UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico

Autor: Victor Flores da Matta Pires
Orientador: Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas - SP
Julho / 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P665a

Pires, Victor Flores da Matta
Análise energética global de um complexo petroquímico / Victor Flores da Matta Pires.--Campinas, SP: [s.n.], 2003.

Orientador: Roger Josef Zemp
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

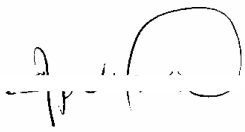
1. Energia - Conservação. 2. Industria Petroquímica 3. Energia elétrica e calor - Cogeração. 4. Processos químicos. 5. Energia – Industria. I. Zemp, Roger Josef. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Titulo em Inglês: Total site analysis of a petrochemical complex
Palavras-chave em Inglês: Pinch, Total site, Energy
Área de concentração: Processos Químicos e Informática
Titulação: Mestre em Engenharia Química
Banca examinadora: Valdir Apolinário de Freitas e Ana Maria Frattini Fileti
Data da defesa: 30/07/2003

iii

Dissertação de Mestrado defendida por Victor Flores da Matta Pires e aprovada em 30 de julho de 2003 pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:

Prof. Dr. Roger Josef Zemp



Dr. Valdir Apolinário de Freitas

Profª. Drª. Ana Maria Frattini Fileti

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, defendida por Victor Flores da Matta Pires em 30 de julho de 2003.

Prof. Dr. Roger Josef Zemp

Orientador

Agradecimentos

Aos meus pais, Eduardo e Zulaine, que me deram a base para todas minhas conquistas.

A minha esposa Tatiana, pelo incentivo e apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Roger Josef Zemp pela orientação e dedicação oferecidos na elaboração deste trabalho.

À Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP, em especial ao DESQ - Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos e Informática.

À BRASKEM, pela oportunidade oferecida e pela confiança depositada.

A todos os colegas e amigos da BRASKEM que de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

Aos amigos da UNICAMP, pelo companheirismo e amizade.

“Existem aqueles que lutam um dia, e estes são bons.
Existem aqueles que lutam muitos dias, e estes são muito bons.
Existem aqueles que lutam anos a fio, e estes são melhores.
Porém, existem os que lutam a vida toda, estes são os imprescindíveis.”

Bertold Brecht

Resumo

A constante busca pela redução dos custos energéticos na indústria petroquímica, proporcionou o desenvolvimento de novas metodologias de otimização energética, dentre as quais se destaca a Análise *Pinch.* Esta metodologia apresenta bons resultados quando aplicada a processos isolados, porém, quando a análise é estendida a todo um complexo industrial, o resultado final não é satisfatório, uma vez que o sistema de utilidades e a interdependência entre os processos não são considerados.

O presente trabalho apresenta a Análise Energética Global ("*Total Site*"), que amplia a Análise *Pinch* da escala de processo para todo o complexo, incluindo o sistema de utilidades como parte integrante do problema, permitindo uma melhor compreensão da interface processo-utilidade, e um aumento do potencial de ganho energético.

A metodologia é baseada nos Perfis Térmicos do complexo, obtidos a partir da Análise Pinch de cada processo individual, e sua interação com o sistema de utilidades, que possibilita a determinação das metas de consumo total de combustível, vapor, refrigeração, trabalho de co-geração e emissões atmosféricas do complexo. Com estas metas, é possível obter diagnósticos claros da eficiência energética do complexo, mostrando possibilidades de otimização, mesmo em unidades como alto grau de integração e eficiência energética.

No trabalho ainda é proposta uma abordagem especial para as utilidades importadas e exportadas pela central de utilidades do complexo.

A Análise Energética Global é aplicada a uma central de matérias primas e utilidades de um Polo Petroquímico, para cálculo de suas metas de energia. Também é realizado uma série de estudos abordando paradas de unidades; entrada em operação de nova unidade; modificações de processo; e modificações no sistema de utilidades.

Os resultados obtidos confirmam a metodologia como uma excelente ferramenta de análise, que pode ser utilizada tanto na fase inicial do projeto, para auxiliar a construção da melhor configuração energética do complexo, como em complexos existentes, na análise de impactos no seu perfil energético, causados por mudanças nos processos.

