

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA POLITÉCNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO EXERGOECONÔMICA DE SISTEMAS DE  
TRIGERAÇÃO**

**Fábio Moraes de Oliveira**

**São Paulo**

**2011**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO EXERGOECONÔMICA DE SISTEMAS DE  
TRIGERAÇÃO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

**Fábio Moraes de Oliveira**

**São Paulo**

**2011**

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO EXERGOECONÔMICA DE SISTEMAS DE  
TRIGERAÇÃO**

Trabalho de formatura apresentado à Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Graduação em Engenharia

**Fábio Moraes de Oliveira**

**Orientador:**

**Prof. Dr. Silvio de Oliveira Junior**

**Área de Concentração:**

**Engenharia Mecânica**

**São Paulo**

**2011**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Oliveira, Fabio Moraes de**

**Análise e otimização exergoeconômica de sistemas de tri-  
geração / F.M. de Oliveira. – São Paulo, 2011.**

**149 p.**

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

**1.Geração de energia elétrica (Otimização) 2.Refrigeração  
3.Termoeletricidade 4.Custo econômico I.Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia  
Mecânica II.t.**

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a cada professor que um dia tive.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por toda a luz e proteção ao longo destes vinte e cinco anos.

Aos meus familiares, em particular aos meus pais Adilson e Roseli, ao meu irmão Afonso, à minha avó Olga e à minha cunhada Ruth, que estiveram ao meu lado e cuja presença foi base fundamental a toda minha vida escolar.

Ao professor Sílvio, pela pronta atenção e competente orientação do presente trabalho de formatura.

O que conhecemos é uma gota.  
O que ignoramos, um oceano.  
(Sir. Isaac Newton)

## RESUMO

Diferentes configurações de plantas de trigeração permitem, através da queima de um combustível como o gás natural, a obtenção de três subprodutos: energia elétrica, vapor de água para determinado processo industrial e água gelada através de um chiller. Do ponto de vista de implementação na indústria, cabe à análise exergoeconômica fornecer a dimensão dos custos envolvidos neste processo. Assim, o presente trabalho busca definir as configurações mais viáveis do ponto de vista exergético e econômico para cada cenário de demanda. Os custos totais envolvidos foram otimizados em base monetária para diversos sistemas com a variação da magnitude de energia elétrica e refrigeração extraídas dos ciclos, detectando-se desta forma, vantagens comparativas ao investidor.

Palavras-chave: Trigeração. Exergoeconomia. Otimização. Custos.

## ABSTRACT

Different configurations allow trigeneration plants, by burning a fuel such as natural gas, to obtain three sub-products: electricity, steam water for an industrial process and cold water from a chiller. Considering the requirements for implementation in industry, the exergoeconomic analysis provides the scale of costs involved in this process. Thus, the purpose of the present study is to define the parameters making the application feasible in terms of exergy efficiency and costs for each demand scenario. The total monetary-based costs involved were optimized for different plants, varying electricity and cooling magnitudes in such way to determine the investor's comparative advantages.

Keywords: Trigeneration. Exergoeconomics. Optimization. Costs.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema da Planta Tetra-Combinada de Trigeração .....	24
Figura 2.2 - Planta-exemplo com fluxos de exergia e custos específicos .....	27
Figura 3.1 - Interface do EES para a ferramenta de otimização .....	32
Figura 3.2 - Convergência do método da busca direta para função de 2 variáveis X1 e X2 .....	33
Figura 5.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão .....	39
Figura 6.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio .....	49
Figura 7.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão .....	62
Figura 7.2 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio .....	63
Figura 8.1 - Ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão de Vapor .....	70
Figura 13.1 - Chiller de absorção de duplo efeito .....	108
Figura 14.1 - Ciclo combinado de potência e refrigeração por absorção .....	120

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 – Busca Direta.....	41
Gráfico 5.2 - Variável Métrica .....	43
Gráfico 5.3 - Algoritmo Genético – Função dos Indivíduos.....	44
Gráfico 5.4 - Algoritmo Genético – Função das Gerações .....	45
Gráfico 5.5 - Algoritmo Genético – Função da Taxa de Mutação Máxima .....	46
Gráfico 5.6 - Algoritmo de Nelder-Mead .....	47
Gráfico 6.1 - Rendimento Exergético em função da tolerância aplicada ao método. 51	
Gráfico 6.2 - Variável Métrica para a aplicação 2 .....	53
Gráfico 6.3 - Algoritmo Genético – Função dos Indivíduos.....	54
Gráfico 6.4 - Algoritmo Genético – Função das Gerações .....	55
Gráfico 6.5 - Algoritmo Genético – Função da Taxa de Mutação Máxima .....	57
Gráfico 6.6 - Simplex de Nelder-Mead.....	58
Gráfico 6.7 - Reiteraões do algoritmo Genético.....	60
Gráfico 8.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1 – Alg. Genético .....	72
Gráfico 8.2 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead .....	72
Gráfico 8.3 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1 – Alg. Genético .....	74
Gráfico 8.4 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead .....	74
Gráfico 8.5 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1 – Alg. Genético .....	76
Gráfico 8.6 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead .....	76
Gráfico 9.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1 .....	79
Gráfico 9.2 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2 .....	79

Gráfico 9.3 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1 .....	81
Gráfico 9.4 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2 .....	81
Gráfico 9.5 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1 .....	83
Gráfico 9.6 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2 .....	83
Gráfico 11.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 1).....	89
Gráfico 11.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 1) .....	90
Gráfico 11.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)....	90
Gráfico 11.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 1) .....	91
Gráfico 11.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 1) .....	91
Gráfico 11.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 1) .....	94
Gráfico 11.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 1) .....	95
Gráfico 11.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 1)....	95
Gráfico 11.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 1) .....	96
Gráfico 11.10 - Rendimento exergético em função da demanda de água gelada .....	96
Gráfico 12.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 2).....	100
Gráfico 12.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 2) .....	100
Gráfico 12.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)..	101
Gráfico 12.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 2) .....	101
Gráfico 12.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 2) .....	102
Gráfico 12.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 2) .....	105

Gráfico 12.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 2)	105
Gráfico 12.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 2)..	106
Gráfico 12.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 2)	106
Gráfico 12.10 - Rendimento exerético em função da demanda de água gelada (Sist. 2)	107
Gráfico 13.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)	112
Gráfico 13.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)	113
Gráfico 13.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)..	113
Gráfico 13.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)	114
Gráfico 13.5 - Rendimento exerético em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)	114
Gráfico 13.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 3)	117
Gráfico 13.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 3)	118
Gráfico 13.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 3)..	118
Gráfico 13.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 3)	119
Gráfico 13.10 - Rendimento exerético em função da demanda de água gelada (Sist. 3)	119
Gráfico 14.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)	122
Gráfico 14.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)	122
Gráfico 14.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)..	123
Gráfico 14.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)	123
Gráfico 14.5 - Rendimento exerético em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)	124
Gráfico 14.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 4)	127

Gráfico 14.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 4)	127
Gráfico 14.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 4)..	128
Gráfico 14.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 4)	128
Gráfico 14.10 - Rendimento exerético em função da demanda de água gelada (Sist. 4)	129
Gráfico 15.1 - Comparação: rendimento exerético em função da eletricidade – Análise A	130
Gráfico 15.2 - Comparação:custo total em função da eletricidade – Análise A	131
Gráfico 15.3 - Comparação: rendimento exerético em função da água gelada – Análise A	131
Gráfico 15.4 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise A	132
Gráfico 15.5 - Comparação: rendimento exerético em função da eletricidade – Análise B	133
Gráfico 15.6 - Comparação:custo total em função da eletricidade – Análise B	133
Gráfico 15.7 - Comparação: rendimento exerético em função da água gelada – Análise B	134
Gráfico 15.8 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise A	134
Gráfico 15.9 - Comparação: rendimento exerético em função da eletricidade – Análise C	135
Gráfico 15.10 - Comparação: custo total em função da eletricidade – Análise C	136
Gráfico 15.11 - Comparação: rendimento exerético em função da água gelada – Análise C	136
Gráfico 15.12 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise C	137
Gráfico 15.13 – Síntese Gráfica da Análise do CTBM para os três primeiros ciclos	139

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros na determinação do custo de equipamentos.....	30
Tabela 5.1 - Resultados Base (Rankine e Compressão de Vapor).....	40
Tabela 5.2 - Resultados – Busca Direta .....	41
Tabela 5.3 - Resultados – Variável Métrica.....	42
Tabela 5.4 - Resultados – Algoritmo Genético 1 .....	44
Tabela 5.5 - Resultados – Algoritmo Genético 2.....	45
Tabela 5.6 - Resultados – Algoritmo Genético 3.....	46
Tabela 5.7 - Resultados – Simplex de Nelder-Mead.....	47
Tabela 6.1 - Resultados Base (Rankine e Absorção Simples).....	50
Tabela 6.2 - Resultados – Busca Direta .....	51
Tabela 6.3 - Resultados – Variável Métrica.....	52
Tabela 6.4 - Resultados – Algoritmo Genético 1 .....	54
Tabela 6.5 - Resultados – Algoritmo Genético 2.....	55
Tabela 6.6 - Resultados – Algoritmo Genético 3.....	56
Tabela 6.7 - Resultados – Simplex de Nelder-Mead.....	58
Tabela 6.8 - Resultados – Reiteraões do Algoritmo Genético .....	59
Tabela 7.1 - Cenário 1: Resultados no ponto ótimo para situação sem excedente de eletricidade .....	65
Tabela 7.2 - Cenário 2: Resultados no ponto ótimo para 1662kW de excedente de eletricidade .....	65
Tabela 7.3 - Cenário 3: Resultados no ponto ótimo para 3143kW de excedente de eletricidade .....	66
Tabela 7.4 - Cenário 1: Resultados no caso base para situação sem excedente de eletricidade .....	66
Tabela 7.5 - Cenário 2: Resultados no caso base para 2390kW de excedente de eletricidade .....	67
Tabela 7.6 - Cenário 3: Resultados no caso base para 3220kW de excedente de eletricidade .....	67
Tabela 7.7 - Cenário 1: Resultados no caso base para situação sem excedente de eletricidade .....	68

Tabela 7.8 - Cenário 2: Resultados no caso base para 442kW de excedente de eletricidade .....	68
Tabela 7.9 - Cenário 3: Resultados no caso base para 1571kW de excedente de eletricidade .....	68
Tabela 8.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1.....	71
Tabela 8.2 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1.....	73
Tabela 8.3 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1.....	75
Tabela 9.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2.....	77
Tabela 9.2 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2.....	80
Tabela 9.3 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2.....	82
Tabela 10.1 - Resultados finais para 2 configuração de refrigeração em 3 cenários de demanda .....	84
Tabela 11.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade.....	86
Tabela 11.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade (cont.)	87
Tabela 11.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade (cont.)	88
Tabela 11.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada.....	92
Tabela 11.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada (cont.)	93
Tabela 11.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada (cont.)	93
Tabela 12.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade.....	97
Tabela 12.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade (cont.)	98
Tabela 12.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade (cont.)	99
Tabela 12.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada.....	103
Tabela 12.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	103
Tabela 12.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	104
Tabela 13.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade.....	109
Tabela 13.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade (cont.)	110
Tabela 13.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade (cont.)	111
Tabela 13.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada.....	115
Tabela 13.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	116

Tabela 13.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	116
Tabela 14.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade.....	121
Tabela 14.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade (cont.)	121
Tabela 14.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade (cont.)	121
Tabela 14.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada.....	125
Tabela 14.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	125
Tabela 14.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada (cont.) .....	126
Tabela 15.1 - Ciclo 1 - Rankine de Potência e Refrigeração por Compressão de Vapor.....	138
Tabela 15.2 - Ciclo 2 - Rankine de Potência e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio.....	138
Tabela 15.3 - Ciclo 3 - Rankine de Potência e Refrigeração por Absorção de Duplo Estágio.....	138
Tabela 15.4 - Ciclo 4 - Ciclo Combinado e Refr. por Absorção - Com excedente à rede elétrica .....	138

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>2</b>	<b>DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA DO PROJETO – ASPECTOS TEÓRICOS</b> .....	<b>23</b>
2.1	O BALANÇO DE EXERGIA .....	25
2.2	ASPECTOS DA EXERGOECONOMIA .....	26
2.2.1	<i>Critério da igualdade</i> .....	28
2.2.2	<i>Critério da extração</i> .....	29
2.2.3	<i>Critério do subproduto</i> .....	29
2.2.4	<i>Custo de capital de equipamentos – Modelo</i> .....	29
2.2.5	<i>A função CTBM (Custo total em base monetária)</i> .....	31
<b>3</b>	<b>AS ROTINAS DE OTIMIZAÇÃO</b> .....	<b>32</b>
3.1	O MÉTODO DA BUSCA DIRETA .....	33
3.2	O MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO MÉTRICA VARIÁVEL .....	34
3.3	O MÉTODO DO ALGORITMO GENÉTICO .....	35
3.4	O MÉTODO DO SIMPLEX DE NELDER-MEAD .....	36
<b>4</b>	<b>RESTRICÇÕES DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO</b> .....	<b>37</b>
<b>5</b>	<b>MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO EXERGÉTICO: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO</b> .....	<b>39</b>
5.1	BUSCA DIRETA .....	41
5.2	OTIMIZAÇÃO MÉTRICA VARIÁVEL .....	42
5.3	ALGORITMO GENÉTICO .....	43
5.3.1	<i>Resultados para gerações e taxa máxima de mutação fixas (variação do número de indivíduos)</i> .....	44
5.3.2	<i>Resultados para indivíduos e taxa máxima de mutação fixos (gerações variáveis)</i> .....	45
5.3.3	<i>Resultados para indivíduos e gerações fixos (taxa de mutação variável)</i> .....	46
5.4	SIMPLEX DE NELDER-MEAD .....	47
<b>6</b>	<b>MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO EXERGÉTICO: CICLO RANKINE E CHILLER DE ABSORÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO</b> .....	<b>49</b>
6.1	MÉTODO DA BUSCA DIRETA .....	50
6.2	MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO DA VARIÁVEL MÉTRICA .....	52
6.3	MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO .....	53
6.3.1	<i>Resultados para gerações e taxa máxima de mutação fixas (variação do número de indivíduos)</i> .....	54
6.3.2	<i>Resultados para indivíduos e taxa máxima de mutação fixos (gerações variáveis)</i> .....	55
6.3.3	<i>Resultados para indivíduos e gerações fixos (taxa de mutação variável)</i> .....	56
6.4	MÉTODO DO SIMPLEX DE NELDER-MEAD .....	57
6.5	REITERAÇÕES NA OTIMIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO .....	59
<b>7</b>	<b>ESTUDOS DE CASO E A MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM BASE MONETÁRIA (CTBM)</b> .....	<b>62</b>
7.1	CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO .....	62
7.2	CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES-EFEITO .....	63
7.3	OS RESULTADOS DE OTIMIZAÇÃO DA TESE DE J. C. BURBANO .....	64
7.3.1	<i>O caso da indústria de laticínios (Resultados-base e caso otimizado)</i> .....	65

7.3.2	<i>O caso do hospital (Resultados-base)</i> .....	66
7.3.3	<i>O caso da indústria de bebidas (Resultados-base)</i> .....	67
<b>8</b>	<b>ESTUDOS DE CASO : CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR</b> .....	<b>70</b>
8.1	CENÁRIO 1 – INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS.....	71
8.2	CENÁRIO 2 – HOSPITAL .....	73
8.3	CENÁRIO 3 – INDÚSTRIA DE BEBIDAS .....	75
<b>9</b>	<b>ESTUDOS DE CASO: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES EFEITO</b> .....	<b>77</b>
9.1	CENÁRIO 1 – INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS.....	77
9.2	CENÁRIO 2 – HOSPITAL .....	80
9.3	CENÁRIO 3 – INDÚSTRIA DE BEBIDAS .....	82
<b>10</b>	<b>ESTUDOS DE CASO: ANÁLISE E COMPARAÇÕES</b> .....	<b>84</b>
<b>11</b>	<b>RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR</b> .....	<b>86</b>
11.1	VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE .....	86
11.2	VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA .....	92
<b>12</b>	<b>RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO SIMPLES</b> .....	<b>97</b>
12.1	VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE .....	97
12.2	VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA .....	102
<b>13</b>	<b>RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIG. POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO</b> .....	<b>108</b>
13.1	VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE .....	109
13.2	VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA .....	115
<b>14</b>	<b>RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO COMBINADO DE POTÊNCIA</b> .....	<b>120</b>
14.1	VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE .....	120
14.2	VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA .....	124
<b>15</b>	<b>ANÁLISE FINAL</b> .....	<b>130</b>
15.1	CENÁRIO DE ANÁLISE A: REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR “VERSUS” POR ABSORÇÃO DE SIMPLES EFEITO .....	130
15.2	CENÁRIO DE ANÁLISE B: REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO “VERSUS” DUPLO ESTÁGIO .....	133
15.3	CENÁRIO DE ANÁLISE C: CICLO RANKINE DE POTÊNCIA “VERSUS” CICLO COMBINADO.....	135
15.4	PARTIÇÃO DO CTBM ENTRE PRODUTOS.....	137
15.5	SÍNTESE GRÁFICA DA ANÁLISE EXPOSTA .....	138
<b>16</b>	<b>SUGESTÕES À CONTINUIDADE DO TRABALHO</b> .....	<b>140</b>
<b>17</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>141</b>
<b>18</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>143</b>
<b>19</b>	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>144</b>

19.1 APENDICE A - BALANÇOS DE CUSTO .....	144
---	-----

## 1 INTRODUÇÃO

O presente documento tem como objetivo apresentar os resultados e estudos no desenvolvimento do projeto integrado de formatura em engenharia mecânica do aluno Fábio Moraes de Oliveira sob orientação do Professor Dr. Sílvio de Oliveira Júnior. O estudo dá da mesma forma continuidade à tese de doutorado de Juan Carlos Burbano, sob mesma orientação.

O tema central considerado é a otimização em termos exergéticos de diversas configurações de plantas de co-geração, melhor detalhadas nas seções subsequentes. Foram implementados balanços de custo em termos monetários na análise exergoeconômica de cada uma das plantas no sentido de detectar vantagens comparativas ao investidor.

O trabalho consiste em determinar os pontos que minimizam o custo total em termos monetários (CTBM [US\$/h], a ser definido ao longo do documento) na geração de energia sob três formas – eletricidade, calor (na extração de vapor para determinado processo industrial e insumo energético para um chiller na produção de água gelada.

Fundamentos que embasam a análise exergoeconômica para sistemas de co-geração serão igualmente apresentados, explicitando os critérios relevantes nesta remodelagem de atribuição de custos aos subprodutos dos sistemas estudados.

Num primeiro momento, foram aplicadas as quatro rotinas de otimização na maximização do rendimento exergético de duas configurações de planta, para uma primeira aproximação com o software disponibilizado e, principalmente, para que se obtivesse a rotina mais robusta para a continuação do trabalho.

Posteriormente, tal método de otimização foi aplicado na minimização dos custos para casos pontuais de demanda, em três diferentes situações, seguindo as linhas de aplicação presentes no trabalho de Burbano (2011).

Já a fase final do estudo busca uma generalização do comportamento das plantas diante da variação das demandas de eletricidade e refrigeração.

As conclusões do trabalho serão expostas ao final do documento, assim como sugestões à continuidade do estudo que, por seu caráter ambicioso, deixa abertura a discussões a nível de pós-graduação.

## **2 DESCRIÇÃO DA PROBLEMÁTICA DO PROJETO – ASPECTOS TEÓRICOS**

O objetivo central do projeto visa à otimização de diferentes plantas de trigeriação, segundo proposta do Prof. Dr. Silvio de Oliveira Jr. Em um primeiro momento, esta otimização será dada em termos exergéticos, e uma posterior análise é feita em termos monetários.

As rotinas de otimização utilizadas são aquelas propostas pelo software EES – Engineering Equation Solver, e serão explicitadas posteriormente no presente documento.

Os sistemas em questão possuem como produtos a geração de potência motora – convertida em energia elétrica através de acoplamentos a geradores, de vapor de água destinado a um determinado processo industrial e de água gelada. Os ciclos de potência e refrigeração associados podem possuir diversas combinações de configurações – ciclo Rankine ou combinado (Rankine-Brayton) para o ciclo de potência, assim como chiller de compressão de vapor, de absorção (simples ou duplo estágio) ou ejetor-compressão no caso do ciclo de refrigeração.

Ao longo do projeto, trabalhou-se basicamente com quatro configurações diferentes de plantas, e uma análise comparativa foi traçada com base em princípios da exergo-economia, onde os balanços de custo são fundados nos fluxos de exergia ao longo do sistema. O esquemático de cada uma destas configurações será apresentado ao longo do presente documento.

Apesar das variações encontradas nos ciclos de potência e refrigeração, o funcionamento das plantas é bastante similar do ponto de vista do sentido percorrido pela água na obtenção dos três sub-produtos energéticos. Pode-se dizer que os sistemas operam em cascata térmica. Como exemplo aos ciclos de trigeriação, considera-se o ciclo tetra-combinado, proposto por Garagatti e Oliveira Jr. (2003). Este foi novamente citado na seção relativa aos objetivos sub-sequentes do trabalho.

A denominação tetracombinação é definida pela caracterização de dois ciclos de potência (ciclo Brayton relativo à turbina a gás e ciclo Rankine na turbina a vapor), além de dois ciclos de refrigeração – por absorção e ejetor-compressão.

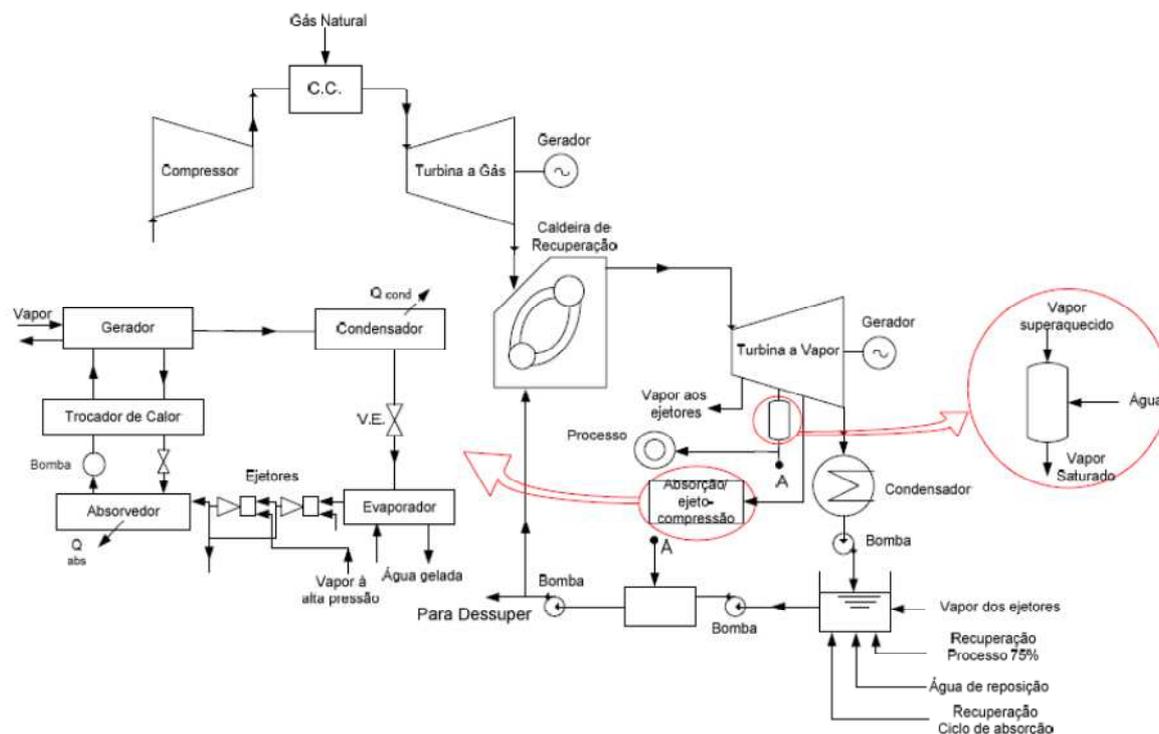


Figura 2.1 - Esquema da Planta Tetra-Combinada de Trigerção

A turbina a gás está acoplada ao compressor, e parte do trabalho gerado pelo ciclo de potência desta é destinada ao trabalho de compressão. A outra parte representa uma parcela da geração de eletricidade da planta. Os gases rejeitados pela TG são utilizados na caldeira de recuperação que gera vapor superaquecido direcionado à turbina a vapor, que possui três extrações intermediárias: a primeira destinada ao processo industrial, que por poder apresentar demanda de vapor saturado, possui um dessuperaquecedor a fluxo de água líquida. A segunda extração é destinada aos ejetores do ciclo de refrigeração e a terceira, à alimentação do gerador do ciclo de absorção no subsistema de refrigeração. As plantas com as quais se trabalhou ao longo do projeto possuem uma ou duas extrações, já que não houve neste primeiro momento a utilização dos ejetores na ausência destes para os ciclos de refrigeração por compressão de vapor e ciclos por absorção de simples e duplo estágio.

Como explicitado anteriormente, o projeto visa à obtenção dos parâmetros que implicam no máximo rendimento exerético (primeiramente) e o mínimo custo em base monetária das plantas de trigeria, sendo definidas as variáveis:

- (i). A demanda energética  $W_{PLANTA}$  (kW);
- (ii). As condições do vapor saturado utilizado no processo industrial (pressão e vazão mássica);
- (iii). O fluxo de calor absorvido pelo chiller no evaporador (kW).

Assim, dada a modelagem do sistema, os parâmetros, sujeitos a condições que serão apresentadas na seqüência do relatório, devem otimizar o rendimento exerético do sistema que satisfazem sua demanda.

Em um primeiro momento, trabalhou-se com demandas fixas às mesmas condições impostas por Burbano (2011). Porém, na continuidade trabalhou-se com variações nestes parâmetros buscando-se uma maior generalização a respeito da magnitude nas propriedades dos sub-produtos das plantas.

## 2.1 O BALANÇO DE EXERGIA

Exergia representa o trabalho que pode ser produzido por um sistema trazido às condições do meio ambiente por processos reversíveis. A quantificação da grandeza feita por um balanço resultante da combinação linear do balanço de energia e balanço de entropia pode ser dado segundo as relações (Oliveira Jr., 2006):

A. Balanço de Energia para um volume de controle (VC) de uma entrada e uma saída:

$$\dot{m}_s h_s - \dot{m}_e h_e = \dot{Q} - \dot{W} \quad (2.1)$$

B. Balanço de Entropia para o mesmo VC:

$$\dot{m}_s s_s - \dot{m}_e s_e = \frac{\dot{Q}}{T} - \dot{S}_{GER} \quad (2.2)$$

C. Multiplicação de (2) por  $-T_0$  e somando-a com (1), temos o balanço exergético do VC:

$$\dot{m}_s b_s - \dot{m}_e b_e = \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \dot{W} - T_0 \dot{S}_{GER} \quad (2.3)$$

Onde:

$$b = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad (2.4)$$

Para volumes de controle com várias entradas e saídas, pode-se escrever:

$$\sum \dot{m}_s b_s - \sum \dot{m}_e b_e = \sum \dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) - \sum \dot{W} - T_0 \dot{S}_{GER} \quad (2.5)$$

Para o caso do rendimento exergético da planta de trigeriação, tem-se:

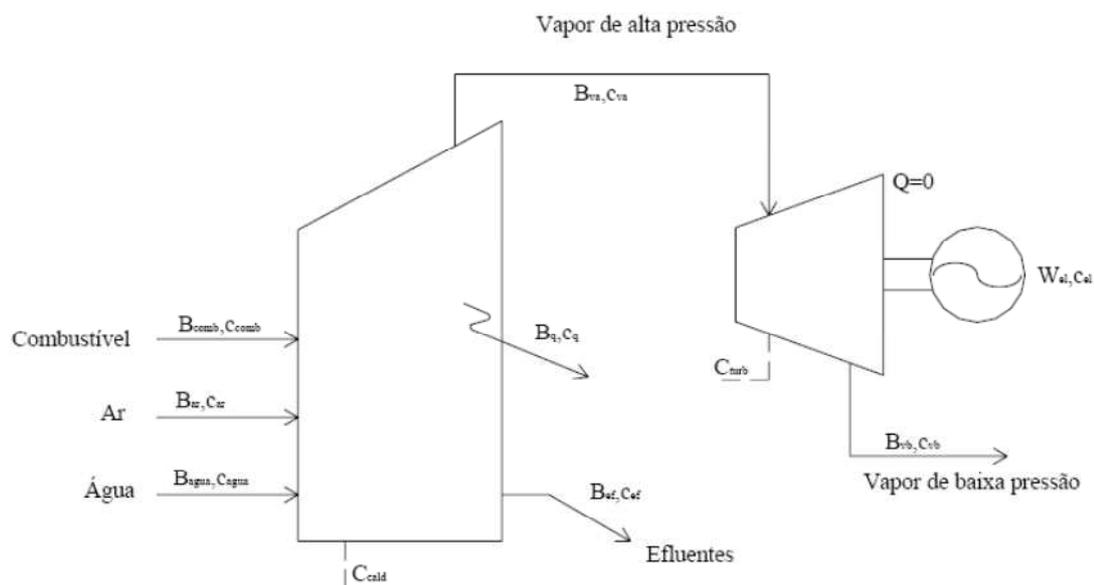
$$\eta_{EXERG} = \frac{B(\acute{U}til)}{B(Consumida)} \quad (2.6)$$

$$\eta_{PLANTA} = \frac{\dot{W}_{PLANTA} + \dot{W}_{REDE} + \dot{B}_{PROCESSO} + \dot{B}_{\acute{A}GUA\ GELADA}}{\dot{m}_{COMB} b_{COMB}} \quad (2.7)$$

## 2.2 ASPECTOS DA EXERGOECONOMIA

Como exposto anteriormente, o projeto se deu no sentido de minimizar uma função objetivo representada pelo custo global de produção dos três subprodutos da planta. Assim, é necessária a análise dos balanços e repartição dos custos dos produtos intermediários e finais para cada equipamento. Considera-se como modelo de aplicação a planta de cogeração que segue, com uma caldeira acoplada com uma

turbina a vapor que gera eletricidade e possui extração única de vapore a baixa pressão (Fig. 2.2):



**Figura 2.2 - Planta-exemplo com fluxos de exergia e custos específicos**

Os parâmetros representados por  $B_i$  representam os fluxos de exergia (kW/s) dos insumos e produtos para cada equipamento, a citar:

$B_{comb}$ : Taxa de exergia do combustível que entra no gerador de vapor;

$B_{ar}$ : Taxa de exergia do ar que entra no gerador de vapor;

$B_{água}$ : Taxa de exergia da água que entra no gerador de vapor;

$B_q$ : Taxa de exergia do calor rejeitado pelo gerador de vapor (sai);

$B_{va}$ : Taxa de exergia da do vapor de alta pressão que sai do gerador de vapor;

$B_{ef}$ : Taxa de exergia dos gases de combustão que saem do gerador de vapor;

Os valores  $c_i$  de mesmos índices indicam os custos específicos em base exérgica (US\$/kW). Considerando  $C_{CALD}$  a taxa de custo de capital de operação e manutenção da caldeira (US\$/s), pode-se escrever o balanço de custos em base monetária para a caldeira:

$$B_{comb} \cdot C_{comb} + B_{ar} \cdot C_{ar} + B_{água} \cdot C_{água} + C_{CALD} = B_{ef} \cdot C_{ef} + B_{va} \cdot C_{va} + B_q \cdot C_q \quad (2.7)$$

Da mesma forma e sob mesma notação, definem-se para a turbina a vapor (adiabática):

$B_{va}$ : Taxa de exergia da do vapor de alta pressão que entra na turbina a vapor;

$B_{vb}$ : Taxa de exergia da do vapor de baixa pressão que sai da turbina a vapor;

$W_{el}$ : Trabalho realizado pela turbina a vapor;

Considerando os custos específicos associados à TV, pode-se escrever analogamente:

$$B_{va} \cdot C_{va} + C_{TV} = B_{vb} \cdot C_{vb} + W_{el} \cdot C_{el} \quad (2.8)$$

Na solução do sistema de equações considerado, tem-se uma indeterminação pelo fato de haver apenas duas equações para três incógnitas. Isto ocorre na determinação de custos onde há a obtenção de mais de um produto por equipamento como é o caso da turbina a vapor. Assim, é um problema a tratar nas plantas de trigeriação estudadas no projeto. Fruto de discussões a respeito do tema, existem três critérios normalmente aplicados de partição dos custos sobre os subprodutos de cada dispositivo da planta:

- (i). Critério da igualdade;
- (ii). Critério da extração;
- (iii). Critério do subproduto.

### 2.2.1 Critério da igualdade

Segundo o método, cada equipamento deve fornecer todas as demandas exergéticas. Assim, os custos não são discriminados e se atribui o mesmo custo exergético específico a cada um dos subprodutos. No caso do exemplo tomado, ter-se-ia  $c_{vb}=c_{el}$ . Assim, o sistema fica determinado na determinação de  $(C_{va}; C_{vb}; C_{el})$ .

### 2.2.2 Critério da extração

No caso do critério da extração, considera-se o produto principal do equipamento, que será penalizado ao carregar todo o custo de operação e manutenção. No caso da turbina, é o caso da eletricidade. Como o custo do vapor não é influenciado pela turbina (princípio do critério), tem-se que  $c_{va}=c_{vb}$ .

### 2.2.3 Critério do subproduto

Da mesma forma, define-se o produto principal do equipamento. Para este é calculado o menor custo de produção relacionado (via uma caldeira de baixa pressão no caso do vapor). O custo do subproduto será então determinado pelo sistema de equações.

Os valores dos fluxos exergéticos  $B_i$  são determinados pela análise exérgica do sistema – já modelada para os casos estudados. Os custos dos insumos externos à planta podem ser dados pelo preço de compra dos respectivos fluxos. Um modelo ao cálculo do custo de capital de operação e manutenção dos equipamentos é avaliado no item subsequente.

### 2.2.4 Custo de capital de equipamentos – Modelo

Segundo o trabalho de BOEHM (1987), o fluxo do custo de capital do equipamento é dado pela relação (3.3).

$$\dot{C}_{EQ} = \frac{C_{EQ} \cdot f_A \cdot f_{O\&M}}{3600 \cdot U} \quad (2.9)$$

Onde:

-  $C_{EQ}$  pode ser extraída como função do equipamento e do fluxo de produto segundo a Tab. 3.1 e relação de escala (Eq. 2.10) que seguem.

Tabela 2.1 - Parâmetros na determinação do custo de equipamentos

Equipamento	m	C <sub>R</sub> (US\$)	S <sub>R</sub>	S [Unidade]
Caldeira	0,57	170000	40000	m <sub>VAPOR</sub> [lb/h]
Turbina a Vapor	0,68	25000	1000	W <sub>TV</sub> [kW]
Turbina a Gás	0,53	6800000	4000000	W <sub>TG</sub> [kW]
Bomba High	0,58	7500	100	W <sub>B</sub> [kW]
Bomba Low	0,39	2500	10	W <sub>B</sub> [kW]
Condensador	0,55	3000	10	Q <sub>cond</sub> [kW]
Torre de Resfriamento	1,00	72000	3600	Q <sub>tower</sub> [kW]
Chiller Compressão	0,77	267000	1000	Q <sub>evap</sub> [tons]
Chiller Absorção Simples	0,66	160000	500	Q <sub>evap</sub> [tons]
Chiller Absorção Duplo	0,70	230000	500	Q <sub>evap</sub> [tons]

Como se pode observar, existem dois conjuntos de parâmetros na estimativa de custos das bombas. São faixas definidas para bombas acima de 23kW e abaixo deste valor. A única bomba que possui a potência na faixa superior é a bomba do condensador. A definição dos custos das bombas no equacionamento foi determinada de forma iterativa.

$$C_{EQ} = C_r \cdot \left(\frac{S}{S_r}\right)^m \quad (2.10)$$

- O fator de amortização  $f_A$  definido pelo sistema Price pode ser determinado pela taxa de juros ao ano ( $i$ ) e pelo tempo de vida do equipamento ( $N$ ) pela relação (2.11):

$$f_A = \frac{i}{1-(1+i)^{-N}} \quad (2.11)$$

-  $U$  representa o número de horas de operação por ano (valor adotado:  $U=8000h/ano$ ).

-  $f_{O\&M}$  é um fator de correção devido à operação e manutenção. O valor utilizado para o parâmetro foi de 1,06.

Com relação aos custos dos equipamentos para a análise proposta foi utilizado o método de estimativa do BOEHM (1987) em “Design Analysis of Thermal Systems”, de 1987. O fator de correção do dólar entre 1987 e 2011 foi adotado 1,97, de acordo com órgãos reguladores da moeda americana. Já a taxa de câmbio utilizada na modelagem foi de 1,62 R\$ / US\$.

### 2.2.5 A função CTBM (Custo total em base monetária)

Em termos monetários, é de interesse do investidor da planta o fluxo de caixa por unidade de tempo que, multiplicado pelo período de operação  $\Delta T$  fornece o gasto total de produção dos três sub-produtos. A minimização desta função em [US\$/h] fornece o mesmo ponto de operação da minimização do custo total. Assim, é definida através do equacionamento (Eq. 2.12):

$$\begin{aligned} \text{CTBM} = 3600 * [C_{\text{ELETR}} \cdot (W_{\text{PLANTA}} + W_{\text{REDE}}) + C_{\text{AG.GELADA}} \cdot (\Delta B_{\text{AG.GELADA}}) + \\ + C_{\text{VAPOR}} \cdot (\Delta B_{\text{PROCESSO}})] \end{aligned} \quad (2.12)$$

### 3 AS ROTINAS DE OTIMIZAÇÃO

A modelização dos sistemas, assim como a utilização das rotinas de otimização se deram através do software “Engineering Equation Solver” (EES), disponibilizado pelo departamento de pós-graduação em Engenharia Térmica e Energia.

Através da opção Min/Max do EES, pode-se acessar a ferramenta do software referente às rotinas de otimização disponíveis em sua versão “Pro”. O EES trabalha com otimização de sistemas de equações que possuem de um a vinte graus de liberdade. Ao clicar sobre a opção presente no Menu “Calculate – Min/Max”, o programa verifica a sintaxe das equações e seu número de graus de liberdade. Se não há erros, a janela disponível ao usuário aparece como apresentada a seguir:

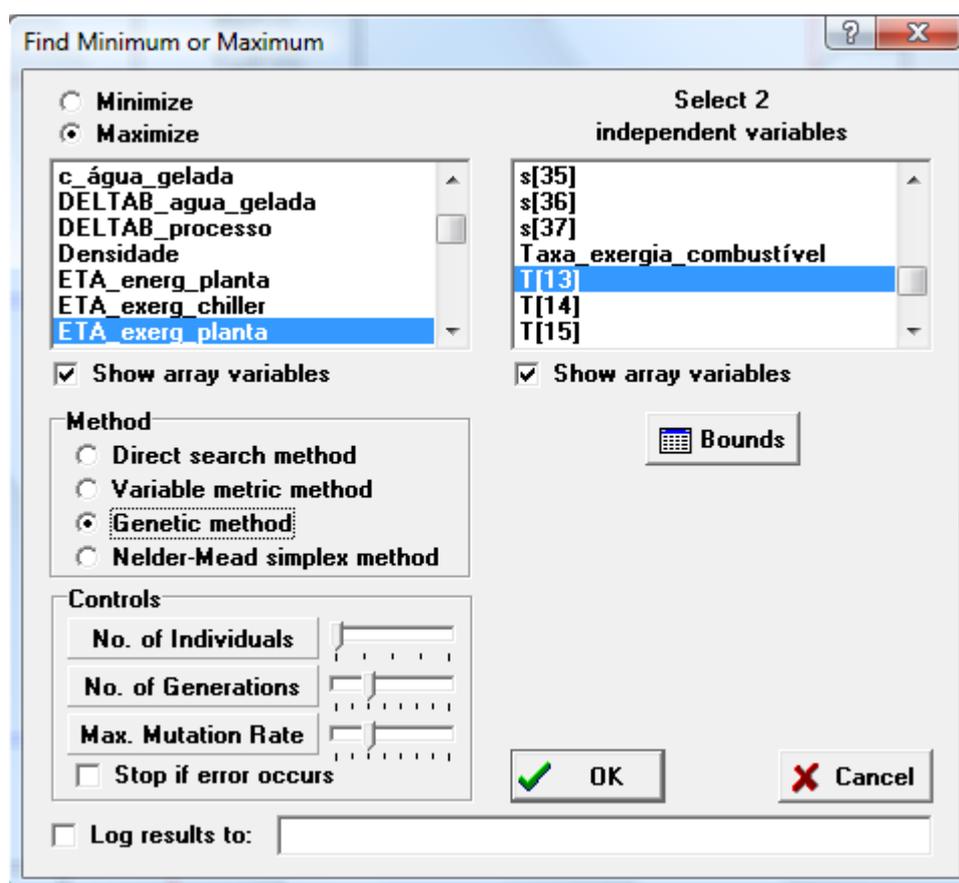
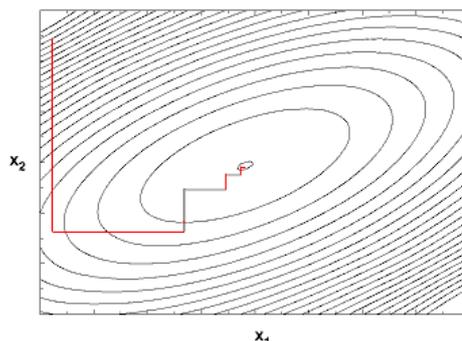


Figura 3.1 - Interface do EES para a ferramenta de otimização

A lista da esquerda permite a seleção da variável a ser otimizada, enquanto que a da direita permite a seleção das variáveis independentes, que no primeiro caso a ser estudado serão dados pela temperatura e a pressão da caldeira a vapor do ciclo Rankine. Como será discutido posteriormente, existem intervalos de valores onde estas grandezas devem estar definidas, por questões construtivas e de mercado. Estes intervalos são definidos através da opção “Bounds”, e serão considerados pelas rotinas. Para o caso de chiller de absorção, onde se trabalhará com 3 graus de liberdade, existem casos em que há inconsistência nos resultados numéricos – a ser questionada posteriormente no projeto. Há quatro métodos disponíveis pelo software com relação ao processo de otimização de funções de várias variáveis, as quais e cujos parâmetros serão apresentados com mais detalhes a seguir.

### 3.1 O MÉTODO DA BUSCA DIRETA

Também conhecido como método de direções Conjugado ou método de Powell, este método envolve a avaliação unidimensional dos valores da função, permitindo a localização do ponto ótimo em função de cada uma das variáveis. Dado um ponto de partida, a rotina procura o máximo da função variando apenas uma das variáveis, mantendo as outras constantes. Assim, após encontrar o valor ótimo para uma determinada variável  $X_1$ , o processo é repetido para as outras dimensões. Este método possui grande vantagem com funções não diferenciáveis, pois parte do princípio apenas da avaliação de valores da própria função no ponto. A desvantagem do método de busca direta é a eficiência relativamente baixa, pois a convergência não é na direção do gradiente da função em cada ponto. O critério de parada é o valor  $\varepsilon$  a ser fornecido e o final das iterações se dá quando a diferença entre dois valores avaliados é menor que  $\varepsilon$ .



**Figura 3.2 - Convergência do método da busca direta para função de 2 variáveis  $X_1$  e  $X_2$**

### 3.2 O MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO MÉTRICA VARIÁVEL

O método de otimização métrica variável é basicamente uma versão multidimensional do método de aproximações quadráticas. O método segue a decomposição da função em série de Taylor, segundo o desenvolvimento abaixo:

- Desenvolvimento de  $f$  em série de Taylor:

$$f(\bar{X}) = f(X_0) + \sum_i \frac{\partial f}{\partial X_i} X_i + \frac{1}{2} \sum_i \sum_j \frac{\partial^2 f}{\partial X_i \partial X_j} X_i X_j + (\dots) \quad (3.1)$$

- Aproximação Quadrática:

$$f(\bar{X}) = A + \bar{B}\bar{X} + \frac{1}{2} \bar{C}\bar{X} \quad (3.2)$$

- O gradiente em  $\bar{X}$  é dado por:

$$\nabla f(\bar{X}) = \bar{C}\bar{X} + \bar{B} \quad (3.3)$$

Assim, no ponto mínimo, tem-se que:

$$\bar{C}\bar{X}_{\text{MIN}} = -\bar{B} \quad (3.4)$$

Pela soma das duas últimas equações, vem:

$$\bar{X}_{\text{MIN}} - \bar{X} = \bar{C}^{-1}[-\nabla f(\bar{X})] \quad (3.5)$$

Assim, a rotina de otimização será:

$$\bar{X}_{i+1} - \bar{X}_i = \bar{C}^{-1}[\nabla f(\bar{X}_{i+1}) - \nabla f(\bar{X}_i)] \quad (3.6)$$

### 3.3 O MÉTODO DO ALGORITMO GENÉTICO

Este método, por possuir alta robustez e convergir, apesar de lentamente, para a solução real desejada, será estudado mais profundamente ao longo do projeto. A descrição do presente documento permite caracterizar o mecanismo geral da rotina, sem apresentar o formalismo matemático que o sustenta.

O método pretende seguir processos que ocorrem na evolução biológica. Uma população de pontos de amostragem inicialmente é escolhida ao acaso, no intervalo especificado pelos limites das variáveis independentes. Os indivíduos nesta população são examinados para determinar a sua aptidão a maximizar ou minimizar a função de acordo com os valores desta nos pontos.

Em seguida, uma nova geração de indivíduos é gerada de forma estocástica, uma «criação» da população anterior. As características de um indivíduo que são repassadas para a próxima geração são representados por valores codificados das suas variáveis independentes. A probabilidade que um indivíduo da população atual seja selecionado para reprodução é uma função crescente da sua aptidão. A "criação" combina as características de dois pais de uma forma estocástica.

Variações adicionais aleatórias são introduzidas pela possibilidade de "Mutações" para que os descendentes possam ter características que diferem marcadamente das do pais. Na implementação utilizada, o número de indivíduos da população se mantém constante para cada geração. Os parâmetros utilizados no método são:

- Número de indivíduos em uma população (de 12 a 256);
- Número de gerações a explorar (de 16 a 2048);
- Taxa de mutação máxima (de 0,0875 a 0,7).

Os maiores valores para a taxa de mutação máxima faz com que o algoritmo busque mais agressivamente pontos de ótimo distantes do ótimo atual. Neste caso, os limites inferior e superior dos parâmetros independentes são extremamente importantes, pois

a população inicial e subseqüente seleções estocásticas são escolhidas dentro dos limites. Como mencionado anteriormente, o método genético é robusto, mas lento. O número de avaliações da função necessário é aproximadamente igual ao produto do número de indivíduos e o número de gerações. Existe a possibilidade de abortar a operação no caso de uma convergência antes do final da aplicação da rotina.

