#### 4 Resultados obtidos

### 4.1 Introdução

O Modelo matemático descrito no capítulo 3 foi implementado no software EES versão 2004. O referido software utiliza o método de Newton-Raphson para a solução de equações não lineares. Também foi utilizado o proograma REFPROP, versão 7, (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties) desenvolvido pelo NIST (Lemmon et al, 2002), o qual proporciona tabelas e gráficos das propriedades termodinâmicas das misturas (GN e MR) mediante três modelos distantes. A equação de Helmholtz, a equação de estado modificado de Benedict-Webb-Rubin, e um modelo estendido da equação de estados correspondentes (ECS).

Para a análise dos refrigerantes e o GN tem-se a tabela 26 com a porcentagem das composições utilizadas na simulação.

| Componentes | Gás<br>Natural | Mistura de<br>Refrigerante | Propano |  |
|-------------|----------------|----------------------------|---------|--|
| Metano      | 0.90 %         | 0.40 %                     | -       |  |
| Etano       | 0.10 %         | 0.40 %                     | -       |  |
| Propano     | -              | 0.10 %                     | 100 %   |  |
| Nitrogênio  | -              | 0.10 %                     | -       |  |

Tabela 26 Composição dos refrigerantes do gás natural.

O presente trabalho contou com poucas referências bibliográficas para a obtenção de valores típicos de operação. e alguns dados foram tomados do estudo do projeto da Planta Melchorita (pela Golder Associates), e alguns foram

escolhidos dentro de uma faixa de valores aceitável, incrementando-se a incerteza na modelagem, o que influenciou de certa forma os resultados finais.

O modelo é um modelo flexível onde os dados de entradas podem ser variados dentro de uma faixa tolerável. Já que o programa EES (EES, 2004) não conta com uma biblioteca ampla de misturas de refrigerantes, encontraram-se difículdades na hora de determinar as propriedades termodinâmicas das mesmas.

Com os dados de entrada no programa, procurou-se idealizar o sistema de modo a ter resultados de temperaturas, título, pressões e vazões similares aos da Planta Melchorita.

Os resultados foram avaliados para várias condições de pressão nos evaporadores do ciclo de pré-resfriamento. As pressões testadas são apresentadas nas tabelas 27 e 28, a seguir:

| Pressão nos evaporadores | P <sub>EVA,1</sub> | P <sub>EVA,2</sub> | P <sub>EVA,3</sub> | P <sub>EVA,4</sub> |
|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Casos                    | (kPa)              | (kPa)              | (kPa)              | (kPa)              |
| Caso I                   | 110                | 210                | 360                | 630                |
| Caso II                  | 120                | 220                | 380                | 650                |
| Ponto de trabalho        | 130                | 239                | 406                | 685                |
| Caso III                 | 140                | 260                | 430                | 710                |

Tabela 27 Valores das pressões analisadas na simulação.

Para as pressões apresentadas na tabela 27 foram obtidas as seguintes temperaturas para o propano, que é o refrigerante na etapa de pré-resfriamento. É avaliado o ponto de trabalho como ponto de referência para as condições de operação da Planta Melchorita.

| Temperaturas nos<br>evaporadores/Casos | T <sub>EVA,1</sub><br>(°C) | Т <sub>ЕVА,2</sub><br>(°С) | T <sub>EVA,3</sub><br>(°C) | T <sub>EVA,4</sub><br>(°C) |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Caso I                                 | -40,21                     | -24,15                     | -8,73                      | 9,062                      |
| Caso II                                | -38,19                     | -22,89                     | -7,07                      | 10,73                      |
| Ponto de trabalho                      | -36,29                     | -20,63                     | -5                         | 12,61                      |
| Caso III                               | -34,5                      | -18,28                     | -3,18                      | 13,9                       |

Tabela 28 Temperaturas de trabalho calculadas pela simulação.

Outros dados de entrada na simulação do processo APCI C3MR são:

As vazões mássicas, tanto do GN e da MR:  $m_{GN} = 150 kg / s$ ,  $m_{MR} = 426, 32 kg / s$ 

A temperatura de saída do primeiro condensador do circuito de propano:

 $T_{12} = 41^{\circ} C$ 

A temperatura de entrada do ar,  $T_{ar:in} = 25^{\circ} C$ .