Abstract

The constant search of energy costs reduction in the petrochemical industry, provided the development of new energy optimization methodologies, which Pinch Analysis stand out. However, the goods results achieved in single process, with this methodology, were not materialised at the site boundary. This problem is caused by the interdependence of the processes and the utility sistem, that are neglected.

The present work presents the Total Site Analysis, that extends Pinch Analysis from process level to site level, including the utilitiy system as a part of the problem, providing a better understanding of process-utility interface, and increasing the potential of energy profit.

The methodology is based on the site's Thermal Profiles, build from Pinch Analysis of each individual process, and its interaction with the utilities system, that makes possible the determination of the targets of fuel consumption, steam, refrigeration, co-generation work and emissions of the site. With these targets, is possible to obtain a clear diagnostic of the energy efficiency of the site, showing optimization possibilities, for even units with a high degree of integration and energy efficiency.

The work presents a special approach to handle the imported and exported utilities by the site's utilities central.

The Total Site Analysis is applied to a raw material and utilities central of a Petrochemical Complex, for calculation of its energy targets. Also, a series of studies is carried through, approaching stops of units; start-up of new units; process modifications; and utilities system modifications.

The results confirm the methodology as an excellent analysis tool, that can be used as in the initial phase of the project, to assist the construction of the best energy configuration of the site, as in existing sites, to analyse site's energy profile impacts, caused by changes in the processes.

