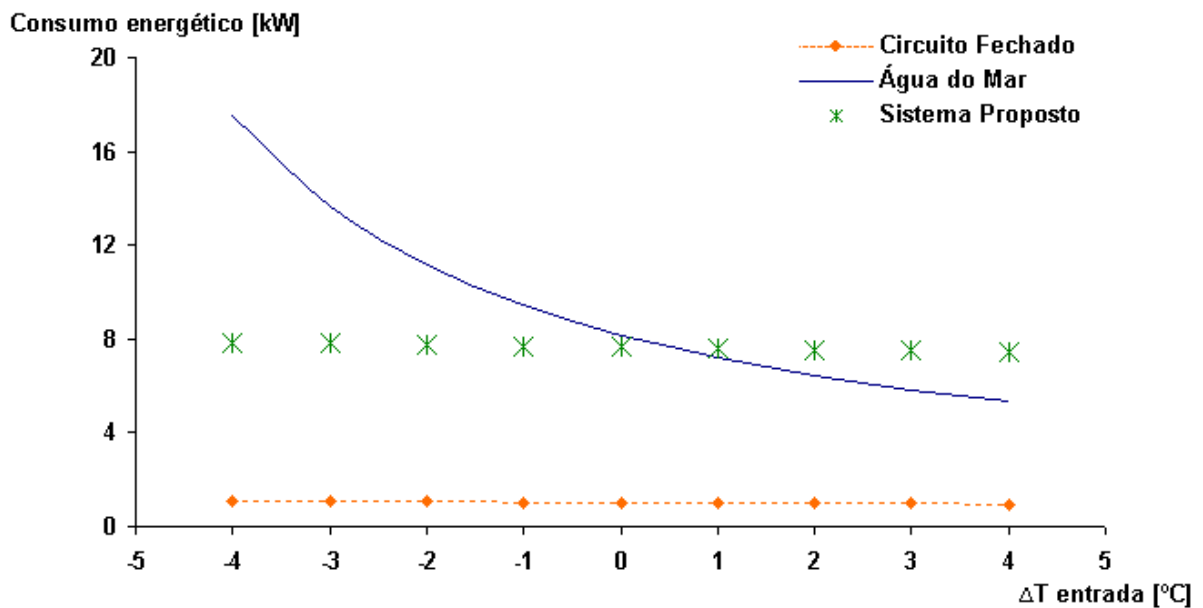


Figura 5.2: Influência da temperatura de entrada do fluido quente no consumo energético de operação dos sistemas de regaseificação.

Observa-se que influência da temperatura de entrada do fluido quente no consumo energético dos equipamentos auxiliares dos sistemas de regaseificação segue o mesmo comportamento observado para a variação da superfície de troca térmica, como era esperado. A sensibilidade dos demais parâmetros mostrou-se análoga a estes resultados.

6. CONCLUSÕES

O estudo comparativo dos sistemas de regaseificação de GNL demonstrou que os métodos propostos por Szargut e Szczygiel e pelo autor deste trabalho constituem uma alternativa ambientalmente mais adequada para a realização do processo de evaporação de GNL do que os sistemas atualmente em operação. O dimensionamento dos trocadores de calor empregados nos quatro sistemas e os valores de consumo energético e de emissões atmosféricas totais mostram que os métodos alternativos são, à primeira vista, tecnicamente viáveis.

O sistema com condensação de etano é a solução mais completa para o problema em questão, pois realiza a evaporação do GNL sem consumo de energia ou queima adicional de combustível e aproveita a disponibilidade energética associada às baixas temperaturas do GNL. Contudo, trata-se de uma solução bastante complexa, pois emprega um ciclo de potência exótico, que opera com uma diferença de temperatura próxima de 100 °C entre os reservatórios térmicos.