A eficiência isentrópica do compressor do circuito de propano,  $\eta_{isse} = 0.83$ .

As pressões de trabalho do condensador do circuito de propano,  $P_{COND1}$ , e do circuito da MR que é a pressão à saída do último compressor.

As efetividade da troca de calor para os evaporadores do circuito propano,  $\varepsilon_{h_{EVA,GN}}, \varepsilon_{h_{EVA,MR}}$ 

A temperatura de entrada do GN,  $T_{in.GN4} = 29^{\circ} C$ 

A temperatura de entrada do MR,  $T_{in MR4} = 29^{\circ}C$ 

A eficiência isentrópica do compressor do circuito da MR,  $\eta_{isse} = 0.85$ .

As temperaturas as saídas depois de cada pós resfriador do circuito da MR:

 $T_{46} = 29^{\circ}C \ , \ T_{48} = 29^{\circ}C \ , \ T_{51} = 29^{\circ}C \ .$ 

A temperatura de saída do GN do MCHE, da primeira etapa:  $T_{65} = -163^{\circ}C$ A temperatura de saída da MR na primeira etapa do MCHE:  $T_{62} = -176^{\circ}C$ A temperatura de saída do GN, na segunda etapa do MCHE:  $T_{64} = -100^{\circ}C$ A temperatura de saída da MR da segunda etapa do MCHE para a parte gás:  $T_{60} = -100^{\circ}C$ 

A temperatura de saída da MR na segunda etapa do MCHE:  $T_{59} = -120^{\circ}C$ As pressões de trabalho no circuito da MR, baixa, média, alta, e no MCHE:  $P_{B,MCHE} = 2MPa$ ,  $P_{M,MCHE} = 2,9MPa$ ,  $P_{A,MCHE} = 5,2MPa$ ,  $P_{MCHE} = 0,47MPa$ . O poder calorífico inferior do GN:  $PCI_{GN} = 39867,023(kJ/m^3)$ 

As incógnitas para o circuito de propano na simulação são:

- As vazões mássicas do refrigerante em cada ponto do circuito;
- As temperaturas de saídas do GN de cada evaporador;
- As temperaturas de saídas da MR de cada evaporador;
- As taxas de troca de calor para os 8 evaporadores;
- A potência consumida pelo compressor;
- A temperatura do refrigerante na saída do compressor;
- As temperaturas de trabalho de cada evaporador;
- As entalpias do GN e da MR em cada ponto do circuito;
- As entropias do refrigerante em cada etapa do compressor;
- O coeficiente de desempenho do circuito;
- O título da mistura na saída do último evaporador;
- A temperatura de saída do GN do circuito;
- A temperatura de saída da MR do circuito;
- A densidade do GN:  $\rho_{GN} = 0,74073(kg / m^3)$

As incógnitas para o circuito da MR na simulação são:

- As temperaturas de saída da MR em cada compressor;
- As entalpias da MR no circuito
- As entropias da MR em cada etapa do compressor;
- A temperatura de saída da MR líquido na primeira etapa do MCHE;
- A temperatura de saída da MR do MCHE;

Para o sistema como um todo foram também incógnitas:

- A potência total necessária para que o sistema opere;
- A taxa de transferência de calor no sistema;
- O coeficiente de desempenho do sistema;
- O fator de transformação do GNL;

# Análise Paramétrica para os diferentes pontos de operação

Para a análise paramétrica foram alteradas as seguintes variáveis: as efetividades dos evaporadores para o GN e a MR ( $\varepsilon_{EVA,GN}$ ,  $\varepsilon_{EVA,MR}$ ), a vazão mássica do GN e a temperatura de saída do GNL.

As variáveis alteradas fornecem o comportamento das seguintes variáveis a ser apresentadas: as temperaturas do GN e da MR na entrada e saída de cada evaporador, as vazões mássicas do refrigerante propano, a potência consumida pelo compressor no circuito, a taxa de transferência de calor, título da MR, COP e as demais propriedades termodinâmicas dos fluxos.

As figuras a seguir apresentam o comportamento dos parâmetros mais importantes e têm por objetivo mostrar o a desempenho do sistema de refrigeração a temperaturas criogênicas.

A figura 68 mostra as quedas das temperaturas de saídas do GN nos evaporadores. As equações de troca de calor e as equações de entalpia do GN em função da temperatura determinaram o comportamento das temperaturas no sistema de pré-resfriamento.



