

Nestor Gálvez Ronceros

**Simulação do
Processo de Liquefação de
Gás Natural APCI C3MR**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: José Alberto dos Reis Parise

Rio de Janeiro
Outubro de 2008

Nestor Gálvez Ronceros

**Simulação do processo de liquefação de gás natural,
APCI C3MR**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Carlos Eduardo Reuther de Siqueira

Departamento de Engenharia Mecânica – UCP

Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Eloi Fernández y Fernández

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de outubro de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Nestor Gálvez Ronceros

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Nacional do Callao, Peru, em 2003. Atua na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Petróleo e Energia.

Ficha Catalográfica

Gálvez Ronceros, Nestor

Simulação do processo de liquefação de gás natural APCI C3MR / Nestor Gálvez Ronceros; orientador: José Alberto dos Reis Parise. – 2008.

192 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Liquefação de gás natural. 3. C3MR. 4. Simulação. 5. GNL. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

Para meus pais, Carmela e David.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Prof. José Alberto dos Reis Parise, pela dedicação, pela força e por ter confiado na minha capacidade.

À CAPES e à PUC-Rio pelo apoio financeiro ao trabalho.

A minha família, pelo apoio e dedicação.

Ao meu amigo Prof. Luis Alberto Llacua Zarate, por seu apoio nos inícios.

Ao Alan da Silva Esteves, pelo apoio na elaboração deste trabalho.

À Rosely, do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio, pela ajuda.

Aos colegas e amigos do sexto andar da Pós-graduação.

Resumo

Gálvez Ronceros, Néstor; Parise, José Alberto dos Reis. **Simulação do Processo de Liquefação de Gás Natural APCI C3MR**. Rio de Janeiro, 2008. 192p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No presente trabalho, é desenvolvido um modelo matemático para a simulação do processo de liquefação de gás natural APCI C3MR com dois estágios. O primeiro estágio consta de um ciclo de pré-resfriamento por compressão de vapor, com propano como refrigerante, o qual reduz aproximadamente até $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura do gás natural, em quatro níveis de pressão. No segundo estágio para a liquefação de gás natural o ciclo de compressão de vapor tem como refrigerante uma mistura composta de nitrogênio, metano, etano e propano. Nos dois estágios os evaporadores trabalham em três diferentes níveis de pressão. Os evaporadores do ciclo de pré-resfriamento são usados como condensadores para o ciclo de liquefação. Para os dados de entrada da simulação foi considerado o projeto da Planta de Liquefação de Gás Natural Pampa Melchorita, no departamento de Ica, ao sul de Lima, Peru, com produção prevista de 4,7 MTPA. As propriedades da mistura de refrigerante e do gás natural foram calculadas a partir do programa REFPROP, desenvolvido no NIST, EUA. Dos valores obtidos das propriedades termodinâmicas construírem-se equações de ajustes que foram utilizadas no modelo matemático. O sistema de equações algébricas não-lineares foi resolvido em plataforma EES.

Palavras-chave

Liquefação de gás natural, C3MR, simulação, GNL.

Abstract

Gálvez Ronceros, Néstor; Parise, José Alberto dos Reis (Advisor). **Simulation of the APCI C3MR Natural Gas Liquefaction Process**. Rio de Janeiro, 2008. 192p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the present work a mathematical model for the simulation the APCI C3MR process for natural gas liquefaction, in two vapor compression refrigeration stages, is presented. In the first stage, with propane as the working fluid, the temperature of natural gas is reduced to $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$. The second stage uses a mixture of nitrogen, methane, ethane and propane as refrigerant. The evaporators of the pré-cooled cycle are used as condensers for the liquefaction cycle. The mathematical model is formed by the mass and energy conservation equations, applied to adequate control volumes, and by the thermodynamic properties equations, from the computational package REFPROP, developed by NIST, USA. A computational program was developed in platform EES, to solve the resulting non-linear system of algebraic equations. As input for the program, data from an existing NG liquefaction plant in Pampa Mechorita, south of Lima, Peru, were used.

Keywords

Natural gas liquefaction, C3MR, simulation, LNG.