Índice

Capítulo 1

Introdução **1**

1.1 - Custo Energético na Indústria Petroquímica 1

1.2 - Tecnologia Pinch 1

1.3 - Análise Energética Global 2

1.4 - Objetivo da Tese 4

Capítulo 2

A Análise Pinch **5**

2.1 – Síntese de Processos Químicos 5

2.2 – Tecnologia Pinch 7

2.2.1 – Curvas Compostas 7

2.2.2 – Algoritmo Tabular 12

2.2.3 – Rede de Trocadores de Calor 15

2.2.3.1 – Montagem da Rede 16

2.2.3.2 – Determinação do Número Mínimo de Trocadores 20

2.2.3.3 – Estimativa da Área de Troca Térmica 21

2.2.4 - Determinação do ΔTmin Ótimo 24

2.3 – Múltiplas Utilidades (Grande Curva Composta) 25

2.4 – Outras Aplicações 28

2.5 – Limitações 29

Capítulo 3

A Análise Energética Global ("Total Site") 31

3.1 – Definição de Complexo ("Site") 31

3.2 – Integração Energética de Processos Separados 32

3.3 – Análise Energética Global ("Total Site") 35

3.3.1 – Construção dos Perfis Térmicos do Complexo 35

3.3.2 – Determinação das Metas Energéticas do Complexo 39

3.3.3 – Análise Exergética do Sistema de Turbinas 44

3.4 – Aplicações e Benefícios 47

Capítulo 4

Análise Pinch do Complexo 53

4.1 – Metodologia 53

4.2 – Descrição do Complexo 53

4.3 – Análise Pinch dos Processos 57

4.3.1 – UTE - Unidade Termoeletrica 58

4.3.2 – UO-1 - Unidade de Olefinas I 61

4.3.3 – UO-2 - Unidade de Olefinas II 65

4.3.4 – UA-1 - Unidade de Aromáticos I 68

4.3.5 – Transferências de Vapor 79

4.4 – Levantamento de Dados 79

Capítulo 5

Análise Energética Global do Complexo **81**

5.1 – Metodologia 81

5.2 – Curvas Compostas Monotônicas 82

5.3 – Abordagem Especial do Sistema de Utilidades do Complexo 88

5.4 – Análise Exergética do Sistema de Utilidades 94

5.5 – Análise Energética Global do Complexo 95

5.6 – Emissões Atmosféricas do Complexo 101

5.7 – Análise de Custos 102

Capítulo 6

Estudos de Casos **105**

6.1 – Metodologia 105

6.2 – Caso 1 - Parada da UO-1 105

6.3 – Caso 2 - Parada da UO-2 108

6.4 – Caso 3 - Parada da UA-1 112

6.5 – Caso 4 - Parada da CEMAP-1 (UO-1 e UA-1) 116

6.6 – Caso 5 - Retirada dos Pré-Aquecedores da UTE 119

6.7 – Caso 6 - Entrada de Nova Unidade 123

6.8 – Caso 7 - Mudança de Temperatura de Utilidade 128

Capítulo 7

Conclusão e Sugestões **135**

7.1 – A Análise Energética Global 135

7.2 – Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico 136

7.3 – Sugestões para Trabalhos Futuros 138

7.4 – Conclusão Final 137

Referência Bibliográfica **141**

Apêndice I

Resumo dos Resultados **145**

A.1 – Análise Energética Global – Resultados 145

A.2 – Análise Energética Global – Variação Percentual 146

A.3 – Análise Energética Global – Gráficos 147

A.4 – Utilidades Geradas – Gráficos 148

A.5 – Utilidades Consumidas – Gráficos 149

A.6 – Trabalho Gerado – Gráficos 153

A.7 – Emissão de CO2 – Gráfico 154

A.8 – Custo Total – Gráfico 155

Nomenclatura

Letras Latinas:

A	Área de Troca Térmica	m^2
Cp	Capacidade Calorífica	kW/kg.ºC
Ex	Exergia	Gcal/h
H	Entalpia	kW
h	Coeficiente de Película	kW/m^2K
M	Vazão Mássica da Corrente	t/h
Q	Carga Térmica	Gcal/h
T	Temperatura	ºC
U	Coeficiente Global de Transferência de Calor	kW/m^2K
a	Constante de Custo de Trocador	
b	Constante de Custo de Trocador	
c	Constante de Custo de Trocador	
$\mathbf{N_{corr}}$	Número de Correntes	
$\mathbf{N_{laços}}$	Número de Laços	
$\mathbf{N_{sist\ ind}}$	Número de Sistemas Independentes	
$\mathbf{N_{troc}}$	Número de Trocadores	
VSAP	Vapor de Super Alta Pressão	
VAP	Vapor de Alta Pressão	
VMP	Vapor de Média Pressão	
VBP	Vapor de baixa Pressão	
AGR	Água de Refrigeração	
W	Trabalho Mecânico de Co-geração	
CC	Curva Composta	
GCC	Grande Curva Composta	
AEG	Análise Energética Global	
UTE	Unidade Termoéletrica	
UO	Unidade de Olefinas	
UA	Unidade de Aromáticos	
V120	Vapor de 120 kgf/cm^2	
V42	Vapor de 42 kgf/cm^2	

V15	Vapor de 15 kgf/cm^2
V3,5	Vapor de 3,5 kgf/cm^2
AGR	Água de Refrigeração @ T=30ºC
P+21	Propileno Refrigerante @ T=21ºC
P+3	Propileno Refrigerante @ T=3ºC
P-24	Propileno Refrigerante @ T=-24ºC
P-40	Propileno Refrigerante @ T=-40ºC
E-54	Etileno Refrigerante @ T=-54ºC
E-75	Etileno Refrigerante @ T=-75ºC
E-101	Etileno Refrigerante @ T=-101ºC
W V42	Trabalho Gerado pelo V42
W V15	Trabalho Gerado pelo V15
W V3,5	Trabalho Gerado pelo V3,5
W cond	Trabalho Gerado pela Condensação

Letras Gregas:

Δ	Variação
S	Somatório
?	Eficiência
T_0	Temperatura Ambiente
$?_C$	Fator de Carnot
$?_{Ex}$	Eficiência Exergética

Subscrito:

min	Mínimo
LM	Média Logaritma
Q	Quente
F	Frio
k	Intervalo de Entalpia
i	Correntes Quentes no intervalo k
j	Correntes Frias no intervalo k
Ex	Exergia

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Custo Energético na Indústria Petroquímica

Os processos petroquímicos normalmente consomem grandes quantidades de energia. Além da própria energia elétrica utilizada na indústria, existe uma intensa utilização de combustível, seja pelo seu uso em caldeiras para geração de vapor, seja pelo seu uso direto nos fornos de processo.