Figura 68 Temperatura de saída do GN dos trocadores de calor em função da efetividade  $\boldsymbol{\epsilon}_{\text{EVA,GN}}$  no ciclo de pré-resfriamento.

Como pode ser observada na figura 69, a taxa de fornecimento de calor nos evaporadores varia com o aumento da efetividade dos equipamentos. Para a variável  $\dot{Q}_{GN4}$  o aumento é linear, visto que somente depende da entalpia de saída do GN. O comportamento desta reta é representado pela equação (3.167), sendo que demais variáveis da equação constantes.

O gráfico mostra um crescimento acentuado da troca de calor até uma efetividade de 0,6.



Figura 69 Taxa de troca de calor nos evaporadores entre o GN e o propano em função da efetividade do evaporador  $\epsilon_{\text{EVA.GN}}$ , no ciclo de pré-resfriamento.

A figura 70 mostra a variação da vazão mássica no circuito de propano nos evaporadores que pré-resfriam o GN. Observa-se o aumento da vazão de refrigerante nos trocadores de calor. Este comportamento é representado pelas equações: (3.13), (3.29), (3.41) e (3.56).



Figura 70 Vazão mássica de refrigerante versus efetividade dos evaporadores de GN.

No caso das temperaturas de saídas da MR nos evaporadores é mostrado na figura 71, os evaporadores para pré-resfriar a MR trabalham com uma faixa na efetividade entre 0,65 e 1.



Figura 71 Temperatura de saída da MR dos trocadores de calor versus efetividade  $\epsilon_{\text{EVA,MR}}$  no ciclo de pré-resfriamento.

Na figura 72 esta representado o comportamento da taxa de troca de calor nos evaporadores da MR em função da efetividade. Os cálculos foram analisados mediante as equações: (3.71), (3.86), (3.99), e (3.114).

O aumento das taxas de troca de calor,  $\dot{Q}_{MR1}$ ,  $\dot{Q}_{MR2}$ ,  $\dot{Q}_{MR3}$ ,  $\dot{Q}_{MR4}$ , depende da efetividade dos evaporadores. O comportamento do  $\dot{Q}_{MR4}$  é linear, devido ao fato de somente depender da entalpia de saída da MR, no quarto evaporador.



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.

Na figura 73 observa-se o comportamento da vazão do refrigerante propano nos evaporadores que pré-resfriam à MR, segundo a efetividade dos evaporadores. Observa-se que o aumento da efetividade faz aumentar a vazão. Isto porque o sistema precisa de maior vazão de refrigerante quanto mais eficiente forem os evaporadores.

Por outro lado a figura 74 representa a potência necessária para que o sistema tenha a capacidade para pré-resfriar as vazões mássicas do GN e da MR. Conclui-se que, com maior efetividade, o circuito de propano demandará uma maior potência, muito embora a tendência da potência seja quase assintótica.



Figura 73 Vazão mássica de refrigerante versus efetividade dos evaporadores da MR.



Figura 74 Variação do consumo total de energia do compressor centrifugo versus a efetividade  $\epsilon_{EVA,GN}$  no ciclo de pré-resfriamento.

A figura 75 mostra o comportamento do título da MR na saída do primeiro evaporador (segundo esquema geral do circuito de propano). Observa-se que existe uma queda do título para uma maior efetividade dos evaporadores para a MR. Isto porque, quanto, maior for a efetividade menor será a porcentagem de gás da MR.



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.

Para o circuito de propano foi analisado o coeficiente de desempenho (COP), como mostra a figura 76. Variou-se a efetividade dos evaporadores para o GN e foram estudados três valores da efetividade dos evaporadores da MR. Mostra-se que o maior COP é determinado para uma efetividade  $\varepsilon_{EVA,MR}=0,98$  como era de se esperar.



Figura 76 Variação do coeficiente de desempenho do sistema versus efetividade do evaporador do GN, para  $\epsilon_{\text{EVA},\text{MR}}$ =0,98 ,  $\epsilon_{\text{EVA},\text{MR}}$ =0,9 ,  $\epsilon_{\text{EVA},\text{MR}}$ =0,85

## 4.3 Análise paramétrica do circuito propano

Para a análise paramétrica do circuito propano variaram-se as pressões nos evaporadores para quatro diferentes valores. Variou-se, também, em grupo, a efetividade dos trocadores.