### 3.4 O MÉTODO DO SIMPLEX DE NELDER-MEAD

Este método também é de fácil implementação em funções dificilmente diferenciáveis, por trabalhar apenas com avaliações do valor da função nos pontos. Tomam-se  $N+1$  pontos dentro dos intervalos definidos para as variáveis independentes, onde  $N$  é o número de graus de liberdade do sistema. O ponto de valor mais distante do objetivo de otimização (cujo valor da função apresenta o menor ou o maior valor entre os três para maximização e minimização, respectivamente), é desprezado e o ponto simétrico ao hiperplano formado por todos os outros pontos é tomado para a próxima avaliação, e assim sucessivamente até que um dos critérios de parada seja atingido. Este método é bastante robusto no caso de otimização de várias condições impostas – caso do chiller de absorção, como será visto posteriormente.

#### 4 RESTRIÇÕES DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Num primeiro momento, no sentido de determinar a robustez de cada rotina de otimização disponibilizada, trabalhou-se no sentido da maximização do rendimento exergético das plantas de trigeração: (i) Ciclo Rankine de Potência e Refrigeração com Compressão e (ii) Ciclo Rankine de Potência e Chiller de Absorção. O intuito de se trabalhar com sistemas simplificados com relação ao final proposto é de se obter uma primeira manipulação com a ferramenta de otimização, com a decisão do método a ser utilizado para a continuidade do projeto.

$$\max \eta_{\text{EXERG}} \quad (4.1)$$

Já na continuidade do trabalho, o custo total em base monetária (CTBM definido anteriormente) é a função-alvo a ser minimizada:

$$\min \text{CTBM} \quad (4.2)$$

Ambas as funções possuem como parâmetros de entrada as demandas:

- (i)  $\dot{W}_{\text{PLANTA}}$
- (ii)  $\dot{Q}_{\text{EVAPORADOR}}$
- (iii)  $\dot{m}_{\text{VAPOR}} ; p_{\text{VAPOR}}$

As restrições aplicadas a cada um destes parâmetros para início das rotinas internas de otimização foram igualmente extraídas do trabalho de Burbano (2011), por condições de disponibilidade do mercado.

$$20 \leq P_{\text{CALDEIRA}} \leq 120 \quad [\text{bar}] \quad (4.3)$$

$$280 \leq T_{\text{CALDEIRA}} \leq 580 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (4.4)$$

$$0,8 \leq P_{\text{EXTRAÇÃO CHILLER}} \leq 1,5 \quad [\text{bar}] \quad (4.5)$$

Além do mais, o vapor que é direcionado da turbina a vapor ao chiller deve estar na condição de superaquecimento (saturado na pior das hipóteses). Pode-se assim, escrever a seguinte condição para a temperatura do vapor de extração da turbina a vapor para o chiller:

$$\left( T_{\text{EXTRAÇÃO}} + \Delta T_{\text{SEGURANÇA}} \right)_{\text{CHILLER}} - T_{\text{VPSATPEXTR}}_{\text{CHILLER}} \geq 0 \quad (4.6)$$

onde  $T_{\text{VPSATPEXTR}}_{\text{CHILLER}}$  é a temperatura de saturação do vapor à pressão de extração do chiller. O valor de  $\Delta T_{\text{SEGURANÇA}}$  serve a garantir o superaquecimento, podendo adotar o valor de 5°C, por exemplo.

Para o caso estudado inicialmente, o ciclo de refrigeração é por compressão, sendo necessárias apenas as condições (4.3) e (4.4). Já para a segunda configuração, serão necessárias as demais proposições.

## 5 MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO EXERGÉTICO: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO

Inicialmente, trabalhou-se com duas configurações de plantas de cogeração com a finalidade de uma primeira aproximação com o software Engineering Equation Solver (EES<sup>®</sup>) e principalmente para a definição da rotina de otimização a ser aplicada em toda a continuidade do projeto dentre aquelas oferecidas pelo programa. O primeiro sistema estudado representa um ciclo de potência Rankine, em que o vapor superaquecido provém de uma caldeira a gás. O esquemático pode ser avaliado pela Fig. 5.1.

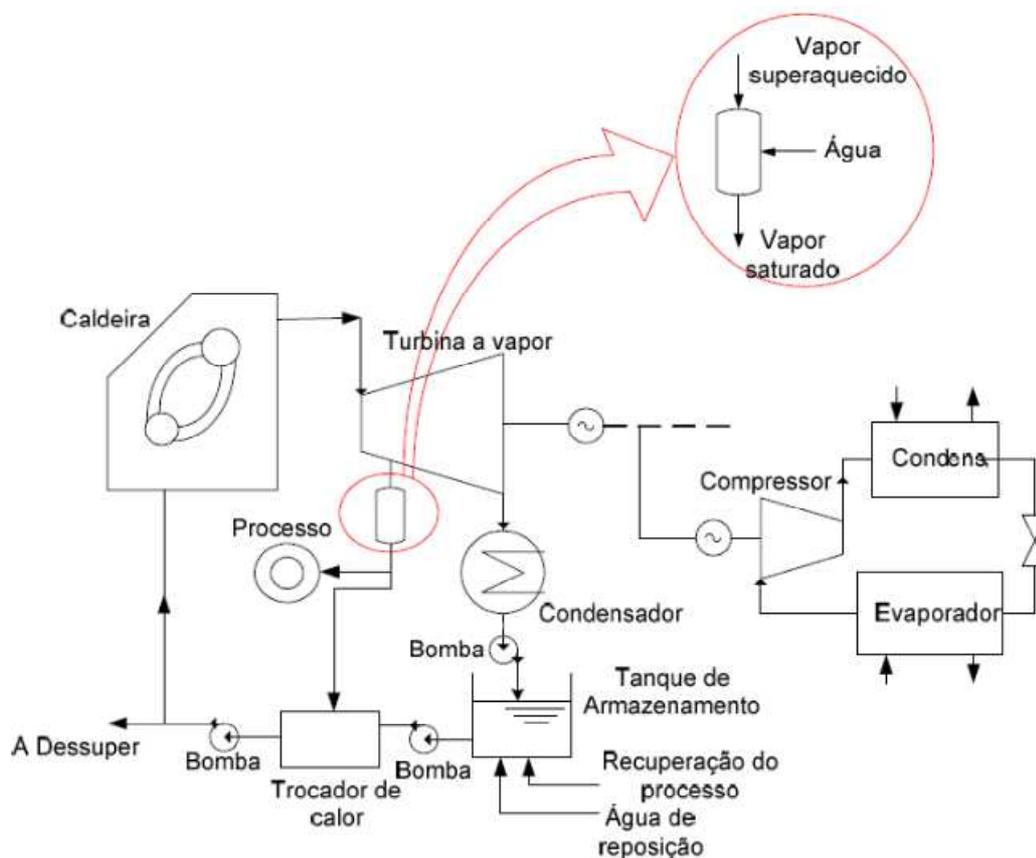


Figura 5.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão

As condições de demanda impostas a uma indústria de laticínios segundo Burbano (2011).

(i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300 \text{ kW}$

- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$   
 (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Os métodos de otimização serão analisados individualmente com particularidades respectivas. Para cada método foram tomados os seguintes resultados relativos ao ponto de máximo rendimento exergético:

- Número de iterações (chamadas da função);
- Tempo gasto pela rotina
- Critérios de parada
- Pressão e temperatura na caldeira
- Rendimento exergético da planta.
- Rendimento energético da planta
- Custos em base exergética dos três produtos (devem ser mínimos no ponto de máximo rendimento exergético)
- Consumo de combustível
- Destruição exergética da planta

O resultado base para a planta adotando-se a pressão da caldeira 42 bar e a temperatura 450°C foi:

**Tabela 5.1 - Resultados Base (Rankine e Compressão de Vapor)**

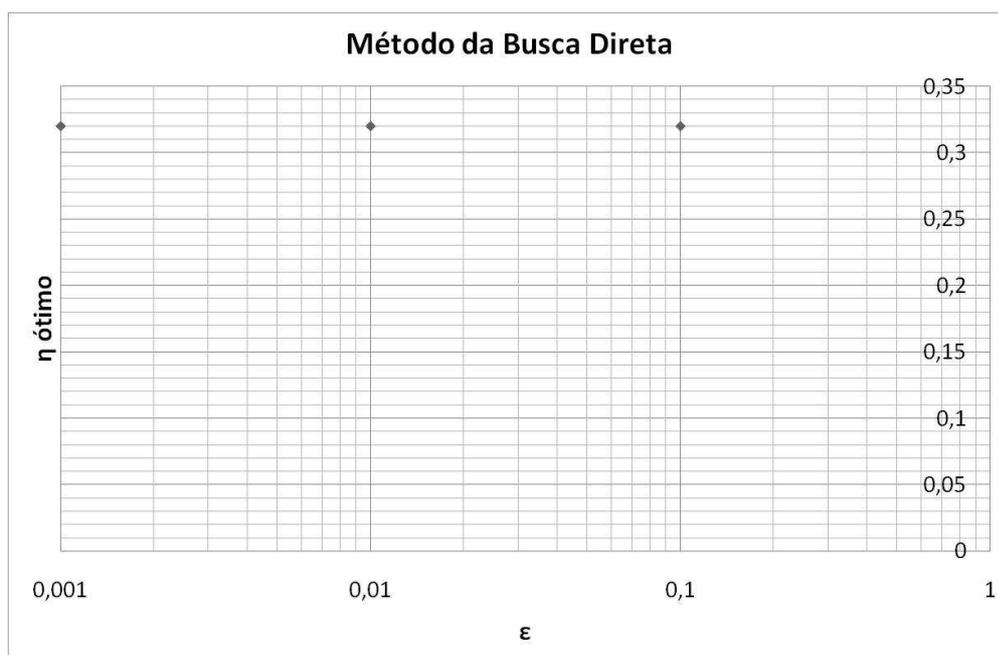
<b>Rankine com ciclo de Absorção</b>	
P13 (bar)	42
T13 (°C)	450
$\eta_{\text{exerg}}$	0,2712
$\eta_{\text{energ}}$	0,583
Custos B. Exergética	22,489
C eletricidade (kJ/kJ)	3,368
C vapor (kJ/kJ)	3,431
C água gelada (kJ/kJ)	15,69
Mc (kg/s)	0,2835
$I_{\text{PLANTA}}$ (kJ/s)	9747

## 5.1 BUSCA DIRETA

O método da busca direta se mostrou bastante consistente desde condições de parada relativamente pouco restritas. Foram aplicadas três rotinas de otimização e desde a condição de  $\varepsilon=10^{-2}$ , obtiveram-se soluções sem refinamento aparente entre si. Dessa forma, os resultados para o método foram:

**Tabela 5.2 - Resultados – Busca Direta**

<b>Método 1 - Busca Direta</b>			
$\varepsilon$	0,01	0,001	0,0001
Chamadas	51	65	121
Tempo gasto (s)	13	15,8	26,7
Psc(bar)	120	120	120
Tsc(°C)	580	580	580
$\eta_{\text{exerg}}$	0,32	0,32	0,32
$\eta_{\text{energ}}$	0,688	0,688	0,688
Custos B. Exergética	19,238	19,238	19,238
C eletricidade (kJ/kJ)	2,883	2,883	2,883
C vapor (kJ/kJ)	2,925	2,925	2,925
C água gelada (kJ/kJ)	13,43	13,43	13,43
Mc (kg/s)	0,2402	0,2402	0,2402
Iplanta (kJ/s)	7730	7730	7730



**Gráfico 5.1 – Busca Direta**

Neste caso mais simples, o método foi bastante consistente, e o valor encontrado para o rendimento exergético máximo foi de 0,32. Intuitivamente, como se trabalhou unicamente com ciclo a vapor e ciclo de compressão, pode-se dizer que era esperado que o máximo rendimento exergético se desse para a condição de máximo superaquecimento do vapor na saída da caldeira, dada pela condição limite do problema ( $T_{sc}=580^{\circ}\text{C}$  e  $P_{sc}=120$  bar).

## 5.2 OTIMIZAÇÃO MÉTRICA VARIÁVEL

Dentre os quatro métodos aplicados, este foi o menos robusto no sentido de convergência para os valores do ponto ótimo. Aplicaram-se nove condições de parada (de  $\varepsilon=10^{-2}$  a  $\varepsilon=10^{-10}$ ) e pôde-se observar a flutuação dos valores entre rotinas. Os resultados são apresentados sob forma de tabela, com os mesmos parâmetros do item anterior.

**Tabela 5.3 - Resultados – Variável Métrica**

<b>Método 2 - Variável Métrica</b>									
$\varepsilon$	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06	1E-07	1E-08	1E-09	1E-10
Chamadas	61	73	96	117	138	163	182	207	223
Tempo gasto (s)	9,4	10,9	14	16,1	19,1	21,5	23,9	27	28,7
Psc (bar)	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Tsc ( $^{\circ}\text{C}$ )	463,7	461,3	461,7	461,7	460,9	463,2	461,9	463,2	460,9
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3066	0,3064	0,3064	0,3064	0,3063	0,3066	0,3064	0,3066	0,3063
$\eta_{\text{energ}}$	0,6588	0,6582	0,6583	0,6583	0,6581	0,6586	0,6583	0,6586	0,6581
Custos B. Exergética	20,076	20,101	20,09	20,09	20,102	20,088	20,09	20,088	20,102
C eletricidade (kJ/kJ)	3,015	3,018	3,017	3,017	3,018	3,016	3,017	3,016	3,018
C vapor (kJ/kJ)	3,021	3,023	3,023	3,023	3,024	3,022	3,023	3,022	3,024
C água gelada (kJ/kJ)	14,04	14,06	14,05	14,05	14,06	14,05	14,05	14,05	14,06
Mc (kg/s)	0,2503	0,2506	0,2505	0,2505	0,2506	0,2504	0,2505	0,2504	0,2506
Iplanta (kJ/s)	8206	8216	8214	8214	8218	8208	8214	8208	8218

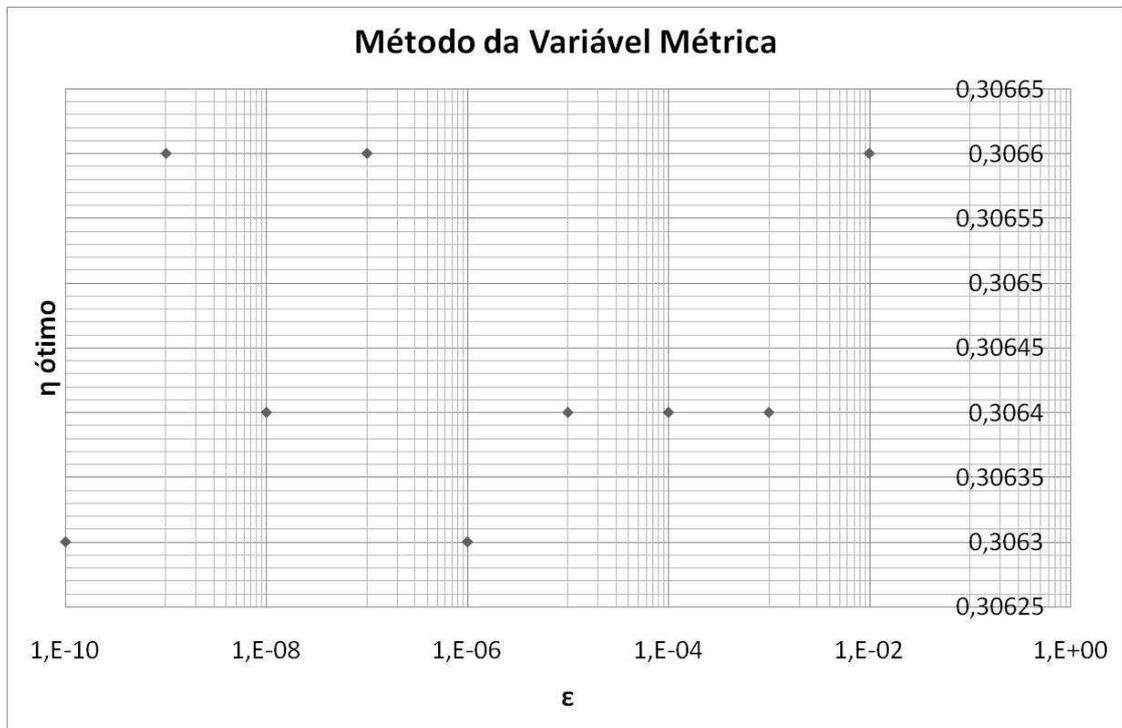


Gráfico 5.2 - Variável Métrica

### 5.3 ALGORITMO GENÉTICO

Bastante robusto, o método permite a alteração de três variáveis de entrada: número de indivíduos, o número de gerações e a taxa de mutação máxima. Como já foi dito anteriormente, a taxa de mutação alta introduz um fator de maior aleatoriedade na busca pelo ponto ótimo, já que os pontos “filhos” são menos dependentes “geneticamente” dos pontos “pais”, que estão mais próximos do ponto procurado. Por outro lado, é de se esperar que um maior número de indivíduos e gerações convirja à solução com maior robustez. A metodologia de aplicação do algoritmo foi aplicada mantendo-se dois parâmetros fixos no valor mínimo, com a variação do terceiro para o estudo da convergência segundo cada um deles.

### 5.3.1 Resultados para gerações e taxa máxima de mutação fixas (variação do número de indivíduos)

Tabela 5.4 - Resultados – Algoritmo Genético 1

Método 3 - Algoritmo Genético – Número de Indivíduos Variável				
Chamadas	290	562	1106	2194
Tempo gasto (s)	61,3	115	230	462,7
Indivíduos	16	32	64	128
Gerações	16	16	16	16
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
Psc (bar)	118,2	120	120	120
Tsc (°C)	576,9	579,2	580	580
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3192	0,3199	0,32	0,32
$\eta_{\text{energ}}$	0,6863	0,6878	0,6879	0,6879
Custos B. Exergética	19,282	19,24	19,238	19,238
C eletricidade (kJ/kJ)	2,89	2,884	2,883	2,883
C vapor (kJ/kJ)	2,932	2,926	2,925	2,925
C água gelada (kJ/kJ)	13,46	13,43	13,43	13,43
Mc (kg/s)	0,2408	0,2403	0,2402	0,2402
Iplanta (kJ/s)	7758	7733	7730	7730

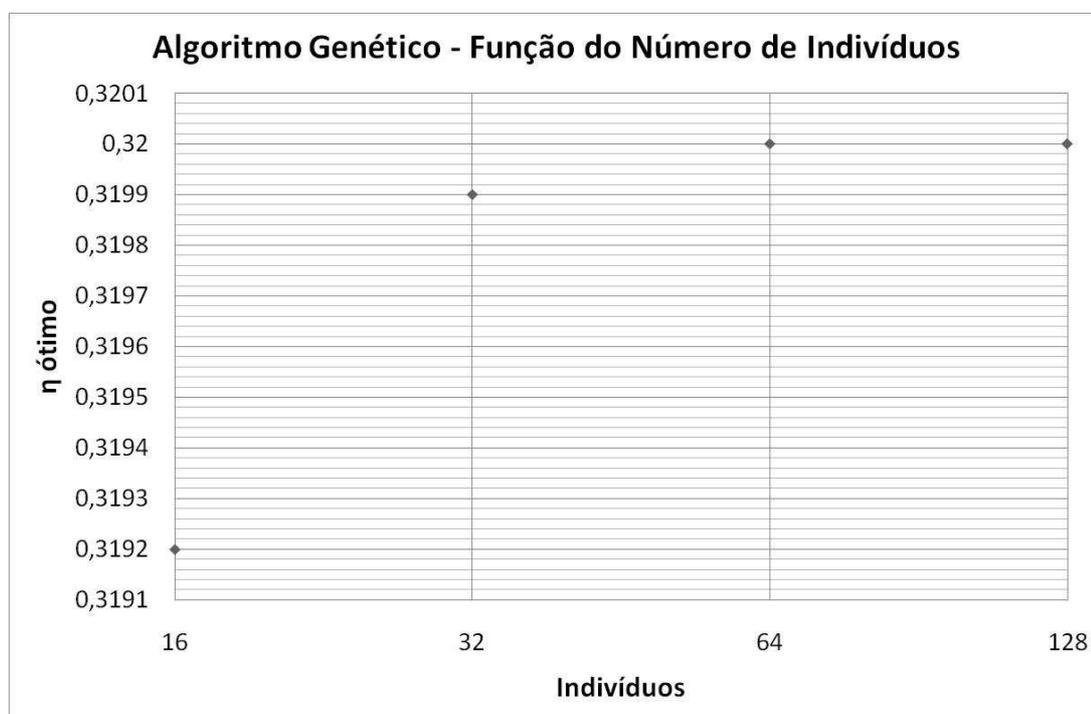


Gráfico 5.3 - Algoritmo Genético – Função dos Indivíduos

### 5.3.2 Resultados para indivíduos e taxa máxima de mutação fixos (gerações variáveis)

Tabela 5.5 - Resultados – Algoritmo Genético 2

Método 3 - Algoritmo Genético – Gerações Variáveis				
Chamadas	290	1106	2184	4370
Tempo gasto (s)	61,3	388,2	822	1322,2
Indivíduos	16	16	16	16
Gerações	16	64	128	256
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
Psc (bar)	118,2	120	120	120
Tsc (°C)	576,9	580	580	580
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3192	0,32	0,32	0,32
$\eta_{\text{energ}}$	0,6863	0,688	0,6879	0,688
Custos B. Exergética	19,282	19,238	19,238	19,238
C eletricidade (kJ/kJ)	2,89	2,883	2,883	2,883
C vapor (kJ/kJ)	2,932	2,925	2,925	2,925
C água gelada (kJ/kJ)	13,46	13,43	13,43	13,43
Mc (kg/s)	0,2408	0,2402	0,2402	0,2402
Iplanta (kJ/s)	7758	7730	7730	7730

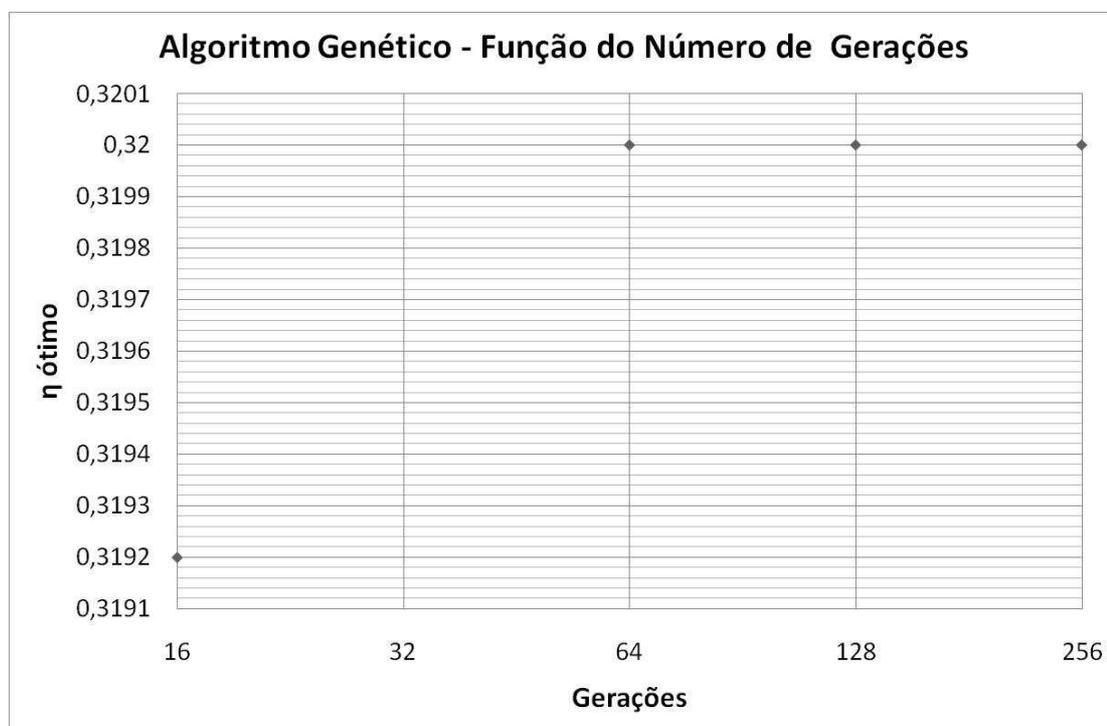


Gráfico 5.4 - Algoritmo Genético – Função das Gerações

### 5.3.3 Resultados para indivíduos e gerações fixos (taxa de mutação variável)

Tabela 5.6 - Resultados – Algoritmo Genético 3

Método 3 - Algoritmo Genético - Taxa de Mutação Variável				
Chamadas	290	290	290	290
Tempo gasto (s)	61,3	83,7	70,5	68,2
Indivíduos	16	16	16	16
Gerações	16	16	16	16
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,2625	0,4375	0,7
Psc (bar)	118,2	119,4	120	119,8
Tsc (°C)	576,9	580	580	575,5
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3192	0,3198	0,32	0,3194
$\eta_{\text{energ}}$	0,6863	0,6877	0,6879	0,6867
Custos B. Exergética	19,282	19,24	19,238	19,278
C eletricidade (kJ/kJ)	2,89	2,884	2,883	2,889
C vapor (kJ/kJ)	2,932	2,926	2,925	2,929
C água gelada (kJ/kJ)	13,46	13,43	13,43	13,46
Mc (kg/s)	0,2408	0,2403	0,2402	0,2407
Iplanta (kJ/s)	7758	7735	7730	7750

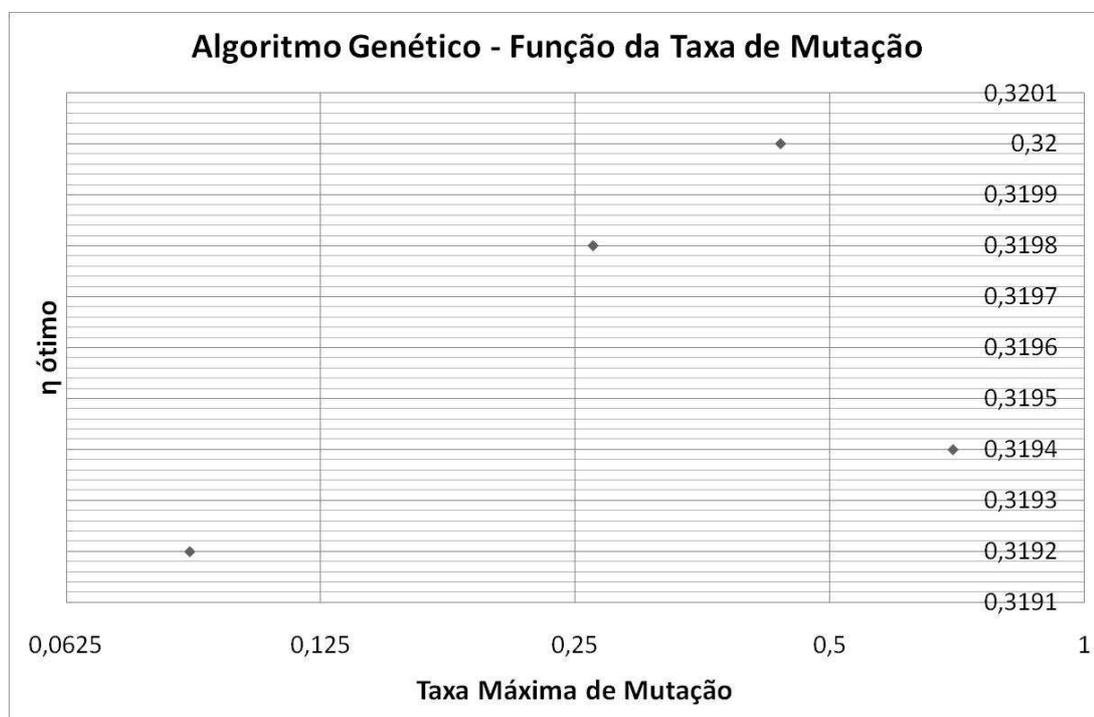


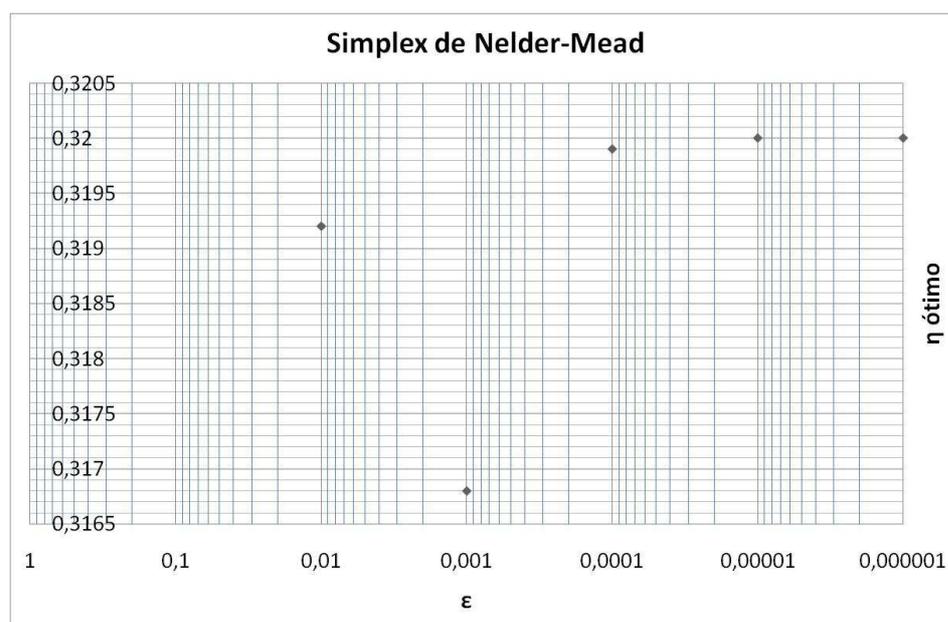
Gráfico 5.5 - Algoritmo Genético – Função da Taxa de Mutação Máxima

## 5.4 SIMPLEX DE NELDER-MEAD

Para o quarto e último método, obteve-se o ponto ótimo a partir de  $\varepsilon=10^{-5}$ . O método pareceu bastante consistente e possui velocidade de iteração muito superior ao método de busca direta para esta planta. Porém, sabe-se que ele deve ser largamente mais robusto quando há um número maior de restrições – aplicações ao chiller de absorção na continuidade do projeto.

**Tabela 5.7 - Resultados – Simplex de Nelder-Mead**

<b>Método 4 - Nelder-Mead Simplex</b>					
$\varepsilon$	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05	1E-06
Chamadas	13	37	83	151	179
Tempo gasto (s)	3,1	7,7	15,9	25,6	29,6
Psc (bar)	120	107,2	119,9	120	120
Tsc (°C)	506,3	577	579,3	280	280
Hexerg	0,3192	0,3168	0,3199	0,32	0,32
Henerg	0,6687	0,6805	0,6877	0,6879	0,6879
Custos B. Exergética	19,784	19,43	19,3	19,238	19,238
C eletricidade (kJ/kJ)	2,968	2,91	2,884	2,883	2,883
C vapor (kJ/kJ)	2,986	2,96	2,986	2,925	2,925
C água gelada (kJ/kJ)	13,83	13,56	13,43	13,43	13,43
Mc (kg/s)	0,2466	0,2429	0,2403	0,2402	0,2402
Iplanta (kJ/s)	8032	7852	7734	7730	7730



**Gráfico 5.6 - Algoritmo de Nelder-Mead**

Os resultados para este sistema simplificado de trigeriação com base nas rotinas aplicadas foram:

$$\eta_{\text{EXERG MAX}} = 0,32$$

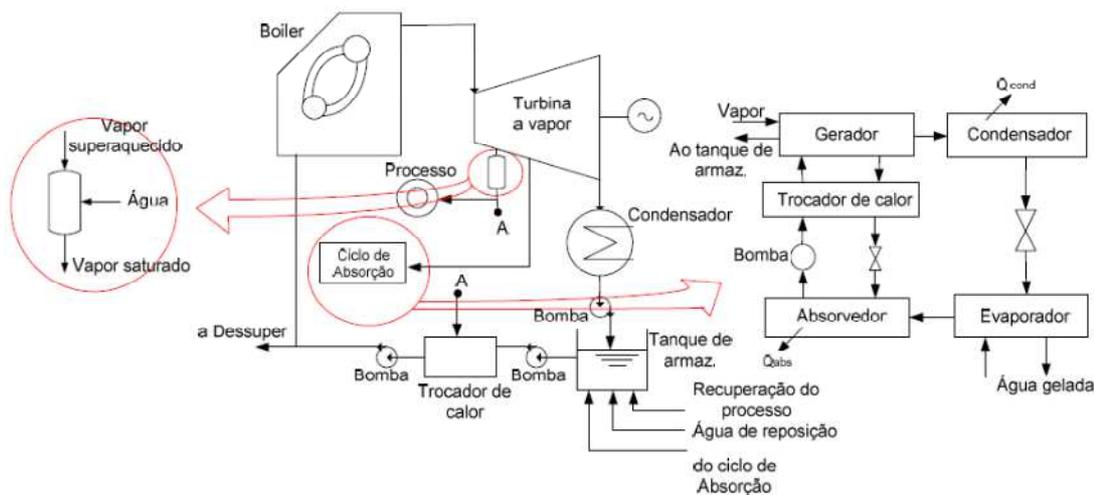
$$T_{\text{SC}} = 580^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{SC}} = 120 \text{ bar}$$

O sistema combinado, com o qual se trabalhou na continuidade do trabalho apresenta maior complexidade tanto em termos de modelagem quanto em nível de rotina de otimização. Assim, estas devem ser refinadas a ponto de se obter resultados consistentes com as imposições do problema, principalmente no que diz respeito aos valores de demanda e disponibilidade de mercado.

## 6 MAXIMIZAÇÃO DO RENDIMENTO EXERGÉTICO: CICLO RANKINE E CHILLER DE ABSORÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO

O segundo exemplo de aplicação de todas as rotinas de otimização disponíveis envolve uma variação no ciclo de refrigeração com relação à primeira planta. Neste caso, tem-se um chiller de absorção simples de simples estágio com a solução água-LiBr. Neste caso, a própria água funciona como fluido refrigerante. Para a condição de extração de vapor superaquecido para o chiller, foi adotada a margem de 1°C para a segurança da equação 4.9. A representação esquemática do sistema pode ser avaliado na Figura 6.1 que segue.



**Figura 6.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio**

As demandas tomadas por base foram mantidas as mesmas do exemplo anterior, sendo:

- (i)  $W_{PLANTA} = 2300 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}$ ;  $p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Assim como no primeiro caso de aplicação das rotinas, para cada ponto de operação foram tomados para análise:

- Número de iterações (chamadas da função);
- Tempo gasto pela rotina
- Critérios de parada
- Pressão e temperatura na caldeira
- Rendimento exergético da planta
- Rendimento energético da planta
- Custos em base exergética dos três produtos (devem ser mínimos no ponto máximo rendimento exergético)
- Consumo de combustível
- Destruição exergética da planta

O resultado base para a planta adotando-se a pressão da caldeira 42 bar e a temperatura 450°C foi:

**Tabela 6.1 - Resultados Base (Rankine e Absorção Simples)**

<b>Rankine com ciclo de Absorção</b>	
P13 (bar)	42
T13 (°C)	450
$\eta_{\text{exerg}}$	0,2751
$\eta_{\text{energ}}$	0,5912
Custos B. Exergética	26,171
C eletricidade (kJ/kJ)	3,306
C vapor (kJ/kJ)	3,365
C água gelada (kJ/kJ)	19,5
Mc (kg/s)	0,2796
Iplanta (kJ/s)	9591

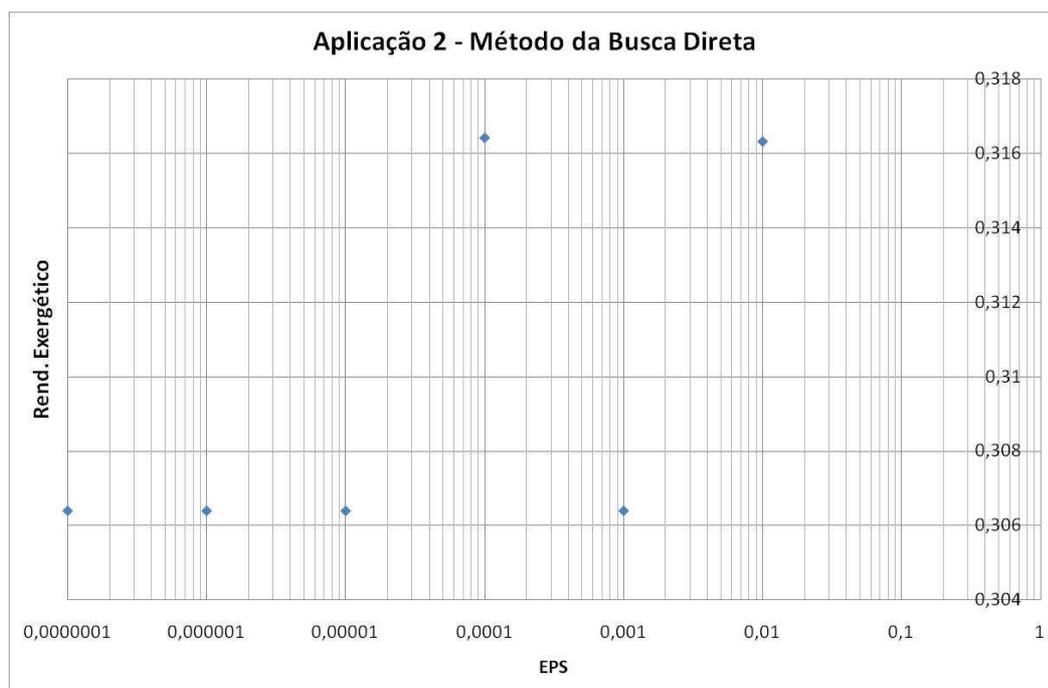
## 6.1 MÉTODO DA BUSCA DIRETA

O método da busca direta se mostrou menos consistente para este segundo caso de aplicação. Para as 6 rotinas aplicadas, o método convergiu para 2 condições de

máximos locais do rendimento exergético. Assim, o método não será priorizado para a continuação do projeto, sendo considerado apenas em casos de eventuais verificações. Os resultados da planta para o método da busca direta podem ser avaliados segundo a tabela:

**Tabela 6.2 - Resultados – Busca Direta**

<b>Método 1 - Busca Direta</b>						
$\varepsilon$	0,01	0,001	0,0001	0,00001	0,000001	0,0000001
Chamadas	76	169	174	214	250	270
Tempo gasto (s)	27,5	56,8	61,2	69,2	77,5	81,8
Psc (bar)	94,11	65,25	94,43	65,26	65,26	65,26
Tsc (°C)	580	580	580	580	580	580
Pchiller (bar)	1,5	0,8	1,5	0,8	0,8	0,8
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3163	0,3064	0,3164	0,3064	0,3064	0,3064
$\eta_{\text{energ}}$	0,6796	0,6583	0,6799	0,6583	0,6583	0,6583
Custos B. Exergética	24,593	22,603	24,591	22,603	22,603	22,603
C eletricidade (kJ/kJ)	2,882	2,976	2,881	2,976	2,976	2,976
C vapor (kJ/kJ)	2,941	3,077	2,94	3,077	3,077	3,077
C água gelada (kJ/kJ)	18,77	16,55	18,77	16,55	16,55	16,55
Mc (kg/s)	0,2432	0,251	0,2431	0,251	0,251	0,251
Iplanta (kJ/s)	7893	8260	7889	8260	8260	8260



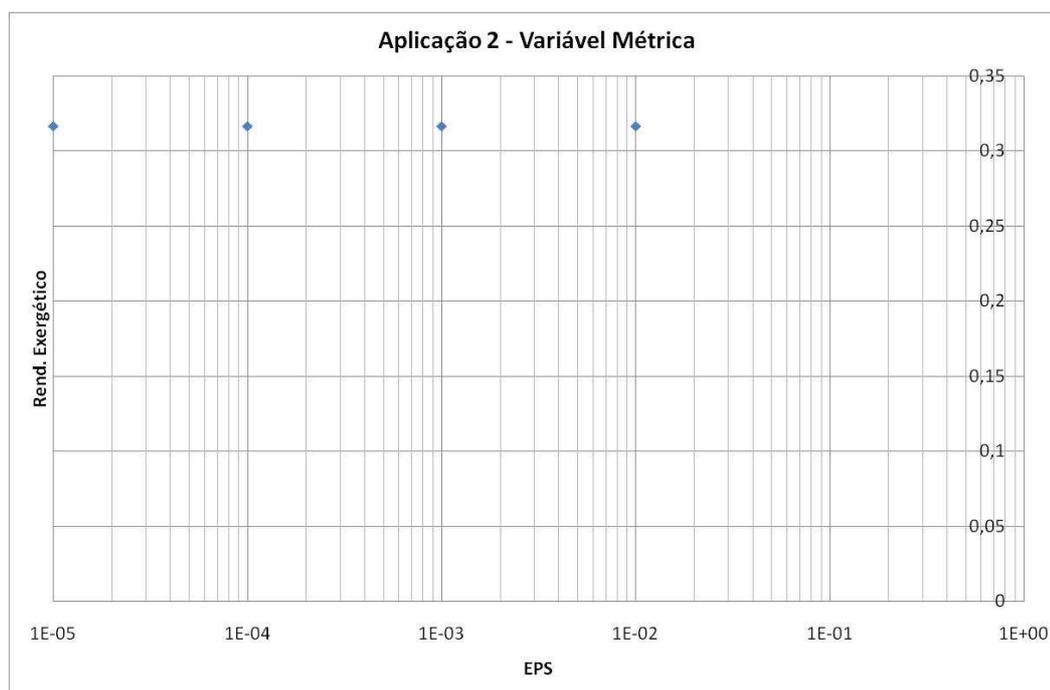
**Gráfico 6.1 - Rendimento Exergético em função da tolerância aplicada ao método**

## 6.2 MÉTODO DA OTIMIZAÇÃO DA VARIÁVEL MÉTRICA

Apesar de ter sido o método menos robusto para o primeiro caso de aplicação, obteve-se um resultado bastante satisfatório em termos de convergência já para tolerâncias relativamente altas, segundo os outros métodos aplicados. Assim como a busca direta, o método será adotado a critério de suporte aos dois seguintes para a continuidade do estudo, por ter fornecido pouca convergência na primeira aplicação.

**Tabela 6.3 - Resultados – Variável Métrica**

<b>Método 2 - Variável Métrica</b>				
$\varepsilon$	1E-02	1E-03	1E-04	1E-05
Chamadas	29	39	49	57
Tempo gasto (s)	8	10,4	12,8	14,9
Psc (bar)	94,4	94,4	94,4	94,4
Tsc (°C)	580	580	580	580
Pchiller (bar)	1,5	1,5	1,5	1,5
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3164	0,3164	0,3164	0,3164
$\eta_{\text{energ}}$	0,6798	0,6798	0,6798	0,6798
Custos B. Exergética	24,591	24,591	24,591	24,591
C eletricidade (kJ/kJ)	2,881	2,881	2,881	2,881
C vapor (kJ/kJ)	2,94	2,94	2,94	2,94
C água gelada (kJ/kJ)	18,77	18,77	18,77	18,77
Mc (kg/s)	0,2431	0,2431	0,2431	0,2431
Iplanta (kJ/s)	7890	7890	7890	7890



**Gráfico 6.2 - Variável Métrica para a aplicação 2**

### 6.3 MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO POR ALGORITMO GENÉTICO

As rotinas de aplicação do algoritmo genético seguiram o mesmo critério do primeiro caso no que diz respeito à variação dos parâmetros de otimização e critérios de parada. Como pôde ser observado no primeiro caso, existe uma convergência ao resultado de ótimo global no intervalo considerado com o aumento no número de indivíduos e gerações. O aumento na taxa de mutação envolve uma maior incidência de fatores de aleatoriedade na busca, o que prejudica o processo iterativo. Mais uma vez, foram apresentadas as evoluções do resultado ótimo segundo o número de indivíduos, gerações e a taxa máxima de mutação.