Sumário

1	Introdução	23
1.1	Contexto Geral	23
1.2	Preâmbulo	23
1.2.1	Demandas dos processos de liquefação no mercado atual	23
1.2.2	Breve História do GNL	25
1.2.3	Importância do GNL na economia mundial	27
1.2.3.1	Países exportadores e importadores	29
1.2.3.1.1	Importadores	29
1.2.3.1.2	Exportadores	30
1.2.3.2	América do Sul	31
1.2.3.3	Peru	31
1.2.3.4	Chile	31
1.2.3.5	Brasil	33
1.3	Objetivos	34
1.4	Conteúdo do trabalho	35
2	Análise dos processos de liquefação de gás natural	37
2.1	Introdução	37
2.2	Composição do GNL	38
2.3	Processo de purificação do GN antes de se converter em GNL	39
2.4	Equipamentos de uma planta de GNL	40
2.5	Considerações Técnicas	41
2.6	Cadeia integrada de GNL	42
2.7	Sistemas de criogenização	43
2.8	Tipos de plantas de GNL	43
2.8.1	Plantas de grande capacidade (“base load ”)	43
2.8.2	Plantas de nivelamento de demanda (peak - shaving)	45
2.8.3	Plantas de pequena escala	45
2.9	Descrição geral dos ciclos	46
2.9.1	Processo de Cascata Clássica (CCP)	47
2.9.2	Processo de Cascata Otimizada de Phillips	48
2.9.3	Processo APCI – C3MR	51
2.9.4	Processo APX (C3MR + Nitrogênio)	54
2.9.5	Processo em Cascata com Mistura de Refrigerante (MFCP)	55
2.9.6	Processo Axens Liquefin	57

2.9.7 Processo PRICO	59
2.10 Trocador de calor criogênico principal	61
2.10.1 Trocador de calor de espiral enrolada (SWHE)	61
2.10.2 Trocador de placa aletada (PFHE)	62
2.10.3 Diferenças entre os trocadores PFHE e SWHE	65
2.11 Justificativa para o estudo do processo APCI C3MR	65
2.12 Detalhamento do processo C3MR (Planta Melchorita - Peru)	67
2.12.1 Circuito termodinâmico de propano	67
2.12.2 Circuito Termodinâmico da mistura de refrigerante	71
2.13 Revisão bibliográfica	75
3 Modelo matemático do processo APCI-C3MR	78
3.1 Introdução	78
3.2 Objetivos do capítulo	78
3.3 Modelo matemático e Hipóteses simplificadoras	78
3.4 Ciclo de Pré-resfriamento	81
3.4.1 Condensador	81
3.4.2 Pós-resfriador	84
3.4.3 Evaporadores	85
3.4.3.1 Evaporadores GN – C ₃ H ₈	86
3.4.3.2 Evaporadores da MR – C ₃ H ₈	94
3.4.4 Compressor	100
3.4.5 Taxa de transferência de calor dos evaporadores	104
3.4.5.1 Evaporadores GN – C ₃ H ₈	104
3.4.5.2 Evaporadores MR – C ₃ H ₈	104
3.4.1.5 Potência do compressor	105
3.4.7 Válvulas de expansão	105
3.4.8 Separadores	106
3.5 Ciclo da mistura de refrigerante	108
3.5.1 Compressores	108
3.5.2 Pós-resfriadores	121
3.5.3 Separador principal MCHE1	122
3.5.3.1 Propriedades da MR no separador segundo REFPROP	123
3.5.3.1.1 Título da mistura de refrigerante	123
3.5.3.1.2 Entalpia da mistura de refrigerante na saída do separador	124
3.5.3.1.3 Fração de líquido e vapor no separador	128
3.5.4 Trocador de calor criogênico principal	128
3.5.4.1 Primeira etapa do MCHE	127
3.5.4.2 Segunda etapa do MCHE	134
3.5.4.3 Terceira etapa do MCHE	136