O primeiro grupo foi composto pelos evaporadores para o GN, com a efetividade variando de 0 até 1. O segundo grupo, para evaporadores com a MR, com a efetividade variando de 0,65 até 1.

#### 4.3.1

### Temperaturas de saídas dos evaporadores do circuito propano para o GN e a MR

As figuras 77 a 80 mostram os gráficos das temperaturas de saída do GN em função da efetividade dos quatro evaporadores no circuito de propano. Verifica-se que a maior redução da temperatura do GN é produzida quando as pressões de evaporação empregadas são menores, mantidos o mesmo valor para a temperatura de entrada do GN, em cada evaporador. A redução da temperatura é mais relevante quando as efetividades aumentam, seguindo tendência esperada.

Observa-se também, o comportamento quase linear da temperatura de saída do quarto evaporador, tanto para o GN como para a MR. Tal comportamento é devido à dependência somente da temperatura de saída, já que a temperatura de entrada deste evaporador é um valor prescrito.

Para as temperaturas de saída da MR no circuito de propano, apresentadas nas figuras 81 a 84, os comportamentos são semelhantes ao caso do GN. Baixam as temperaturas conforme baixam as pressões de evaporação. Igualmente, com o aumento das efetividades dos evaporadores do circuito de propano, reduzem-se as temperaturas de saída da MR em cada evaporador.



#### Grupos de evaporadores para o GN



Figura 77 Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 1



Figura 78 Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 2



Figura 79 Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 3.



Figura 80 Comportamento da temperatura de saída do GN em função da efetividade do evaporador 4

4.3.1.2

#### Grupos de evaporadores para a MR



Figura 81 Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 1



Figura 82 Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 2



Figura 83 Comportamento da temperatura de saída da MR em função da efetividade do evaporador 3



Figura 84 Comportamento da temperatura de saída da MR versus a efetividade do evaporador 4.

# Taxa de Transferência de calor nos evaporadores do circuito propano para o GN e a MR

Os comportamentos das taxas de transferência de calor nos evaporadores são mostrados nas figuras 85 a 88 para o GN e nas figuras 89 a 92 para a MR.

As curvas apresentam a mesma tendência, sempre em crescimento com a efetividade dos trocadores. Isto era esperado, já que a troca de calor está relacionada com o comportamento da temperatura, pois a taxa de transferência de calor está diretamente ligada à efetividade.

A tendência das curvas, a partir de uma efetividade de 0,7 aproximadamente, é quase assintótica.

O comportamento linear para o evaporador 4 é devido que a taxa de transferência de calor depende do valor da temperatura de saída do quarto evaporador.

#### 4.3.2.1

#### Grupos de evaporadores para o GN



Figura 85 Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 1.



Figura 86 Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 2.



Figura 87 Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 3.



Figura 88 Comportamento da taxa de transferência de calor para o GN versus a efetividade do evaporador 4.

#### 4.3.2.2

#### Grupos de evaporadores para a MR

Figura 89 Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 1.



Figura 90 Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 2.



Figura 91 Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 3.



Figura 92 Comportamento da taxa de transferência de calor para a MR versus a efetividade do evaporador 4.

#### 4.3.3

#### Vazão mássica do circuito propano

# 4.3.3.1

#### Vazão mássica total

A vazão de propano foi levantada da figura 93, para os diferentes níveis de pressão. Observa-se que, para uma maior pressão de evaporação o sistema demanda menor vazão mássica.

A vazão aumenta com a efetividade de evaporador do GN, em virtude de maior capacidade com maiores valores de  $\varepsilon$ .



Figura 93 Comportamento com a efetividade da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 11.

# 4.3.3.2 Grupos de evaporadores para o GN

As vazões mássicas nos outros pontos do circuito são mostradas nas figuras 94 a 100. Observa-se a mesma tendência da figura 93 das curvas, sempre em aumento para uma maior efetividade, já que a capacidade aumenta com a efetividade e o sistema precisa de maior fluxo mássico para produzí-lo. Para pressões maiores o circuito de propano requer de menores vazões.



Figura 94 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 16.



Figura 95 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 18.



Figura 96 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 19.



Figura 97 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 22.



Figura 98 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 24.