### 6.3.1 Resultados para gerações e taxa máxima de mutação fixas (variação do número de indivíduos)

Tabela 6.4 - Resultados – Algoritmo Genético 1

Método 3 - Algoritmo Genético					
Chamadas	290	562	1106	2194	4370
Tempo gasto (s)	88,6	172	333,9	675,3	1316,1
Indivíduos	16	32	64	128	256
Gerações	16	16	16	16	16
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
Psc (bar)	54,1	68,71	79,85	82,02	90,54
Tsc (°C)	579,9	550,4	578,9	579,8	579,6
Pchiller (bar)	0,8254	1,467	1,152	1,248	1,45
$\eta_{\text{exerg}}$	0,2995	0,3029	0,3119	0,3126	0,3152
$\eta_{\text{energ}}$	0,6436	0,6508	0,6702	0,6718	0,6773
Custos B. Exergética	23,209	25,512	23,781	24,073	24,525
C eletricidade (kJ/kJ)	3,03	2,999	2,923	2,915	2,891
C vapor (kJ/kJ)	3,159	3,073	2,998	2,988	2,954
C água gelada (kJ/kJ)	17,02	19,44	17,86	18,17	18,68
Mc (kg/s)	0,2568	0,2539	0,2466	0,246	0,244
Iplanta (kJ/s)	8528	8395	8052	8026	7933

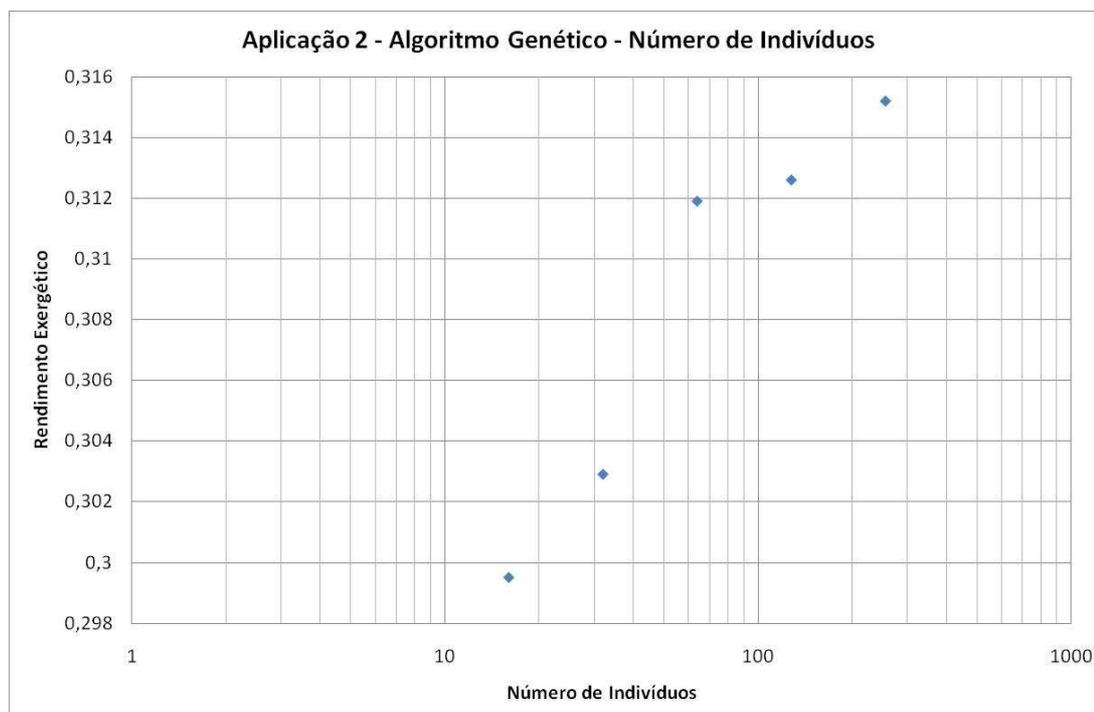


Gráfico 6.3 - Algoritmo Genético – Função dos Indivíduos

### 6.3.2 Resultados para indivíduos e taxa máxima de mutação fixos (gerações variáveis)

Tabela 6.5 - Resultados – Algoritmo Genético 2

<b>Método 3 - Algoritmo Genético</b>				
Chamadas	290	1106	2194	4370
Tempo gasto (s)	88,6	331,5	660,6	1301
Indivíduos	16	16	16	16
Gerações	16	64	128	256
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
Psc (bar)	54,1	86,87	91,76	94,09
Tsc (°C)	579,9	579,1	580	580
Pchiller (bar)	0,8254	1,315	1,431	1,496
$\eta_{\text{exerg}}$	0,2995	0,3142	0,3157	0,3163
$\eta_{\text{energ}}$	0,6436	0,6751	0,6784	0,6796
Custos B. Exergética	23,209	24,19	24,436	24,583
C eletricidade (kJ/kJ)	3,03	2,902	2,887	2,882
C vapor (kJ/kJ)	3,159	2,968	2,949	2,941
C água gelada (kJ/kJ)	17,02	18,32	18,6	18,76
Mc (kg/s)	0,2568	0,2448	0,2436	0,2432
Iplanta (kJ/s)	8528	7969	7915	7893

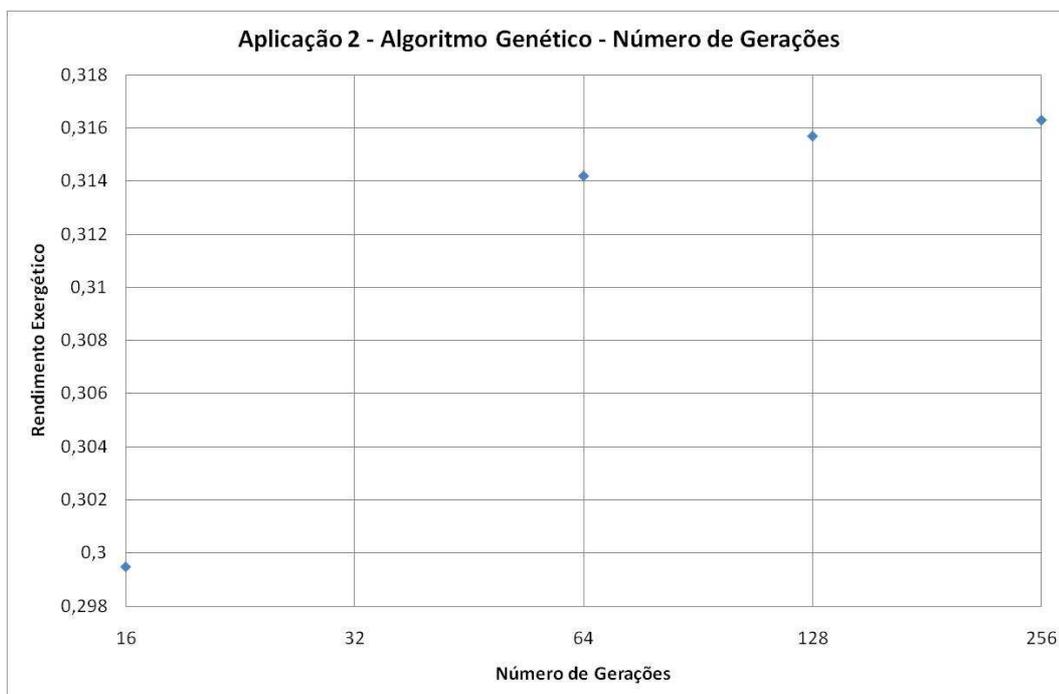


Gráfico 6.4 - Algoritmo Genético – Função das Gerações

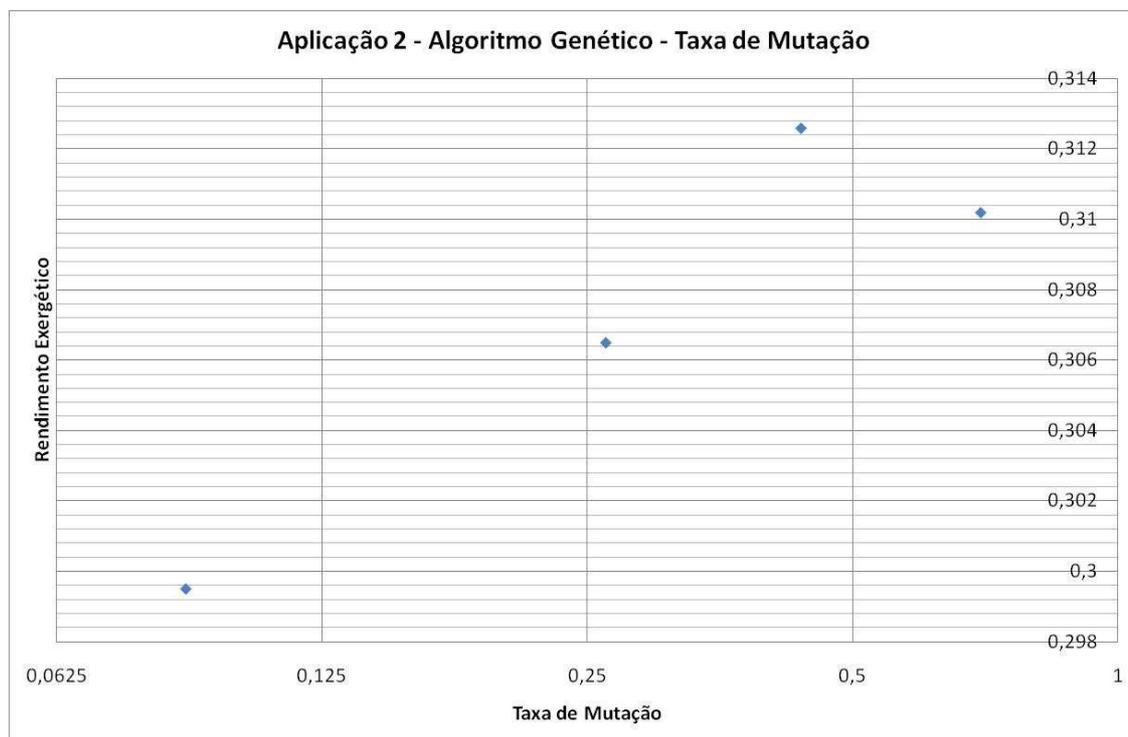
Da mesma forma, o número de gerações implica em uma convergência no resultado do rendimento exergético global da planta. Como foi dito anteriormente, este parâmetro representa o critério de parada do método.

### 6.3.3 Resultados para indivíduos e gerações fixos (taxa de mutação variável)

Como previsto anteriormente, um aumento na taxa de mutação não implica em uma convergência do processo de otimização exergética da planta. Este fator apenas aumenta a aleatoriedade do processo, distanciando os pontos “filhos” de pais favoráveis ao ponto procurado.

**Tabela 6.6 - Resultados – Algoritmo Genético 3**

<b>Método 3 - Algoritmo Genético</b>				
Chamadas	290	290	290	290
Tempo gasto (s)	88,6	87,3	86,3	87,2
Indivíduos	16	16	16	16
Gerações	16	16	16	16
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,2625	0,4375	0,7
Psc (bar)	54,1	73,23	86,18	78,34
Tsc (°C)	579,9	561,8	570,9	573,2
Pchiller (bar)	0,8254	1,384	1,471	1,313
$\eta_{\text{exerg}}$	0,2995	0,3065	0,3126	0,3102
$\eta_{\text{energ}}$	0,6436	0,6586	0,6717	0,6666
Custos B. Exergética	23,209	24,978	24,78	24,464
C eletricidade (kJ/kJ)	3,03	2,967	2,914	2,935
C vapor (kJ/kJ)	3,159	3,041	2,976	3,009
C água gelada (kJ/kJ)	17,02	18,97	18,89	18,52
Mc (kg/s)	0,2568	0,2509	0,2461	0,2479
Iplanta (kJ/s)	8528	8255	8028	8116



**Gráfico 6.5 - Algoritmo Genético – Função da Taxa de Mutação Máxima**

#### 6.4 MÉTODO DO SIMPLEX DE NELDER-MEAD

A grande vantagem do método de Nelder-Mead é o ganho em termos computacionais. A convergência é extremamente rápida em comparação ao algoritmo genético, e representa uma forte ferramenta de verificação do resultado obtido. O resultado pareceu bastante consistente para este caso de aplicação, apesar de ter apresentado um erro na rotina para o primeiro ponto considerado ( $\epsilon=10^{-4}$ ).

Tabela 6.7 - Resultados – Simplex de Nelder-Mead

Método 4 - Nelder-Mead Simplex			
$\varepsilon$	1E-05	1E-06	1,0E-07
Chamadas	201	200	200
Tempo gasto (s)	57,8	58,4	63
Psc (bar)	94	94,41	94,42
Tsc (°C)	579,8	580	580
Pchiller (bar)	1,492	1,499	1,5
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3163	0,3164	0,3164
$\eta_{\text{energ}}$	0,6796	0,6799	0,6799
Custos B. Exergética	24,573	24,581	24,591
C eletricidade (kJ/kJ)	2,882	2,881	2,881
C vapor (kJ/kJ)	2,941	2,94	2,94
C água gelada (kJ/kJ)	18,75	18,76	18,77
Mc (kg/s)	0,2432	0,2431	0,2431
Iplanta (kJ/s)	7895	7890	7889

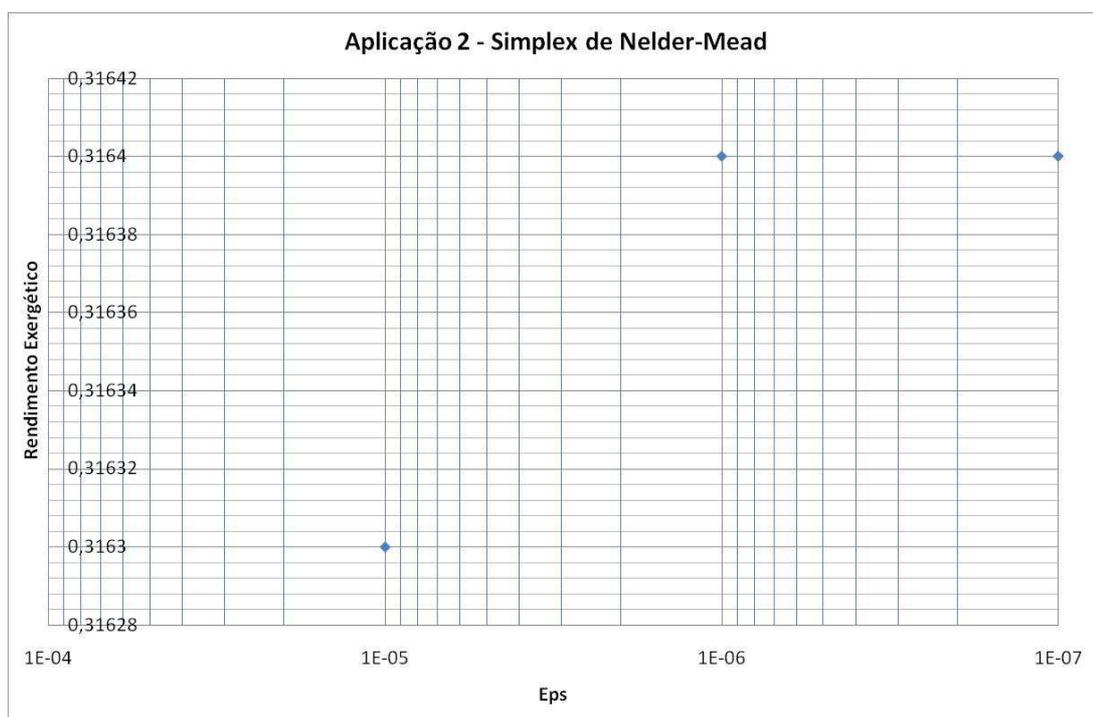


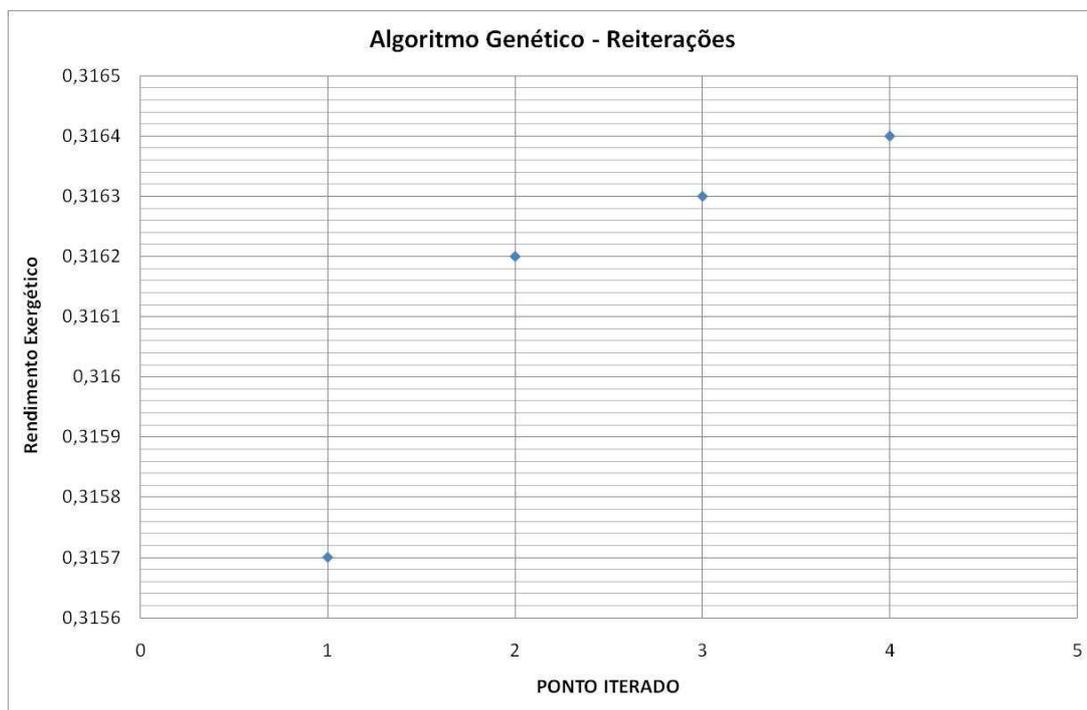
Gráfico 6.6 - Simplex de Nelder-Mead

## 6.5 REITERAÇÕES NA OTIMIZAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Antes de apresentar o resultado final para este segundo caso de aplicação, pode-se analisar o método genético reiterado, onde os pontos-“pai” da primeira geração da primeira otimização representam o resultado otimizado de uma rotina aplicada anteriormente. Assim, tem-se uma aproximação fina ao ponto onde ocorre o máximo rendimento exergético da planta. Para tal, utilizaram-se 32 indivíduos e 128 gerações em quatro rotinas aplicadas, onde, no final, determinou-se o ponto de máximo consistente com os outros métodos utilizados:

**Tabela 6.8 - Resultados – Reiteraões do Algoritmo Genético**

<b>Algoritmo Genético Reiterado</b>				
Indivíduos	32	32	32	32
Gerações	128	128	128	128
Taxa de Mutação Maxima	0,0875	0,0875	0,0875	0,0875
Psc (bar)	91,89	93,68	93,98	94
Tsc (°C)	580	580	580	580
Pchiller (bar)	1,432	1,488	1,488	1,5
$\eta_{\text{exerg}}$	0,3157	0,3162	0,3163	0,3164
$\eta_{\text{energ}}$	0,6784	0,6794	0,6796	0,6798
C eletricidade (kJ/kJ)	2,887	2,883	2,882	2,881
C vapor (kJ/kJ)	2,949	2,942	2,941	2,94
C água gelada (kJ/kJ)	18,6	18,74	18,74	18,77
Mc (kg/s)	0,2436	0,2433	0,2432	0,2431
Iplanta (kJ/s)	7913	7897	7894	7890



**Gráfico 6.7 - Reiteraões do algoritmo Genético**

Em linhas gerais, este procedimento equivale ao aumento no número de gerações do método. Dessa forma, eventualmente pode-se estender o critério de parada para um valor maior de gerações àquele permitido pelo software.

Finalmente, o resultado encontrado para a segunda planta estudada em termos de otimização exergética foi:

$$\eta_{\text{EXERG MAX}} = 0,3164$$

$$T_{\text{SC}} = 580^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{SC}} = 94,4 \text{ bar}$$

$$P_{\text{CHILLER}} = 1,5 \text{ bar}$$

Assim, para as aplicações na minimização dos custos em termos monetários, foram utilizados o algoritmo genético e o simplex de Nelder-Mead. Como foi visto e será

discutido na seqüência do documento, o algoritmo genético é bastante custoso em termos computacionais, sendo privilegiado para as análises finais do trabalho o simplex de Nelder-Mead.

## 7 ESTUDOS DE CASO E A MINIMIZAÇÃO DO CUSTO TOTAL EM BASE MONETÁRIA (CTBM)

Primeiramente nesta seção, serão apresentadas comparações dos resultados obtidos em termos da maximização do rendimento exergético para efeito de definição de critério diante das rotinas de otimização a serem adotadas na seqüência. Da mesma forma, os estudos de caso de Burbano e seus resultados serão verificados, antes da minimização dos custos para estas configurações de demanda.

### 7.1 CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO

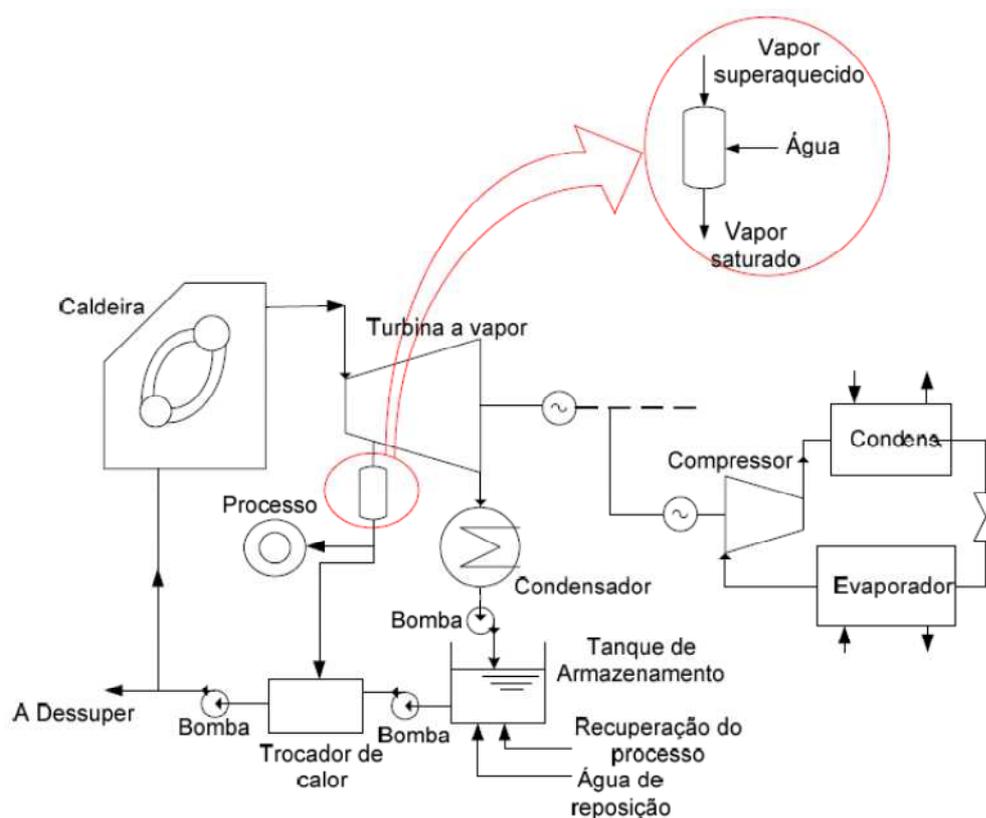


Figura 7.1 - Planta de Trigeração com ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão

As condições de demanda aplicadas advêm de uma indústria de laticínios colombiana (LARRAZÁBAL; OLIVEIRA JR., 2002):

(i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300 \text{ kW}$

- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$   
 (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}$ ;  $p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Os resultados obtidos utilizando as quatro rotinas de otimização (ver relatório anexo) são apresentados no quadro abaixo.

$\eta_{EXERG \text{ MAX}} = 0,32$ $T_{SC} = 580^{\circ}\text{C}$ $P_{SC} = 120 \text{ bar}$
---

## 7.2 CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES-EFEITO

Da mesma forma, e para as mesmas condições de demanda, foram aplicadas todas as quatro rotinas de otimização para o caso de cogeração com refrigeração por absorção de simples-efeito. O esquema da planta e os resultados obtidos podem ser verificados no que segue.

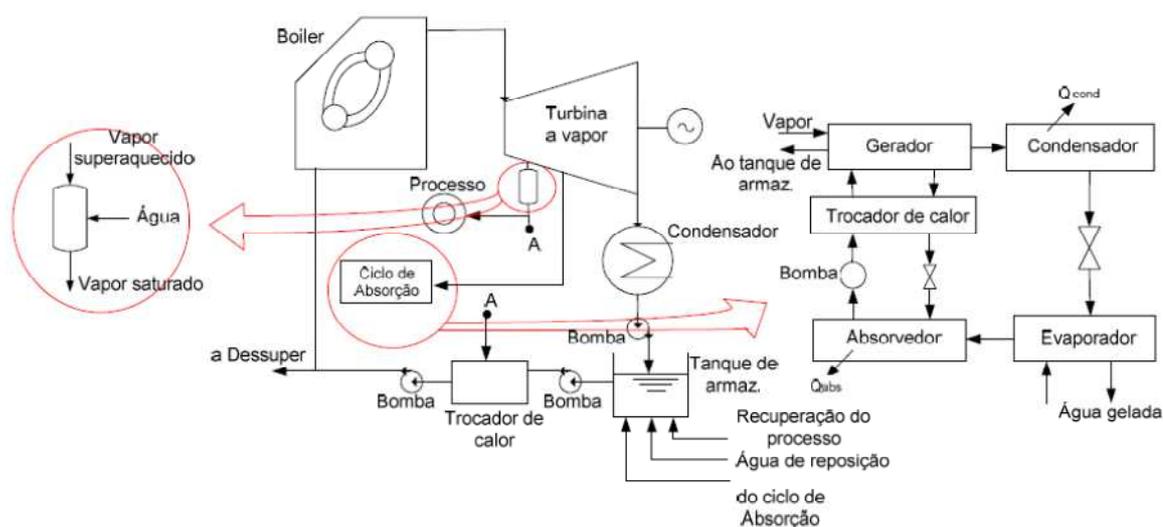


Figura 7.2 - Planta de Trigeriação com ciclo Rankine e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio

$$\eta_{\text{EXERG MAX}} = 0,3164$$

$$T_{\text{SC}} = 580^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{SC}} = 94,4 \text{ bar}$$

$$P_{\text{CHILLER}} = 1,5 \text{ bar}$$

Assim como nos casos de aplicação da tese de J. C. Burbano, o algoritmo genético e o Simplex de Nelder-Mead foram os que apresentaram maior robustez entre as rotinas empregadas. Dado o alto consumo computacional do algoritmo genético, para os dados gerados na análise da variação de demandas, o simplex será preferido. Nos estudos de caso, o algoritmo genético serviu de critério de comparação como será apresentado posteriormente.

### 7.3 OS RESULTADOS DE OTIMIZAÇÃO DA TESE DE J. C. BURBANO

Julga-se relevante citar os principais resultados obtidos na tese de doutorado intitulada “Otimização exergoeconômica de sistema tetracombinado de cogeração”. O trabalho apresenta os resultados obtidos pelo algoritmo genético de oito diferentes configurações de plantas de trigerção, a citar:

- Ciclo Rankine e chiller de compressão
- Ciclo Rankine e chiller de absorção de simples efeito
- Ciclo Rankine chiller de absorção de duplo efeito
- Turbina a gás e chiller de absorção de simples efeito
- Turbina a gás e chiller de absorção de duplo efeito
- Ciclo combinado e chiller de absorção de simples efeito
- Ciclo combinado e chiller de absorção duplo efeito
- Ciclo tetra-combinado

O estudo abordou três casos de demanda energética. Além do caso da indústria de laticínios, consideraram-se um hospital e uma indústria de bebidas cujos resultados

no ponto de máximo rendimento exergético podem ser avaliados nos sub-itens que seguem.

### 7.3.1 O caso da indústria de laticínios (Resultados-base e caso otimizado)

Obtiveram-se os seguintes resultados para as demandas apresentadas em 2.1:

**Tabela 7.1 - Cenário 1: Resultados no ponto ótimo para situação sem excedente de eletricidade**

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética		Eficiência Exergética	
	Caso Base	Caso Otimizado	Caso Base	Caso Otimizado
	(%)	(%)	(%)	(%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	58,30	68,8	27,12	32,0
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	59,12	68,03	27,51	31,66
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	59,19	69,21	27,54	32,61

**Tabela 7.2 - Cenário 2: Resultados no ponto ótimo para 1662kW de excedente de eletricidade**

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética		Eficiência Exergética	
	Caso Base	Caso Otimizado	Caso Base	Caso Otimizado
	(%)	(%)	(%)	(%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	46,83	55,24	25,88	30,53
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	47,27	54,47	26,13	30,12
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	47,27	55,9	26,13	30,9
Turbina a gás e refrigeração por absorção simples efeito	57,13	57,21	31,58	31,66
Turbina a gás e refrigeração por absorção duplo efeito	57,15	57,23	31,6	31,68

Tabela 7.3 - Cenário 3: Resultados no ponto ótimo para 3143kW de excedente de eletricidade

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética		Eficiência Exergética	
	Caso Base	Caso Otimizado	Caso Base	Caso Otimizado
	(%)	(%)	(%)	(%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	41,63	49,1	25,32	29,87
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	41,93	48,34	25,51	29,41
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	41,91	49,53	25,50	30,31
Ciclo combinado e refrigeração por absorção simples efeito	66,08	67,4	40,21	41,48
Ciclo combinado e refrigeração por absorção de duplo	66,04	67,67	40,17	41,74
Ciclo Tetra-Combinado	66,01	67,3	40,14	41,32

### 7.3.2 O caso do hospital (Resultados-base)

A demanda neste caso foi extraída do trabalho de Ruyet (2008) para um hospital de grande porte:

- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2200 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2100 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,55 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Os resultados para este segundo caso analisado foram:

Tabela 7.4 - Cenário 1: Resultados no caso base para situação sem excedente de eletricidade

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	59,40	24,02
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	62,66	25,41
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	63,13	25,57

Tabela 7.5 - Cenário 2: Resultados no caso base para 2390kW de excedente de eletricidade

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	44,83	23,82
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	46,19	24,58
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	46,35	24,64
Turbina a gás e refrigeração por absorção simples efeito	57,96	30,84
Turbina a gás e refrigeração por absorção duplo efeito	58,04	30,89

Tabela 7.6 - Cenário 3: Resultados no caso base para 3220kW de excedente de eletricidade

Sistema de Trigeração	Eficiência Energética (%)	Eficiência Exergética (%)
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	42,26	23,78
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	43,36	24,30
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	43,48	24,49
Ciclo combinado e refrigeração por absorção simples efeito	68,72	38,72
Ciclo combinado e refrigeração por absorção de duplo	68,85	38,83
Ciclo Tetra-Combinado	68,10	38,10

### 7.3.3 O caso da indústria de bebidas (Resultados-base)

A demanda para este terceiro e último caso que consta na tese em questão foi baseada em uma planta localizada no município de Jundiaí-SP:

- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 8000 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2000 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,7 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

As tabelas com os máximos de rendimento exergético podem ser avaliadas abaixo.

**Tabela 7.7 - Cenário 1: Resultados no caso base para situação sem excedente de eletricidade**

<b>Sistema de Trigeração</b>	<b>Eficiência Energética (%)</b>	<b>Eficiência Exergética (%)</b>
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	37,80	23,87
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	38,44	24,30
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	38,49	24,32

**Tabela 7.8 - Cenário 2: Resultados no caso base para 442kW de excedente de eletricidade**

<b>Sistema de Trigeração</b>	<b>Eficiência Energética (%)</b>	<b>Eficiência Exergética (%)</b>
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	37,19	23,86
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	37,68	24,26
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	37,82	24,28
Turbina a gás e refrigeração por absorção simples efeito	46,84	30,08
Turbina a gás e refrigeração por absorção duplo efeito	46,89	30,11

**Tabela 7.9 - Cenário 3: Resultados no caso base para 1571kW de excedente de eletricidade**

<b>Sistema de Trigeração</b>	<b>Eficiência Energética (%)</b>	<b>Eficiência Exergética (%)</b>
Turbina a vapor e refrigeração por compressão	35,85	23,82
Turbina a vapor e refrigeração por absorção simples efeito	36,35	24,18
Turbina a vapor e refrigeração por absorção duplo efeito	36,38	24,19
Ciclo combinado e refrigeração por absorção simples efeito	59,08	39,26
Ciclo combinado e refrigeração por absorção de duplo	59,14	39,31
Ciclo Tetra-Combinado	58,72	38,91

Os resultados anteriormente mostram que os sistemas combinados com refrigeração de duplo efeito sempre possuem melhor impacto para todos os três cenários que o caso da planta tetra-combinada, apesar de possuírem rendimentos exergéticos sensivelmente próximos.

Como se pôde ver, os resultados obtidos na otimização dos dois primeiros casos são coerentes com aqueles encontrados no trabalho de Burbano.

Na continuação do trabalho serão analisados os mesmos cenários do ponto de vista de custos em base monetária.

Primeiramente serão estudadas nos estudos de caso as duas primeiras plantas que apresentam ciclo Rankine de Potência e refrigeração por compressão de vapor e absorção de simples estágio. Já para a generalização das demandas de eletricidade e refrigeração serão estudadas além destas configurações aquela que apresenta refrigeração por absorção de duplo-efeito e um ciclo combinado com turbina a gás.

## 8 ESTUDOS DE CASO : CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

Para cada caso de planta estudado, serão feitas aplicações para os três cenários de demanda, para que se tenham parâmetros de análise na comparação de configurações de planta em termos monetários.

O critério de partição de custos utilizado foi o critério da **igualdade**.

A primeira planta pode ser avaliada na figura que segue.

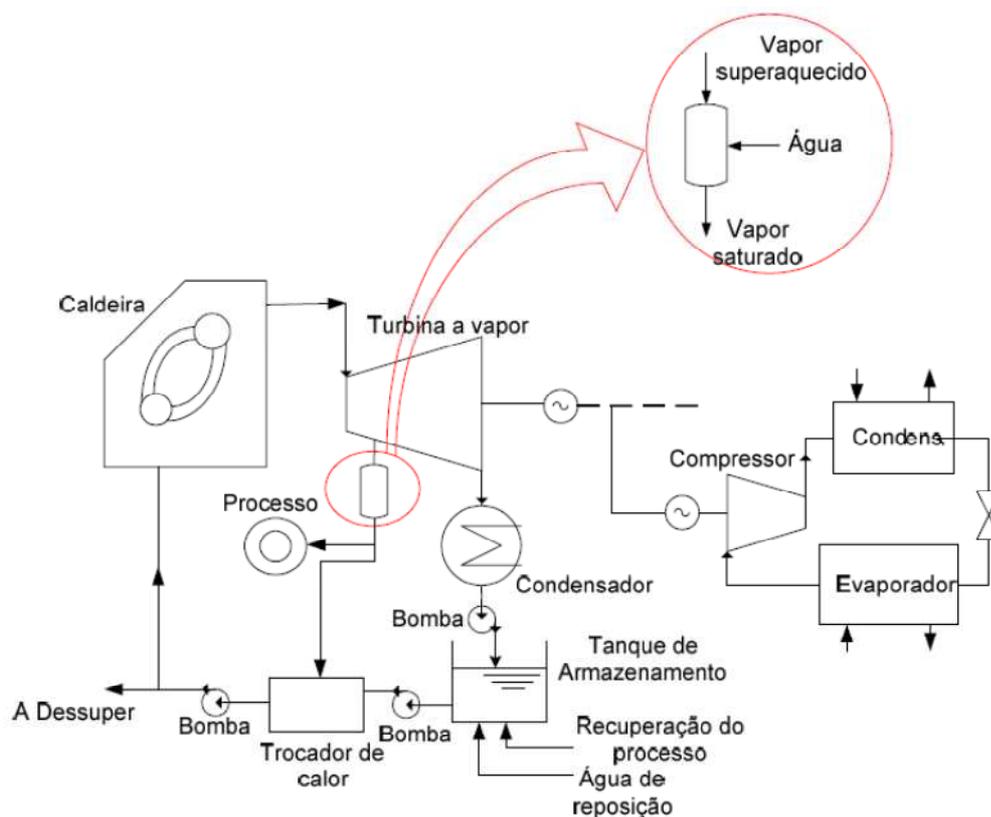


Figura 8.1 - Ciclo Rankine e Refrigeração por Compressão de Vapor

No caso desta planta, utilizaram-se duas rotinas diferentes de otimização na minimização da função CTBM – o algoritmo genético com base de 32 indivíduos e 64 gerações e o simplex de Nelder-Mead com critério de parada de  $\epsilon=10^{-7}$

## 8.1 CENÁRIO 1 – INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS.

Como explicitado anteriormente, as condições de demanda aplicadas para a indústria de laticínios são:

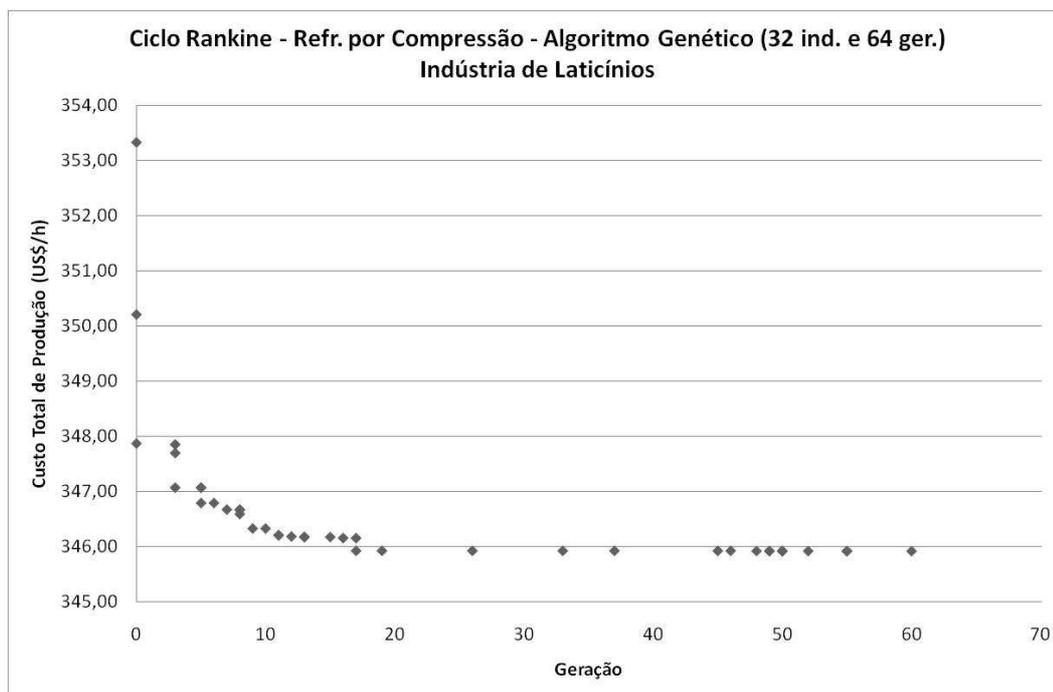
- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBM para a primeira configuração de planta e cenário 1 (variáveis – propriedades na caldeira):

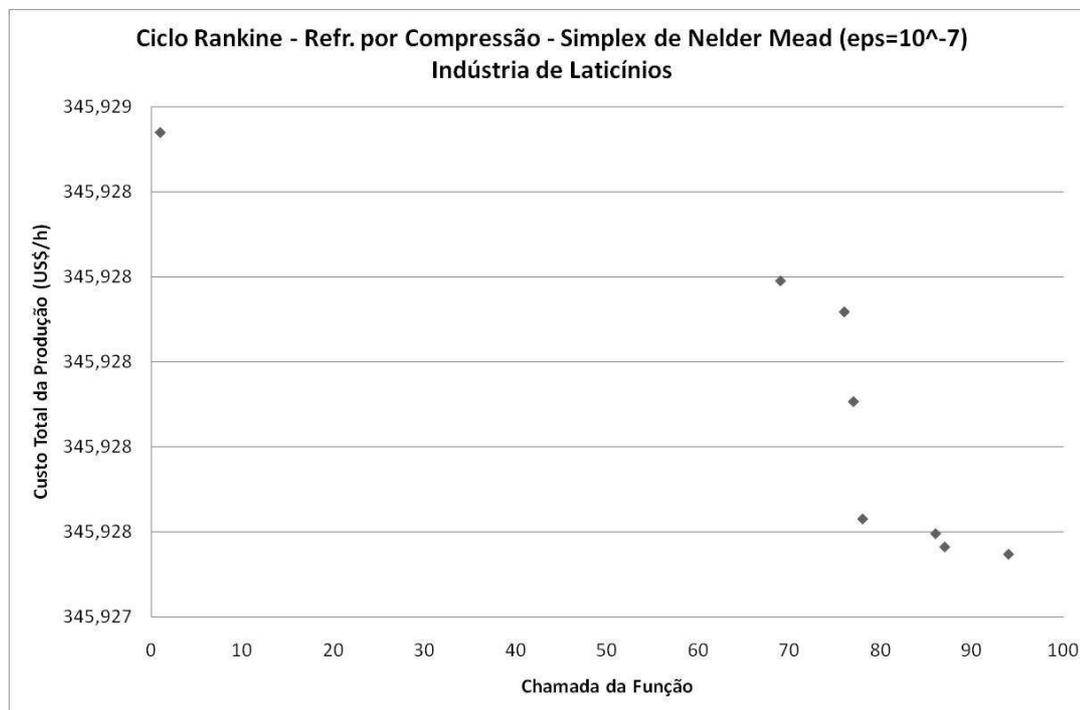
**Tabela 8.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1**

<b>Aplicação 1 - Indústria de Laticínios - Rankine/Compressão de Vapor</b>		
Parâmetro	Algoritmo Genético	Simplex de Nelder-Mead
$P_{CALD}$ (bar)	120	120
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$\eta_{ENERGETICO}$	68,80%	68,80%
$\eta_{EXERGETICO}$	32,00%	32,00%
$C_{ELETRICIDADE}$ (US\$/kJ)	0,00002425	0,00002425
$C_{AGUA GELADA}$ (US\$/kJ)	0,00018230	0,00018230
$C_{VAPOR}$ (US\$/kJ)	0,00002462	0,00002462
CTBM (US\$/h)	345,93	345,93

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 8.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1 – Alg. Genético**



**Gráfico 8.2 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead**

## 8.2 CENÁRIO 2 – HOSPITAL

Como explicitado, as condições de demanda aplicadas ao cenário do hospital são:

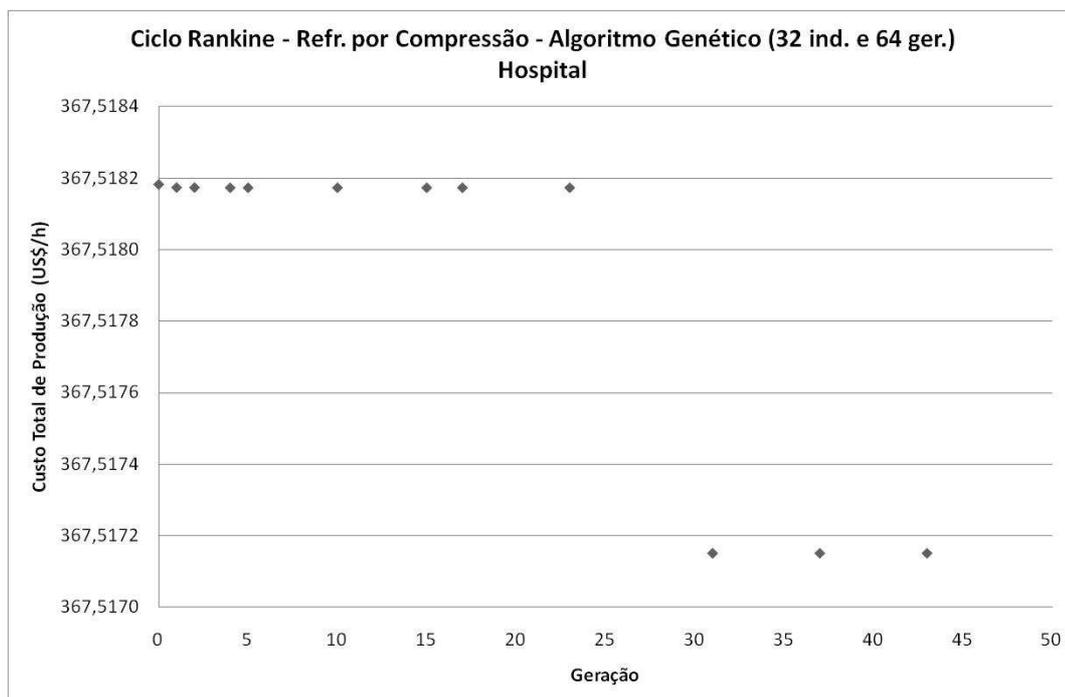
- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2200 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2100 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,55 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBM para a primeira configuração de planta e cenário 2 (variáveis – propriedades na caldeira):

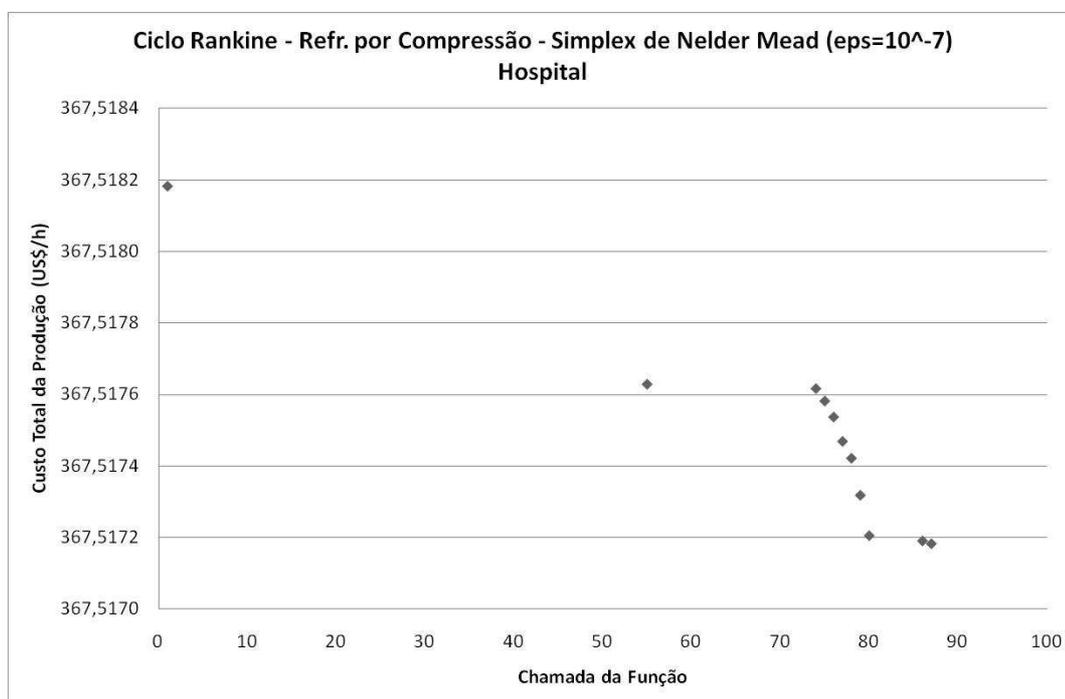
**Tabela 8.2 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1**

<b>Aplicação 2 - Hospital - Rankine/Compressão de Vapor</b>		
Parâmetro	Algoritmo Genético	Simplex de Nelder-Mead
$P_{CALD}$ (bar)	120	120
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$\eta_{ENERGETICO}$	69,89%	69,89%
$\eta_{EXERGETICO}$	28,27%	28,27%
$C_{ELETRICIDADE}$ (US\$/kJ)	0,00002512	0,00002512
$C_{AGUA GELADA}$ (US\$/kJ)	0,00016740	0,00016740
$C_{VAPOR}$ (US\$/kJ)	0,00002555	0,00002555
<b>CTBM (US\$/h)</b>	<b>367,52</b>	<b>367,52</b>

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 8.3 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1 – Alg. Genético**



**Gráfico 8.4 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead**

### 8.3 CENÁRIO 3 – INDÚSTRIA DE BEBIDAS

Como explicitado, as condições de demanda para a indústria de bebidas aplicadas são:

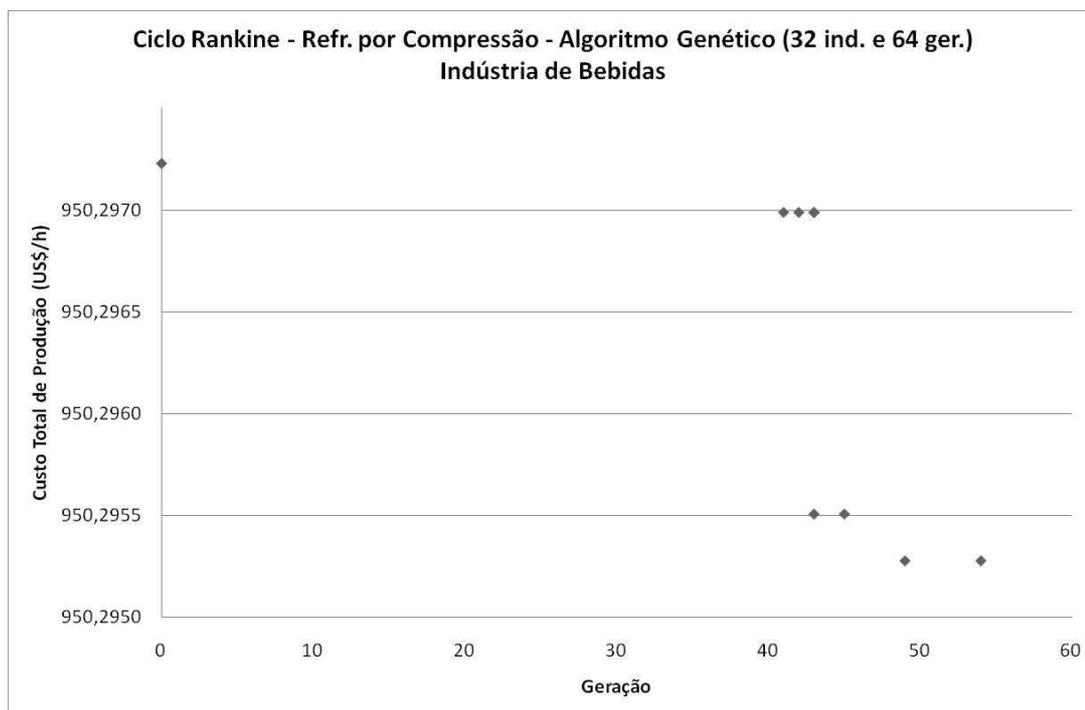
- (iv)  $\dot{W}_{PLANTA} = 8000 \text{ kW}$
- (v)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2000 \text{ kW}$
- (vi)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,7 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBM para a primeira configuração de planta e cenário 3 (variáveis – propriedades na caldeira):

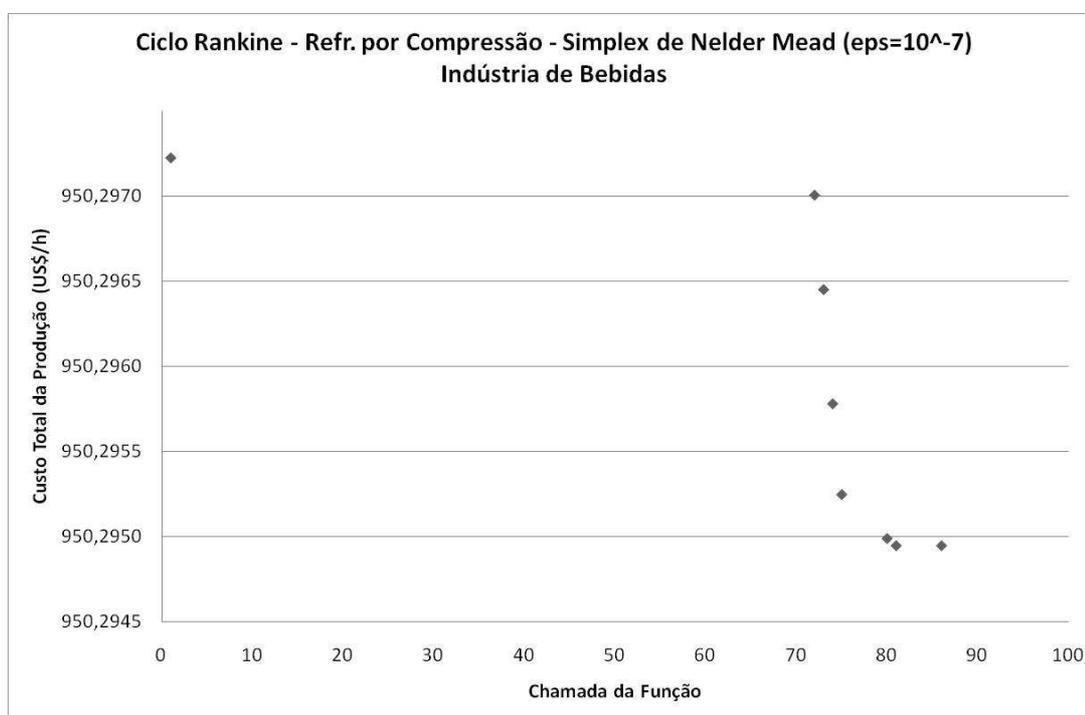
**Tabela 8.3 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1**

<b>Aplicação 3 - Indústria de Bebidas - Rankine/Compressão de Vapor</b>		
Parâmetro	Algoritmo Genético	Simplex de Nelder-Mead
$P_{CALD}$ (bar)	120	120
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$\eta_{ENERGETICO}$	44,46%	44,46%
$\eta_{EXERGETICO}$	28,08%	28,08%
$C_{ELETRICIDADE}$ (US\$/kJ)	0,00002658	0,00002658
$C_{AGUA GELADA}$ (US\$/kJ)	0,00017480	0,00017480
$C_{VAPOR}$ (US\$/kJ)	0,00002709	0,00002709
CTBM (US\$/h)	950,30	950,29

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 8.5 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1 – Alg. Genético**



**Gráfico 8.6 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 1 – Simplex de Nelder-Mead**

## 9 ESTUDOS DE CASO: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES EFEITO

Pelo fato de as concentrações nas soluções do ciclo de absorção já se encontrarem definidas no trabalho de Burbano (2011), a otimização nesta segunda configuração de planta possui as concentrações fixas, e os parâmetros variáveis disponíveis às rotinas do EES são pressão e temperatura na saída da caldeira e a pressão de extração do vapor da TV para o chiller.