3.6 Consumo por tonelada de GNL	139
3.7 Análise do Fator de Transformação	141
4 Resultados obtidos	142
4.1 Introdução	142
4.2 Análise Paramétrica para os diferentes pontos de operação	146
4.3 Análise paramétrica do circuito propano	153
4.3.1 Temperaturas de saídas dos evaporadores do circuito propano para o GN e a MR	153
4.3.1.1 Grupos de evaporadores para o GN	154
4.3.1.2 Grupos de evaporadores para a MR	156
4.3.2 Taxa de Transferência de calor nos evaporadores do circuito propano para o GN e a MR	158
4.3.2.1 Grupos de evaporadores para o GN	158
4.3.2.2 Grupos de evaporadores para a MR	160
4.3.3 Vazão mássica do circuito propano	162
4.3.3.1 Vazão mássica total	162
4.3.3.2 Grupos de evaporadores para o GN	163
4.3.3.3 Grupos de evaporadores para a MR	167
4.3.4 Potência total do circuito de propano	171
4.3.5 Título da MR na saída do evaporador 1	174
4.3.6 COP do circuito do propano	175
4.4 Análise paramétrica do circuito da mistura de refrigerante	177
4.4.1 Primeira parte do MCHE	177
4.4.2 Segunda parte do MCHE	178
4.4.3 Terceira parte do MCHE	178
4.4.4 Análise das curvas	179
4.4.4.1 Vazão de calor trocado no processo	179
4.4.4.2 Potência total consumida no processo	180
4.4.4.3 Taxa de transferência de calor e potência total no processo variando a temperatura T_{65} (temperatura de saída do GNL do MCHE)	180
4.4.4.4 Análise do COP do processo variando-se a temperatura T_{65} (temperatura de saída do GNL do MCHE) e a vazão mássica de GN.	182
4.4.4.5 Coeficiente de consumo de energia, E_c .	183
4.4.4.6 Fator de Transformação	184
5 Conclusões	185
5.1 Recomendações para trabalhos futuros	186
6 Referencias bibliográficas	188

Lista de figuras

Figura 1. Demanda mundial de energia primária (World Energy Outlook , 2006)	27
Figura 2. Viabilidade técnica e econômica do GNL em função das reservas e da distancia entre produção e consumo (Morgan, 2005) .	28
Figura 3. Comércio de GNL no mundo (BP, 2006)	30
Figura 4. Mapa do Caribe, América do Sul e Central, e Peru, mostrando as plantas projetadas, em construção e existentes. (PLUSPETROL, 2008)	32
Figura 5. Localização do terminal de GNL no Rio de Janeiro (Gonçalves, 2007).	34
Figura 6. Produção de GNL segundo os processos de liquefação, de acordo com estudo da Simmons & Company International (Kessler, 2005)	38
Figura 7. Diagrama de uma planta para a produção de GNL (Shukri et al, 2006).	40
Figura 8. Localização das principais unidades de uma planta de GNL (Del Solar, 2004)	41
Figura 9. Custo de investimento de uma planta de liquefação de GN por MTPA (STATOIL, 2004)	46
Figura 10. Processo de Cascata Clássica (Förg, 2003)	48
Figura 11. Processo Phillips de Cascata Otimizada (Andress, 1996)	50
Figura 12. Variação da temperatura (°C) do GN versus % de calor trocado no processo de cascata otimizada (Andress, 1996)	50
Figura 13. Esquema simplificado – Planta APCI C3-MR (Martin et al, 2005)	52
Figura 14. Processo APCI C3MR com pré-resfriamento por ciclo de propano e circuito de MR (N ₂ , CH ₄ , C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈) (Shukri et al, 2004).	53
Figura 15. Variação da temperatura de GN e refrigerantes (°C) com a porcentagem de troca de calor (%) (Shukri et al, 2004)	53
Figura 16. Esquema do processo simplificado AP-X (Martin et al, 2005).	55
Figura 17. Esquema do Processo em Cascata com Fluido Misturado, MFCP (Shukri et al, 2004)	57
Figura 18. Esquema do Processo Axens Liquefin (Axens IFP Group Technologies, 2004)	59
Figura 19. Curva do comportamento da temperatura do GN no processo de Liquefação (Martin, 2008)	59
Figura 20. Processo PRICO da Black & Veatch (Mokhatab, 2006)	60
Figura 21. Parte interna do Trocador de Calor de Espiral Enrolada (Linde, 2005)	62
Figura 22. (SWHE) Trocador de Calor de Espiral Enrolada (Kessler, 2007)	62