Figura 99 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 25.



Figura 100 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador do GN no ponto 21.

### 4.3.3.3 Grupos de evaporadores para a MR

As vazões mássicas correspondentes para os evaporadores da MR são mostradas nas figuras 101 a 107. O comportamento é semelhante aos dos evaporadores de GN, sempre com a vazão mássica acompanhando a efetividade. Para os evaporadores da MR foram estudados valores de efetividade entre 0,65 e 1.



Figura 101 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 29.



Figura 102 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 30.



Figura 103 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 32.



Figura 104 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 34.



Figura 105 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 36.



Figura 106 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 38.



Figura 107 Comportamento da vazão mássica do propano em função da efetividade do evaporador da MR no ponto 40.

#### 4.3.4 Potência total do circuito de propano

O comportamento da potência total, e em cada estágio do compressor, são mostradas nas figuras 108 a 112. Segundo as figuras anteriores a diminuição da temperatura do GN é produto de uma troca de calor maior. Entretanto, para que o sistema apresente maior capacidade de calor é necessário um consumo maior. Como é mostrado na figura 28 (diagrama p-h do circuito de propano), os pontos que definem o trabalho do compressor compressor são estabelecidos pelas pressões de trabalho dos evaporadores. Então, quando as pressões nos evaporadores sobem, reduz-se o trabalho do compressor.

No comportamento deste parâmetro, a potência varia conforme a efetividade. Para uma maior efetividade o trabalho aumenta, pelos mativos já explicadas.



Figura 108 Comportamento da potência total consumida pelo compressor do circuito propano em função da efetividade dos evaporadores de GN.



Figura 109 Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 1-2' em função da efetividade dos evaporadores de GN.



Figura 110 Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 4-5' em função da efetividade dos evaporadores de GN.



Figura 111 Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 7-8' em função da efetividade dos evaporadores de GN.



Figura 112 Comportamento da potência consumida pelo compressor para a etapa 10-11' em função da efetividade dos evaporadores de GN.

## 4.3.5 Título da MR na saída do evaporador 1

O título da MR está relacionado com a temperatura de saída da MR do evaporador 1, como é mostrado na figura 113. A MR terá menor título a uma pressão menor.

A efetividade geral para os evaporadores da MR influi para que, na saída do evaporador 1, diminua o título.



Figura 113 Comportamento do título na saída do evaporador 1 em função da efetividade dos evaporadores da MR.

## 4.3.6 COP do circuito do propano

É apresentado, nas figuras 114 a 116, o comportamento do COP segundo as efetividades dos evaporadores de GN.

Observa-se que o COP aumenta com as efetividades dos evaporadores, como é esperado.

Para uma pressão de evaporação maior o sistema apresenta um maior COP. Isto porque o compressor trabalha com uma vazão de presão menor.



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.



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.



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.

#### 4.4

#### Análise paramétrica do circuito da mistura de refrigerante

A análise do circuito da MR é dividida em três partes. E foram assumidas temperaturas de entrada e saída de alguns dos fluxos mássicos. Os valores foram determinados segundo uma temperatura intermediária entre a entrada e saída da MR do MCHE.

## 4.4.1 Primeira parte do MCHE

Para a análise da primeira parte do MCHE, segundo a figura 59 são prescritas as temperaturas dos pontos 65 em -162 °C, que é a temperatura na qual

o GN se liquefaz e do ponto 62 em -176 °C, já que é preciso uma temperatura menor para que a MR possa trocar calor com o GN.

É importante mencionar que o ponto 65 se encontra a uma pressão de 5,2 MPa a igual ao ponto 64. O ponto 62 trabalha a uma pressão de 0,47 MPa, que é a pressão no interior do MCHE.

## 4.4.2 Segunda parte do MCHE

A segunda parte é analisada com a conservação de massa e um balanço de energia entre os pontos 68, 59 e o produto 69, segundo a figura 64.

### 4.4.3 Terceira parte do MCHE

Para a terceira parte da análise foram assumidas as temperaturas dos pontos 60, 64 em um valor de -100 °C, devido ao fato de ser desconhecida a geometria e desempenho do MCHE. Por isto foi estimada a temperatura intermediária no trocador principal, tanto para no GN quanto a MR, já que eles devem baixar suas temperaturas em -162 e -176 °C respectivamente.