Da mesma forma, a otimização se dará no sentido de minimizar o custo total em base monetária para os três diferentes cenários inicialmente propostos. Neste caso, dado o alto consumo computacional do processo dos algoritmos genéticos, a otimização foi feita utilizando-se 2 iterações com o Simplex de Nelder-Mead.

### 9.1 CENÁRIO 1 – INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS.

Considerando as mesmas demandas do capítulo anterior, i.e:

- (i)  $W_{PLANTA} = 2300 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

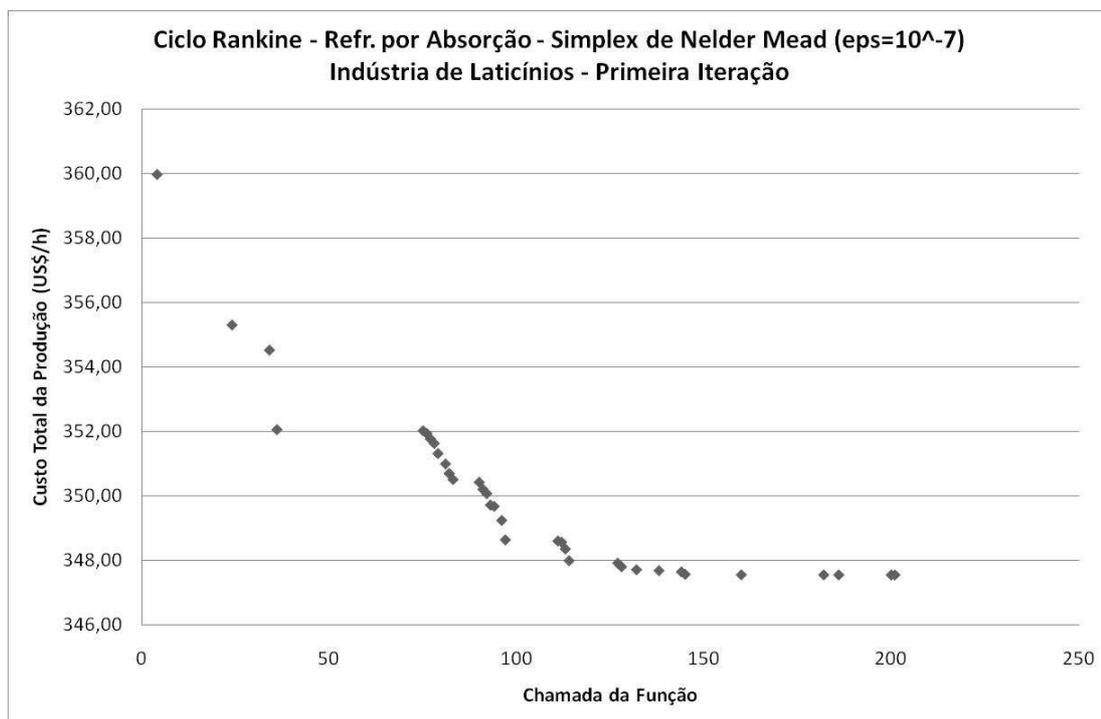
Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBE para a segunda configuração de planta e cenário 1 (variáveis – propriedades na caldeira e pressão de extração do chiller):

**Tabela 9.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2**

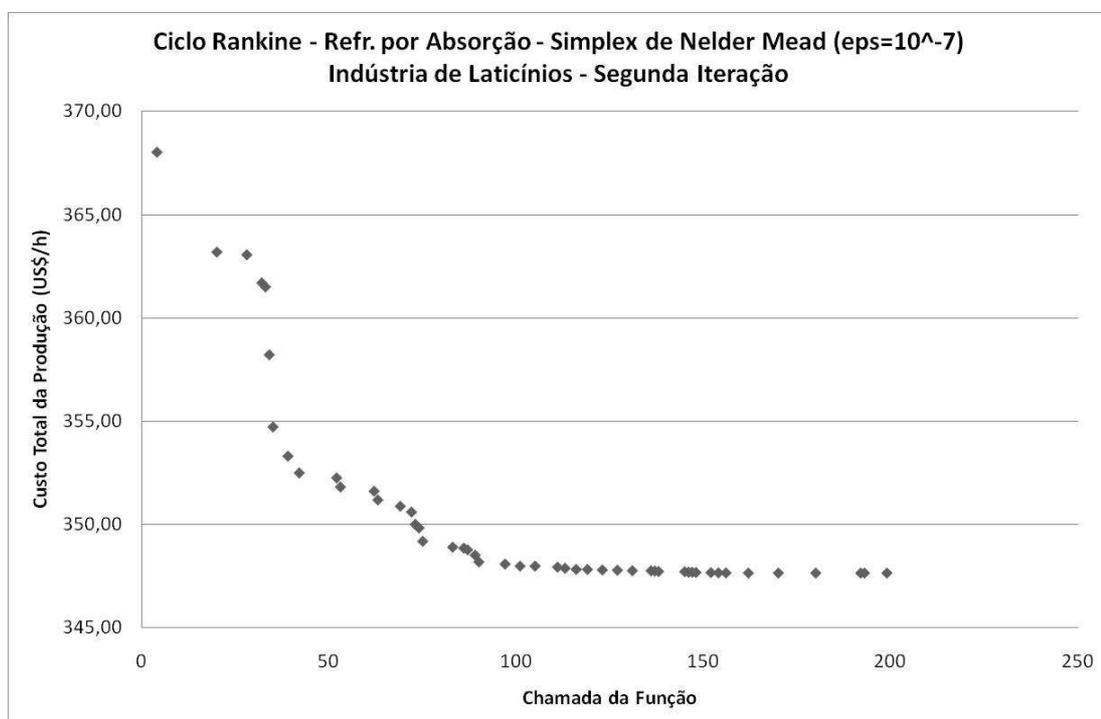
<b>Aplicação 1 - Indústria de Laticínios - Rankine/Absorção Simples</b>		
Parâmetro	Simplex de Nelder-Mead (1)	Simplex de Nelder-Mead (2)
$P_{CALD}$ (bar)	94,41	94,11
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$P_{CHILLER}$ (bar)	1,5	1,492
$\eta_{ENERGETICO}$	67,98%	67,97%
$\eta_{EXERGETICO}$	31,64%	31,63%

<b>Aplicação 1 - Indústria de Laticínios - Rankine/Absorção Simples</b>		
Parâmetro	Simplex de Nelder-Mead (1)	Simplex de Nelder-Mead (2)
$C_{\text{ELETRICIDADE}}$ (US\$/kJ)	0,00002417	0,00002417
$C_{\text{AGUA GELADA}}$ (US\$/kJ)	0,0001872	0,0001870
$C_{\text{VAPOR}}$ (US\$/kJ)	0,00002469	0,00002469
CTBM (US\$/h)	347,57	347,64

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 9.1 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1**



**Gráfico 9.2 - Minimização do custo total para o cenário 1 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2**

## 9.2 CENÁRIO 2 – HOSPITAL

Considerando as mesmas demandas do capítulo anterior, i.e:

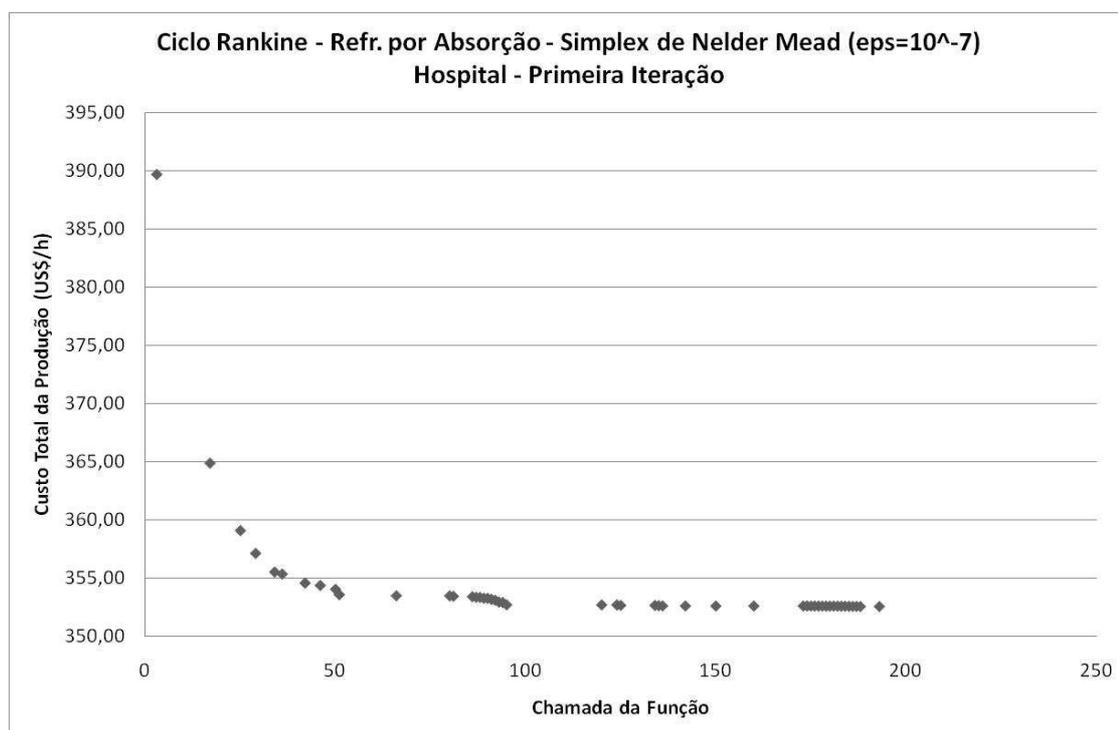
- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2200 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2100 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,55 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBE para a segunda configuração de planta e cenário 2 (variáveis – propriedades na caldeira e pressão de extração do chiller):

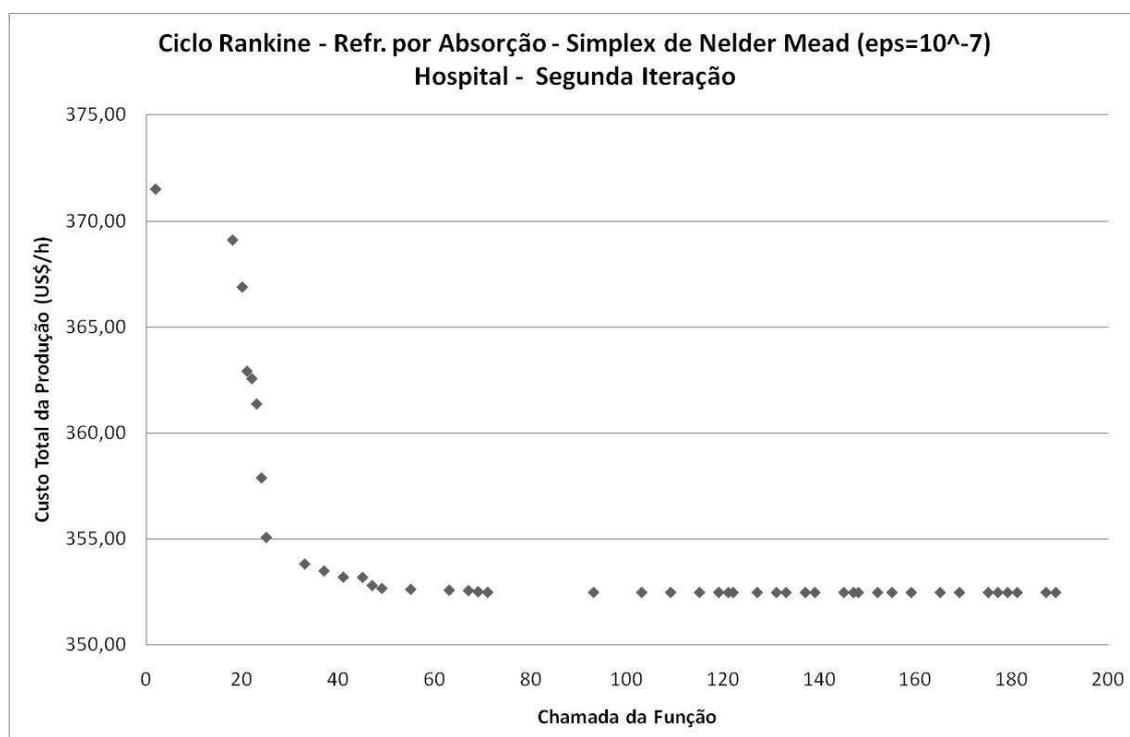
**Tabela 9.2 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2**

<b>Aplicação 2 - Hospital - Rankine/Absorção Simples</b>		
Parâmetro	Simplex de Nelder-Mead (1)	Simplex de Nelder-Mead (2)
$P_{CALD}$ (bar)	93,64	94,43
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$P_{CHILLER}$ (bar)	1,489	1,5
$\eta_{ENERGETICO}$	71,63%	71,67%
$\eta_{EXERGETICO}$	29,05%	29,06%
$C_{ELETRICIDADE}$ (US\$/kJ)	0,00002348	0,00002346
$C_{AGUA GELADA}$ (US\$/kJ)	0,0001655	0,0001657
$C_{VAPOR}$ (US\$/kJ)	0,00002393	0,00002390
CTBM (US\$/h)	352,61	352,46

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 9.3 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1**



**Gráfico 9.4 - Minimização do custo total para o cenário 2 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2**

### 9.3 CENÁRIO 3 – INDÚSTRIA DE BEBIDAS

Considerando as mesmas demandas do capítulo anterior, i.e:

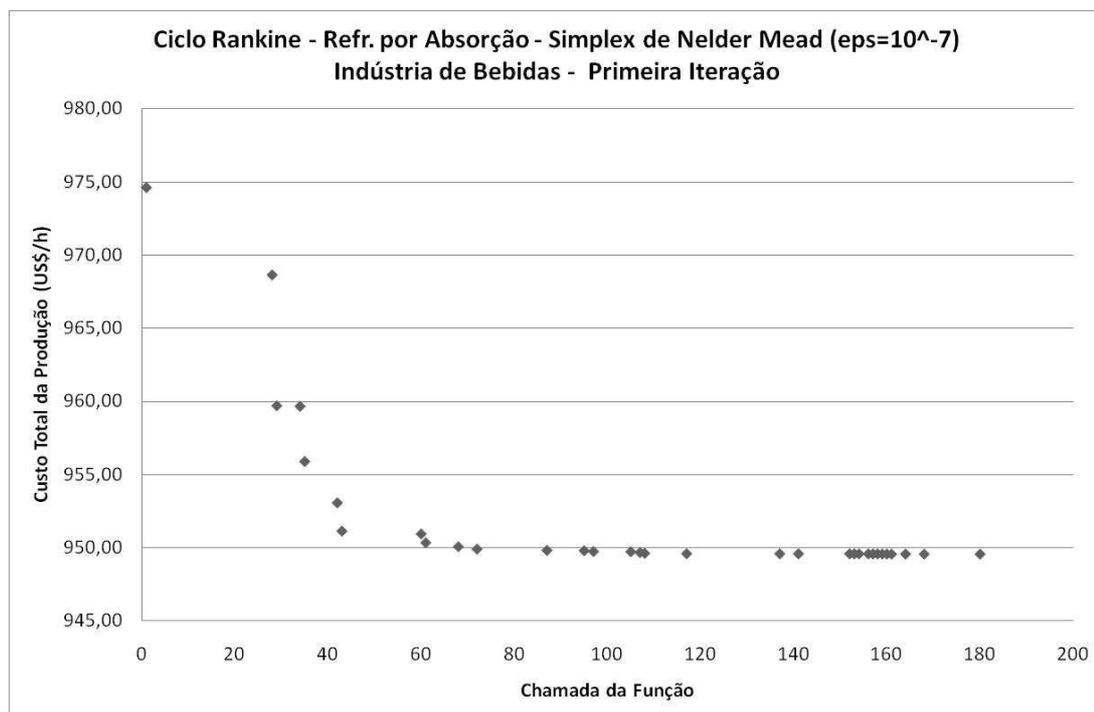
- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 8000 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 2000 \text{ kW}$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 1,7 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Seguem os resultados do ponto ótimo na minimização do CTBE para a segunda configuração de planta e cenário 3 (variáveis – propriedades na caldeira e pressão de extração do chiller):

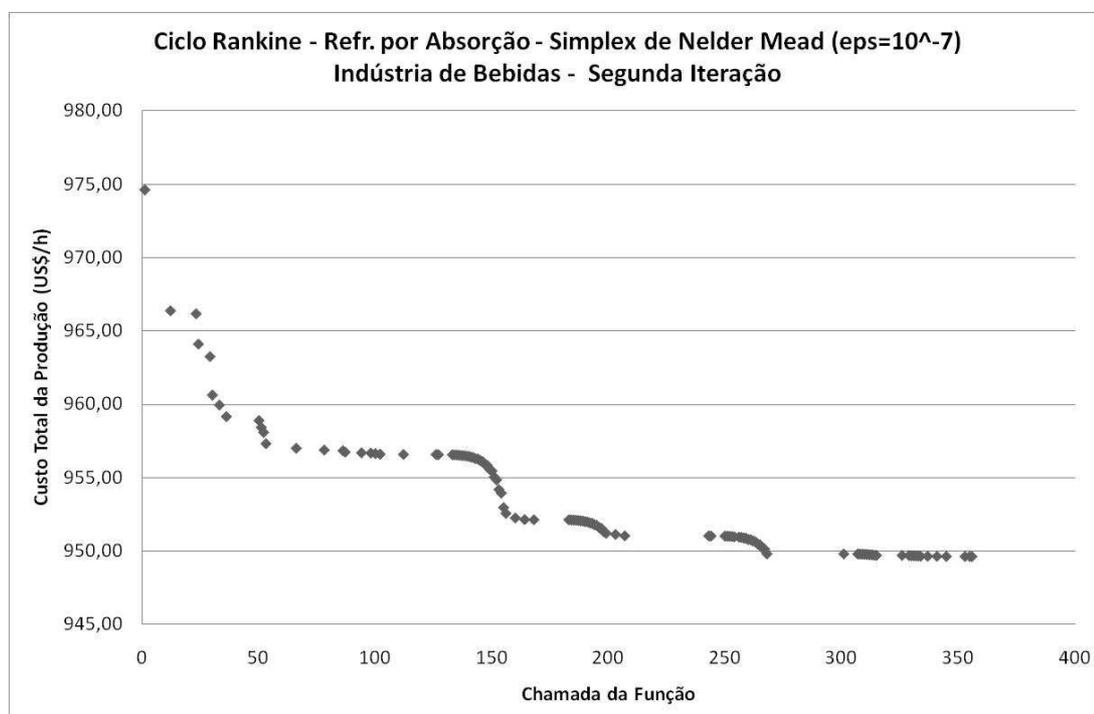
**Tabela 9.3 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2**

<b>Aplicação 3 - Indústria de Bebidas - Rankine/Absorção Simples</b>		
Parâmetro	Simplex de Nelder-Mead (1)	Simplex de Nelder-Mead (2)
$P_{CALD}$ (bar)	94,43	94,441
$T_{CALD}$ (°C)	580	580
$P_{CHILLER}$ (bar)	1,5	1,5
$\eta_{ENERGETICO}$	44,29%	44,28%
$\eta_{EXERGETICO}$	27,99%	27,99%
$C_{ELETRICIDADE}$ (US\$/kJ)	0,00002626	0,00002626
$C_{AGUA GELADA}$ (US\$/kJ)	0,0001836	0,0001836
$C_{VAPOR}$ (US\$/kJ)	0,00002696	0,00002696
CTBM (US\$/h)	949,60	949,62

Os gráficos relativos aos melhores pontos do processo iterativo podem ser avaliados na página subsequente.



**Gráfico 9.5 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 1**



**Gráfico 9.6 - Minimização do custo total para o cenário 3 e planta 2 – Simplex de Nelder-Mead 2**

## 10 ESTUDOS DE CASO: ANÁLISE E COMPARAÇÕES

Para que se tenha uma comparação entre as duas configuração de planta otimizadas com relação às características de demanda, tomam-se os dados de rendimento energético, exerético e os custos por unidade de tempo para todos os cenários em análise:

**Tabela 10.1 - Resultados finais para 2 configuração de refrigeração em 3 cenários de demanda**

<b>Análise por Ciclos de Refrigeração</b>		
<b>Aplicação 1 - Indústria de Laticínios</b>		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	68,80%	67,98%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	32,00%	31,64%
CTBM (US\$/h)	345,93	347,57
<b>Aplicação 2 - Hospital</b>		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	69,89%	71,67%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	28,27%	29,06%
CTBM (US\$/h)	367,52	352,46
<b>Aplicação 3 - Indústria de Bebidas</b>		
Parâmetro	Compressão	Absorção (SE)
$\eta_{\text{ENERGETICO}}$	44,46%	44,28%
$\eta_{\text{EXERGETICO}}$	28,08%	27,99%
CTBM (US\$/h)	950,29	949,62

Pode-se concluir a existência de comportamentos distintos com relação ao rendimento exerético e a importância dos custos dos equipamentos em termos monetários.

Com respeito ao trabalho de Burbano (2011), é evidente que maiores custos em base exerética implicam em menores rendimentos exeréticos. O comportamento dos custos em base monetária não é exatamente este com a incidência dos custos dos equipamentos. No caso da aplicação do hospital (em que se tem uma mesma proporção de energia elétrica e refrigeração), um aumento do rendimento exerético é acompanhado por uma queda nos custos, evidenciando a vantagem em se trabalhar

com ciclos de absorção quando se possui uma demanda importante de água gelada em relação à demanda de eletricidade (ao menos da mesma ordem de grandeza). Uma segunda conclusão importante do trabalho é a vantagem dos sistemas de refrigeração ao se trabalhar com grandes complexos em relação a plantas menores de cogeração. As aplicações 1 e 3 possuem ambas aproximadamente a mesma relação de demanda de eletricidade sobre refrigeração – da ordem de 4. Porém, a indústria de bebidas apresenta uma demanda de 4 vezes mais que a fábrica de laticínios. Por trabalhar com demandas sensivelmente menores, esta última possui um custo ligeiramente inferior trabalhando com compressão de vapor. Isso não ocorre na indústria de bebidas por os ciclos de absorção são menos custosos para grandes demandas de refrigeração.

Na seqüência do documento serão apresentadas generalizações nos casos de demanda de eletricidade e refrigeração no sentido de traçar o comportamento dos principais parâmetros relacionado à análise exergoeconômica das plantas.

## 11 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

### 11.1 VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE

Primeiramente serão apresentados os resultados da minimização do CTBM sujeitos às demandas:

- (i)  $1500kW \leq \dot{W}_{PLANTA} \leq 20000kW$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 kW$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 kg/s; p_{VAPOR} = 5 bar$

Os resultados do processo de otimização podem ser avaliados na tabela que segue.

**Tabela 11.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade**

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
1500	264.60	0.00002324	0.00002355	0.0001775	5767
2000	315.55	0.00002393	0.00002429	0.0001808	6994
2500	366.13	0.00002443	0.00002482	0.0001831	8221
3000	416.49	0.00002482	0.00002522	0.0001849	9447
3500	466.72	0.00002512	0.00002554	0.0001863	10674
4000	516.85	0.00002536	0.00002580	0.0001874	11901
4500	566.89	0.00002556	0.00002601	0.0001884	13127
5000	616.88	0.00002572	0.00002618	0.0001891	14354
5500	666.80	0.00002586	0.00002633	0.0001898	15581
6000	716.69	0.00002599	0.00002646	0.0001904	16807
6500	766.54	0.00002609	0.00002657	0.0001908	18034
7000	816.35	0.00002618	0.00002667	0.0001913	19260
7500	866.14	0.00002626	0.00002675	0.0001916	20487
8000	915.89	0.00002633	0.00002683	0.0001920	21714
8500	965.63	0.00002640	0.00002690	0.0001923	22940
9000	1015.35	0.00002646	0.00002696	0.0001925	24167
9500	1065.04	0.00002651	0.00002701	0.0001928	25394
10000	1114.72	0.00002655	0.00002706	0.0001930	26620
10500	1164.38	0.00002660	0.00002711	0.0001932	27847
11000	1214.03	0.00002664	0.00002715	0.0001934	29074
11500	1263.66	0.00002667	0.00002719	0.0001935	30300
12000	1313.28	0.00002670	0.00002722	0.0001937	31527
12500	1362.89	0.00002673	0.00002725	0.0001938	32753

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
13000	1412.49	0.00002676	0.00002728	0.0001940	33980
13500	1462.08	0.00002679	0.00002731	0.0001941	35207
14000	1511.66	0.00002681	0.00002733	0.0001942	36433
14500	1561.23	0.00002683	0.00002736	0.0001943	37660
15000	1610.79	0.00002686	0.00002738	0.0001944	38887
15500	1660.34	0.00002688	0.00002740	0.0001945	40113
16000	1709.88	0.00002689	0.00002742	0.0001946	41340
16500	1759.42	0.00002691	0.00002744	0.0001947	42567
17000	1808.95	0.00002693	0.00002746	0.0001947	43793
17500	1858.47	0.00002694	0.00002747	0.0001948	45020
18000	1907.99	0.00002696	0.00002749	0.0001949	46246
18500					
19000					
19500					
20000	2106.00	0.00002701	0.00002754	0.0001951	51153

Tabela 11.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade (cont.)

$W_{PLANTA}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP	$\eta_{exerg\ chiller}$
1500	0.1811	0.8187	0.3341	4.128	0.2147
2000	0.2181	0.7287	0.3244	4.128	0.2147
2500	0.2550	0.6647	0.3175	4.128	0.2147
3000	0.2920	0.6170	0.3123	4.128	0.2147
3500	0.3289	0.5799	0.3083	4.128	0.2147
4000	0.3659	0.5504	0.3051	4.128	0.2147
4500	0.4028	0.5262	0.3025	4.128	0.2147
5000	0.4397	0.5061	0.3003	4.128	0.2147
5500	0.4767	0.4892	0.2985	4.128	0.2147
6000	0.5136	0.4746	0.2969	4.128	0.2147
6500	0.5506	0.4621	0.2955	4.128	0.2147
7000	0.5875	0.4511	0.2943	4.128	0.2147
7500	0.6245	0.4414	0.2933	4.128	0.2147
8000	0.6614	0.4328	0.2924	4.128	0.2147
8500	0.6984	0.4251	0.2915	4.128	0.2147
9000	0.7353	0.4181	0.2908	4.128	0.2147
9500	0.7722	0.4119	0.2901	4.128	0.2147
10000	0.8092	0.4062	0.2895	4.128	0.2147
10500	0.8461	0.4010	0.2889	4.128	0.2147
11000	0.8831	0.3962	0.2884	4.128	0.2147
11500	0.9200	0.3919	0.2879	4.128	0.2147
12000	0.9570	0.3878	0.2875	4.128	0.2147
12500	0.9939	0.3841	0.2871	4.128	0.2147

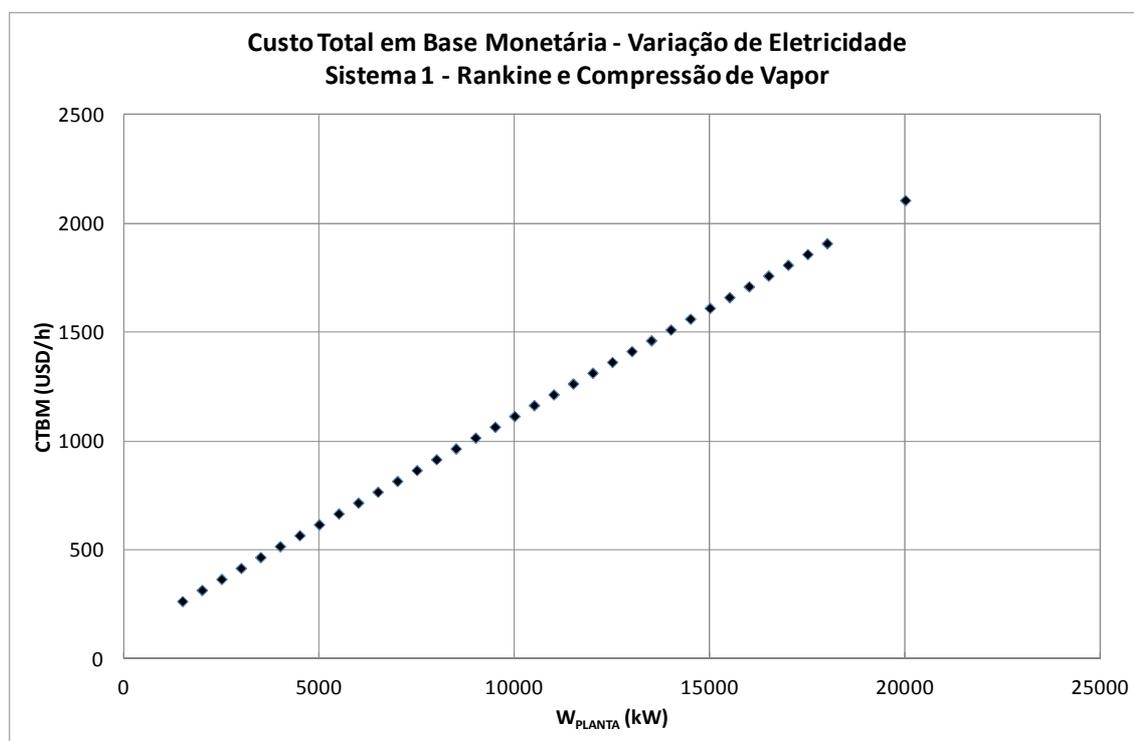
$W_{PLANTA}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP	$\eta_{exerg}$ chiller
13000	1.0310	0.3806	0.2867	4.128	0.2147
13500	1.0680	0.3774	0.2864	4.128	0.2147
14000	1.1050	0.3744	0.2860	4.128	0.2147
14500	1.1420	0.3715	0.2857	4.128	0.2147
15000	1.1790	0.3689	0.2854	4.128	0.2147
15500	1.2160	0.3664	0.2852	4.128	0.2147
16000	1.2530	0.3641	0.2849	4.128	0.2147
16500	1.2890	0.3619	0.2847	4.128	0.2147
17000	1.3260	0.3598	0.2845	4.128	0.2147
17500	1.3630	0.3578	0.2842	4.128	0.2147
18000	1.4000	0.3560	0.2840	4.128	0.2147
18500					
19000					
19500					
20000	1.5480	0.3494	0.2833	4.128	0.2147

**Tabela 11.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Eletricidade (cont.)**

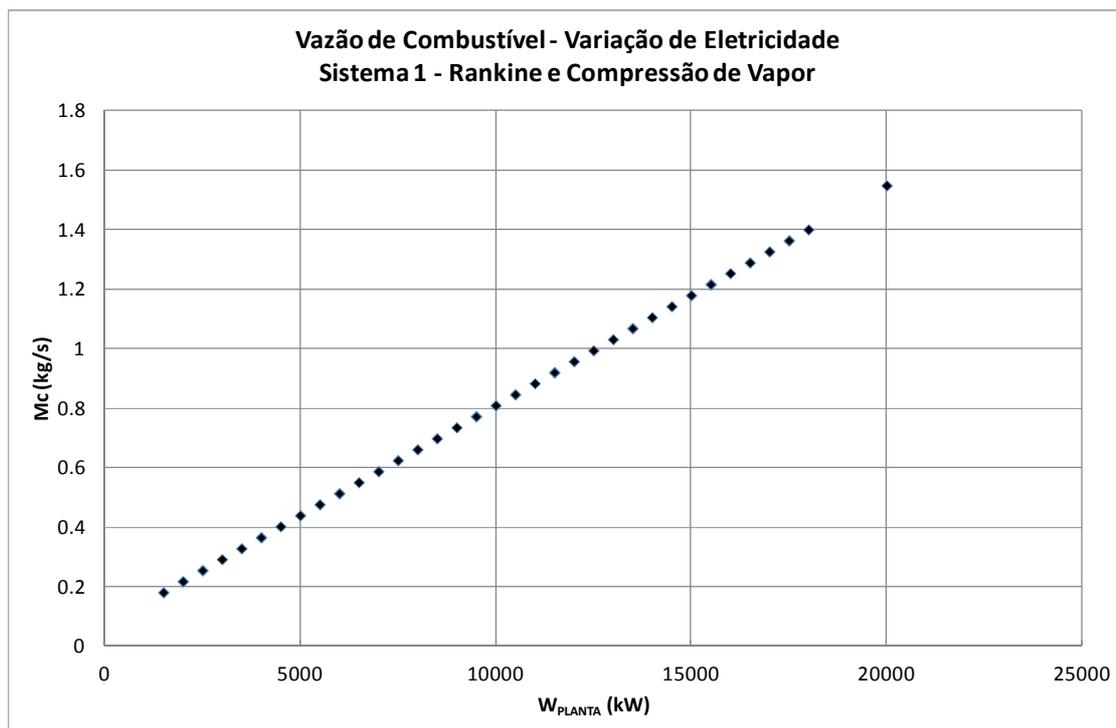
$W_{PLANTA}$ (kW)	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
1500	120	580	224821	73099	321884
2000	120	580	249914	87901	321884
2500	120	580	273233	101608	321884
3000	120	580	295139	114492	321884
3500	120	580	315880	126727	321884
4000	120	580	335641	138428	321884
4500	120	580	354561	149681	321884
5000	120	580	372747	160549	321884
5500	120	580	390288	171080	321884
6000	120	580	407252	181315	321884
6500	120	580	423700	191285	321884
7000	120	580	439679	201016	321884
7500	120	580	455232	210530	321884
8000	120	580	470394	219846	321884
8500	120	580	485196	228980	321884
9000	120	580	499664	237945	321884
9500	120	580	513823	246754	321884
10000	120	580	527694	255417	321884
10500	120	580	541295	263945	321884
11000	120	580	554643	272344	321884
11500	120	580	567753	280624	321884
12000	120	580	580639	288789	321884
12500	120	580	593311	296848	321884

$W_{PLANTA}$ (kW)	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
13000	120	580	605785	304805	321884
13500	120	580	618065	312665	321884
14000	120	580	630165	320434	321884
14500	120	580	642092	328115	321884
15000	120	580	653854	335712	321884
15500	120	580	665459	343229	321884
16000	120	580	676913	350669	321884
16500	120	580	688223	358036	321884
17000	120	580	699394	365332	321884
17500	120	580	710432	372560	321884
18000	120	580	721342	379723	321884
18500					
19000					
19500					
20000	120	580	763799	407766	321884

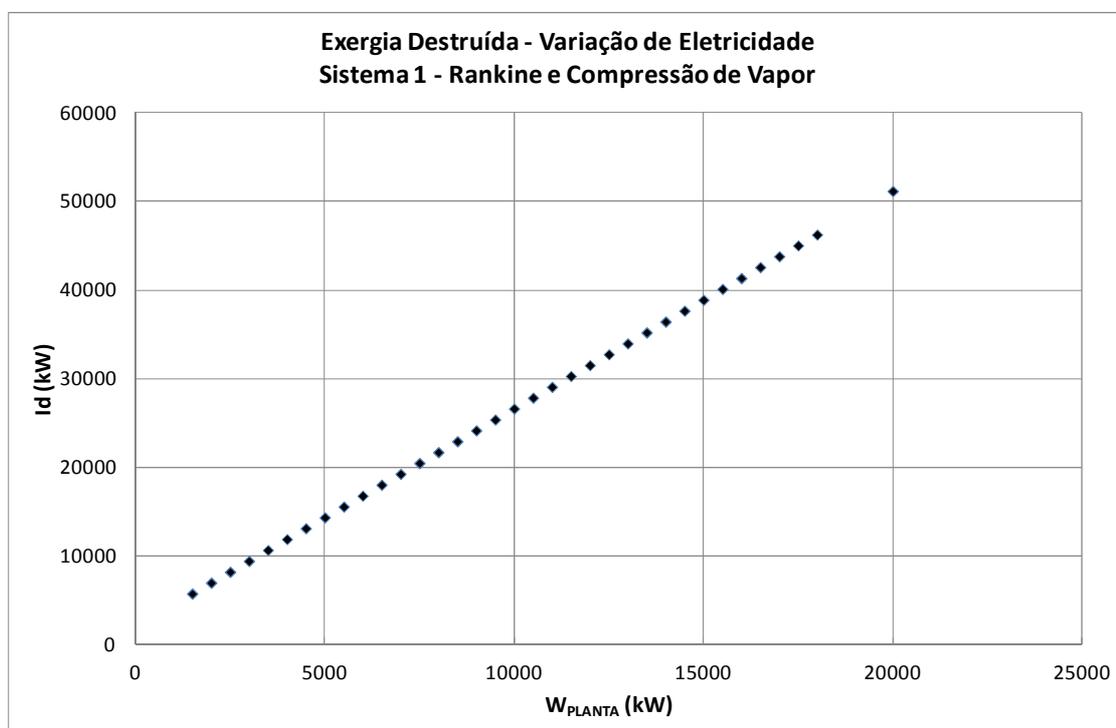
Os gráficos relativos à evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise são apresentados a seguir.



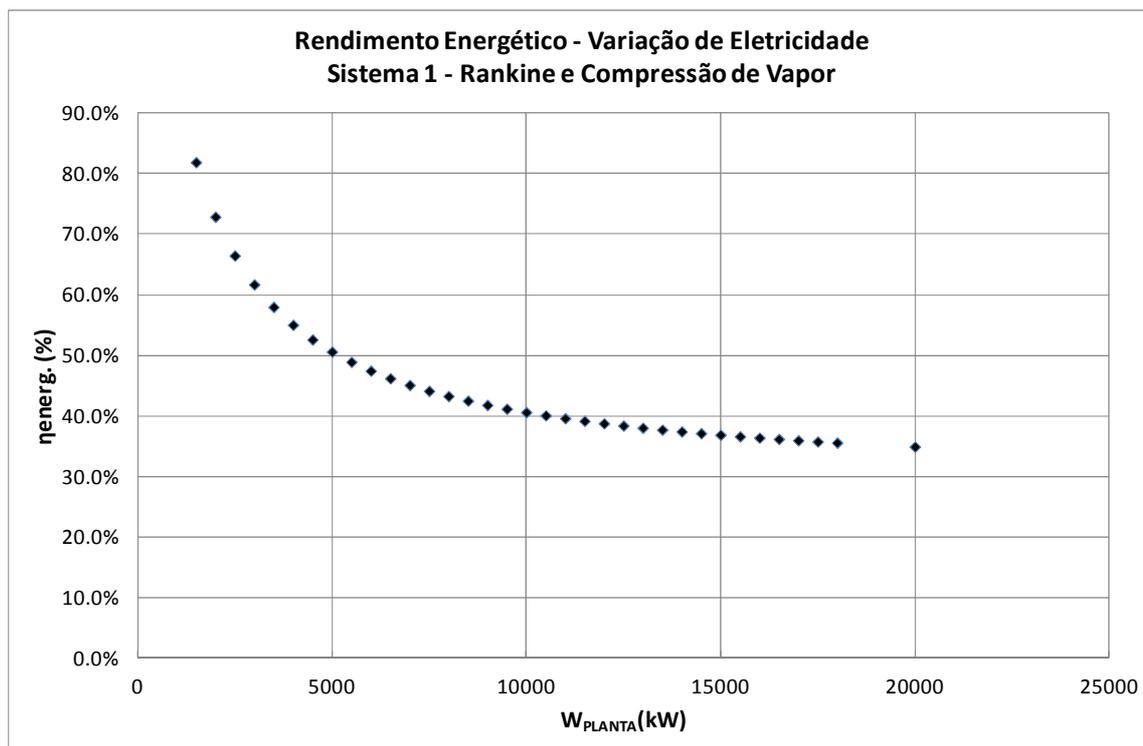
**Gráfico 11.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)**



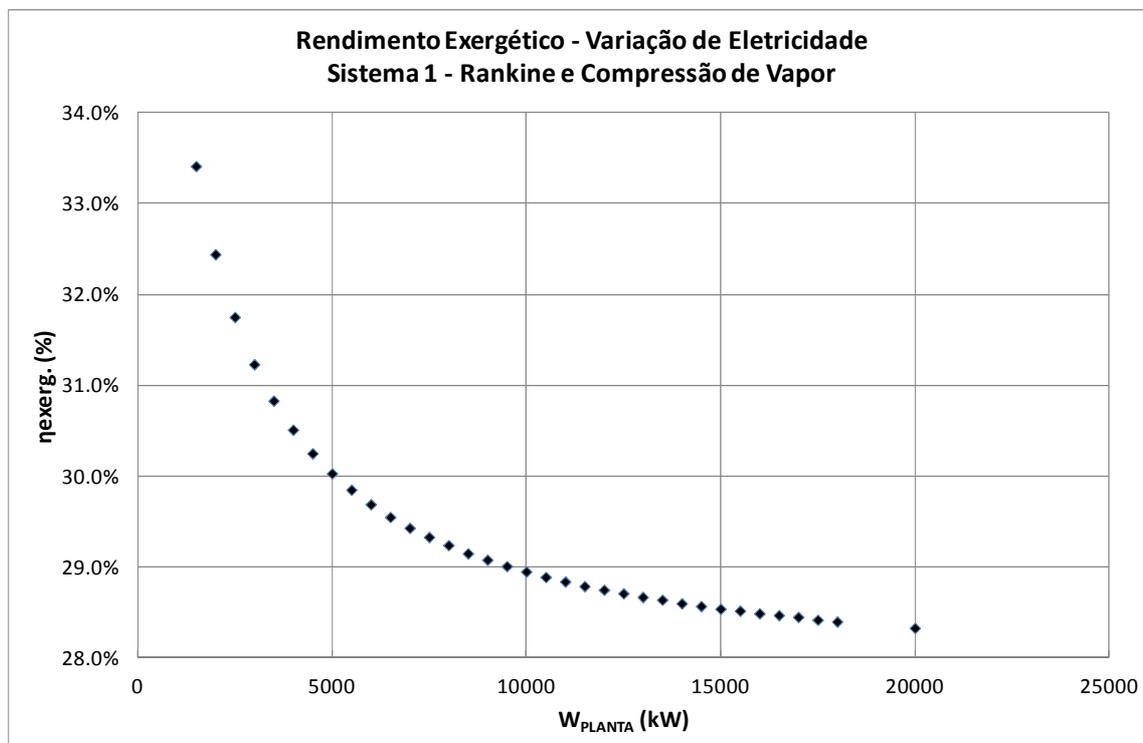
**Gráfico 11.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)**



**Gráfico 11.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)**



**Gráfico 11.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)**



**Gráfico 11.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 1)**

## 11.2 VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA

Neste segundo caso, fixou-se a demanda de eletricidade em 2300kW e fez-se variar a demanda de água gelada através do calor trocado no evaporador:

- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300kW$
- (ii)  $400kW \leq \dot{Q}_{EVAPORADOR} \leq 5000 kW$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 kg/s; p_{VAPOR} = 5 bar$

Os resultados do processo de otimização podem ser avaliados na tabela que segue.