Figura 23. Detalhe interno de um trocador de calor de placa aletada (PFHE) (Rivera et al, 2008)	63
Figura 24. (PFHE) Vista geral do trocador de Calor de Placa Aletada (PFHE) (Martin, 2004)	64
Figura 25. Vista do Trocador de Calor de Placa Aletada (PFHE) (Martin, 2004)	64
Figura 26. Circuito de pré-resfriamento com Propano (PERU LNG, 2003)	68
Figura 27. Esquema simplificado de circuito de pré-resfriamento.	70
Figura 28. Diagrama P - h do ciclo de compressão de vapor de propano.	71
Figura 29. Circuito de Liquefação com Mistura de Refrigerante (MR)(PERU LNG, 2003)	73
Figura 30. Esquema simplificado de circuito de liquefação.	74
Figura 31. Diagrama P-h da MR (10% N ₂ ,40% CH ₄ ,40% C ₂ H ₆ ,10% C ₃ H ₈).	75
Figura 32. Diagrama P-h do GN obtido com REFPROP (Lemmon et al, 2002)	80
Figura 33. Diagrama P-h da MR (10%N ₂ , 40%CH ₄ , 40%C ₂ H ₆ , 10%C ₃ H ₈) obtido com REFPROP (Lemmon et al, 2002)	80
Figura 34. Esquema geral da etapa de pré-resfriamento para a produção de frio e consumo do compressor.	82
Figura 35. Volume de controle do condensador 1.	83
Figura 36. Volume de controle do pós resfriador	84
Figura 37. Volume de controle do evaporador de GN – C ₃ H ₈	86
Figura 38. Variação da entalpia em função da temperatura para o GN a uma pressão de 6,3 MPa.	89
Figura 39. Volume de controle do evaporador da MR	94
Figura 40. Diagrama P-h do circuito de propano	100
Figura 41. Volume de controle do compressor	101
Figura 42. Exemplo de volume de controle da válvula de estrangulamento	105
Figura 43. Volume de controle do separador	107
Figura 44. Volume de controle do compressor de baixa pressão	108
Figura 45. Esquema geral da etapa de liquefação para a produção de frio e consumo do compressor.	109
Figura 46. Variação da entropia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -70 até 80 °C	112
Figura 47. variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -70 até 80 °C	112
Figura 48. Variação da entropia da MR em função da temperatura, a uma pressão de 2 MPa, entre 0 e 80 °C.	114
Figura 49. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2 MPa, entre 0 e 80 °C.	115

Figura 50. Variação da entropia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa, entre 0 e 80 °C	117
Figura 51. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa, entre 0 e 80 °C.	117
Figura 52. Variação da entropia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa, entre 0 e 80 °C.	119
Figura 53. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa, entre 0 e 80 °C	120
Figura 54. Volume de controle do pós-resfriador.	122
Figura 55. Variação do título de vapor da MR em função da temperatura de saída do evaporador 1.	124
Figura 56. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa, entre -182 e -30 °C	126
Figura 57. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa, entre -28 e 80 °C	127
Figura 58. Volume de controle do condensador da MR.	128
Figura 59. Volume de controle da primeira etapa do MCHE.	129
Figura 60. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa, entre -180 e -72 °C	131
Figura 61. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -182 e -124 °C	132
Figura 62. Variação da entalpia do GN em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -180 e -90 °C	133
Figura 63. Variação da entalpia do GN em função da temperatura à pressão atmosférica, entre -180 e -160,8 °C	133
Figura 64. Volume de controle da segunda etapa do MCHE.	134
Figura 65. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -124 e -72 °C	136
Figura 66. Volume de controle da terceira etapa do MCHE.	137
Figura 67. Variação da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -70 e 80 °C	139
Figura 68. Temperatura de saída do GN dos trocadores de calor em função da efetividade $\epsilon_{EVA,GN}$ no ciclo de pré-resfriamento.	146
Figura 69. Taxa de troca de calor nos evaporadores entre o GN e o propano em função da efetividade do evaporador $\epsilon_{EVA,GN}$, no ciclo de pré-resfriamento.	147
Figura 70. Vazão mássica de refrigerante versus efetividade dos evaporadores de GN.	148
Figura 71. Temperatura de saída da MR dos trocadores de calor versus efetividade $\epsilon_{EVA,MR}$ no ciclo de pré-resfriamento.	148