Com o valor assumido nos pontos 60 e 64, e com as mesmas premissas de desconhecimento, a valor da temperatura no ponto 59, que é menor que o fluido 60 e 64 a resfriar, é assumido esta a uma temperatura de -120 °C.

O ponto 58 é produto das equações de conservação de massa e balanço de energia na terceira parte do MCHE

# 4.4.4.1 Vazão de calor trocado no processo

A figura 117 mostra a taxa de transferência de calor total do processo que é necessária para liquefazer uma determinada vazão mássica de refrigerante de GN.

Estes resultados foram obtidos para uma pressão padrão que é mantida ao longe do processo, conforme e mostrado na tabela 27.

Observa-se que a variação da vazão mássica implica um aumento da troca de calor no sistema, isto é, o processo vai aumentar a troca de calor conforme aumenta a vazão mássica do GN, como esperado.

As efetividades do circuito propano foram mantidas em 0,95 para os evaporadores de GN em 0,97, para os de MR.



Figura 117 Comportamento da troca de calor em função da vazão mássica do GN.

## 4.4.4.2 Potência total consumida no processo

Para a análise da potência do processo são considerados os consumos dos compressores do circuito da MR e do circuito de propano. A figura 118 mostra a potência em função da vazão mássica do GN. Relacionando as figuras 117 e 118, o comportamento da potência e da taxa de troca de calor apresentam semelhança. O aumento da vazão de GN implica um aumento de potência dos compressores para alcançar a capacidade térmica.



Figura 118 Comportamento da potência total do processo em função da vazão mássica do GN.

#### 4.4.4.3

# Taxa de transferência de calor e potência total no processo variando a temperatura T<sub>65</sub> (temperatura de saída do GNL do MCHE)

É analisado o comportamento da taxa de transferência de calor e potência do sistema variando-se a temperatura de saída do GNL do MCHE. Observa-se que o processo demanda mais capacidade térmica e mais potência por parte dos compressores para obter uma temperatura menor do GNL. Por exemplo para baixar em dois grados da temperatura do GNL, é preciso um acréscimo de 1000 kW.



Figura 119 Comportamento da troca de calor em função da temperatura de saída do GNL ( $T_{65}$ ).



Figura 120 Comportamento do trabalho em função da temperatura de saída do GNL  $(\rm T_{65}).$ 

# Análise do COP do processo variando-se a temperatura $T_{65}$ (temperatura de saída do GNL do MCHE) e a vazão mássica de GN.

O comportamento do COP com  $T_{65}$  é mostrado na figura 121. O COP decresce para uma maior temperatura de saída como esperado.



Figura 121 Comportamento do COP em função da temperatura de saída do GNL (T<sub>65</sub>).

Para uma variação da vazão mássica, o comportamento do COP é mostrado na figura 122.



Figura 122 Comportamento do COP em função da vazão mássica do GN.

## 4.4.4.5 Coeficiente de consumo de energia, E<sub>c</sub>.

O valor que relaciona a energia necessária para transformar uma tonelada de GNL é mostrado na figura 123. É um parâmetro que assume um valor característico para cada processo, segundo a tabela 6 apresentada do presente trabalho. O  $E_c$  decresce para uma produção maior de GNL, o que torna o processo uma opção favorável para ser aplicada na indústria, frente aos outros processos de liquefação.

Para o caso rodado no programa, o valor de  $E_c$  foi de 11,9 (kW/Ton-dia), um valor mais baixo comparado com o referencial de 12,2 (kW/Ton-dia) (Salof, 2008), já que não foram consideradas perdas nem a energia consumida por outros equipamentos.



Figura 123 Comportamento da  $E_c$  em função da vazão mássica do GN.

#### 4.4.4.6 Fator de Transformação

Foi necessário encontrar uma relação entre a energia consumida e a energia produzida no processo. Para isto, foi calculada a potência total disponível no GNL, a partir da vazão mássica do GN e seu poder calorífico, nas condições padrão conforme é mostrado na seção 3.7.

A figura 124 mostra o comportamento do fator ( $f_{TGNL}$ ), que decresce para uma produção maior. Isto quer dizer que a porcentagem gasta por cada aumento da vazão mássica de GNL sempre será cada vez menor.



Figura 124 Comportamento do fator em função da vazão mássica do GN.