**Tabela 11.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada**

$Q_{EVAPORADOR}$ (kW)	CTBM (USD/h)	$C_{elctr}$ (USD/kJ)	$C_{vapor}$ (USD/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (USD/kJ)
400	341.55	0.00002422	0.00002459	0.0001866
600	348.52	0.00002427	0.00002464	0.0001803
800	355.34	0.00002431	0.00002469	0.0001762
1000	362.05	0.00002436	0.00002474	0.0001732
1200	368.67	0.00002440	0.00002478	0.0001710
1400	375.23	0.00002444	0.00002483	0.0001692
1600	381.74	0.00002449	0.00002487	0.0001677
1800	388.20	0.00002453	0.00002491	0.0001664
2000	394.61	0.00002456	0.00002496	0.0001654
2200	401.00	0.00002460	0.00002500	0.0001645
2400	407.35	0.00002464	0.00002504	0.0001636
2600	413.67	0.00002468	0.00002507	0.0001629
2800	419.96	0.00002471	0.00002511	0.0001623
3000	426.24	0.00002475	0.00002515	0.0001617
3200	432.50	0.00002478	0.00002519	0.0001612
3400	438.71	0.00002481	0.00002522	0.0001607
3600	444.93	0.00002485	0.00002525	0.0001602
3800	451.12	0.00002488	0.00002529	0.0001598
4000	457.29	0.00002491	0.00002532	0.0001595
4200	463.46	0.00002494	0.00002535	0.0001591
4400	469.60	0.00002497	0.00002538	0.0001588
4600	475.73	0.00002500	0.00002541	0.0001585
4800	481.85	0.00002502	0.00002544	0.0001582
5000	487.96	0.00002505	0.00002547	0.0001580

Tabela 11.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada (cont.)

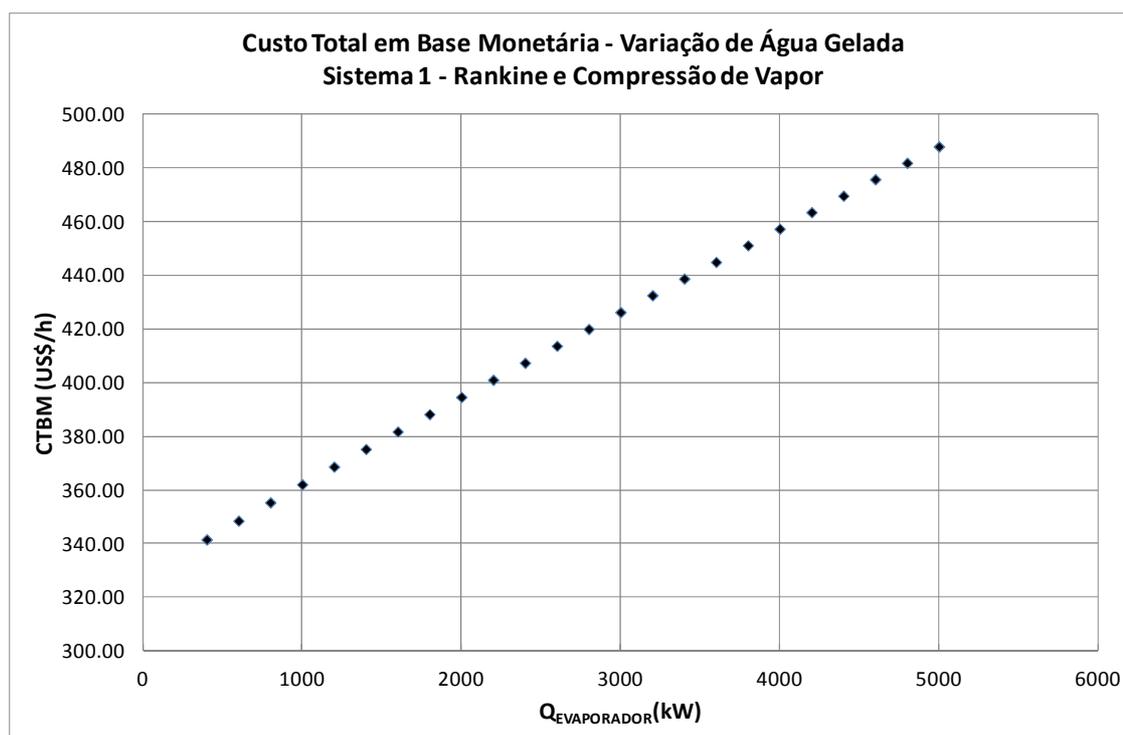
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$I_{\text{destruída}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP
400	7637	0.2380	0.6833	0.3224	4.128
600	7786	0.2416	0.6907	0.3185	4.128
800	7934	0.2452	0.6979	0.3148	4.128
1000	8082	0.2487	0.7050	0.3111	4.128
1200	8230	0.2523	0.7118	0.3075	4.128
1400	8379	0.2559	0.7184	0.3041	4.128
1600	8527	0.2595	0.7249	0.3007	4.128
1800	8675	0.2631	0.7311	0.2974	4.128
2000	8824	0.2666	0.7372	0.2942	4.128
2200	8972	0.2702	0.7432	0.2911	4.128
2400	9120	0.2738	0.7490	0.2881	4.128
2600	9268	0.2774	0.7546	0.2851	4.128
2800	9417	0.2810	0.7601	0.2823	4.128
3000	9565	0.2845	0.7654	0.2795	4.128
3200	9714	0.2881	0.7706	0.2767	4.128
3400	9861	0.2917	0.7757	0.2741	4.128
3600	10010	0.2953	0.7807	0.2715	4.128
3800	10158	0.2989	0.7856	0.2690	4.128
4000	10306	0.3024	0.7903	0.2665	4.128
4200	10455	0.3060	0.7949	0.2641	4.128
4400	10603	0.3096	0.7994	0.2617	4.128
4600	10751	0.3132	0.8038	0.2594	4.128
4800	10889	0.3168	0.8082	0.2571	4.128
5000	11048	0.3203	0.8124	0.2549	4.128

Tabela 11.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 1 – Variação de Água Gelada (cont.)

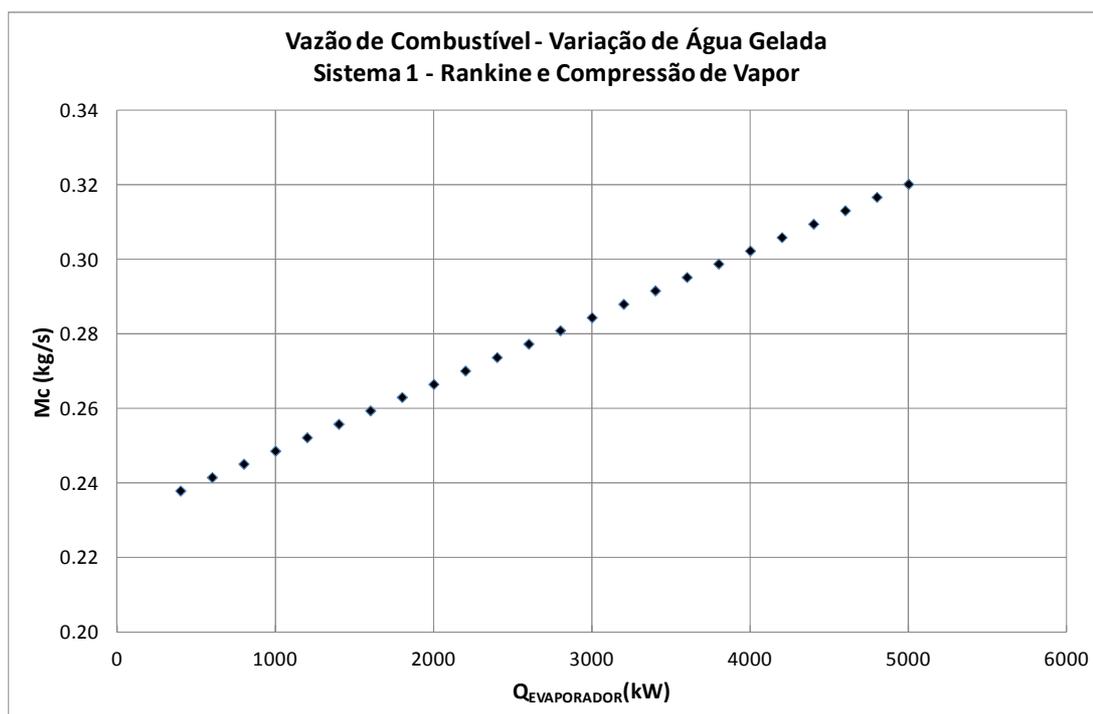
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$\eta_{\text{exerg chiller}}$	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$C_{\text{GV}}$ (USD)	$C_{\text{TV}}$ (USD)	$C_{\text{CHILLER}}$ (USD)
400	0.2147	120	580	262688	95410	261073
600	0.2147	120	580	264933	96729	356741
800	0.2147	120	580	267164	98040	445201
1000	0.2147	120	580	269381	99343	528660
1200	0.2147	120	580	271584	100638	608339
1400	0.2147	120	580	273774	101925	685007
1600	0.2147	120	580	275951	103205	759187
1800	0.2147	120	580	278115	104476	831259
2000	0.2147	120	580	280266	105741	901508
2200	0.2147	120	580	282405	106999	970157
2400	0.2147	120	580	284531	108250	1037000
2600	0.2147	120	580	286647	109494	1103000
2800	0.2147	120	580	288749	110731	1168000
3000	0.2147	120	580	290841	111962	1232000

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$\eta_{\text{exerg chiller}}$	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$C_{\text{GV}}$ (USD)	$C_{\text{TV}}$ (USD)	$C_{\text{CHILLER}}$ (USD)
3200	0.2147	120	580	292934	113186	1295000
3400	0.2147	120	580	294991	114405	1356000
3600	0.2147	120	580	297050	115617	1418000
3800	0.2147	120	580	299097	116824	1478000
4000	0.2147	120	580	301133	118024	1537000
4200	0.2147	120	580	303161	119219	1596000
4400	0.2147	120	580	305181	120408	1654000
4600	0.2147	120	580	307183	121592	1712000
4800	0.2147	120	580	309180	122770	1769000
5000	0.2147	120	580	311167	123943	1826000

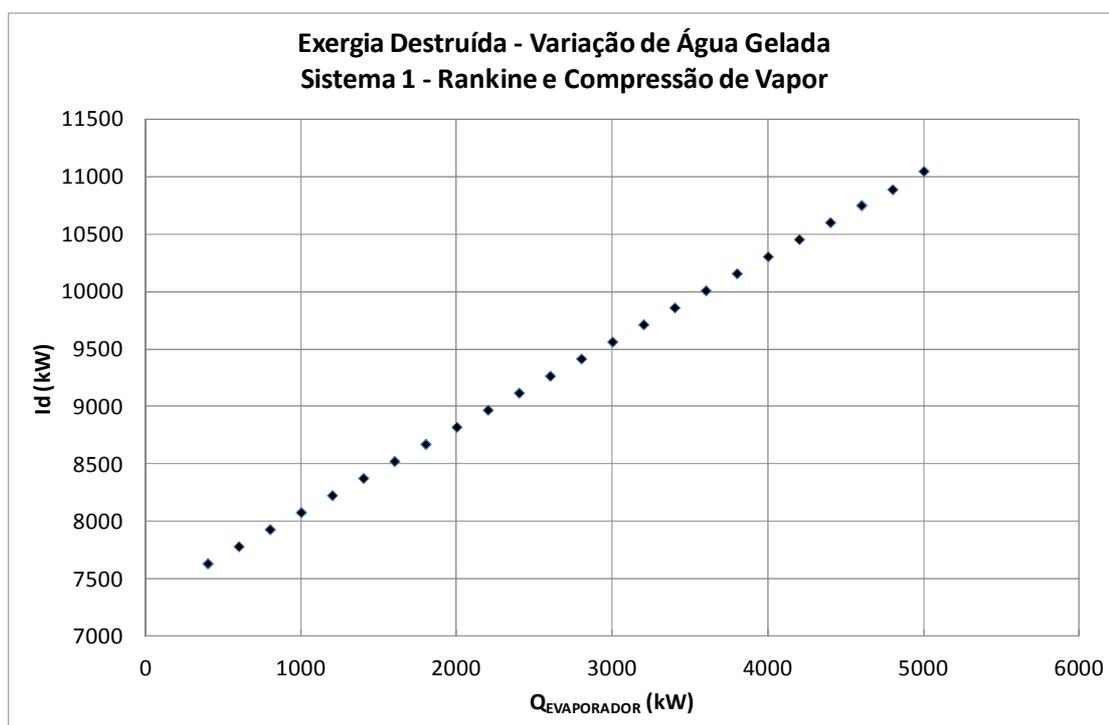
A evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise com a variação do calor trocado no evaporador é apresentada abaixo.



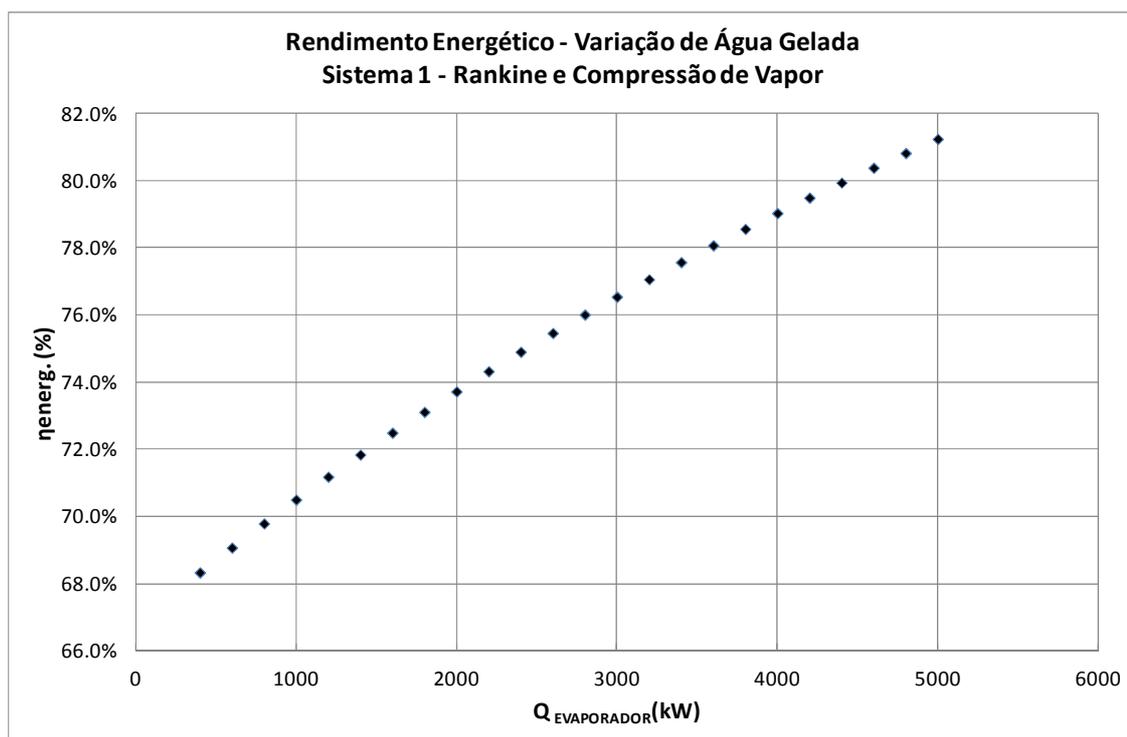
**Gráfico 11.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 1)**



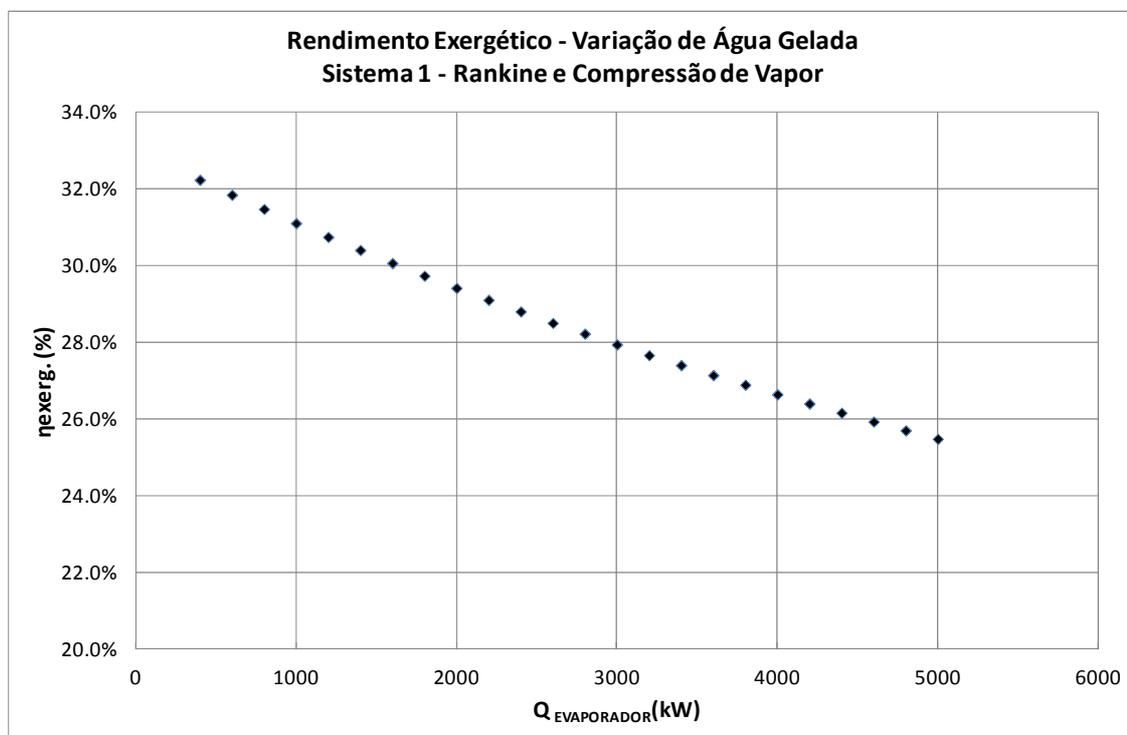
**Gráfico 11.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 1)**



**Gráfico 11.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 1)**



**Gráfico 11.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 1)**



**Gráfico 11.10 - Rendimento exergético em função da demanda de água gelada**

## 12 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO SIMPLES

### 12.1 VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE

A minimização do CTBM para a segunda planta é igualmente sujeita às demandas:

- (i)  $1500kW \leq \dot{W}_{PLANTA} \leq 20000kW$
- (ii)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 kW$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 kg/s; p_{VAPOR} = 5 bar$

Os resultados do processo de otimização da planta 2 podem ser avaliados na tabela que segue.

**Tabela 12.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade**

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
1500	264.00	0.00002298	0.00002339	0.0001793	5881
2000	316.72	0.00002382	0.00002431	0.0001843	7141
2500	368.53	0.00002440	0.00002495	0.0001879	8405
3000	419.58	0.00002482	0.00002539	0.0001914	9652
3500	470.80	0.00002516	0.00002577	0.0001937	10912
4000	522.09	0.00002545	0.00002608	0.0001955	12178
4500	572.95	0.00002568	0.00002633	0.0001970	13432
5000	623.88	0.00002587	0.00002654	0.0001983	14692
5500	674.95	0.00002604	0.00002673	0.0001991	15958
6000	725.50	0.00002617	0.00002687	0.0002003	17208
6500	776.28	0.00002630	0.00002700	0.0002011	18468
7000	827.01	0.00002640	0.00002712	0.0002018	19727
7500	879.34	0.00002655	0.00002728	0.0002027	21044
8000	928.38	0.00002659	0.00002732	0.0002029	22246
8500	979.03	0.00002666	0.00002740	0.0002034	23505
9000	1029.67	0.00002673	0.00002748	0.0002039	24765
9500	1080.25	0.00002679	0.00002754	0.0002043	26024
10000	1131.71	0.00002687	0.00002763	0.0002048	27314
10500	1181.41	0.00002690	0.00002766	0.0002050	28542
11000	1231.96	0.00002694	0.00002771	0.0002053	29802
11500	1282.51	0.00002699	0.00002776	0.0002055	31062
12000	1333.39	0.00002703	0.00002781	0.0002058	32334
12500	1383.57	0.00002706	0.00002784	0.0002060	33581

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
13000	1434.08	0.00002710	0.00002788	0.0002062	34841
13500	1484.50	0.00002713	0.00002791	0.0002065	36098
14000	1534.98	0.00002716	0.00002794	0.0002066	37358
14500	1585.48	0.00002718	0.00002797	0.0002068	38618
15000	1635.92	0.00002721	0.00002800	0.0002070	39877

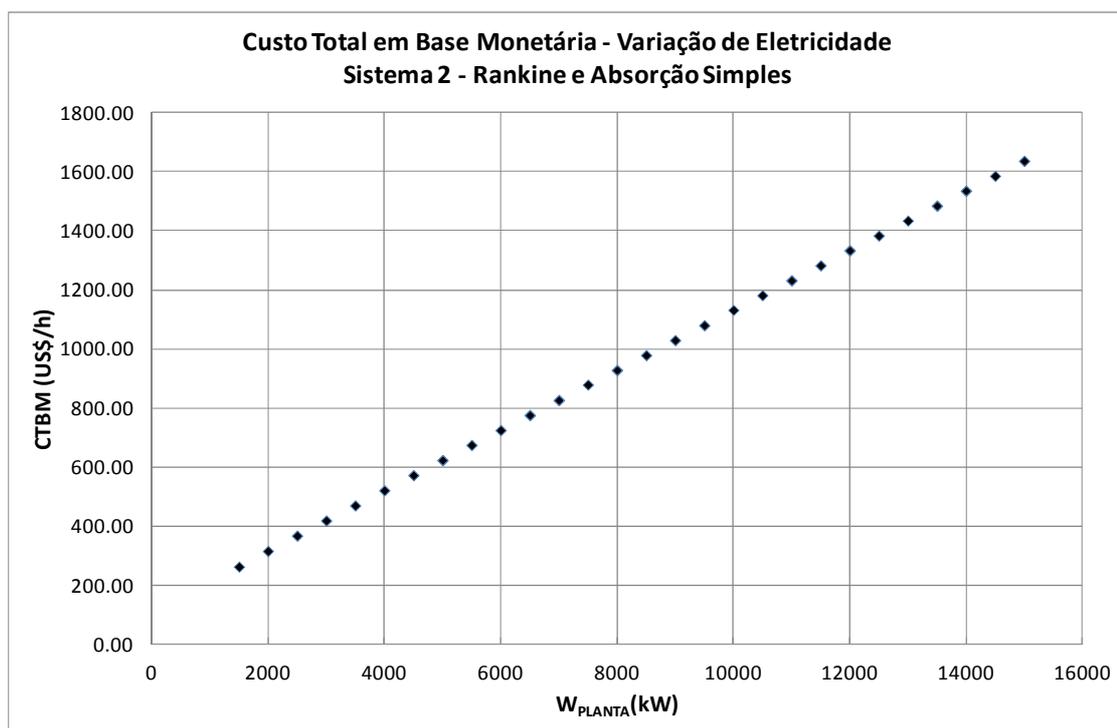
Tabela 12.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade (cont.)

$W_{PLANTA}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP	$\eta_{exerg\ chiller}$
1500	0.1830	0.8103	0.3309	0.7145	0.1537
2000	0.2207	0.7201	0.3208	0.7145	0.1541
2500	0.2584	0.6560	0.3135	0.7145	0.1543
3000	0.2958	0.6089	0.3084	0.7145	0.1535
3500	0.3334	0.5720	0.3042	0.7145	0.1535
4000	0.3712	0.5424	0.3008	0.7145	0.1535
4500	0.4088	0.5185	0.2982	0.7145	0.1535
5000	0.4464	0.4986	0.2959	0.7145	0.1535
5500	0.4842	0.4816	0.2939	0.7145	0.1538
6000	0.5217	0.4673	0.2924	0.7145	0.1535
6500	0.5593	0.4548	0.2910	0.7145	0.1535
7000	0.5970	0.4439	0.2898	0.7145	0.1535
7500	0.6359	0.4335	0.2881	0.7145	0.1535
8000	0.6723	0.4258	0.2877	0.7145	0.1535
8500	0.7099	0.4182	0.2868	0.7145	0.1535
9000	0.7476	0.4113	0.2861	0.7145	0.1535
9500	0.7852	0.4051	0.2854	0.7145	0.1535
10000	0.8235	0.3991	0.2845	0.7145	0.1535
10500	0.8605	0.3943	0.2842	0.7145	0.1535
11000	0.8981	0.3896	0.2836	0.7145	0.1535
11500	0.9358	0.3853	0.2831	0.7145	0.1535
12000	0.9737	0.3811	0.2826	0.7145	0.1535
12500	1.0110	0.3775	0.2823	0.7145	0.1535
13000	1.0490	0.3741	0.2819	0.7145	0.1536
13500	1.0860	0.3709	0.2815	0.7145	0.1535
14000	1.1240	0.3679	0.2812	0.7145	0.1535
14500	1.1620	0.3651	0.2809	0.7145	0.1535
15000	1.1990	0.3625	0.2806	0.7145	0.1535

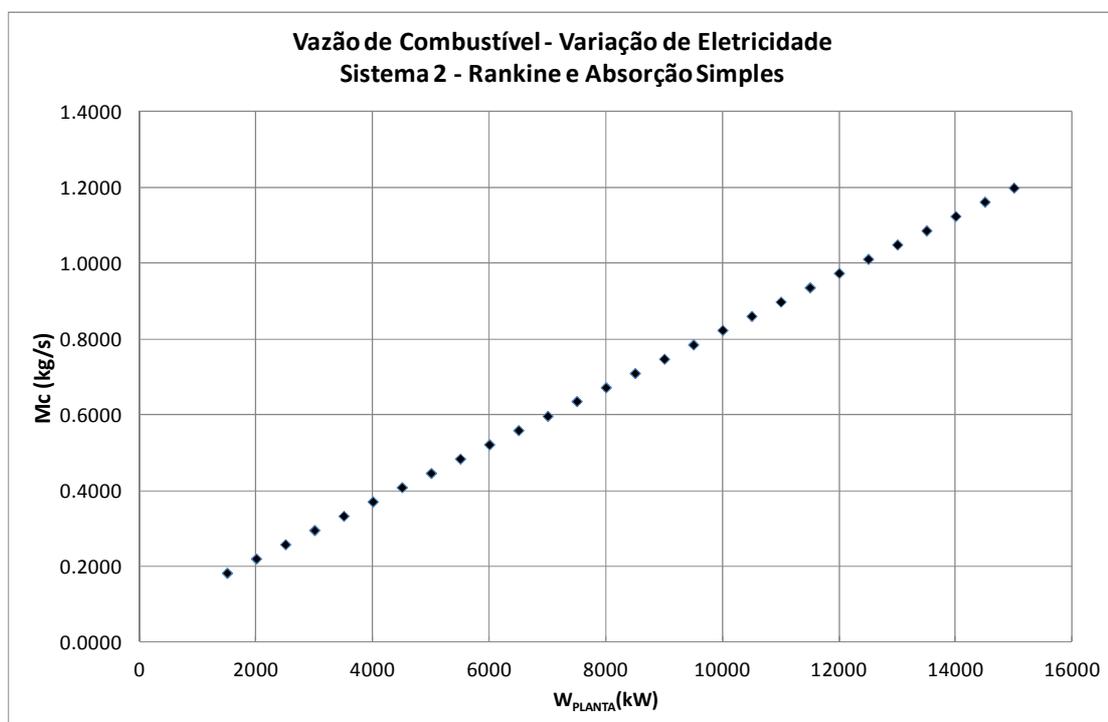
Tabela 12.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Eletricidade (cont.)

$W_{PLANTA}$ (kW)	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$P_{chiller}$ (bar)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
1500	93.63	580.0	1.494	224932	69453	142658
2000	93.57	580.0	1.477	250244	84522	142658
2500	93.22	580.0	1.468	273796	98412	142658
3000	94.43	580.0	1.500	295787	111449	142658
3500	94.43	580.0	1.500	316690	123791	142658
4000	94.19	579.6	1.500	336713	135578	142658
4500	94.38	579.9	1.500	355687	146903	142658
5000	94.33	580.0	1.500	373989	157828	142658
5500	93.95	580.0	1.487	391698	168404	142658
6000	94.43	580.0	1.500	408722	178688	142658
6500	94.43	580.0	1.500	425282	188694	142658
7000	94.43	580.0	1.500	441369	198457	142658
7500	93.21	578.1	1.500	457829	207988	142658
8000	94.43	580.0	1.500	472287	217337	142658
8500	94.43	580.0	1.500	487186	226492	142658
9000	94.41	580.0	1.499	501751	235475	142658
9500	94.43	580.0	1.500	515998	244300	142658
10000	93.55	580.0	1.500	530108	252959	142658
10500	94.43	580.0	1.500	543648	261517	142658
11000	94.42	580.0	1.500	557079	269927	142658
11500	94.41	580.0	1.500	570276	278215	142658
12000	94.24	579.7	1.500	583393	286387	142658
12500	94.40	579.9	1.500	596008	294454	142658
13000	94.37	580.0	1.500	608545	302416	142658
13500	94.43	580.0	1.500	620892	310283	142658
14000	94.43	580.0	1.500	633067	318056	142658
14500	94.41	580.0	1.500	645084	325740	142658
15000	94.47	579.9	1.500	656906	333340	142658

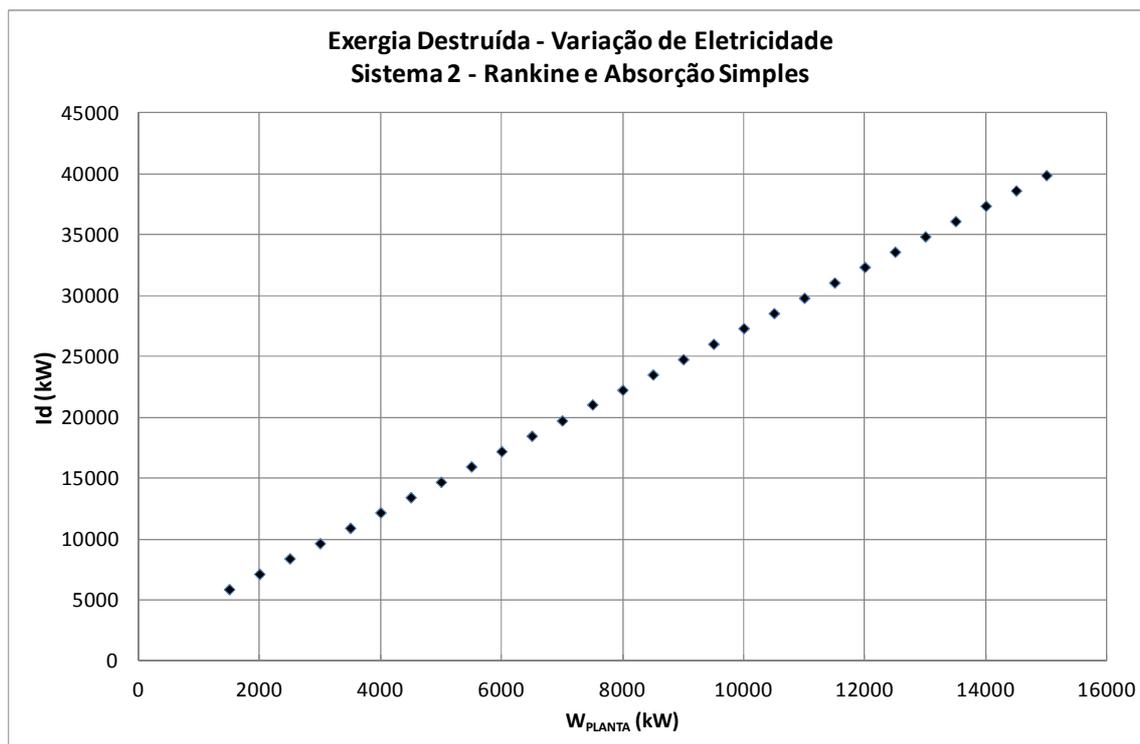
Os gráficos relativos à evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise para variação de eletricidade na segunda configuração são apresentados a seguir.



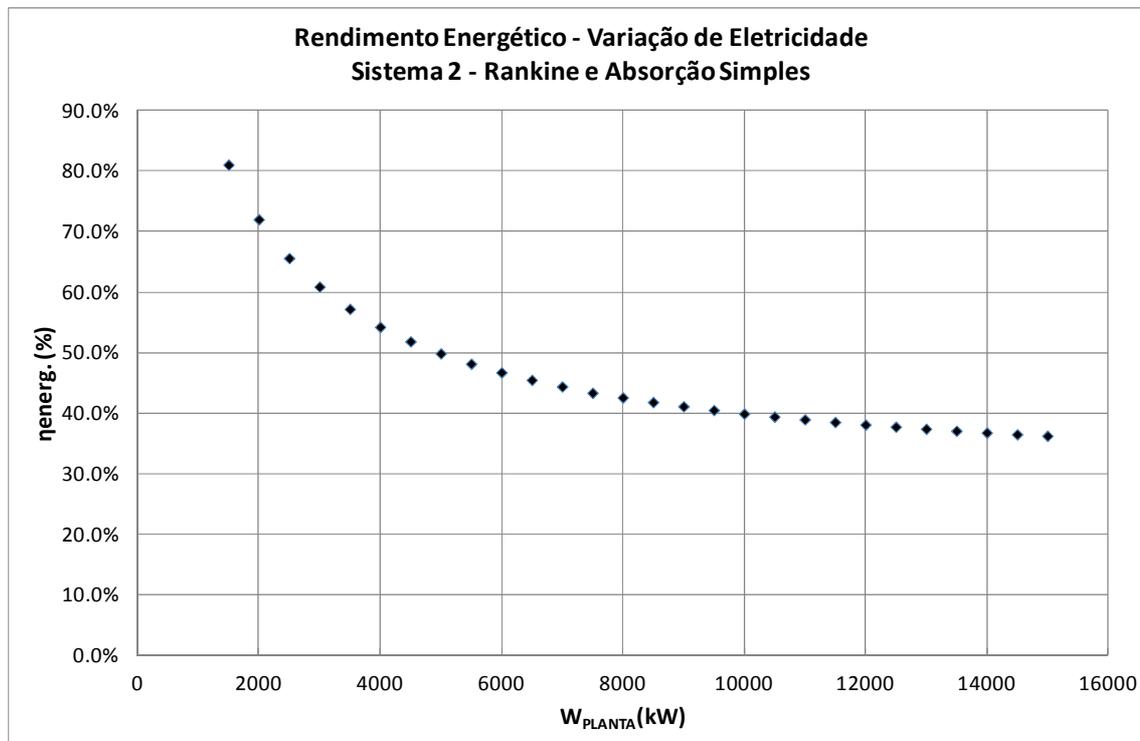
**Gráfico 12.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)**



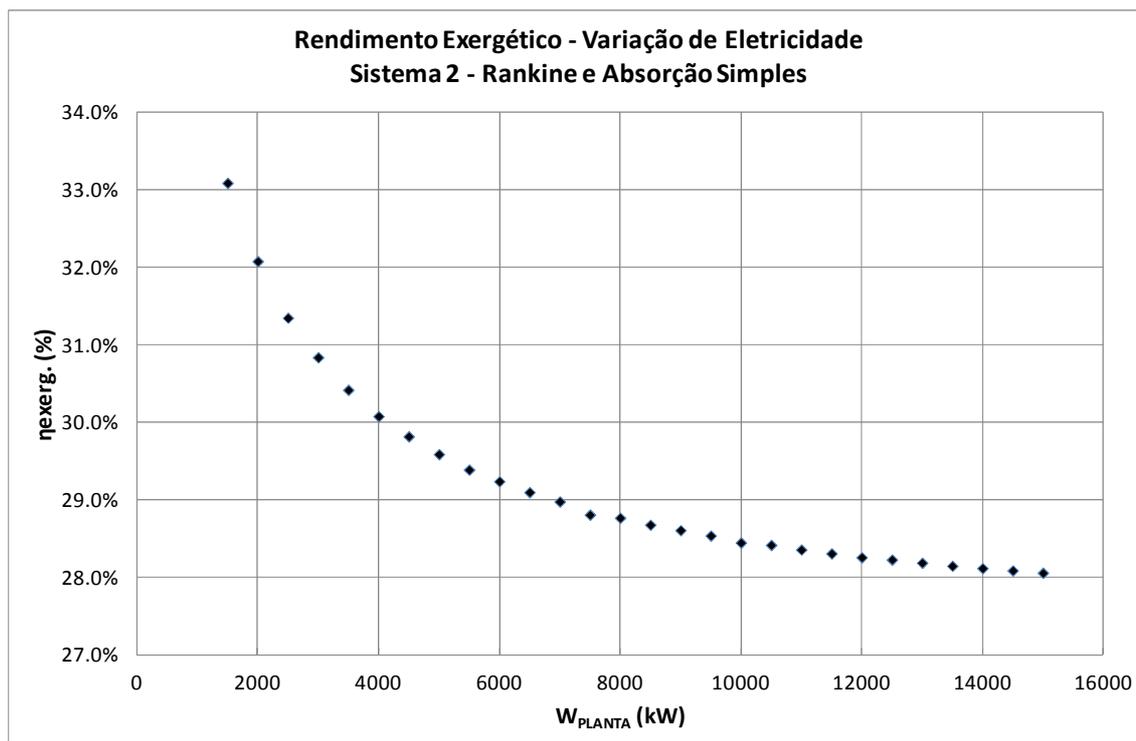
**Gráfico 12.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)**



**Gráfico 12.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)**



**Gráfico 12.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)**



**Gráfico 12.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 2)**

## 12.2 VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA

Da mesma forma, para esta planta fixou-se a demanda de eletricidade em 2300kW e fez-se variar a demanda de água gelada através do calor trocado no evaporador:

- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300kW$
- (ii)  $400kW \leq \dot{Q}_{EVAPORADOR} \leq 5000kW$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 kg/s; p_{VAPOR} = 5 bar$

Os resultados do processo de otimização podem ser avaliados na tabela que segue. (As células em branco representam pontos inatingíveis pelo sistema – para esta demanda combinada de eletricidade e água gelada).

Tabela 12.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	CTBM (USD/h)	$C_{\text{eletr}}$ (USD/kJ)	$C_{\text{vapor}}$ (USD/kJ)	$C_{\text{agua gel.}}$ (USD/kJ)	$I_{\text{destruída}}$ (kJ)
400	344.55	0.00002426	0.00002479	0.0001931	7821
600	349.34	0.00002411	0.00002463	0.0001845	7930
800	354.03	0.00002397	0.00002447	0.0001792	8037
1000	358.64	0.00002383	0.00002432	0.0001754	8142
1200	363.19	0.00002370	0.00002417	0.0001725	8245
1400	367.68	0.00002356	0.00002402	0.0001700	8346
1600	372.11	0.00002343	0.00002388	0.0001679	8446
1800	376.49	0.00002330	0.00002374	0.0001660	8545
2000	380.78	0.00002318	0.00002360	0.0001643	8642
2200	384.90	0.00002304	0.00002345	0.0001626	8737
2300	388.75	0.00002324	0.00002373	0.0001572	8854
2400	393.52	0.00002395	0.00002433	0.0001471	9003
2600	403.86	0.00002400	0.00002487	0.0001446	9301
2800					
3000					
3200					
3400					
3600					
3800					
4000					
4200					
4400					
4600					
4800					
5000					

Tabela 12.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada (cont.)

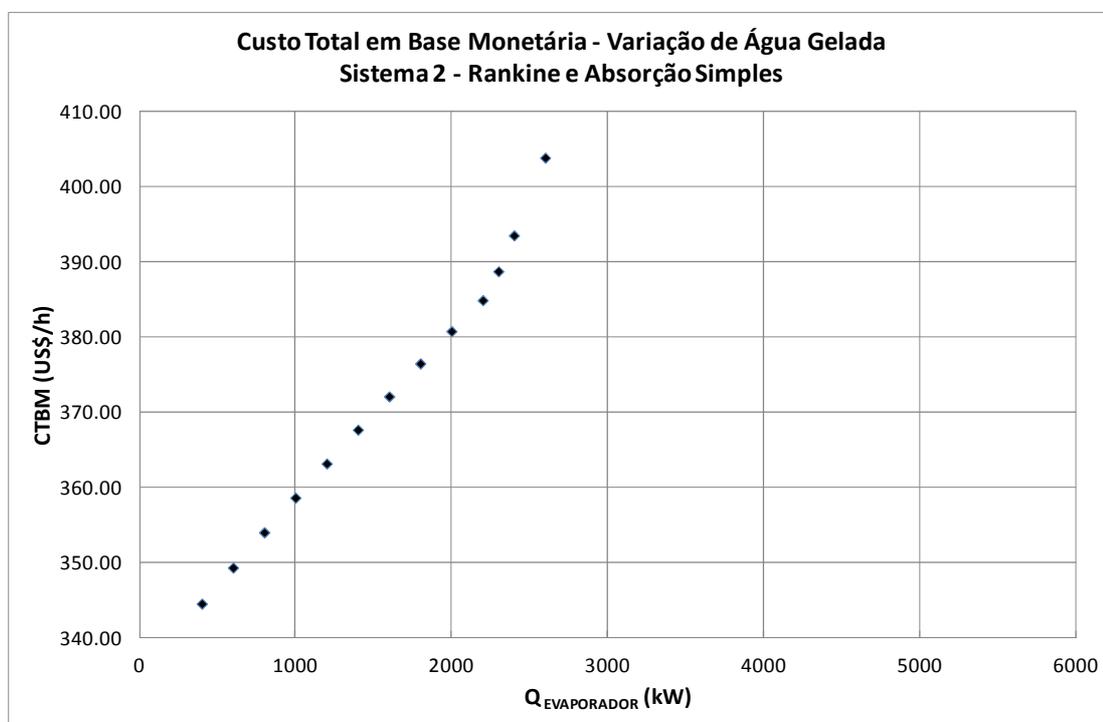
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP	$\eta_{\text{exerg}}$ chiller
400	0.2415	0.6733	0.3179	0.7117	0.1511
600	0.2440	0.6838	0.3155	0.7156	0.1545
800	0.2465	0.6940	0.3133	0.7176	0.1562
1000	0.2491	0.7041	0.3110	0.7188	0.1573
1200	0.2516	0.7139	0.3089	0.7196	0.1580
1400	0.2541	0.7236	0.3067	0.7201	0.1585
1600	0.2566	0.7331	0.3046	0.7206	0.1589
1800	0.2591	0.7424	0.3026	0.7209	0.1592
2000	0.2616	0.7515	0.3006	0.7212	0.1594
2200	0.2641	0.7604	0.2986	0.7214	0.1596
2300	0.2669	0.7605	0.2960	0.7215	0.1670
2400	0.2703	0.7587	0.2926	0.7216	0.1829

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP	$\eta_{\text{exerg chiller}}$
2600	0.2722	0.7550	0.2861	0.7217	0.1885
2800					
3000					
3200					
3400					
3600					
3800					
4000					
4200					
4400					
4600					
4800					
5000					

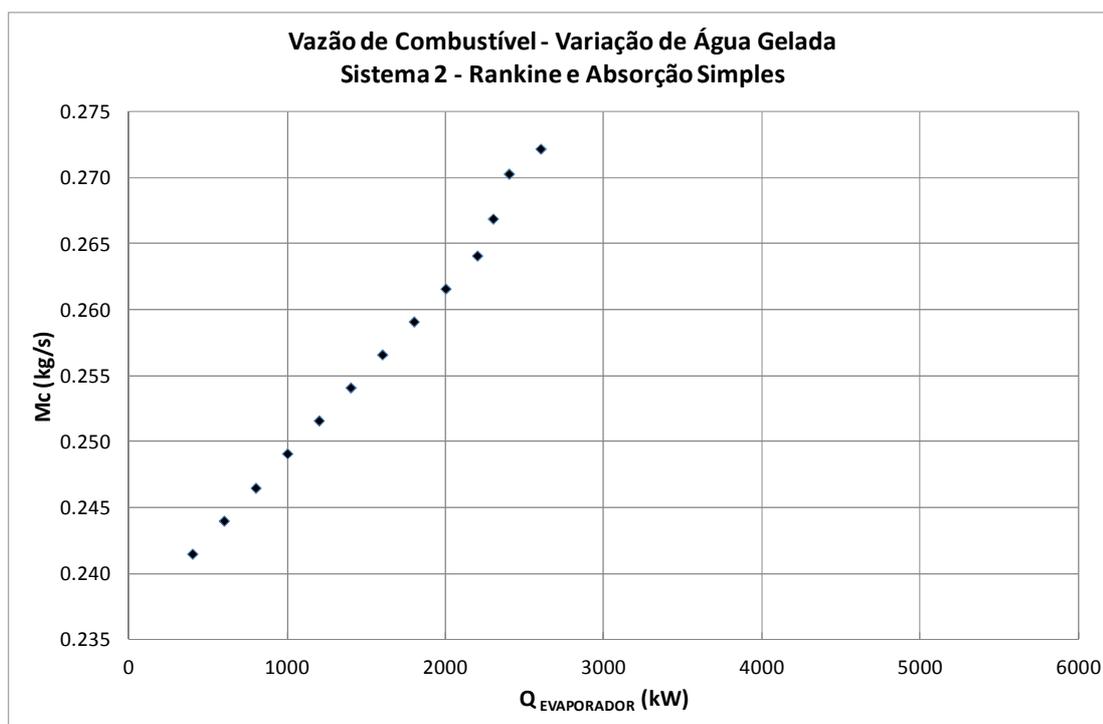
**Tabela 12.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 2 – Variação de Água Gelada (cont.)**

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$P_{\text{chiller}}$ (bar)	$C_{\text{GV}}$ (US\$)	$C_{\text{TV}}$ (US\$)	$C_{\text{CHILLER}}$ (US\$)
400	94.43	580.0	1.50	263514	92932	119220
600	94.43	580.0	1.50	265069	93017	155801
800	94.43	580.0	1.50	266619	93102	188378
1000	94.42	580.0	1.50	268165	93187	218269
1200	94.42	580.0	1.50	269696	93271	246179
1400	94.42	580.0	1.50	271225	93356	272543
1600	94.43	580.0	1.50	272748	93441	297653
1800	94.43	580.0	1.50	274263	93526	321715
2000	94.43	580.0	1.50	275773	93611	344882
2200	94.40	580.0	1.50	277285	93695	367274
2300	82.65	579.2	1.25	278370	93586	378209
2400	66.34	580.0	0.89	279398	93412	388983
2600	54.74	580.0	0.80	282814	93393	410085
2800						
3000						
3200						
3400						
3600						
3800						
4000						
4200						
4400						
4600						
4800						
5000						

A evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise com a variação do calor trocado no evaporador é apresentada abaixo.