Já o sistema proposto neste trabalho é uma alternativa mais simples e usual, ao passo que utiliza a disponibilidade associada ao GNL para reduzir a temperatura dos gases emitidos por uma planta termelétrica. Assim, reduz-se a poluição térmica atmosférica decorrente da operação da planta e evita-se a queima adicional de combustível e a utilização e descarte de grandes volumes de água marinha.

As emissões atmosféricas totais deste sistema, regaseificando um quilograma de GNL por segundo, somam 7,639 quilogramas de CO₂ por hora, enquanto o sistema de circuito fechado, que é empregado na maior parte dos terminais de GNL, emite mais de 143

quilogramas de CO₂ por hora. Entretanto, o emprego deste sistema está condicionado a existência de uma planta termelétrica junto ao terminal de GNL.

A avaliação de emissões atmosféricas totais foi realizada utilizando um valor médio estabelecido para as emissões provenientes da geração de energia elétrica a partir de todas as fontes energéticas. Uma avaliação mais objetiva poderia ser realizada avaliando apenas as emissões de origem termelétrica, especialmente das termelétricas a gás, de modo a estabelecer um melhor comparativo da aplicação do gás natural ao longo de toda a sua cadeia produtiva.

A análise de sensibilidade demonstra que o sistema de regaseificação com água do mar é bastante sensível às variações da temperatura de entrada do fluido quente, enquanto os demais sistemas mantêm-se praticamente estáveis frente à mesma variação de temperatura. A estabilidade é importante para a adequada operação destes sistemas que, em escala real, regaseificam volumes diários da ordem de trinta mil metros cúbicos de GNL.

Como continuação para este trabalho sugere-se um estudo mais aprofundado das condições de transferência de calor durante a regaseificação do GNL, visando um projeto mais detalhado dos trocadores de calor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACUNHA JUNIOR, I. C. ; CAROTENUTO, A.; PERIN, A. L.; FONTANA, D. H. G.; KLEIN, L. F.; GONÇALVES, G. R.; SCHNEIDER, P. S. Energy recovery from liquefied natural gas vaporization: the role of coupled thermal systems. In: 12th BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL ENGINEERING AND SCIENCES, Novembro 10-14, 2008, Belo Horizonte. **Proceedings of ENCIT 2008**, Belo Horizonte: 2008.

AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA. **Natural Gas Market Review 2007**. Paris, 2007.

DISPENZA, C.; DISPENZA, G.; LA ROCCA, V.; PANNO, G. Exergy recovery during LNG regasification: Electric energy production – Part one. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 380-387, 2009.

DISPENZA, C.; DISPENZA, G.; LA ROCCA, V.; PANNO, G. Exergy recovery during LNG regasification: Electric energy production – Part two. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 388-399, 2009.

DISPENZA, C.; DISPENZA, G.; LA ROCCA, V.; PANNO, G. Exergy recovery in regasification facilities – Cold utilization: A modular unit. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, p. 3595-3608, 2009.

KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 1. ed. Boca Raton: CRC, 1998. 432 p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2008 – 2017 Volume 1**. Rio de Janeiro, 2009.

MIYAZAKI, T.; KANG, Y. T.; AKISAWA, A.; KASHIWAGI, T. A combined power cycle using refuse incineration and LNG cold energy. **Energy**, v.25, n. 7, p. 639-655, 2000.

STOECKER, W. F. **Design of thermal systems**. 3. ed. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1989. 528 p.

SZARGUT, J.; SZCZYGIEL, I. Utilization of the cryogenic exergy of liquid natural gas (LNG) for the production of electricity. **Energy**, v. 34, p. 827-837, 2009.

WHITMORE, W. D.; BAXTER, V. K.; LASKA, S. L. A critique of offshore liquefied natural gas (LNG) terminal policy. **Ocean & Coastal Management**, v. 52, p. 10-16, 2009.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P.; BERGMAN, T. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 643 p.

CARVALHO JR, J. A.; MACQUAY, M. Q. **Princípios de combustão aplicada**. 1. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2007. 176 p.