Figura 72. Taxa de troca de calor nos evaporadores entre a MR e o propano em função da efetividade $\epsilon_{EVA,MR}$ no ciclo de pré-resfriamento.	149
Figura 73. Vazão mássica de refrigerante versus efetividade dos evaporadores da MR.	150
Figura 74. Variação do consumo total de energia do compressor centrífugo versus a efetividade $\epsilon_{EVA,GN}$ no ciclo de pré-resfriamento.	150
Figura 75. Variação do título da MR na saída do evaporador 1 em função da efetividade no ciclo de pré-resfriamento, com uma efetividade $\epsilon_{EVA,GN}=0,98$ no ciclo de pré-resfriamento.	151
Figura 76. Variação do coeficiente de desempenho do sistema versus efetividade do evaporador do GN, para $\epsilon_{EVA,MR}=0,98$, $\epsilon_{EVA,MR}=0,9$, $\epsilon_{EVA,MR}=0,85$	152
Figura 77. Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 1	154
Figura 78. Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 2	154
Figura 79. Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 3.	155
Figura 80. Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 4	155
Figura 81. Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 1	156
Figura 82. Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 2	156
Figura 83. Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 3	157
Figura 84. Comportamento da temperatura de saída da MR versus a Efetividade do evaporador 4.	157
Figura 85. Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 1.	158
Figura 86. Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 2.	159
Figura 87. Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 3.	159
Figura 88. Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 4.	160
Figura 89. Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 1.	160
Figura 90. Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 2.	161

Figura 91. Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 3.	161
Figura 92. Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 4.	162
Figura 93. Comportamento com a efetividade da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 11.	163
Figura 94. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 16.	164
Figura 95. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 18.	164
Figura 96. Comportamento da vazão mássica do propao em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 19.	165
Figura 97. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 22.	165
Figura 98. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 24.	166
Figura 99. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 25.	166
Figura 100. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 21.	167
Figura 101. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 29.	168
Figura 102. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 30.	168
Figura 103. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 32.	169
Figura 104. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 34.	169
Figura 105. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 36.	170
Figura 106. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 38.	170
Figura 107. Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 40.	171
Figura 108. Comportamento da potência total consumida pelo compressor do circuito propano em função da efetividade dos evaporadores de GN.	172
Figura 109. Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 1-2' em função da efetividade dos evaporadores de GN.	172
Figura 110. Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 4-5' em função da efetividade dos evaporadores de GN.	173

Figura 111. Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 7-8' em função da efetividade dos evaporadores de GN.	173
Figura 112. Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 10-11' em função da efetividade dos evaporadores de GN.	174
Figura 113. Comportamento do título na saída do evaporador 1 em função da efetividade dos evaporadores da MR.	175
Figura 114. Comportamento do COP do circuito de propano em função das efetividades dos evaporadores de GN, tendo 0,98 como efetividade dos evaporadores da MR.	176
Figura 115. Comportamento do COP do circuito de propano em função das efetividades dos evaporadores de GN, tendo 0,90 como efetividade dos evaporadores da MR.	176
Figura 116. Comportamento do COP do circuito de propano em função das efetividades dos evaporadores de GN, tendo 0,85 como efetividade dos evaporadores da MR.	177
Figura 117. Comportamento da troca de calor em função da vazão mássica do GN.	179
Figura 118. Comportamento da potência total do processo em função da vazão mássica do GN.	180
Figura 119. Comportamento da troca de calor em função da temperatura de saída do GNL (T65).	181
Figura 120. Comportamento do trabalho em função da temperatura de saída do GNL (T65).	181
Figura 121. Comportamento do COP em função da temperatura de saída do GNL (T65).	182
Figura 122. Comportamento do COP em função da vazão mássica do GN.	182
Figura 123. Comportamento da E_c em função da vazão mássica do GN.	183
Figura 124. Comportamento do fator em função da vazão mássica do GN.	184