**Gráfico 12.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 2)**



**Gráfico 12.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 2)**

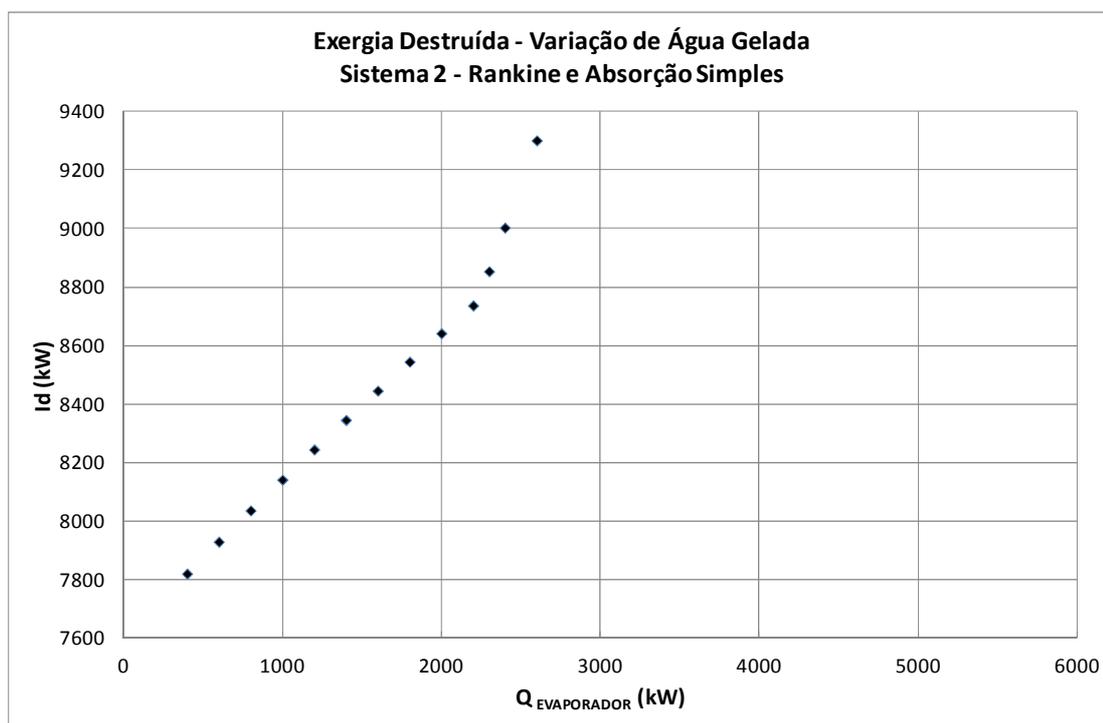


Gráfico 12.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 2)

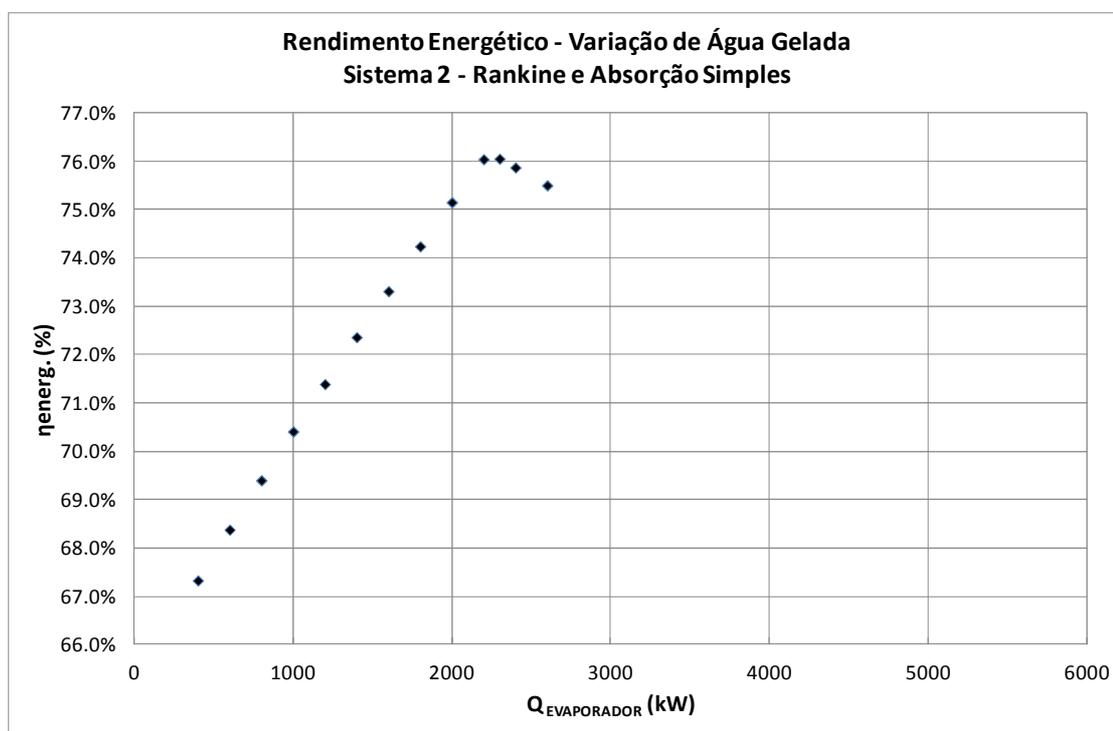
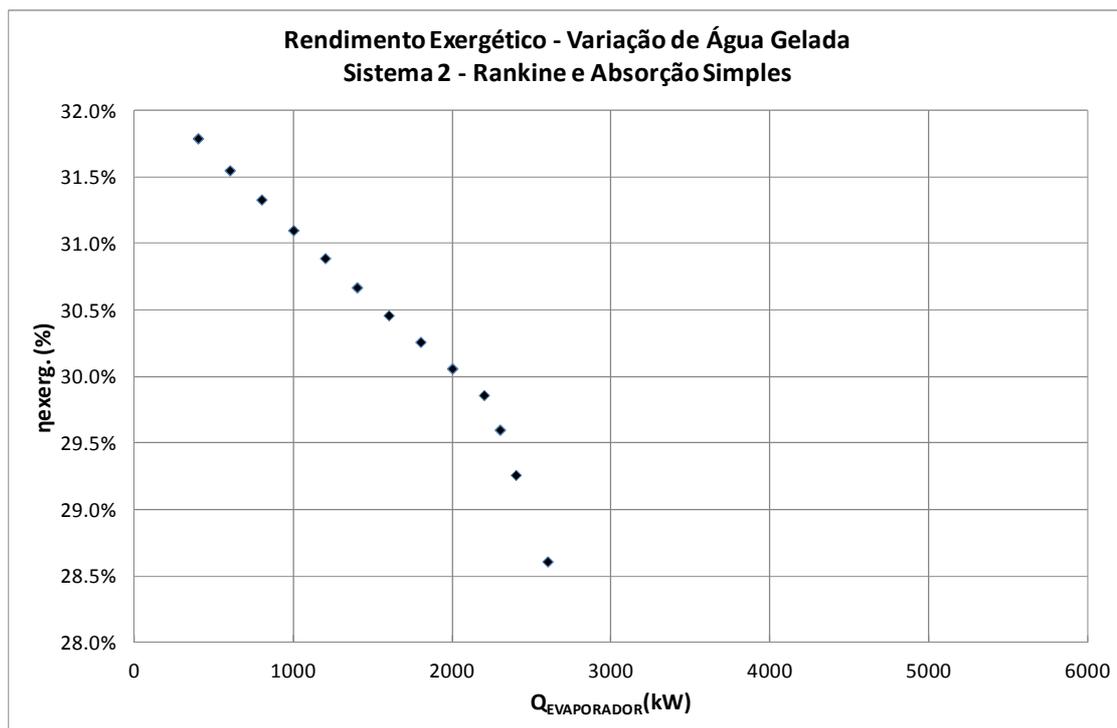


Gráfico 12.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 2)



**Gráfico 12.10 - Rendimento exergético em função da demanda de água gelada (Sist. 2)**

### 13 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO RANKINE E REFRIG. POR ABSORÇÃO DE DUPLO EFEITO

Esta configuração não havia sido utilizada para os estudos de caso anteriormente apresentados. O chiller de absorção de duplo efeito trabalha com dois níveis de pressão para o condensador e para o gerador, havendo um trocador de calor entre o condensador de alta pressão e o gerador de baixa pressão. Em geral os chillers de duplo efeito possuem eficiências exergéticas superiores aos de simples estágio. Os custos exergéticos destas máquinas são, portanto, reduzidos. A figura abaixo representa esquematicamente a configuração deste sistema de refrigeração.

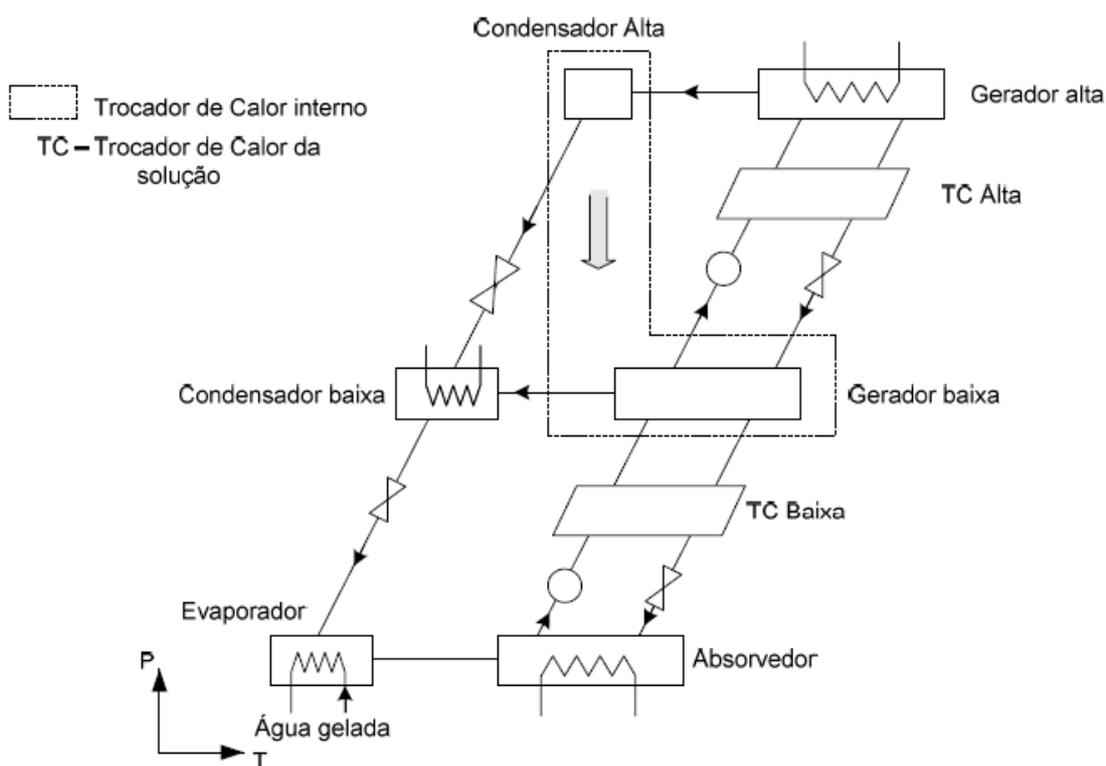


Figura 13.1 - Chiller de absorção de duplo efeito

### 13.1 VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE

A minimização do CTBM para a terceira planta é sujeita às mesmas demandas:

- (iv)  $1500kW \leq \dot{W}_{PLANTA} \leq 20000kW$
- (v)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 kW$
- (vi)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 kg/s; p_{VAPOR} = 5 bar$

Os resultados do processo de otimização da planta 3 podem ser avaliados na tabela que segue.

**Tabela 13.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade**

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
1500	254.11	0.00002272	0.00002300	0.0001228	5518
2000	305.75	0.00002354	0.00002387	0.0001257	6742
2500	356.46	0.00002411	0.00002447	0.0001277	7968
3000	406.91	0.00002453	0.00002492	0.0001292	9194
3500	458.08	0.00002492	0.00002530	0.0001306	10451
4000	507.35	0.00002513	0.00002555	0.0001313	11645
4500	557.42	0.00002535	0.00002579	0.0001321	12872
5000	607.42	0.00002553	0.00002598	0.0001328	14097
5500	657.36	0.00002569	0.00002614	0.0001333	15323
6000	707.25	0.00002582	0.00002628	0.0001338	16549
6500	759.82	0.00002603	0.00002649	0.0001345	17871
7000	806.92	0.00002604	0.00002651	0.0001345	19002
7500	856.76	0.00002613	0.00002661	0.0001349	20228
8000	906.46	0.00002621	0.00002669	0.0001351	21453
8500	956.25	0.00002628	0.00002677	0.0001354	22680
9000	1006.43	0.00002635	0.00002684	0.0001357	23923
9500	1057.24	0.00002643	0.00002695	0.0001360	25191
10000	1105.26	0.00002645	0.00002695	0.0001360	26357
10500	1154.91	0.00002649	0.00002700	0.0001362	27583
11000	1204.55	0.00002654	0.00002704	0.0001363	28809
11500	1254.17	0.00002658	0.00002708	0.0001365	30035
12000	1303.79	0.00002661	0.00002712	0.0001366	31261
12500	1353.38	0.00002665	0.00002716	0.0001367	32488
13000	1402.97	0.00002668	0.00002719	0.0001368	33713
13500	1452.93	0.00002671	0.00002723	0.0001369	34952
14000	1502.11	0.00002673	0.00002725	0.0001370	36166
14500	1551.67	0.00002676	0.00002728	0.0001371	37391

$W_{PLANTA}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
15000	1601.21	0.00002678	0.00002730	0.0001372	38617
15500	1650.75	0.00002680	0.00002732	0.0001373	39843
16000	1700.28	0.00002682	0.00002734	0.0001373	41069
16500	1752.06	0.00002688	0.00002740	0.0001375	42373
17000	1799.54	0.00002686	0.00002739	0.0001375	43529
17500	1849.28	0.00002688	0.00002740	0.0001375	44764
18000	1898.41	0.00002689	0.00002742	0.0001376	45976
18500	1948.10	0.00002691	0.00002744	0.0001376	47210
19000	1997.56	0.00002692	0.00002745	0.0001377	48433
19500	2046.79	0.00002693	0.00002746	0.0001377	49650
20000	2096.27	0.00002695	0.00002748	0.0001378	50876

Tabela 13.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade (cont.)

$W_{PLANTA}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP	$\eta_{exerg\ chiller}$
1500	0.1755	0.8452	0.3451	1.213	0.2816
2000	0.2123	0.7483	0.3333	1.213	0.2816
2500	0.2493	0.6801	0.3249	1.213	0.2816
3000	0.2862	0.6294	0.3187	1.213	0.2816
3500	0.3238	0.5891	0.3132	1.213	0.2816
4000	0.3601	0.5592	0.3101	1.213	0.2816
4500	0.3970	0.5339	0.3070	1.213	0.2816
5000	0.4339	0.5129	0.3044	1.213	0.2816
5500	0.4709	0.4952	0.3022	1.213	0.2816
6000	0.5078	0.4801	0.3004	1.213	0.2816
6500	0.5468	0.4653	0.2976	1.213	0.2816
7000	0.5817	0.4556	0.2974	1.213	0.2816
7500	0.6186	0.4456	0.2961	1.213	0.2816
8000	0.6555	0.4367	0.2950	1.213	0.2816
8500	0.6925	0.4287	0.2940	1.213	0.2816
9000	0.7298	0.4213	0.2930	1.213	0.2816
9500	0.7676	0.4114	0.2919	1.213	0.2816
10000	0.8032	0.4092	0.2917	1.213	0.2816
10500	0.8402	0.4038	0.2910	1.213	0.2816
11000	0.8771	0.3989	0.2904	1.213	0.2816
11500	0.9140	0.3944	0.2899	1.213	0.2816
12000	0.9510	0.3903	0.2893	1.213	0.2816
12500	0.9879	0.3864	0.2889	1.213	0.2816
13000	1.0250	0.3828	0.2884	1.213	0.2816
13500	1.0620	0.3794	0.2879	1.213	0.2816
14000	1.0990	0.3764	0.2876	1.213	0.2816
14500	1.1360	0.3734	0.2872	1.213	0.2816
15000	1.1730	0.3708	0.2870	1.213	0.2816
15500	1.2090	0.3683	0.2866	1.213	0.2816

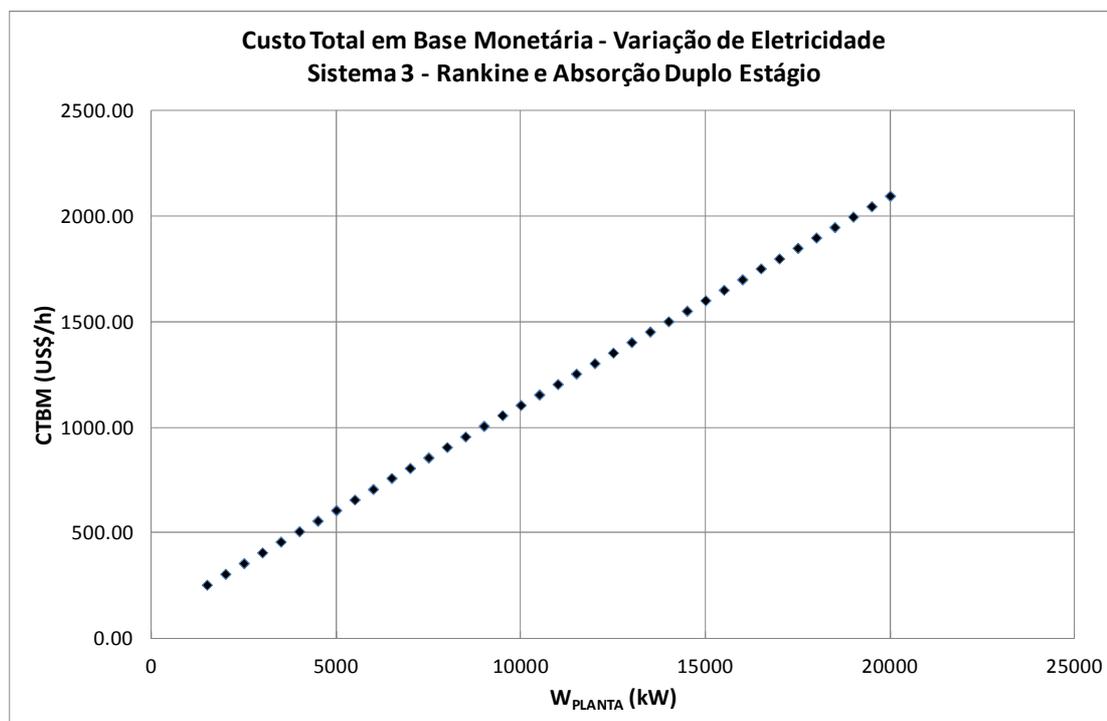
$W_{PLANTA}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP	$\eta_{exerg\ chiller}$
16000	1.2460	0.3659	0.2863	1.213	0.2816
16500	1.2850	0.3631	0.2857	1.213	0.2816
17000	1.3200	0.3614	0.2858	1.213	0.2816
17500	1.3580	0.3594	0.2855	1.213	0.2816
18000	1.3940	0.3575	0.2853	1.213	0.2816
18500	1.4310	0.3557	0.2851	1.213	0.2816
19000	1.4680	0.3540	0.2849	1.213	0.2816
19500	1.5050	0.3524	0.2847	1.213	0.2816
20000	1.5420	0.3508	0.2845	1.213	0.2816

Tabela 13.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Eletricidade (cont.)

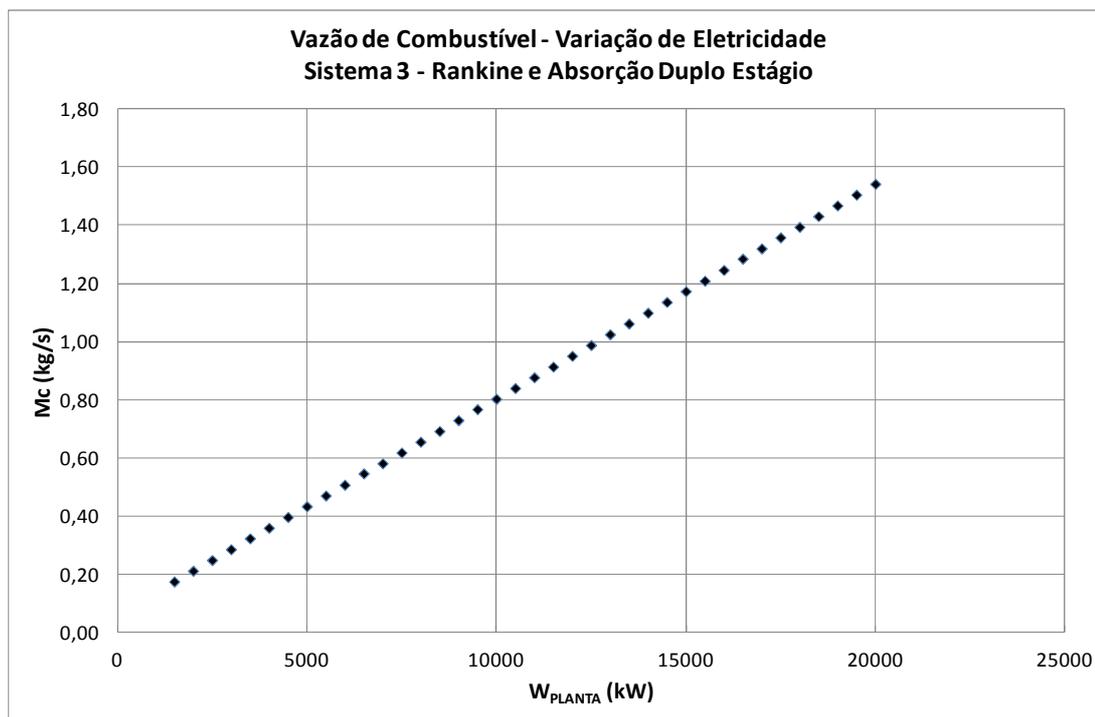
$W_{PLANTA}$ (kW)	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$P_{chiller}$ (bar)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
1500	120.0	579.3	0.8	220858	69595	195391
2000	120.0	580.0	0.8	246154	84695	195391
2500	120.0	580.0	0.8	269706	98618	195391
3000	120.0	580.0	0.8	291804	111669	195391
3500	119.7	575.4	0.8	313773	124050	195391
4000	120.0	580.0	0.8	332602	135849	195391
4500	120.0	580.0	0.8	351639	147196	195391
5000	120.0	580.0	0.8	369927	158145	195391
5500	120.0	580.0	0.8	387558	168748	195391
6000	120.0	580.0	0.8	404602	179046	195391
6500	117.8	574.5	0.8	422995	189066	195391
7000	120.0	580.0	0.8	437181	198855	195391
7500	119.9	580.0	0.8	452783	208415	195391
8000	120.0	580.0	0.8	467996	217775	195391
8500	119.9	580.0	0.8	482853	226946	195391
9000	120.0	578.7	0.8	497822	235958	195391
9500	117.5	580.0	0.8	511781	244737	195391
10000	120.0	580.0	0.8	525475	253487	195391
10500	120.0	580.0	0.8	539112	262044	195391
11000	120.0	580.0	0.8	552494	270471	195391
11500	120.0	580.0	0.8	565637	278776	195391
12000	120.0	580.0	0.8	578552	286967	195391
12500	120.0	580.0	0.8	591266	295049	195391
13000	120.0	580.0	0.8	603754	303028	195391
13500	119.9	579.5	0.8	616313	310913	195391
14000	120.0	580.0	0.8	628190	318697	195391
14500	120.0	580.0	0.8	640136	326398	195391
15000	120.0	580.0	0.8	651921	334013	195391
15500	120.0	580.0	0.8	663546	341548	195391

$W_{PLANTA}$ (kW)	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$P_{chiller}$ (bar)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
16000	120.0	580.0	0.8	675022	349005	195391
16500	118.9	578.5	0.8	687210	356371	195391
17000	119.8	580.0	0.8	697582	363694	195391
17500	120.0	579.4	0.8	708927	370950	195391
18000	120.0	579.9	0.8	719569	378120	195391
18500	119.9	579.8	0.8	730471	385233	195391
19000	120.0	579.7	0.8	741162	392289	195391
19500	120.0	580.0	0.8	751578	399279	195391
20000	120.0	580.0	0.8	762036	406215	195391

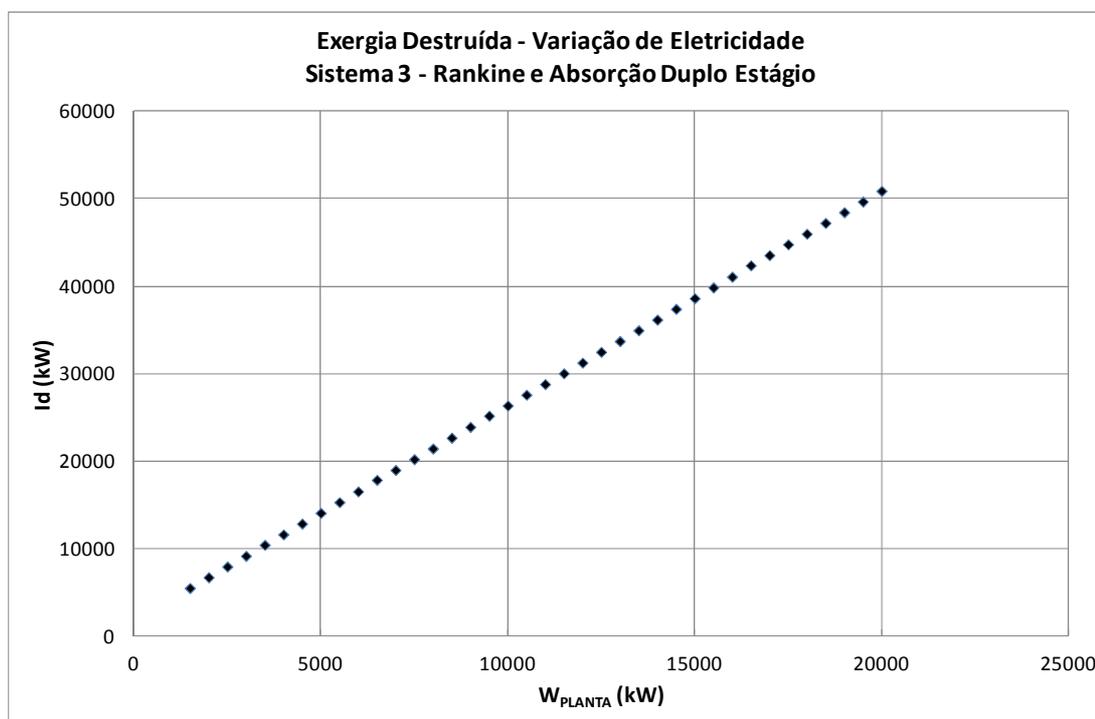
Os gráficos relativos à evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise para variação de eletricidade na terceira configuração são apresentados a seguir.



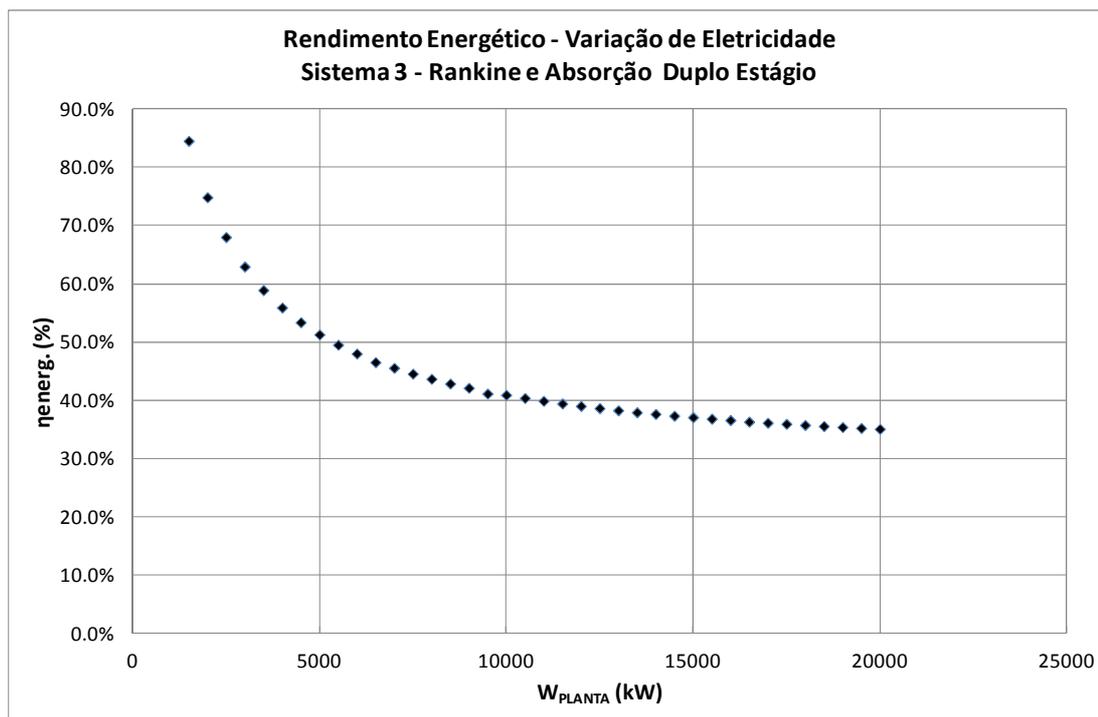
**Gráfico 13.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)**



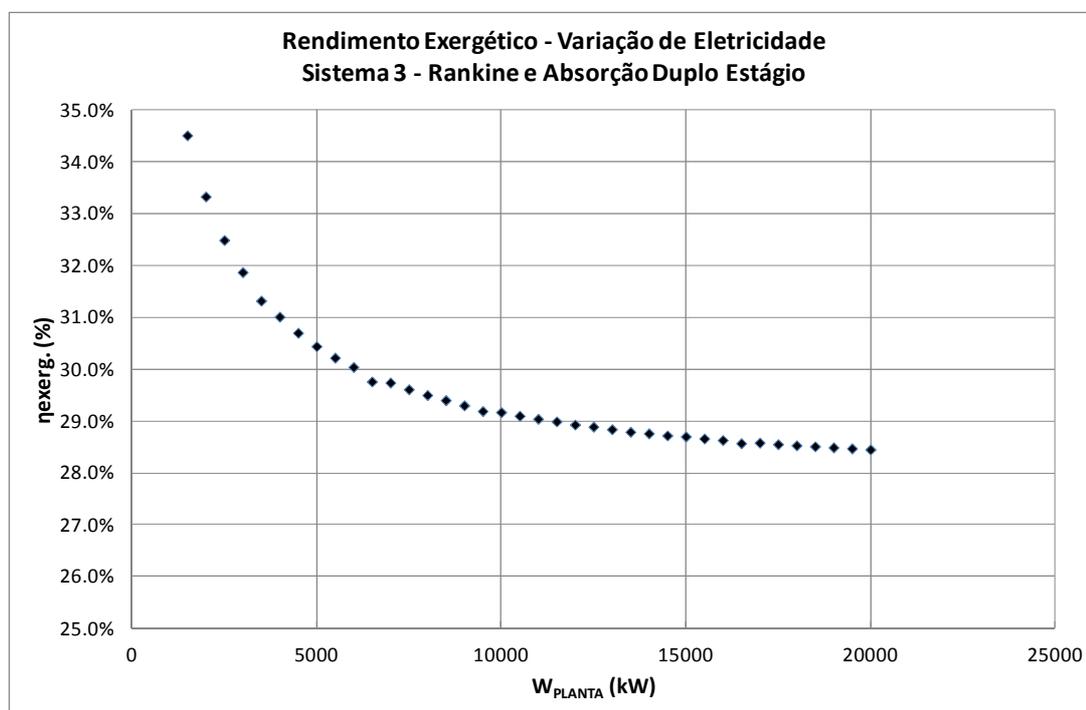
**Gráfico 13.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)**



**Gráfico 13.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)**



**Gráfico 13.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)**



**Gráfico 13.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 3)**

### 13.2 VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA

A demanda de eletricidade foi igualmente fixada em 2300kW e fez-se variar a demanda de água gelada através do calor trocado no evaporador:

- (i)  $\dot{W}_{PLANTA} = 2300kW$
- (ii)  $400kW \leq \dot{Q}_{EVAPORADOR} \leq 5000kW$
- (iii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Os resultados do processo de otimização podem ser avaliados na tabela que segue. (As células em branco representam pontos inatingíveis pelo sistema – para esta demanda combinada de eletricidade e água gelada).

**Tabela 13.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada**

$Q_{EVAPORADOR}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{detr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)
400	334.32	0.00002395	0.00002431	0.0001332	7452
600	337.32	0.00002422	0.00002422	0.0001242	7492
800	340.23	0.00002379	0.00002413	0.0001188	7531
1000	343.11	0.00002371	0.00002405	0.0001151	7572
1200	345.75	0.00002362	0.00002395	0.0001122	7605
1400	348.46	0.00002354	0.00002386	0.0001100	7640
1600	351.07	0.00002346	0.00002378	0.0001081	7672
1800	353.67	0.00002338	0.00002369	0.0001065	7703
2000	356.27	0.00002330	0.00002361	0.0001051	7734
2200	358.76	0.00002322	0.00002352	0.0001039	7761
2400	361.24	0.00002314	0.00002344	0.0001028	7787
2600	363.69	0.00002306	0.00002335	0.0001017	7812
2800	366.07	0.00002298	0.00002327	0.0001008	7836
3000	368.37	0.00002291	0.00002319	0.0000999	7865
3200	378.06	0.00002403	0.00002424	0.0001052	8515
3400	422.90	0.00002984	0.00003002	0.0001320	11808
3600					
3800					
4000					
4200					
4400					
4600					
4800					

Tabela 13.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada (cont.)

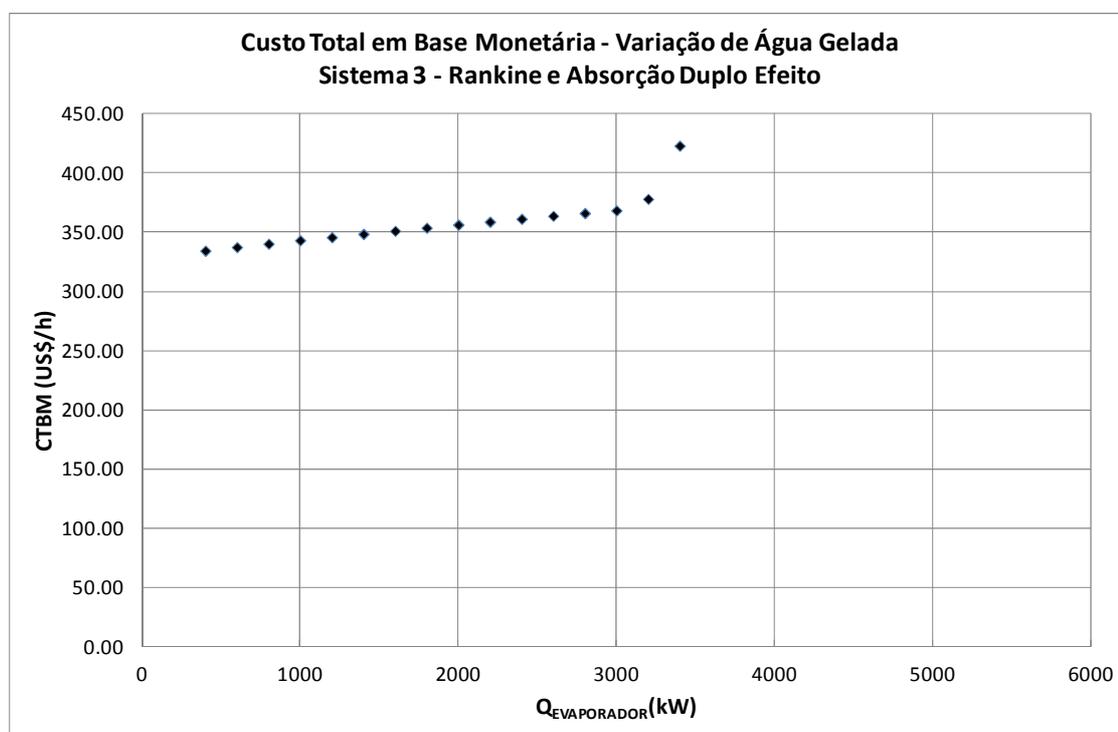
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP	$\eta_{\text{exerg}}$ chiller
400	0.2338	0.6956	0.3283	1.205	0.2735
600	0.2349	0.7103	0.3277	1.216	0.2850
800	0.2361	0.7248	0.3270	1.222	0.2911
1000	0.2373	0.7390	0.3263	1.226	0.2949
1200	0.2384	0.7535	0.3258	1.228	0.2975
1400	0.2395	0.7675	0.3251	1.23	0.2993
1600	0.2407	0.7816	0.3245	1.231	0.3006
1800	0.2418	0.7954	0.3239	1.232	0.3019
2000	0.2430	0.8091	0.3233	1.233	0.3028
2200	0.2441	0.8228	0.3227	1.233	0.3035
2400	0.2452	0.8362	0.3221	1.234	0.3041
2600	0.2464	0.8496	0.3216	1.234	0.3047
2800	0.2475	0.8628	0.3210	1.235	0.3051
3000	0.2488	0.8754	0.3202	1.235	0.3055
3200	0.2634	0.8429	0.3033	1.235	0.2977
3400	0.3346	0.6752	0.2391	1.235	0.2762
3600					
3800					
4000					
4200					
4400					
4600					
4800					

Tabela 13.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 3 – Variação de Água Gelada (cont.)

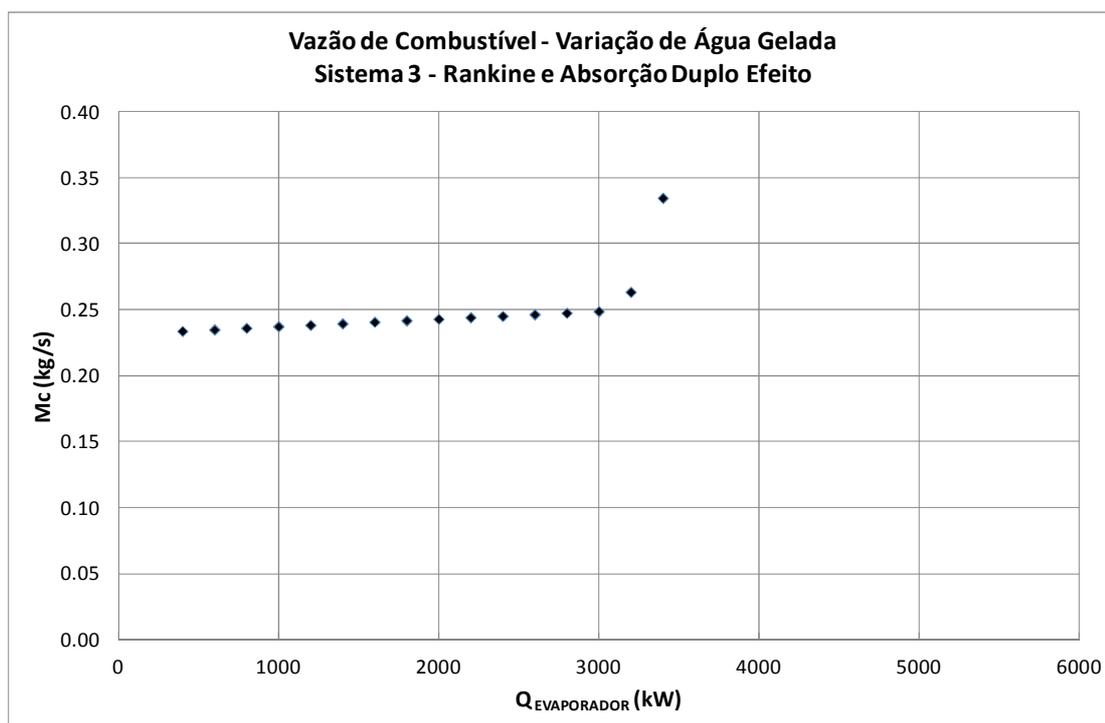
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$P_{\text{chiller}}$ (bar)	$C_{\text{GV}}$ (US\$)	$C_{\text{TV}}$ (US\$)	$C_{\text{CHILLER}}$ (US\$)
400	120.0	580.0	0.80	260030	93127	161523
600	120.0	580.0	0.80	260747	93191	214536
800	119.9	580.0	0.80	261477	93255	262395
1000	119.6	579.9	0.80	262227	93316	306756
1200	120.0	580.0	0.80	262912	93384	348514
1400	119.9	579.9	0.80	263647	93447	388225
1600	120.0	580.0	0.80	264352	93512	426263
1800	120.0	580.0	0.80	265064	93576	462897
2000	120.0	579.8	0.80	265818	93640	498327
2200	120.0	580.0	0.80	266491	93703	532708
2400	120.0	580.0	0.80	267205	93767	566163
2600	120.0	580.0	0.80	267912	93831	598790
2800	120.0	580.0	0.80	268620	93895	630673
3000	119.2	580.0	0.80	269368	93951	661878
3200	93.3	509.8	0.88	286571	93979	692466

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$P_{\text{chiller}}$ (bar)	$C_{\text{GV}}$ (US\$)	$C_{\text{TV}}$ (US\$)	$C_{\text{CHILLER}}$ (US\$)
3400	61.0	456.8	1.26	354437	94362	722485
3600						
3800						
4000						
4200						
4400						
4600						
4800						

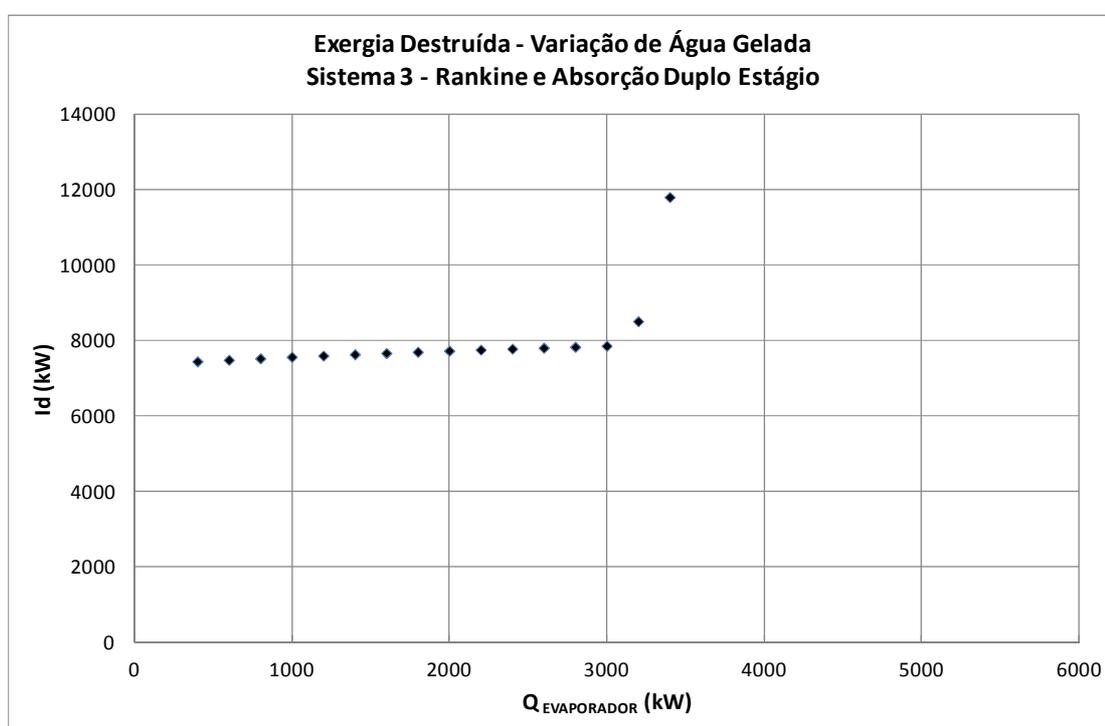
A evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise com a variação do calor trocado no evaporador são apresentados abaixo.



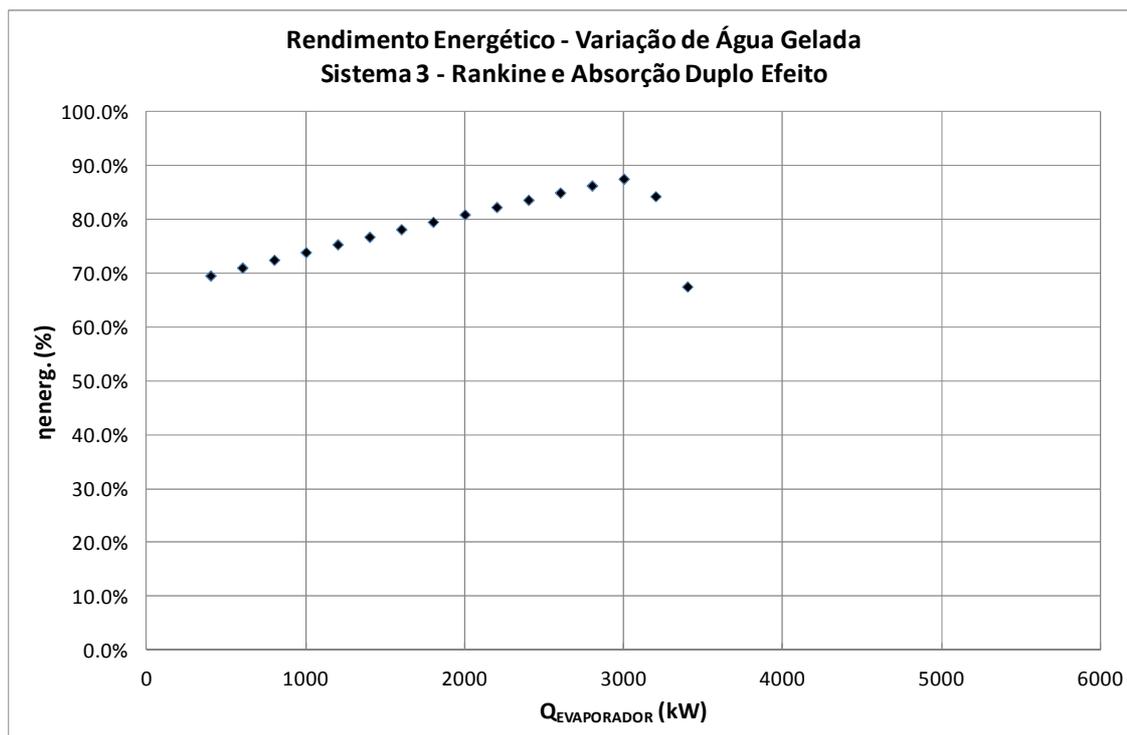
**Gráfico 13.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 3)**



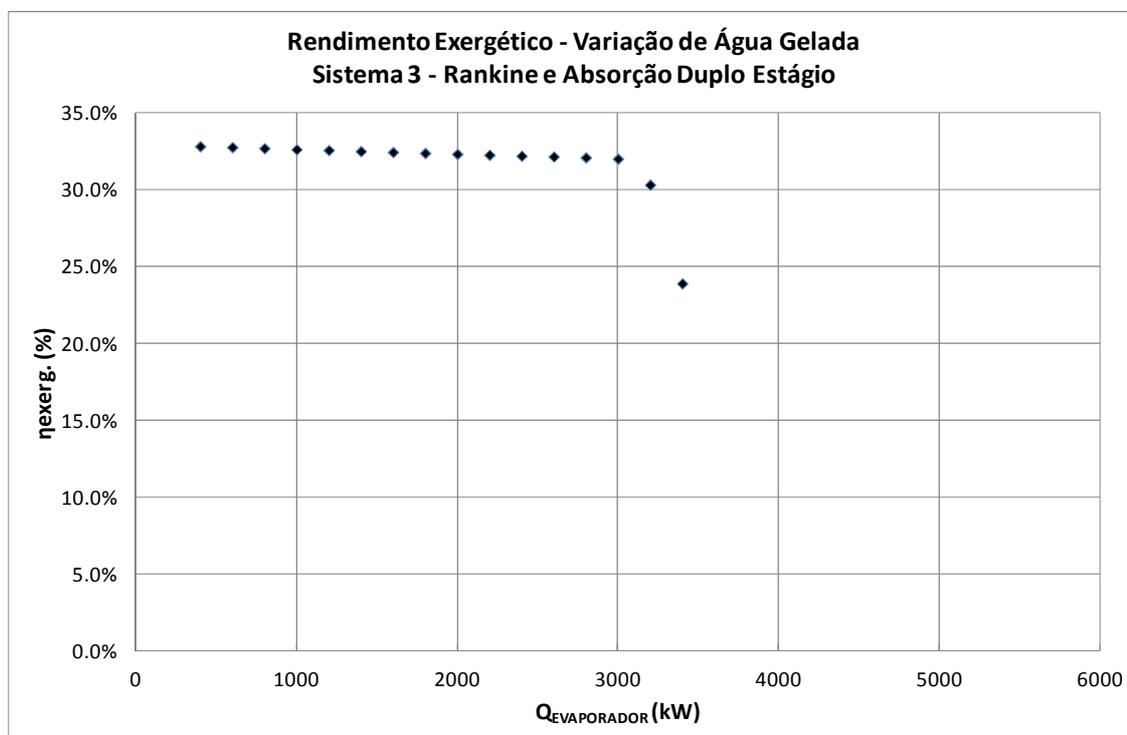
**Gráfico 13.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 3)**



**Gráfico 13.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 3)**



**Gráfico 13.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 3)**



**Gráfico 13.10 - Rendimento exergético em função da demanda de água gelada (Sist. 3)**

## 14 RESULTADOS DA VARIAÇÃO DAS DEMANDAS: CICLO COMBINADO DE POTÊNCIA

A quarta e última configuração de planta a ser estudada a nível do trabalho de formatura é o ciclo combinado de potência com uma turbina a gás e uma turbina a vapor, com um chiller de absorção de simples estágio para efeito de refrigeração. O esquemático do sistema pode ser observado na figura abaixo.