A partir da crise de energia da década de 70, com o aumento do preço do petróleo, o custo energético passou a ter uma maior importância na matriz de custos das empresas, levando a uma maior preocupação na redução do seu consumo.

Então, com o intuito de maximizar a eficiência energética dos processos, novos conceitos e metodologias surgiram, dentre elas a Tecnologia *Pinch*.

1.2 - Tecnologia *Pinch*

Um processo petroquímico é composto de diversas correntes. Algumas necessitam ser aquecidas, enquanto outras necessitam ser resfriadas. Esta troca de energia pode ser realizada via uso de utilidades (vapor, água de refrigeração, etc) ou pela troca direta entre as correntes de processo.

Dentre estas duas opções, a mais econômica consiste no aproveitamento energético das correntes de processo. Neste sentido, no final da década de 70, Linnhoff e colaboradores desenvolveram uma nova metodologia denominada de Tecnologia *Pinch*, que consiste em um conjunto de técnicas estruturadas para a aplicação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica.

A aplicação da metodologia permite, antes mesmo do projeto, obter o consumo mínimo possível de utilidades em um processo (metas de utilidades), através da maximização da recuperação de calor entre as correntes de processo. A técnica determina ainda a obtenção da rede de trocadores de calor necessária para atingir estas metas e uma estimativa da área mínima para a integração energética.

A metodologia também permite a otimização do custo total do sistema de recuperação de energia, através de uma análise comparativa entre custo de energia e o custo de capital.

Uma das grandes vantagens da Tecnologia *Pinch* em relação a outras abordagens vem do fato dela ser um método termodinâmico e não puramente matemático, e, por isso, manter sempre o engenheiro no controle da situação. Isto ocorre porque a metodologia apenas aponta para uma solução de mínimo consumo de energia, sem levar em consideração os aspectos de operacionalidade, segurança, localização, entre outros, que são introduzidos na análise pelo engenheiro de processo. Ou seja, o engenheiro utiliza a Análise *Pinch* apenas como uma ferramenta a mais para o projeto de otimização energética. A análise final fica, indispensavelmente, sob responsabilidade do mesmo, proporcionando assim um projeto final industrialmente viável.

A técnica de integração baseada na Tecnologia *Pinch* apresenta excelentes resultados quando aplicada a processos isolados, porém estas melhorias não são totalmente materializadas quando a análise envolve todo o complexo.

1.3 - Análise Energética Global

Para uma dada melhoria, a redução no consumo de energia global em todo o complexo (diversos processos interligados por um sistema comum de utilidades) é bem inferior ao potencial indicado pela Análise *Pinch* no nível do processo.

Este fato é causado pela interdependência entre os diferentes processos e pelo fato da análise negligenciar o sistema de utilidades. Ou seja, melhorias em uma área podem ser contra produtivas em outra, uma vez que elas estão interligadas pelo sistema de utilidades, causando penalidades ao sistema como um todo.

Para solucionar este problema, Dhole e Linnhoff desenvolveram uma técnica denominada Análise "*Total Site*" (Análise Energética Global), que estendeu a técnica *Pinch* à todo o complexo. Nesta nova abordagem, o sistema de utilidades é considerado como parte integrante do problema, permitindo uma melhor compreensão da interface processo-utilidade. A metodologia se baseia na análise dos Perfis Térmicos, que são obtidos a partir da Análise *Pinch* de cada processo individual, e explicitam o perfil energético do complexo, através das

metas de consumo de utilidades, capacidade de cogeração, e queima de combustíveis.

Com esta nova abordagem, obtém-se diagnósticos claros da eficiência energética do complexo, mostrando possibilidades de redução de consumo de energia, mesmo em unidades como alto grau de integração e eficiência energética. Outra grande vantagem, vem do fato dela permitir a avaliação de efeitos de modificações antes do projeto.

Um outro aspecto importante da Análise Energética Global é a determinação da possibilidade de redução de emissões atmosféricas, devido à redução no consumo energético, visto que a legislação a este respeito se torna cada dia mais severa, podendo vir a ser um grave limitante à capacidade de produção das indústrias.