Lista de tabelas

Tabela 1. Exportações dos países produtores, em bilhões de metros cúbicos (BP, 2006).	29
Tabela 2. Composição do gás natural e suas propriedades (ASHRAE, 1997).	38
Tabela 3. Composição, em %, do GNL para distinta origem (Pita, 2006).	39

Tabela 4. Tecnologia existente de Plantas Base Load (Mølnvik, 2003).	44
Tabela 5. Novos processos de liquefação de GN (Pita, 2006)	45
Tabela 6. Comparações entre os trocadores de calor PFHE e SWHE (Linde, 2005).	65
Tabela 7. Comparação do uso de energia em processos de GNL (Salof, 2008)	66
Tabela 8. Valores da entalpia específica em função da temperatura para o GN a uma pressão de 6,3 MPa e composição 90% CH ₄ e 10% C ₂ H ₆ .	88
Tabela 9. Valores da entropia em função da temperatura para a MR a uma pressão de 0,47 MPa.	111
Tabela 10. Valores da entalpia da MR em função da temperatura para a MR a uma pressão de 0,47 Mpa	112
Tabela 11. Valores da entropia da MR em função da temperatura, a uma pressão de 2 MPa	113
Tabela 12. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2 MPa	114
Tabela 13. Valores da entropia em função da temperatura para a MR a uma pressão de 2,91 MPa Figura 125 Variação da entropia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa, entre -70 até 80 °C	116
Tabela 14. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa.	116
Tabela 15. Valores da entropia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa.	118
Tabela 16. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 2,91 MPa.	119
Tabela 17. Valores do título da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa.	123
Tabela 18. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa, entre -182°C e -30 °C .	125
Tabela 19. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa, entre -28 °C e 80 °C.	127
Tabela 20. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 5,2 MPa.	130
Tabela 21. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa.	131
Tabela 22. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa.	132
Tabela 23. Valores da entalpia do GN em função da temperatura à pressão atmosférica.	133

Tabela 24. Valores da entalpia da MR em função da temperatura a uma pressão de 0,47 MPa.	135
Tabela 25. Valores da entalpia da MR em função da temperatura à pressão de 0,47 MPa.	138
Tabela 26. Composição dos refrigerantes do gás natural.	142
Tabela 27. Valores das pressões analisadas na simulação.	143
Tabela 28. Temperaturas de trabalho calculado pela simulação.	143

Simbologia

COP_{C3}	Coeficiente de desempenho do circuito propano	–
COP_{Sist}	Coeficiente de desempenho do sistema	–
c_p	Calor específico a pressão constante	kJ/kgK
$\varepsilon_{h_{EVA,GN}}$	Efetividade de troca de calor nos evaporadores que resfriam o GN	–
$\varepsilon_{h_{EVA,MR}}$	Efetividade de troca de calor nos evaporadores que resfriam a MR	–
E_c	Coeficiente de consumo de energia.	kW/Ton-dia
f_{TGNL}	Fator de transformação do GNL	%
h	Entalpia específica	kJ/kg
\dot{m}	Vazão mássica	kg/s
\dot{m}_{GN}	Vazão mássica do gás natural	kg/s
\dot{m}_{MR}	Vazão mássica da mistura de refrigerante	kg/s
P	Pressão absoluta	bar
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor	kW
T	Temperatura absoluta	K
s	Entropia específica	kJ/kg-K
\dot{W}	Taxa de trabalho fornecido ou potência elétrica	kW
x	Titulo da mistura de refrigerante	–