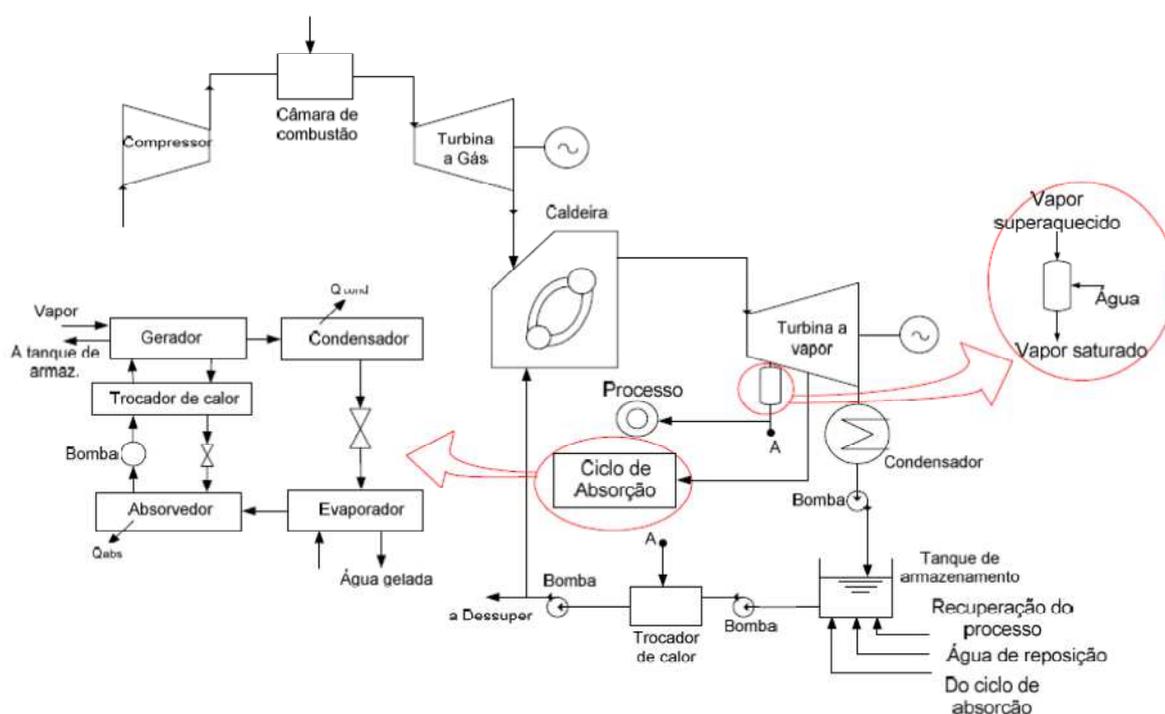


Figura 14.1 - Ciclo combinado de potência e refrigeração por absorção.

### 14.1 VARIAÇÃO NA DEMANDA DE ELETRICIDADE

A variação de demanda de eletricidade no caso do ciclo combinado se deu pela aplicação de quatro modelos de turbina a gás diferentes: CENTAUR50, SGT100, SGT300 e MARS90. As demandas relativas à refrigeração e ao processo foram mantidas as mesmas das aplicações anteriores, i.e.:

- (i)  $\dot{Q}_{EVAPORADOR} = 525 \text{ kW}$
- (ii)  $\dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$

Os resultados do processo de otimização da planta 4 podem ser avaliados na tabela que segue.

**Tabela 14.1 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade**

Modelo TG	$W_{PLANTA}$ (kW)	$W_{REDE}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{eletr}$ (US\$/kJ)	$C_{vapor}$ (US\$/kJ)
CENTAUR50	5119	-0,27	410,90	0,00001525	0,00002221
SGT100	5912	0,11	448,10	0,00001502	0,00002196
SGT300	9021	0,13	619,00	0,00001507	0,00002217
MARS90	11213	0,00	718,50	0,00001464	0,00002182

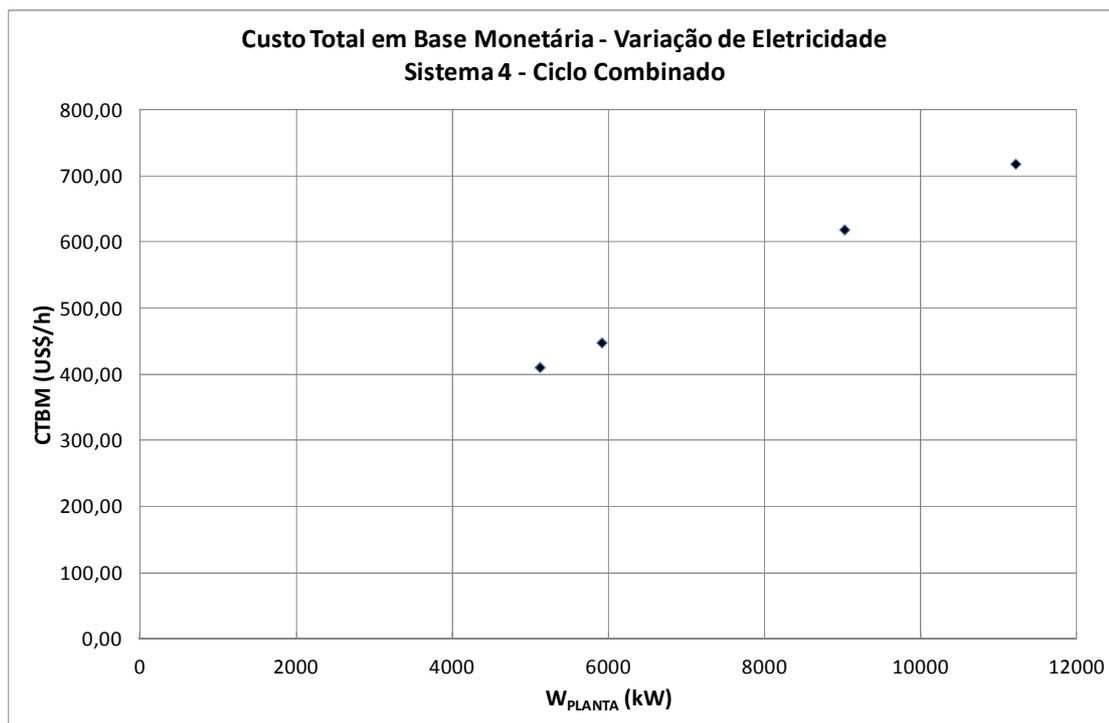
**Tabela 14.2 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade (cont.)**

Modelo TG	$C_{agua\ gel.}$ (US\$/kJ)	$I_{destruída}$ (kW)	$M_{comb}$ (kg/s)	$\eta_{energ}$	$\eta_{exerg}$	COP
CENTAUR50	0,0001532	9296	0,3510	0,6402	0,3829	0,7145
SGT100	0,0001454	10013	0,3858	0,6262	0,3905	0,7145
SGT300	0,0001464	14927	0,5666	0,5428	0,3780	0,7145
MARS90	0,0001444	17135	0,6642	0,5331	0,3899	0,7145

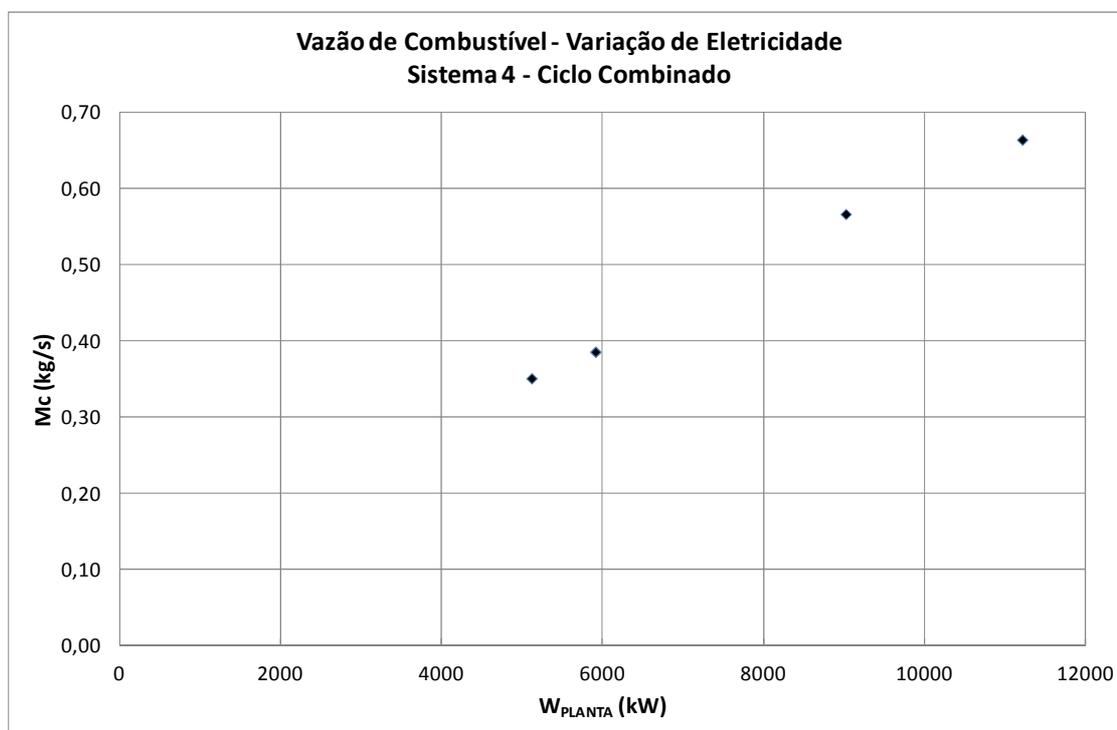
**Tabela 14.3 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Eletricidade (cont.)**

Modelo TG	$\eta_{exerg\ chiller}$	$P_{SC}$ (bar)	$T_{SC}$ (°C)	$P_{chiller}$ (bar)	$C_{TG}$ (US\$)	$C_{GV}$ (US\$)	$C_{TV}$ (US\$)	$C_{CHILLER}$ (US\$)
CENTAUR50	0,1798	20,0	280,0	0,8	592773	287771	59381	142658
SGT100	0,1798	20,0	280,0	0,8	673662	296704	62944	142658
SGT300	0,1798	20,0	280,0	0,8	808981	372259	92772	142658
MARS90	0,1798	20,0	280,0	0,8	891298	408680	107125	142658

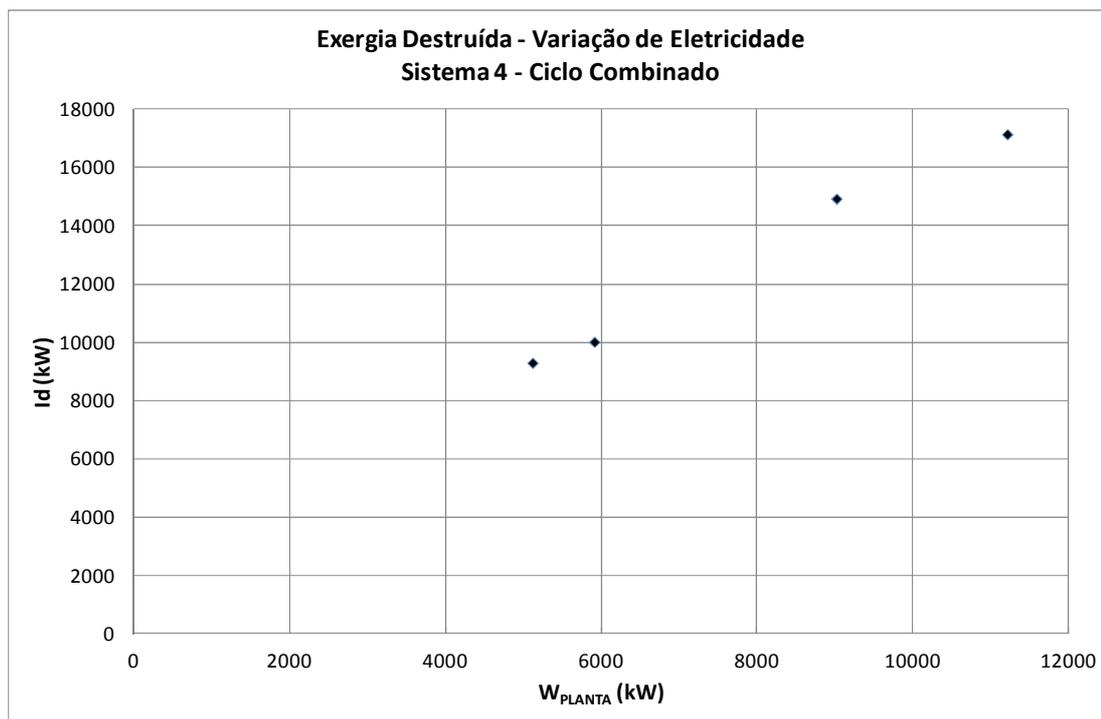
Os gráficos relativos à evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise para variação de eletricidade na quarta configuração são apresentados a seguir.



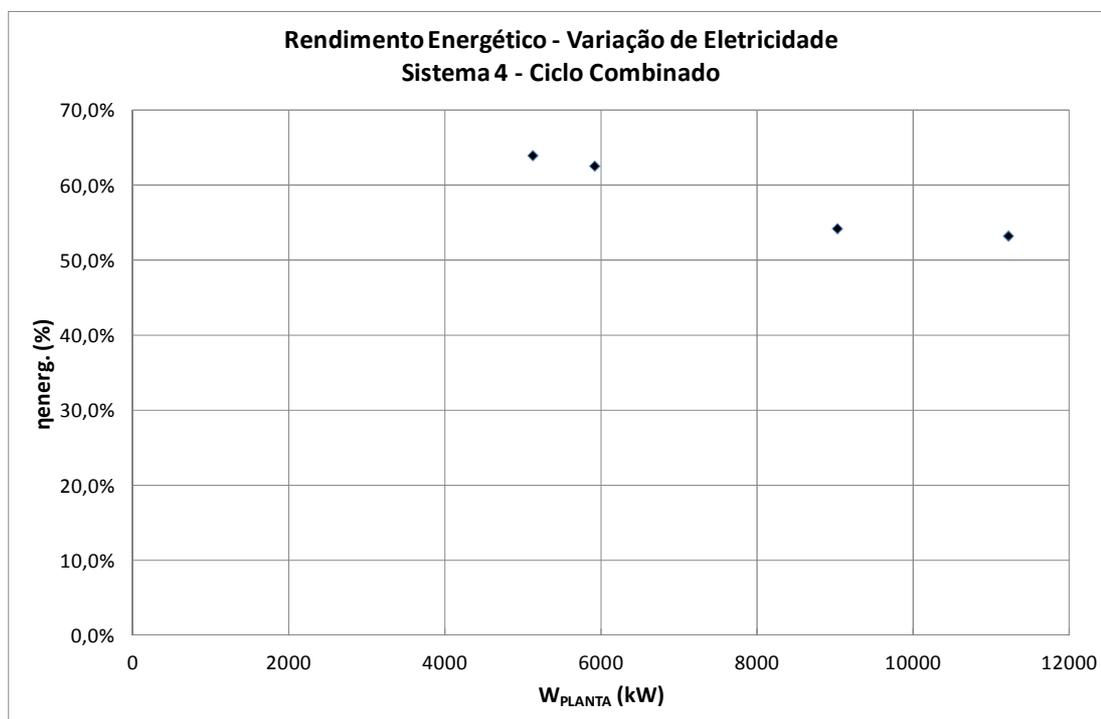
**Gráfico 14.1 - Custo total em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)**



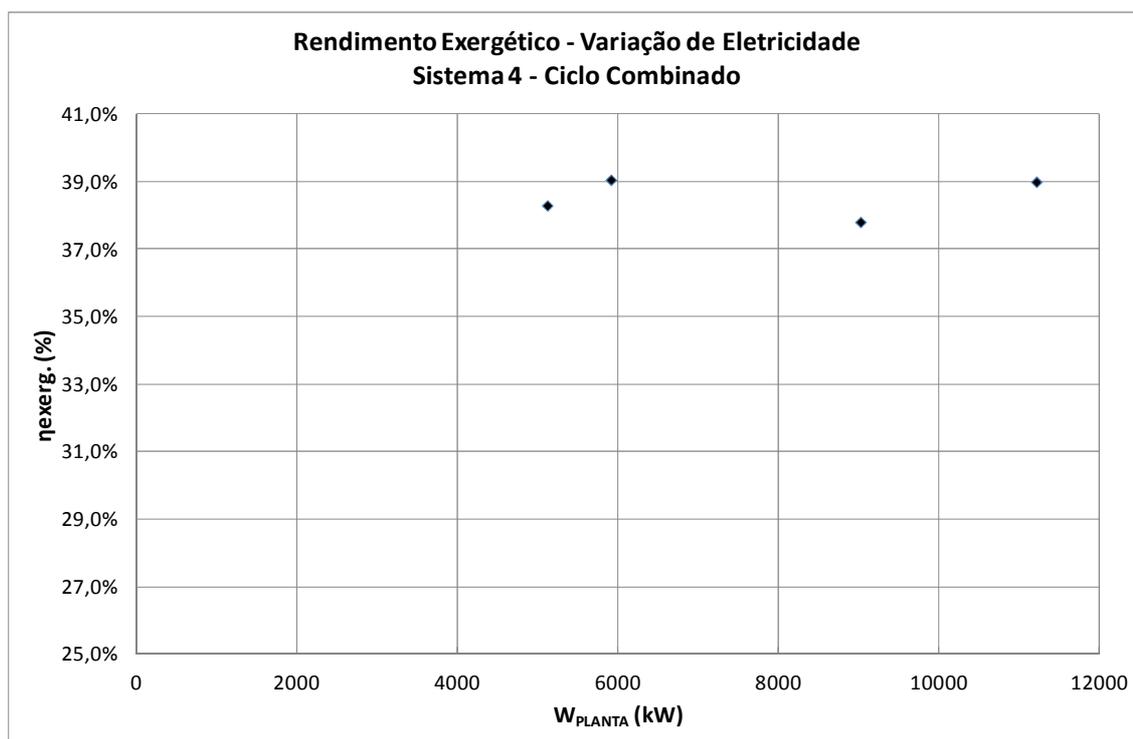
**Gráfico 14.2 - Vazão de combustível em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)**



**Gráfico 14.3 - Exergia destruída em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)**



**Gráfico 14.4 - Rendimento energético em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)**



**Gráfico 14.5 - Rendimento exergético em função da demanda de eletricidade (Sist. 4)**

## 14.2 VARIAÇÃO NA DEMANDA ÁGUA GELADA

A turbina a gás utilizada para esta série de dados foi a CENTAUR50. Devido ao fato de que as propriedades operacionais desta são fixas, o trabalho total da planta é diminuído com o aumento da demanda de refrigeração devido à extração de vapor da turbina a vapor para o chiller. Assim, a demanda de eletricidade é uma variável dependente neste caso:

$$(i) \quad 400kW \leq \dot{Q}_{EVAPORADOR} \leq 5000kW$$

$$(ii) \quad \dot{m}_{VAPOR} = 2,0 \text{ kg/s}; \quad p_{VAPOR} = 5 \text{ bar}$$

Os resultados do processo de otimização podem ser avaliados na tabela que segue. (Da mesma forma que eu para os casos anteriores, células em branco representam pontos inatingíveis pelo sistema – para esta demanda combinada de eletricidade e água gelada).

Tabela 14.4 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$W_{\text{PLANTA}}$ (kW)	CTBM (US\$/h)	$C_{\text{eletr}}$ (US\$/kJ)	$C_{\text{vapor}}$ (US\$/kJ)	$C_{\text{agua gel.}}$ (US\$/kJ)
400	5129	408,30	0,00001526	0,00002223	0,0001513
600	5113	412,50	0,00001524	0,00002220	0,0001447
800	5096	416,50	0,00001523	0,00002217	0,0001408
1000	5080	420,40	0,00001522	0,00002214	0,0001382
1200	5064	424,30	0,00001521	0,00002211	0,0001361
1400	5047	428,10	0,00001519	0,00002209	0,0001345
1600	5031	431,90	0,00001518	0,00002206	0,0001332
1800	5015	435,70	0,00001517	0,00002203	0,0001321
1900	5007	437,60	0,00001516	0,00002202	0,0001316
2000					
2400					
2600					
2800					
3000					
3200					
3400					
3600					
3800					
4000					
4200					
4400					
4600					
4800					
5000					

Tabela 14.5 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada (cont.)

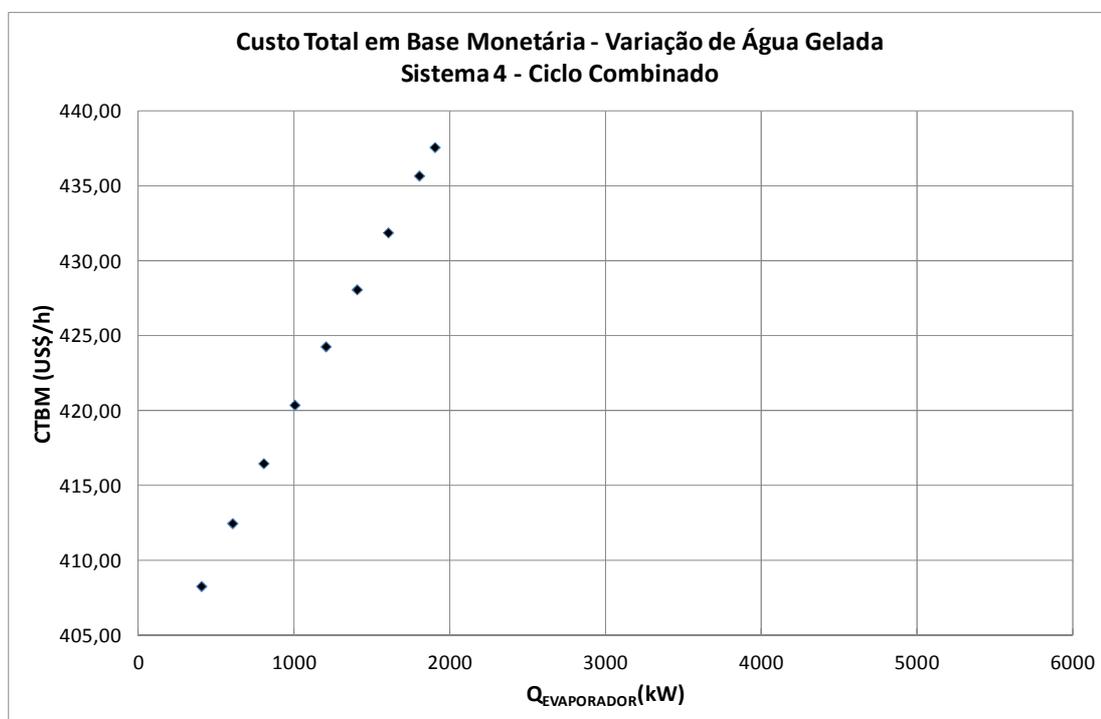
$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$I_{\text{destruída}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP	$\eta_{\text{exerg chiller}}$
400	9291	0,3510	0,6333	0,3831	0,7117	0,1766
600	9299	0,3510	0,6444	0,3828	0,7156	0,1811
800	9306	0,3510	0,6555	0,3825	0,7176	0,1835
1000	9311	0,3510	0,6666	0,3822	0,7188	0,185
1200	9314	0,3510	0,6777	0,3819	0,7196	0,1859
1400	9316	0,3510	0,6888	0,3817	0,7201	0,1867
1600	9316	0,3510	0,6999	0,3814	0,7206	0,1872
1800	9314	0,3510	0,7110	0,3811	0,7209	0,1876
1900	9313	0,3510	0,7165	0,3809	0,7210	0,1878
2000						
2400						
2600						
2800						

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$I_{\text{destruída}}$ (kW)	$M_{\text{comb}}$ (kg/s)	$\eta_{\text{energ}}$	$\eta_{\text{exerg}}$	COP	$\eta_{\text{exerg chiller}}$
3000						
3200						
3400						
3600						
3800						
4000						
4200						
4400						
4600						
4800						
5000						

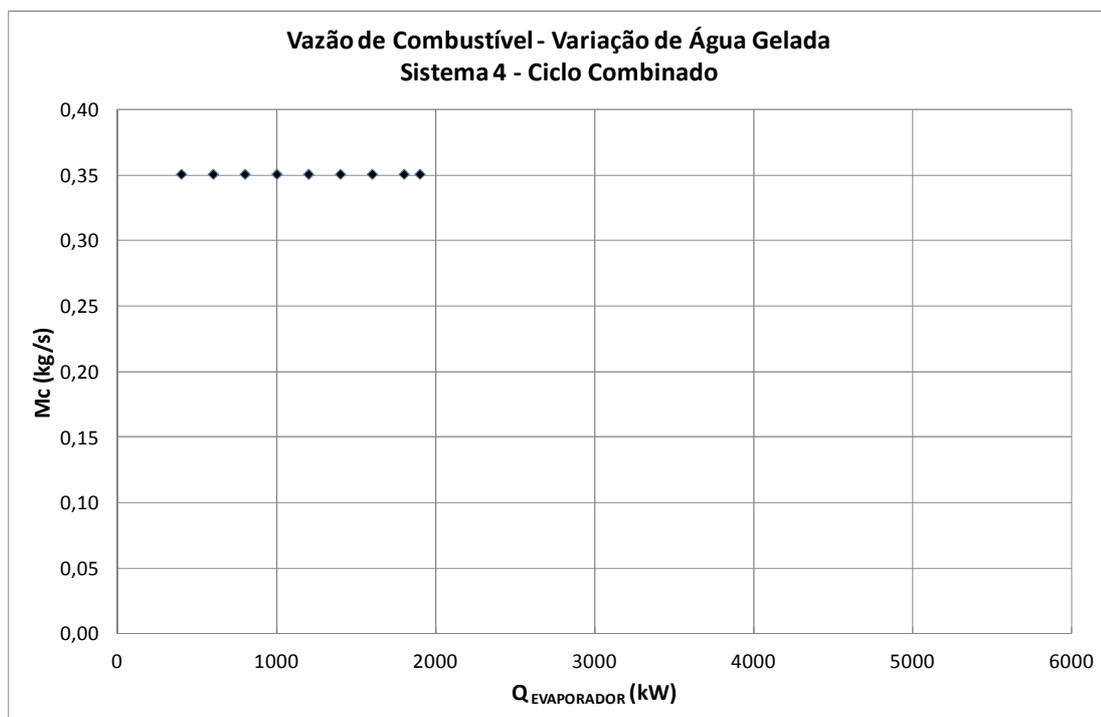
Tabela 14.6 - Minimização do CTBM - Ciclo 4 – Variação de Água Gelada (cont.)

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$ (kW)	$P_{\text{SC}}$ (bar)	$T_{\text{SC}}$ (°C)	$P_{\text{chiller}}$ (bar)	$C_{\text{TG}}$ (US\$)	$C_{\text{GV}}$ (US\$)	$C_{\text{TV}}$ (US\$)	$C_{\text{CHILLER}}$ (US\$)
400	20,0	280,0	0,80	592773	287771	59700	119220
600	20,0	280,0	0,80	592773	287771	59189	155801
800	20,0	280,0	0,80	592773	287771	58676	188378
1000	20,0	280,0	0,80	592773	287771	58161	218269
1200	20,0	280,0	0,80	592773	287771	57643	246179
1400	20,0	280,0	0,80	592773	287771	57124	272543
1600	20,0	280,0	0,80	592773	287771	56602	297653
1800	20,0	280,0	0,80	592773	287771	56078	321715
1900	20,0	280,0	0,80	592773	287771	55815	333402
2000							
2400							
2600							
2800							
3000							
3200							
3400							
3600							
3800							
4000							
4200							
4400							
4600							
4800							
5000							

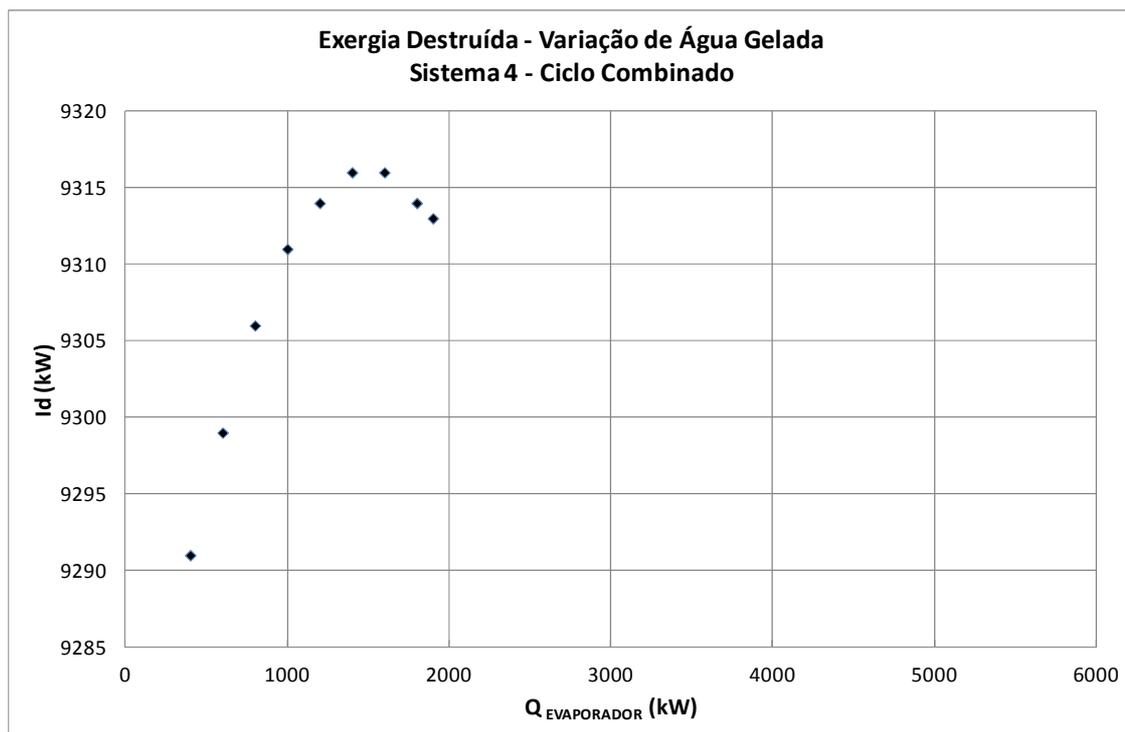
A evolução dos principais parâmetros envolvidos à análise com a variação do calor trocado no evaporador são apresentados abaixo.



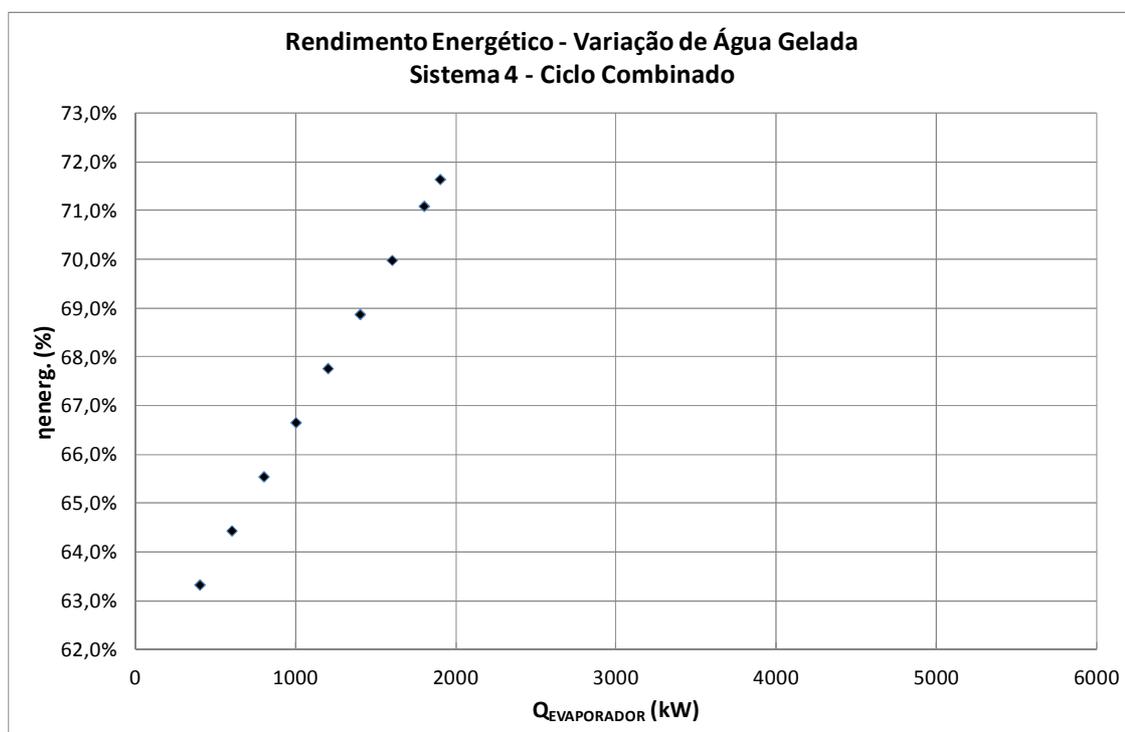
**Gráfico 14.6 - Custo total em função da demanda de água gelada (Sist. 4)**



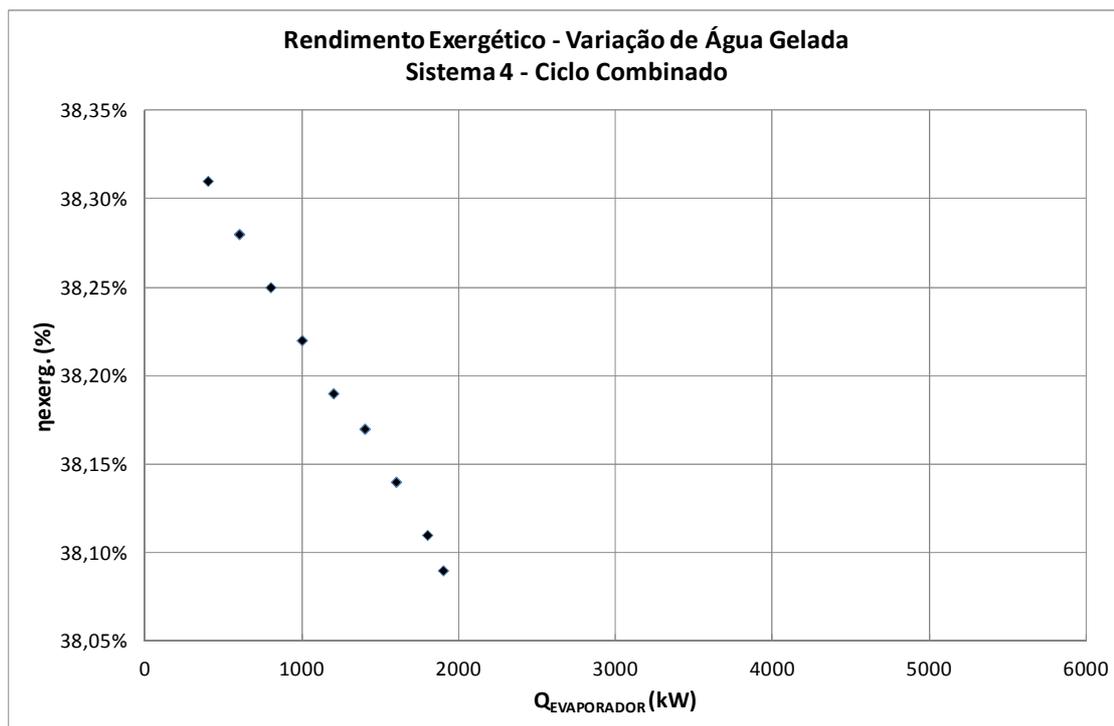
**Gráfico 14.7 - Vazão de combustível em função da demanda de água gelada (Sist. 4)**



**Gráfico 14.8 - Exergia destruída em função da demanda de água gelada (Sist. 4)**



**Gráfico 14.9 - Rendimento energético em função da demanda de água gelada (Sist. 4)**



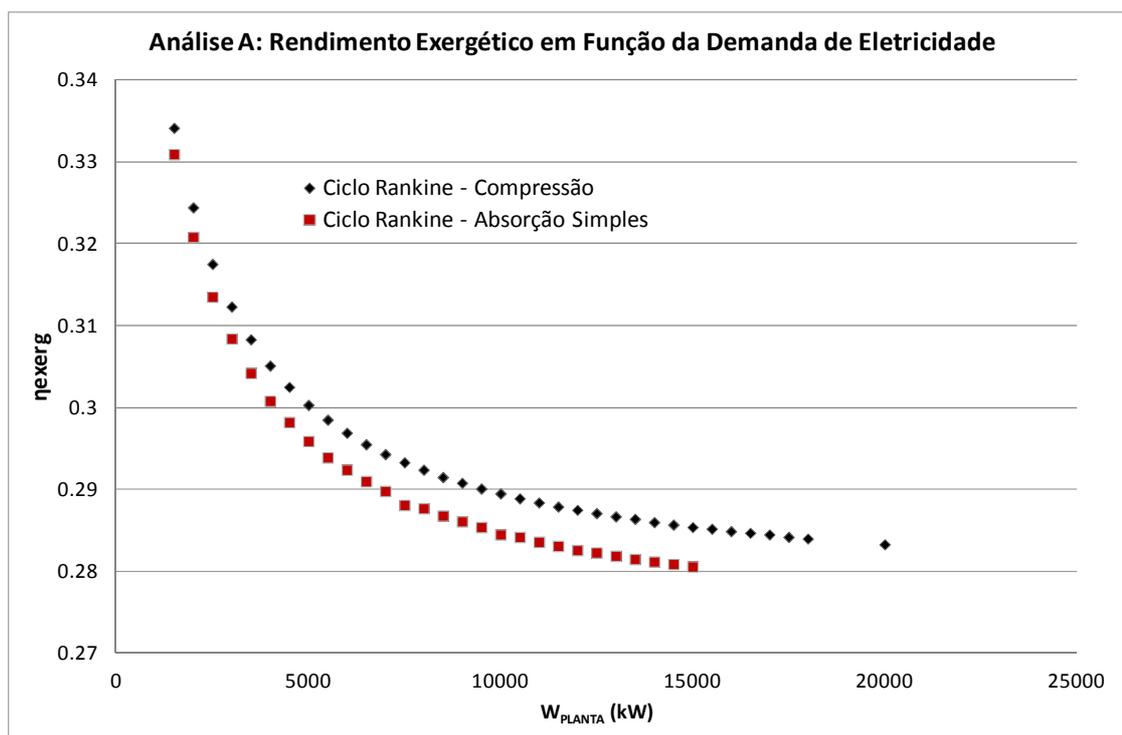
**Gráfico 14.10 - Rendimento exergético em função da demanda de água gelada (Sist. 4)**

## 15 ANÁLISE FINAL

Os dados obtidos ao longo das seções anteriores permitem ao menos três cenários de análise para os intervalos de demanda considerados, podendo a ser extrapolados a sistemas mais robustos e a casos particulares como os três estudos apresentados anteriormente.

### 15.1 CENÁRIO DE ANÁLISE A: REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR “VERSUS” POR ABSORÇÃO DE SIMPLES EFEITO

A nível de análise exergoeconômica, serão apresentadas superposições das curvas relativas a dois parâmetros: custo total em base monetária e rendimento exergético.



**Gráfico 15.1 - Comparação: rendimento exergético em função da eletricidade – Análise A**

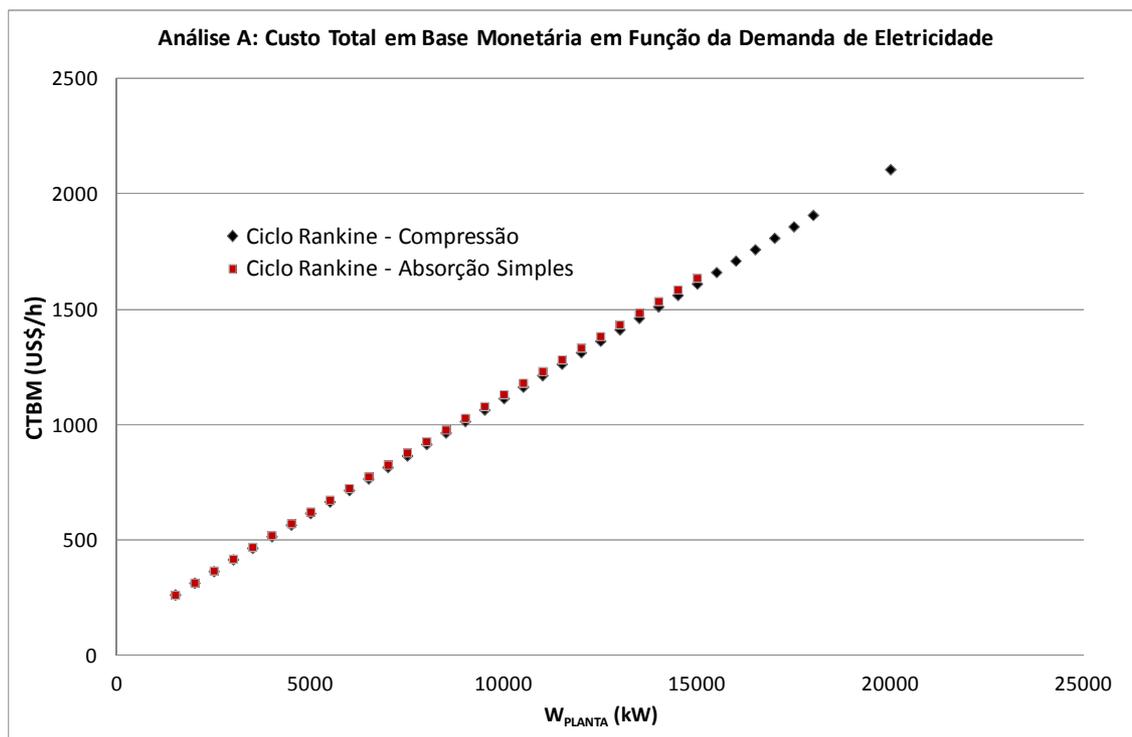


Gráfico 15.2 - Comparação: custo total em função da eletricidade – Análise A

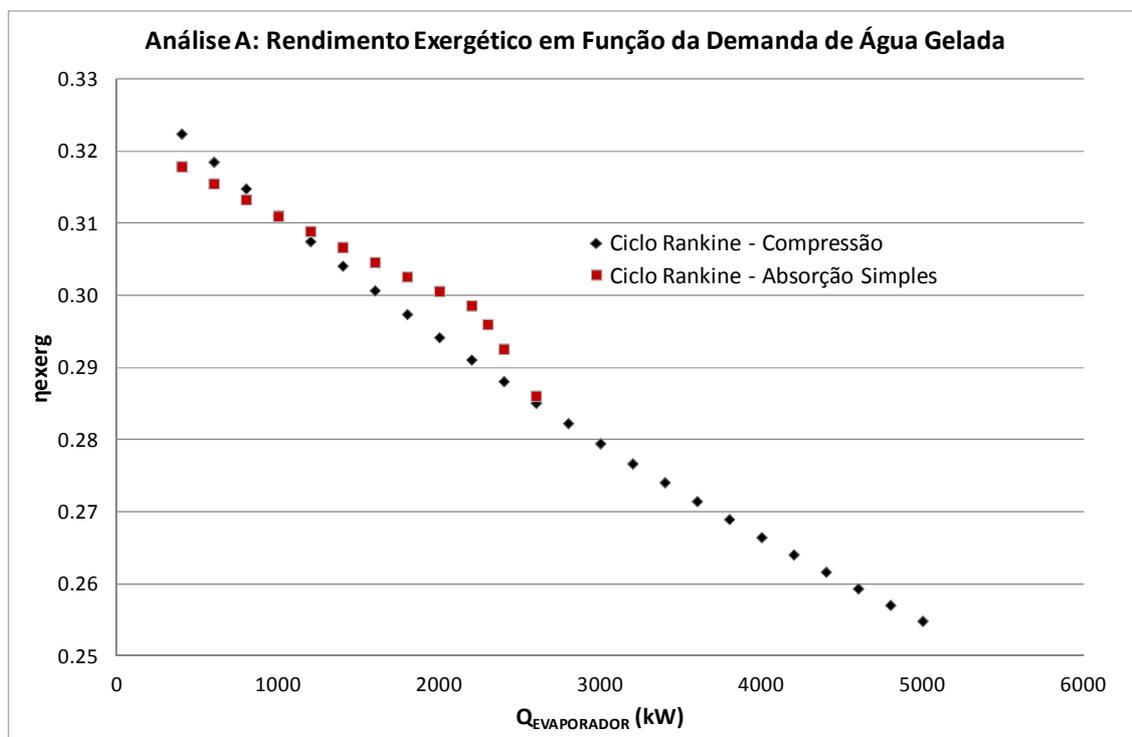
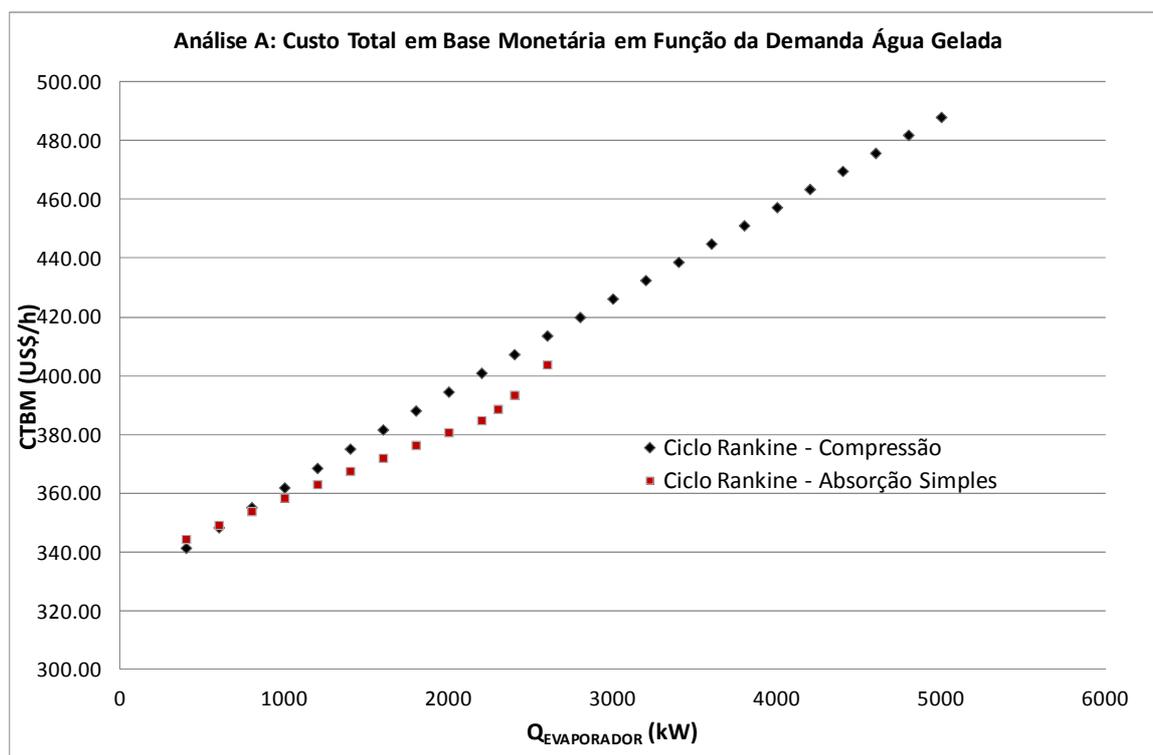


Gráfico 15.3 - Comparação: rendimento exergético em função da água gelada – Análise A

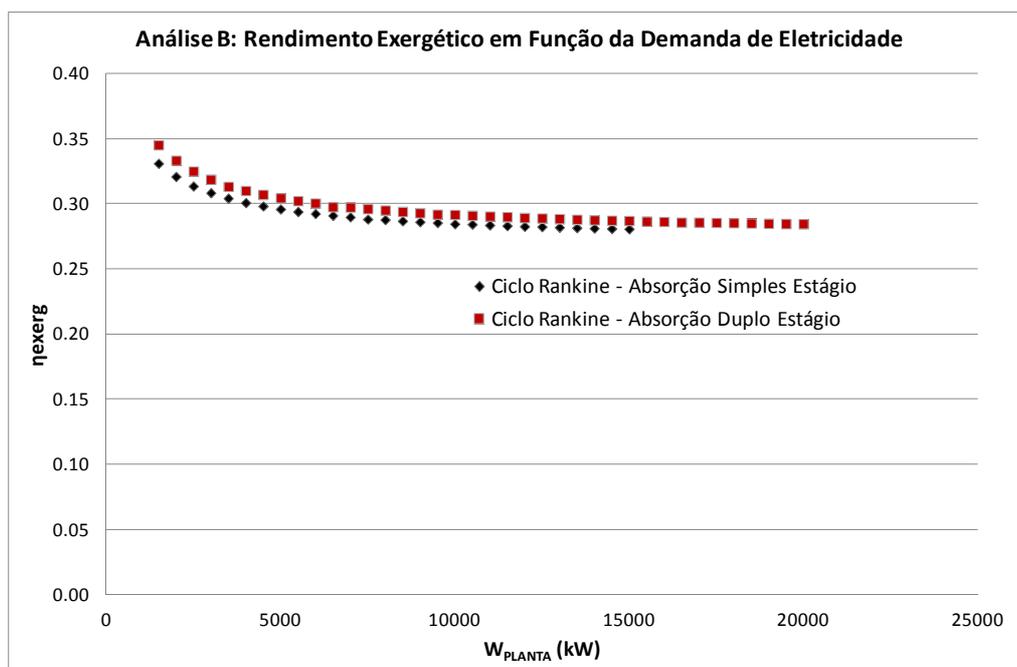


**Gráfico 15.4 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise A**

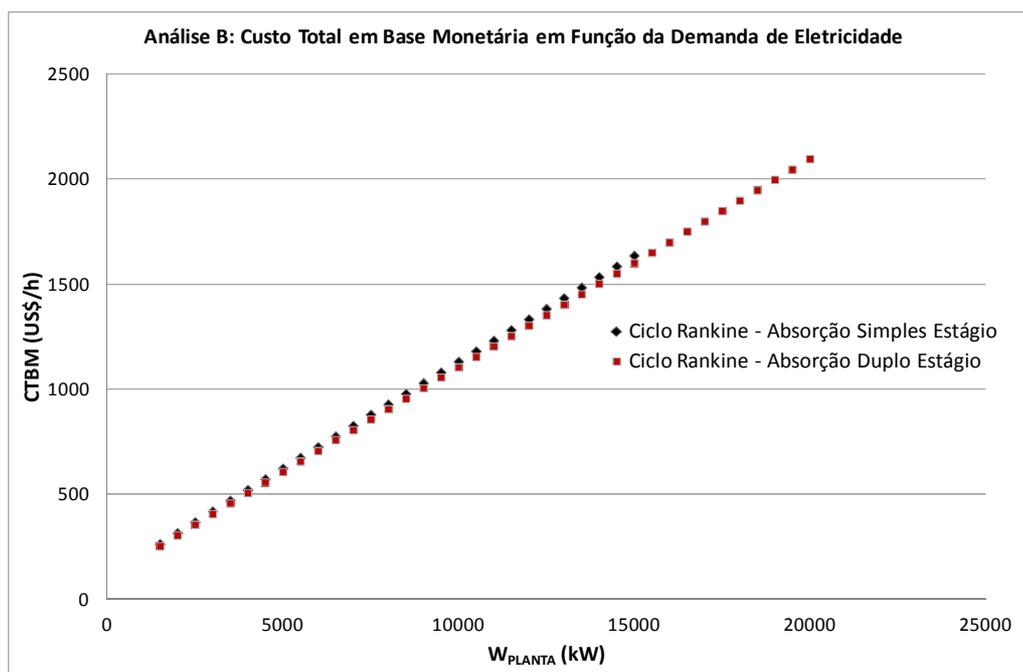
Como havia sido previsto pelos estudos de caso, quando se possui uma baixa demanda de água gelada em relação à de eletricidade (como apresentado pelas figs. 15.1 e 15.2), o ciclo de refrigeração por compressão possui um rendimento exergético superior, além de ser sensivelmente menos custoso em termos monetários apesar de apresentarem ambos uma mesma tendência no crescimento linear. O efeito da vantagem em termos exergéticos se dá pelo fato de que a exergia mais alta destruída pelo chiller a compressão de vapor é compensada por não haver uma extração na turbina a vapor, diminuindo assim o custo dos seus sub-produtos. Já no caso em que se tem uma demanda substancial de água gelada, há uma inversão de papéis em torno de 1000 kW trocados no evaporador. A partir deste ponto, os custos associados ao chiller de compressão passam a ser superiores devido à alta exergia destruída pelo sistema de refrigeração. Pode-se notar que a demanda de refrigeração por absorção é limitada pela potência fornecida na turbina, pois a partir de certo ponto, o vapor que deve ser extraído da turbina não atinge as condições de extração necessárias ao alto consumo de calor do chiller.

## 15.2 CENÁRIO DE ANÁLISE B: REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE SIMPLES ESTÁGIO “VERSUS” DUPLO ESTÁGIO

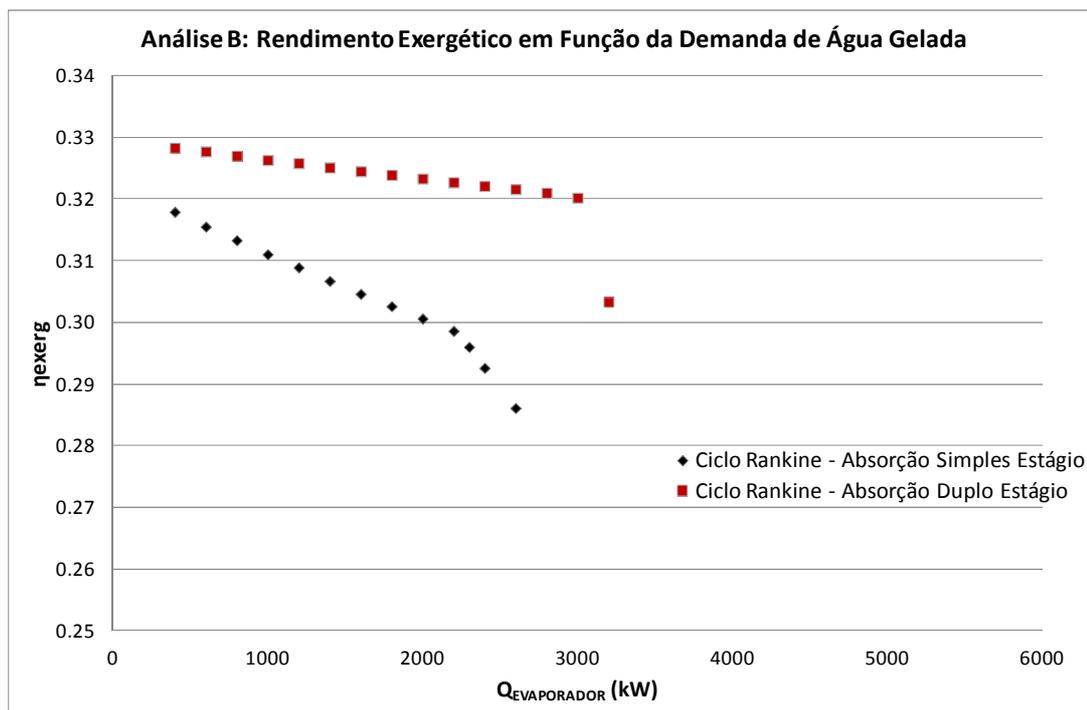
Os mesmos parâmetros analisados para o caso anterior são demonstrados abaixo nas figuras que seguem.



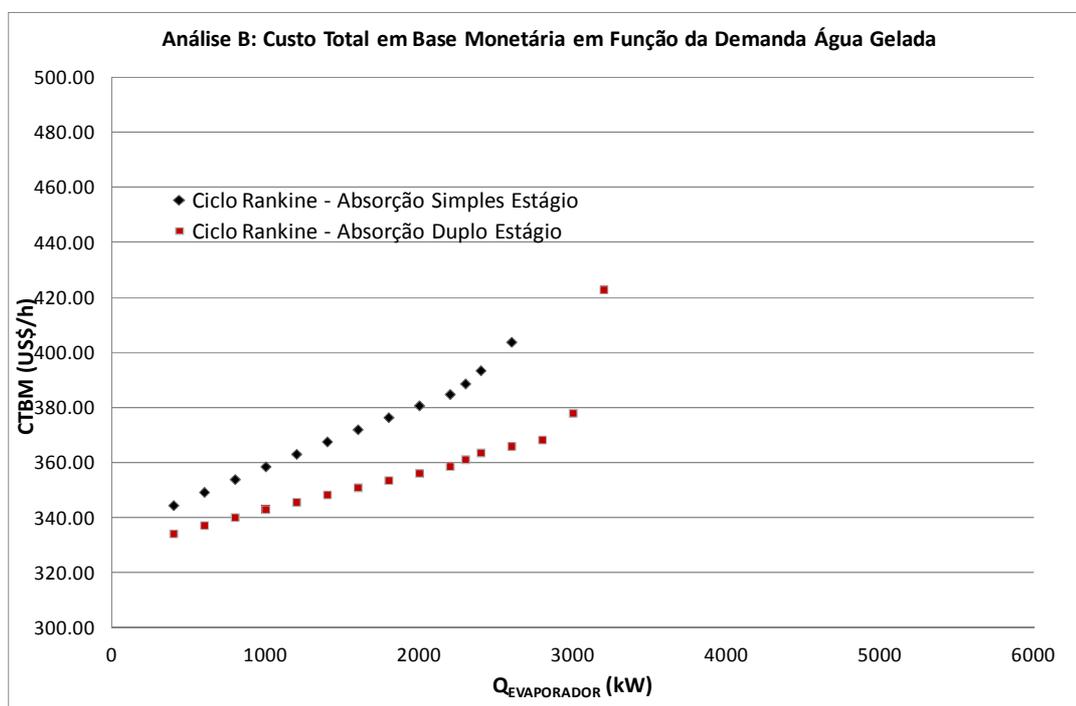
**Gráfico 15.5 - Comparação: rendimento exergético em função da eletricidade – Análise B**



**Gráfico 15.6 - Comparação: custo total em função da eletricidade – Análise B**



**Gráfico 15.7 - Comparação: rendimento exergético em função da água gelada – Análise B**



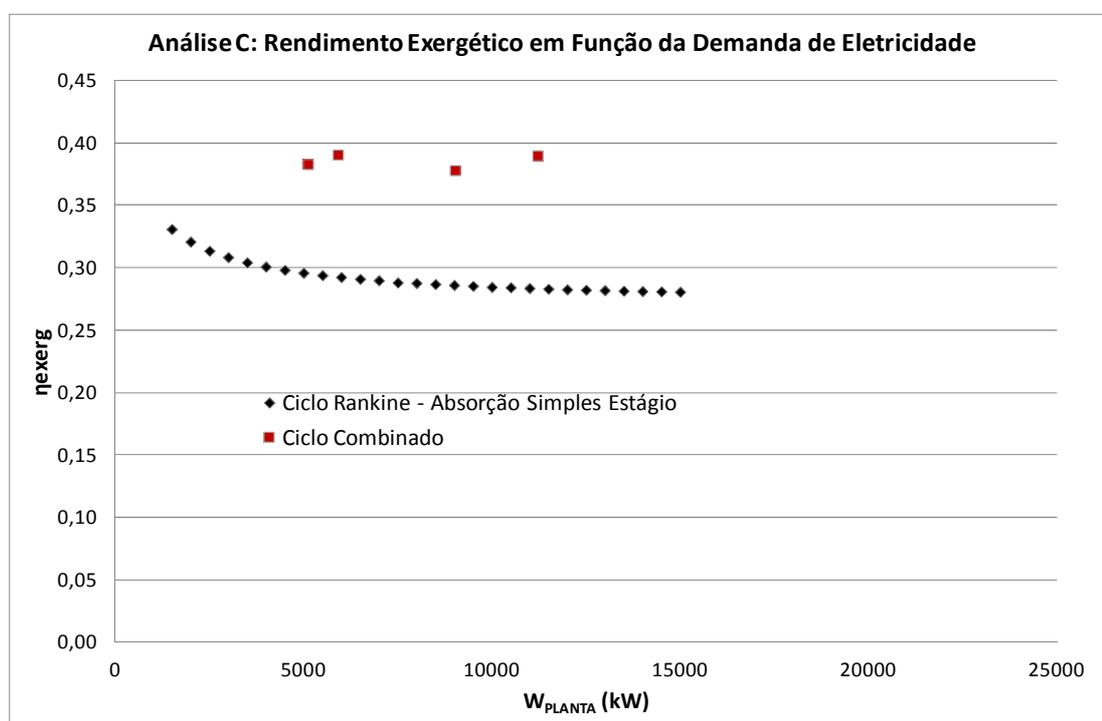
**Gráfico 15.8 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise A**

Como previsto anteriormente na descrição do sistema de refrigeração de duplo estágio, este possui visível vantagem comparativa em relação ao de simples efeito.

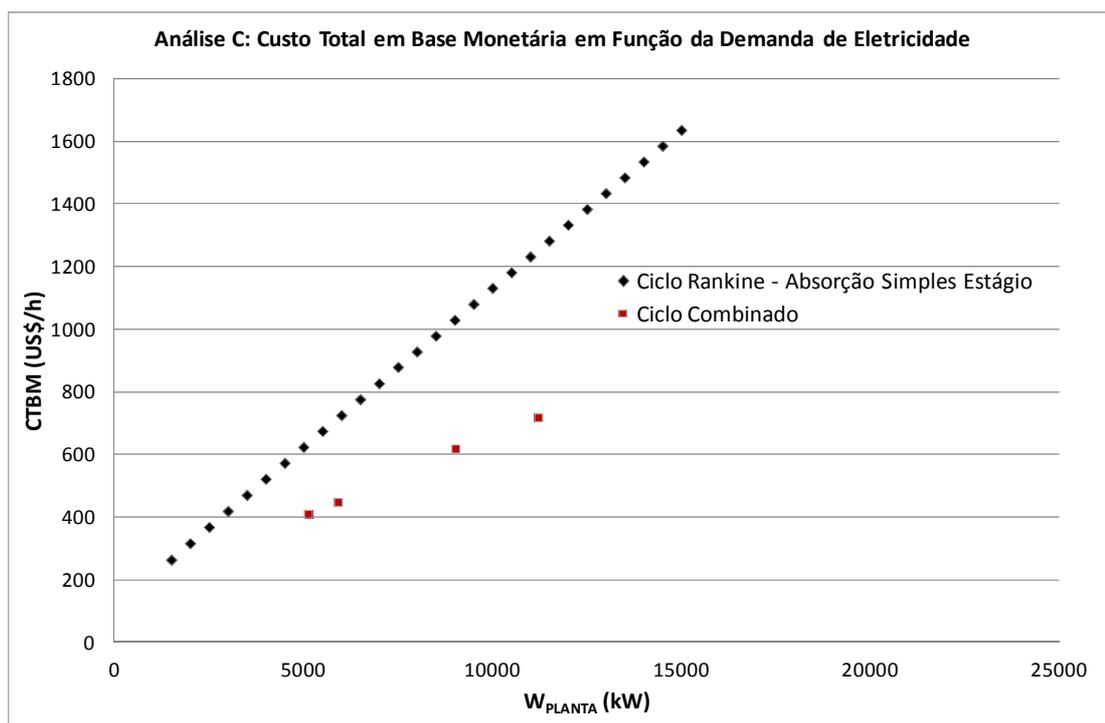
Esta vantagem é principalmente traduzida no caso em que se varia a demanda de água gelada. Vale salientar que, mesmo sendo um equipamento mais custoso em termos de investimento inicial, o sistema de duplo estágio se mostra superior em termos de custo na produção dos três subprodutos ao longo de sua operação. Os sistemas são igualmente limitados à demanda de eletricidade como explicitado na seção anterior.

### 15.3 CENÁRIO DE ANÁLISE C: CICLO RANKINE DE POTÊNCIA “VERSUS” CICLO COMBINADO

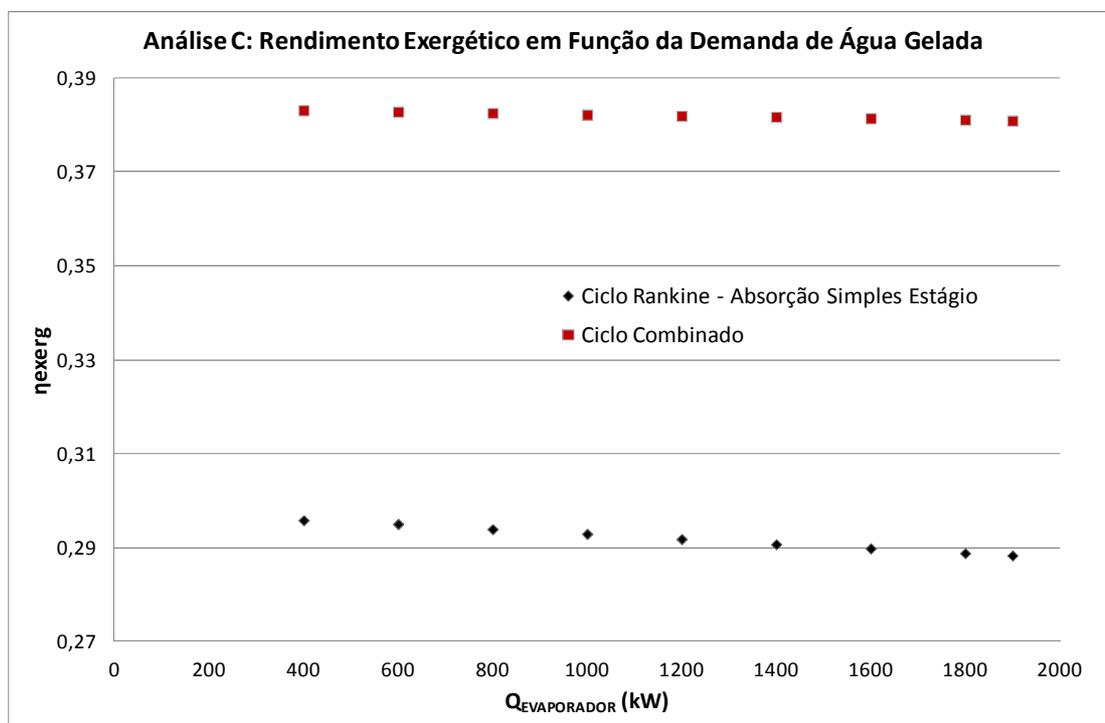
Dado que no ciclo combinado a eletricidade obtida pela planta depende da demanda de refrigeração, novas tomadas de dados para o ciclo Rankine tiveram de ser realizadas para que esta análise fosse tratada. Os gráficos comparando os parâmetros em questão para as 2 plantas são apresentados a seguir.



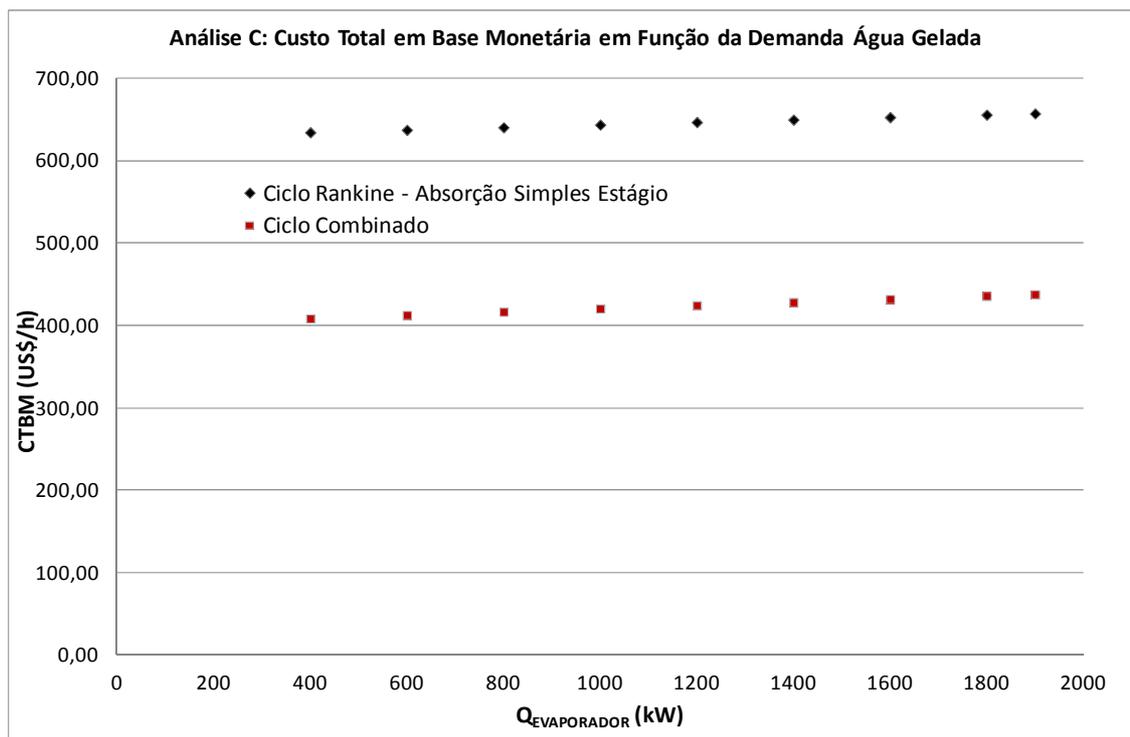
**Gráfico 15.9 - Comparação: rendimento exergético em função da eletricidade – Análise C**



**Gráfico 15.10 - Comparação: custo total em função da eletricidade – Análise C**



**Gráfico 15.11 - Comparação: rendimento exergético em função da água gelada – Análise C**



**Gráfico 15.12 - Comparação: custo total em função da água gelada – Análise C**

Apesar de a tendência decrescente não poder ter sido identificada para a eficiência do ciclo combinado na variação da demanda de eletricidade, pode-se concluir que do ponto de vista dos custos, o ciclo combinado é o que apresenta maior vantagem comparativa entre todos os ciclos estudados nas faixas de demanda consideradas.

#### 15.4 PARTIÇÃO DO CTBM ENTRE PRODUTOS

Em termos comparativos à situação do mercado, é interessante a apresentação dos custos da eletricidade e da água gelada em [US\$/kWh] e [US\$/t], respectivamente. Estes dados podem servir ao investidor um critério de decisão de implementação ou não da planta, além de lhe fornecerem possibilidades do prazo médio de retorno do investimento. As tabelas de partição do CTBM podem ser avaliadas abaixo segundo cada uma das configurações. Os exemplos considerados são os mesmos apresentados nos estudos de caso do presente trabalho adicionados ao Museu de Liverpool, que possui demanda de eletricidade de 2300 kW e demanda térmica de 2400kW dos quais 1400kW são destinados a efeito de refrigeração (fonte: Cogen Europe).

**Tabela 15.1 - Ciclo 1 - Rankine de Potência e Refrigeração por Compressão de Vapor**

Aplicação	CTBM (US\$/h)	CBM <sub>Eletr</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Refrig</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Vapor</sub> (US\$/h)	C. kWh (US\$/kWh)	C. Refr. (US\$/t)
Ind. Laticínios	345,93	200,79	18,06	127,08	0,09	0,12
Hospital	367,52	198,99	66,36	102,18	0,09	0,11
Ind. Bebidas	950,29	765,50	65,97	118,82	0,10	0,12
Museu	375,23	202,40	44,70	128,13	0,09	0,11

**Tabela 15.2 - Ciclo 2 - Rankine de Potência e Refrigeração por Absorção de Simples Estágio**

Aplicação	CTBM (US\$/h)	CBM <sub>Eletr</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Refrig</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Vapor</sub> (US\$/h)	C. kWh (US\$/kWh)	C. Refr. (US\$/t)
Ind. Laticínios	347,57	200,10	20,07	127,40	0,09	0,13
Hospital	352,46	185,81	71,05	95,61	0,08	0,12
Ind. Bebidas	949,60	756,32	75,01	118,27	0,09	0,13
Museu	367,68	195,09	48,61	123,98	0,08	0,12

**Tabela 15.3 - Ciclo 3 - Rankine de Potência e Refrigeração por Absorção de Duplo Estágio**

Aplicação	CTBM (US\$/h)	CBM <sub>Eletr</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Refrig</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Vapor</sub> (US\$/h)	C. kWh (US\$/kWh)	C. Refr. (US\$/t)
Ind. Laticínios	336,21	197,90	13,16	125,16	0,09	0,09
Hospital	327,56	187,60	43,91	96,06	0,09	0,07
Ind. Bebidas	913,82	752,01	45,18	116,64	0,09	0,08
Museu	348,43	194,88	30,40	123,15	0,08	0,08

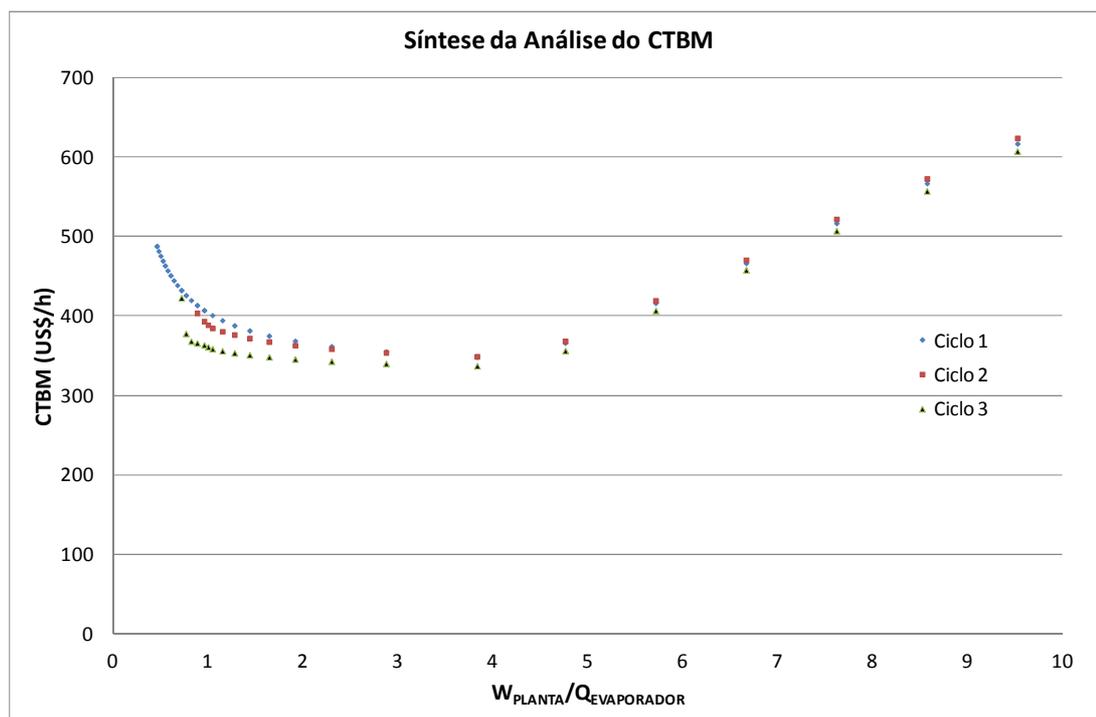
**Tabela 15.4 - Ciclo 4 - Ciclo Combinado e Refr. por Absorção - Com excedente à rede elétrica**

Aplicação	CTBM (US\$/h)	CBM <sub>Eletr</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Refrig</sub> (US\$/h)	CBM <sub>Vapor</sub> (US\$/h)	Excedente (kW)	C. kWh (US\$/kWh)	C. Refr. (US\$/t)
Ind. Laticínios	410,92	280,98	15,73	114,21	2819	0,05	0,11
Hospital	427,58	282,23	56,63	88,72	2932	0,05	0,09
Ind. Bebidas	638,39	487,74	53,84	96,81	995	0,05	0,09
Museu	428,15	276,10	38,47	113,58	2747	0,05	0,10

## 15.5 SÍNTESE GRÁFICA DA ANÁLISE EXPOSTA

A análise comparativa descrita nesta seção pode ser posta em síntese por intermédio de um único diagrama cujo eixo das abscissas representa a razão entre demanda de eletricidade e refrigeração e o eixo das ordenadas indica o custo total em base monetária. O ciclo combinado não será apresentado neste diagrama pelo fato de ter sido programado para características fixas de potência elétrica, não permitindo a variação desta para efeito de análise, a não ser na troca de modelo de turbina. É importante ressaltar que o custo não possui propriamente um mínimo por volta de

$W/Q = 4$ . O diagrama obtido é na realidade composição de duas curvas em torno desta vertical. Do lado direito o custo cresce com o aumento do trabalho elétrico extraído, sendo mantido o calor trocado no chiller. Já caminhando para a esquerda, há o aumento do calor trocado no evaporador sendo mantido fixo o trabalho elétrico extraído da planta.



**Gráfico 15.13 – Síntese Gráfica da Análise do CTBM para os três primeiros ciclos**

Da mesma forma como discutido anteriormente, existe uma inversão da tendência na comparação entre o ciclo 1 (Refrigeração por Compressão de Vapor) e o ciclo 2 (Absorção de Simples Estágio), no sentido em que para maiores valores de demanda relativa de refrigeração, o ciclo de absorção se apresenta menos custoso. O ciclo de absorção de duplo estágio possui custos menores para toda a faixa considerada.

## 16 SUGESTÕES À CONTINUIDADE DO TRABALHO

Dado seu caráter abrangente e de vital importância a aplicações industriais, o estudo fornece embasamento à continuidade de seu conteúdo via um eventual trabalho de pós-graduação. Assim, descreve-se brevemente uma diretriz a ser adotada em uma possível retomada do projeto.

Uma próxima análise no escopo do estudo seria a variação das demandas e análise na minimização dos custos para o sistema tetra-combinado, segundo proposta de Garagatti e Oliveira Jr. (2003). Burbano (2011) mostrou que em termos da otimização do rendimento exergético, o ciclo de absorção de duplo-efeito possui pequena vantagem comparativa com relação ao tetra-combinado, tendência que poderia ser invertida do ponto de vista dos custos em base monetária, visto o investimento inicial sensivelmente superior do primeiro.

Esta análise deve conter análises de demandas reais da indústria em termos de cogeração – a exemplo de um complexo shopping-hotel em que as demandas de refrigeração são superiores relativamente, o que não foi tratado no trabalho de doutorando (Burbano) do qual partiu o presente estudo. Análises estas devem ser dadas sempre considerando termos monetários onde incide o investimento inicial aos equipamentos. Ao investidor cabe a negociação com instituições financeiras viabilizando o projeto que proporcione o retorno do investimento em prazos menores que implicam, como foi visto, na redução das ineficiências. Assim, dados reais atrelados ao mercado dos equipamentos serão igualmente incluídos.

## 17 CONCLUSÕES

O presente documento referente ao trabalho de formatura em engenharia mecânica de Fábio Moraes de Oliveira teve como objetivo a apresentação dos resultados obtidos pelo estudo ao longo do projeto.

Não só por três estudos de caso mas pela generalização de cenários de demanda de energia elétrica e refrigeração, diferentes sistemas de trigeração puderam ser avaliados do ponto de vista exergoeconômico, análise de extrema importância do ponto de vista da implementação dos sistemas e impactos ao meio ambiente. Os pontos de funcionamento observados para cada cenário objetivaram a minimização dos custos em termos monetários.

As rotinas de otimização disponíveis na versão profissional do EES (Genético e Nelder-Mead) possuem uma robustez bastante importante com relação aos dois primeiros métodos apresentados. Particularmente, o algoritmo genético permite a reiteração a partir do ponto já otimizado, ilimitando o critério de parada para uma busca fina do ponto de máximo rendimento exergético global da planta. Porém, dado o seu alto consumo em termos computacionais, ele serviu de ferramenta de verificação de convergência do preferido algoritmo do simplex de Nelder-Mead.

Todos os resultados obtidos ao longo do projeto não só foram compatíveis, como fornecem um caráter complementar ao trabalho de BURBANO (2011), como proposto inicialmente.

Para sistemas de demanda relativamente baixa com uma alta relação de consumo de eletricidade / refrigeração, sistemas de compressão possuem vantagem comparativa em termos monetários sobre sistemas de absorção por simples efeito. Quando se tem uma demanda de refrigeração importante, este último deve ser priorizado.

Os chillers de absorção de duplo estágio possuem vantagem sobre os equipamentos de simples estágio, apesar do investimento superior na implementação. Esta vantagem é amplamente evidenciada em demandas substanciais de refrigeração.

Ambos os sistemas de refrigeração por absorção, apesar de vantajosos para demandas superiores de água gelada, possuem uma limitação na refrigeração que é função da eletricidade produzida, pelo fato de que as propriedades do vapor utilizado no gerador do chiller possui propriedades que são função dos pontos de operação da turbina.

O ciclo combinado possui vantagem comparativa sobre todas as outras configurações de plantas com as quais se trabalhou. A vantagem se traduz tanto pela avaliação do rendimento exergético quanto pelo custo em termos monetários. Assim, para o investidor que busca um retorno maior no longo prazo (trabalhou-se com um horizonte de 20 anos), o ciclo combinado, apesar de seu investimento inicial sensivelmente superior, deve ser tratado para efeito de implementação.

Finalmente, por ser um trabalho bastante amplo e ambicioso, o presente projeto de formatura fornece forte abertura a um homônimo estudo de pós graduação, tratando em termos de custo o sistema tetra-combinado e buscando, principalmente, uma abrangência mais forte de aplicações à indústria para cada caso de configuração estudado, buscando reduzir suas ineficiências e os prazos de retorno do investimento desembolsado.

## 18 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOEHM R. F, 1987, **Design analysis of thermal system**. John Wiley & Sons Inc, New York. Vol. 1, pp. 118-167.

BURBANO, J. C., PELLEGRINI, L. F., OLIVEIRA JR. S.,2009, **Comparative exergoeconomic analysis of trigeneration systems for a dairy industry**. Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems. Foz de Iguaçu, Vol. 4, pp. 513-524.

BURBANO, J. C., PELLEGRINI, L. F., OLIVEIRA JR. S.,2009. **Exergoeconomic Analysis of Tetra-Combined Trigeneration Systems**. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

BURBANO, J. C, 2011, **Otimização Exergoeconômica de Sistema Tetra-combinado de Cogeração**. Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

COGEN Europe, 2010, **Case study factsheet - Northern region, UK: Museum of Liverpool – Public Sector**.

EES, 2010, **Engineering Equation Solver**. Academic Professional Version 8.600, Chart Software.

GARAGATTI ARRIOLA, D. W., OLIVEIRA JR., S., 2003, **Tetra-combined Trigeneration System. Exergy and Thermo-economic Analysis**. Proceedings of the ECOS'2003 Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Vol. 1, pp. 137-144.

## 19 APÊNDICES

### 19.1 APENDICE A - BALANÇOS DE CUSTO

As equações relacionadas ao caso mais complexo estudado, o ciclo combinado representado na seção 14 (Fig.14.1) podem ser encontradas abaixo, conforme linguagem de programação do EES<sup>®</sup>.

- Definição de constantes

```

$CONSTANT i# = 0,15           //taxa de juros aa.
$CONSTANT NHO# = 8000        //número de horas de operação ao ano
$CONSTANT fom# = 1,06        //fator de operação e manutenção
$CONSTANT life# = 20         //vida útil dos equipamentos em anos

//Constantes para determinação dos valores dos equipamentos segundo a
nomenclatura:

//GV: Gerador de Vapor
//TV: Turbina a Vapor
//Bh e Bl: Bomba de alta e de baixa conforme faixas definidas no Boehm (1987)
//CD: Condensador
//CTOW: Torre de resfriamento
//TANK: Tanque
//CHILLERABSSE: Chiller de absorção de simples estágio
//TGAS : Turbina a gás

$CONSTANT mGV# = 0,57
$CONSTANT mTV# = 0,68
$CONSTANT mBh# = 0,58
$CONSTANT mBl# = 0,39
$CONSTANT mCD# = 0,55

```

\$CONSTANT mCTOW# = 1,00

\$CONSTANT mTANK# = 0,68

\$CONSTANT mCHILLERABSSE# = 0,66

\$CONSTANT mTGAS# = 0,53

\$CONSTANT CrGV# = 170000

\$CONSTANT CrTV# = 25000

\$CONSTANT CrBh# = 7500

\$CONSTANT CrBl# = 2500

\$CONSTANT CrCD# = 3000

\$CONSTANT CrCTOW# = 72000

\$CONSTANT CrTANK# = 17

\$CONSTANT CrCHILLERABSSE# = 160000

\$CONSTANT CrTGAS# = 6800000

\$CONSTANT SrGV# = 40000

\$CONSTANT SrTV# = 1000

\$CONSTANT SrBh# = 100

\$CONSTANT SrBl# = 10

\$CONSTANT SrCD# = 10

\$CONSTANT SrCTOW# = 3600

\$CONSTANT SrTANK# = 1

\$CONSTANT SrCHILLERABSSE# = 500

\$CONSTANT SrTGAS# = 4000000

\$CONSTANT infrate# = 1,98 //taxa de inflação no período 1987 – 2011

fa=i#/(1-(1+i#)^(-life#)) //fator de amortização (sistema Price)

//Balanço de custo do compressor: (1) seção de entrada e (2) seção de saída

m[1]\*b[1]\*c[1] + W\_compressor\*c\_GT = m[2]\*b[2]\*c[2]

$$c[1] = 0$$

//Balanço de custo da câmara de combustão: (2) seção de entrada e (3) seção de saída

$$m\_comb*b\_comb*c\_comb + m[2]*b[2]*c[2] = m[3]*b[3]*c[3]$$

$$c\_comb = \text{Custo\_GN} / (\text{Taxa\_cambio} * \text{Densidade} * b\_comb)$$

$$\text{Custo\_GN} = 0,491633 \quad //\text{Preço da COMGAS para cogeração}$$

$$\text{Taxa\_cambio} = 1,62$$

$$\text{Densidade} = P\_gas / (R\_GN * T\_gas)$$

$$R\_GN = R\#/MM\_comb$$

$$P\_gas = 101,325$$

$$T\_gas = 293,15$$

//Balanço de custo da turbina a gás: (3) seção de entrada e (4) seção de saída

$$m[3]*b[3]*c[3]$$

$$+ \text{infrate}\# * \text{CrTGAS}\# * ((W\_turbine / \text{SrTGAS}\#)^{mTGAS}\#) * \text{fa} * \text{fom}\# / (3600 * \text{NHO}\#) =$$

$$W\_turbine * c\_GT + m[4]*b[4]*c[4]$$

$$\text{VP\_TGAS} = \text{infrate}\# * \text{CrTGAS}\# * ((W\_turbine / \text{SrTGAS}\#)^{mTGAS}\#)$$

$$c[4] = c\_GT$$

//Balanço de custo do gerador de vapor: (4 e 10) seções de entrada e (13 e 6) seções de saída

$$m[8]*b[8]*c[8] + m[6]*b[6]*c[6] = m[8]*b[10]*c[10] + m[7]*b[7]*c[7]$$

$$m[10]*b[10]*c[10] +$$

$$m[4]*b[4]*c[4] + \text{infrate}\# * \text{CrGV}\# * ((7936,64 * m[13] / \text{SrGV}\#)^{mGV}\#) * \text{fa} * \text{fom}\# / (3600 * \text{NHO}\#) = m[13]*b[13]*c[13] + m[6]*b[6]*c[6]$$

$$c[8] = c[10]$$

$$c[4] = c[6]$$

$$c[6] = c[7]$$

$$\text{VP\_gervapor} = \text{infrate}\# * \text{CrGV}\# * ((7936,64 * m[13] / \text{SrGV}\#)^{mGV}\#)$$

//Balanço de custo da turbina a vapor: (14) seção de entrada e (15, 16 e 17) seções de saída

$$m[14]*b[14]*c[14]+infrate\#\#CrTV\#\#((W\_TurbinaVapor/SrTV\#)^{mTV\#})\#fa\#fom\#/(3600*NHO\#)=m[15]*b[15]*c[15]+m[16]*b[16]*c[16]+m[17]*b[17]*c[17]+W\_TurbinaVapor*c\_TV$$

$$VP\_turbvapor=infrate\#\#CrTV\#\#((W\_TurbinaVapor/SrTV\#)^{mTV\#})$$

$$c[14]=c[13]$$

$$c[15]=c\_TV$$

$$c[16]=c[15]$$

$$c[17]=c[16]$$

//Balanço de custo do condensador e torre de resfriamento: (17) seção de entrada e (18) seção de saída

$$c[17]*m[17]*b[17]+infrate\#\#CrCD\#\#((m[17]*(h[17]-h[18])/SrCD\#)^{mCD\#})\#fa\#fom\#/(3600*NHO\#)+infrate\#\#CrCTOW\#\#((m[17]*(h[17]-h[18])/SrCTOW\#)^{mCTOW\#})\#fa\#fom\#/(3600*NHO\#)=c[18]*m[18]*b[18]$$

//Balanço de custo da bomba para o tanque de condensado: (18) seção de entrada e (25) seção de saída

$$c[25]*m[25]*b[25]=c[18]*m[18]*b[18]+c\_eletricidade*W\_bomba\_condensador+infrate\#\#CrBl\#\#((W\_bomba\_condensador/SrBl\#)^{mBl\#})\#fa\#fom\#/(3600*NHO\#)$$

//Balanço de custo da bomba com make-up: (26) seção de entrada e (27) seção de saída

$$c[27]*m[27]*b[27]=c[26]*m[26]*b[26]+c\_eletricidade*W\_bomba\_make\_up+infrate\#\#CrBl\#\#((W\_bomba\_make\_up/SrBl\#)^{mBl\#})\#fa\#fom\#/(3600*NHO\#)$$

$$c[26]=0,05/(1000*b[26])$$

//Balanço de custo do tanque de condensado: (25, 27, 31 e 41) seções de entrada e (32) seção de saída

$$c[31]*m[31]*b[31]+c[41]*m[41]*b[41] + c[27]*m[27]*b[27]+c[25]* m[25]*b[25]+$$

$$\text{infrate}\#\#\text{CrTANK}\#\#((10000/\text{SrTANK}\#)^{\text{mTANK}\#})\#\#\text{fa}\#\#\text{fom}\#/(3600*\text{NHO}\#)=c[32]$$

$$* m[32]*b[32]$$

//Balanço de custo da bomba para o desaerador: (32) seção de entrada e (33) seção de saída

$$c[33]*m[33]*b[33]=c[32]*m[32]*b[32]+c_{\text{eletricidade}}*W_{\text{bomba\_desaerador}}+\text{infrate}\#\#\text{CrBl}\#\#((W_{\text{bomba\_desaerador}}/\text{SrBl}\#)^{\text{mBl}\#})\#\#\text{fa}\#\#\text{fom}\#/(3600*\text{NHO}\#)$$

//Balanço de custo do desaerador: (30 e 33) seções de entrada e (34) seção de saída

$$c[30]*m[30]*b[30] +c[33]* m[33]*b[33] =c[34]* m[34]*b[34]$$

//Balanço de custo da bomba da caldeira: (34) seção de entrada e (35) seção de saída

$$c[34]*m[34]*b[34]+c_{\text{eletricidade}}*W_{\text{bomba\_caldeira}}+\text{infrate}\#\#\text{CrBh}\#\#((W_{\text{bomba\_caldeira}}/\text{SrBh}\#)^{\text{mBh}\#})\#\#\text{fa}\#\#\text{fom}\#/(3600*\text{NHO}\#) =c[35]* m[35]*b[35]$$

//Balanço de custo da bomba do Chiller de Absorção

$$c[16]*(m[16]*b[16]-m[41]*b[41])+c_{\text{eletricidade}}*W_{\text{bomba\_torre2}}+$$

$$c_{\text{eletricidade}}*W_{\text{fan1}}+\text{infrate}\#\#\text{CrCHILLERABSSE}\#\#((Q_{\text{evaporador\_chiller}}/3,5$$

$$17/\text{SrCHILLERABSSE}\#)^{\text{mCHILLERABSSE}\#})\#\#\text{fa}\#\#\text{fom}\#/(3600*\text{NHO}\#)=c_{\text{água\_g}}$$

$$\text{elada}}*B_{\text{fornecida\_ag}}$$

$$\text{VP\_chiller}=\text{infrate}\#\#\text{CrCHILLERABSSE}\#\#((Q_{\text{evaporador\_chiller}}/3,517/\text{SrCHILLERABSSE}\#)^{\text{mCHILLERABSSE}\#})$$

//Cálculo do custo total em base monetária (CTBM)

$$CTBM = 3600 * (c_{\text{eletricidade}} * (W_{\text{planta}} + W_{\text{rede}}) + c_{\text{água gelada}} * (\Delta T_{\text{água gelada}}) + c_{\text{vapor processo}} * (\Delta T_{\text{processo}}))$$