Símbolos gregos

ε	Efetividades	–
η	Eficiência	–
ρ	Densidade	

Sub-índices e abreviaturas

<i>CON</i>	Condensador
<i>C3</i>	Circuito de propano
<i>EVA</i>	Evaporador
<i>GN</i>	Gás natural
<i>in</i>	Entrada
<i>liq</i>	Líquido
<i>out</i>	Saída
<i>max</i>	Máximo
<i>MCHE</i>	Trocador de calor criogenico principal
<i>MR</i>	Mistura de refrigerante
<i>Sist</i>	Sistema total
<i>sGN</i>	Saída do Gás Natural
<i>sMR</i>	Saída da mistura de refrigerante
<i>vap</i>	Vapor
1	Entrada de refrigerante ao compressor do separador 1
2	Saída do refrigerante do impulsor 1
3	Entrada de refrigerante ao compressor do separador 2
4	Entrada do refrigerante do impulsor 2
5	Saída do refrigerante do impulsor 2
6	Entrada de refrigerante ao compressor do separador 3
7	Entrada do refrigerante do impulsor 3
8	Saída do refrigerante do impulsor 3
9	Entrada de refrigerante ao compressor do separador 4
10	Entrada do refrigerante do impulsor 4
11	Saída de refrigerante do compressor
12	Saída do refrigerante do condensador 1
13	Entrada do refrigerante no acumulador
14	Saída do refrigerante no acumulador
15	Saída do refrigerante do condensador 2
16	Derivação do fluxo de refrigerante para resfriar GN
17	Saída de refrigerante da válvula de expansão

- 18 Saída do refrigerante do evaporador de GN 4
- 19 Saída do refrigerante no evaporador de de GN4
- 20 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 21 Saída do refrigerante do evaporador de GN 3
- 22 Saída do refrigerante no evaporador de GN3
- 23 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 24 Saída do refrigerante do evaporador de GN 2
- 25 Saída do refrigerante no evaporador de GN2
- 26 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 27 Saída do refrigerante do evaporador de GN 1
- 28 Derivação do fluxo de refrigerante para resfriar a MR
- 29 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 30 Saída do refrigerante do evaporador da MR 4
- 31 Entrada no separador 4
- 32 Saída do refrigerante no evaporador da MR4
- 33 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 34 Saída do refrigerante do evaporador da MR 3
- 35 Entrada no separador 3
- 36 Saída do refrigerante no evaporador da MR3
- 37 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 38 Saída do refrigerante do evaporador da MR 2
- 39 Entrada no separador 2
- 40 Saída do refrigerante no evaporador da MR2
- 41 Saída de refrigerante da válvula de expansão
- 42 Saída do refrigerante do evaporador da MR 1
- 43 Entrada no separador 1
- 44 Entrada da mistura de refrigerante ao compressor de baixa
- 45 Saída da mistura de refrigerante ao compressor de baixa
- 46 Entrada da mistura de refrigerante ao compressor de media
- 47 Saída da mistura de refrigerante ao compressor de media
- 48 Entrada do refrigerante ao separador
- 49 Entrada da mistura de refrigerante ao compressor de alta
- 50 Saída da mistura de refrigerante ao compressor de alta
- 51 Saída da MR no condensador 3
- 52 Saída da MR no evaporador 4

53	Saída da MR no evaporador 3
54	Saída da MR no evaporador 2
55	Saída da MR no evaporador 1
56	Saída da MR do separador em estado de líquido saturado
57	Saída da MR do separador em estado vapor saturado
58	Saída da MR em estado líquido da segunda etapa do MCHE Saída da MR na segunda etapa do MCHE à temperatura de
59	evaporação
60	Saída da MR no estado vapor da segunda etapa do MCHE
61	Saída da MR do MCHE 1 na primeira etapa ao líquido saturado Saída da MR na primeira etapa do MCHE a temperatura de
62	evaporação
63	Entrada do GN no MCHE
64	Saída do GN do MCHE na primeira etapa
65	Saída do GN do MCHE em estado líquido
66	Saída da MR do MCHE ao vapor saturado

Lista de siglas

C3MR	Propano+ Mistura de refrigerante
OCR	Refrigeração com cascata otimizada
SMR	Refrigeração com uma mistura
DMR	Dupla mistura de refrigerante
C3R	Pré-resfriamento com propano
PCMR	Pré-resfriamento com mistura de refrigerante
EXP, TEX	Turbo Expansor