Então, a Análise Energética Global são procedimentos que possibilitam a determinação, para o complexo, das metas de:

- Consumo total de combustível
- Consumo de vapor
- Refrigeração
- Co-geração
- Emissões atmosféricas

1.4 - Objetivo da Tese

A presente tese tem como objetivo explorar a técnica de Análise Energética Global, através da fundamentação dos seus conceitos e metodologia. A ferramenta, por ser relativamente recente, e envolver sigilo industrial e interesses comerciais, possui poucas publicações a respeito. Por isso pretende-se, através deste estudo, aprofundar-se na matéria, através do desenvolvimento da análise de um complexo, destacando a importância e dificuldades de cada etapa.

Para o desenvolvimento do trabalho, será realizada uma Análise Energética Global da central de matérias primas e utilidades de um complexo

petroquímico. A partir das Análises *Pinch* dos processos individuais, serão construídas as curvas do perfil energético do complexo e realizado uma análise energética do mesmo. Posteriormente serão realizados alguns estudos de casos com a finalidade de melhor explorar e desenvolver a metodologia.

Capítulo 2 – A Análise *Pinch*

2.1 – Síntese de Processos Químicos

Um processo químico é composto de diversas etapas. Desde a entrada da matéria prima até a saída do produto final, a corrente de processo sofre uma série sequencial de transformações físicas e químicas. Por esta razão, a síntese de um processo químico deve ser realizado em duas etapas bem distintas: uma de escolha dos subprocessos individuais (reação, separação, aquecimento, resfriamento, etc.) e outra de interconexão entre eles.

Porém, devido a complexidade dos processos, um grande número de configurações pode ser obtido, dificultando a análise da melhor opção. Para diminuir este problema pode-se dividir a síntese de um processo em quatro subsistemas hierárquicos: sistema de reação; sistema de separação e reciclo; sistema de troca térmica; e sistema de utilidades. Esta separação proporciona uma abordagem mais estruturada e sistemática da síntese de processos e pode ser representada por um diagrama em camadas - Diagrama *"Onion"* (SMITH, 1995), mostrado na figura 2.1.

O diagrama representa bem a hierarquia proposta. Primeiramente deve-se realizar a escolha do sistema de reação, por ser esta a única forma de ocorrer as transformações químicas da matéria prima no produto desejado. Porém, como as reações químicas, geralmente, não são completas e formam subprodutos, um sistema de separação e reciclo é necessário para isolar o produto final e reutilizar a matéria prima não reagida. Para a realização das reações e separações determinadas nas etapas anteriores, é necessário a utilização de uma rede de troca térmica que deve ser projetada de uma forma a obter a melhor recuperação de calor, sendo apenas o restante da energia necessária suprida pelo sistema de utilidades.

Apesar da veracidade da hierarquia proposta, o diagrama "Onion" não apresenta apenas uma via única de dentro para fora, uma vez que realimentações podem ser necessárias. O fluxo de informações pode ser invertido no momento em que escolhas em etapas anteriores determinem sérios obstáculos às etapas

posteriores ou possibilitem uma otimização do sistema, determinando uma reavaliação.

FIGURA 2.1 – Diagrama em Camadas (“ONION”)

O presente trabalho aborda as duas últimas camadas do diagrama: a rede de troca térmica e o sistema de utilidades.

A síntese dos sistemas de reação e separação determinam o balanço mássico e energético do sistema e com isso as cargas térmicas necessárias ao projeto das duas camadas posteriores: sistema de troca térmica e de utilidades. Contudo, o projeto propriamente dito da rede de troca térmica não é necessário para determinar o desempenho completo do processo, uma vez que pode-se trabalhar com metas de consumo energético para a determinação da melhor configuração. Além disto, estas metas possibilitam a determinação dos custos de energia e de capital da rede de troca térmica, possibilitando inclusive que o engenheiro proponha mudanças no processo (nas duas camadas anteriores do diagrama) que melhorem o custo energético do sistema, sem a necessidade de projetar a rede, tornando a análise de alternativas rápida e conveniente (SMITH, 1995).

A determinação destas metas de energia, bem como da rede de trocadores necessária para atingi-las é uma das grandes contribuições da Tecnologia *Pinch* (LINNHOFF et al, 1982)

2.2 – Tecnologia *Pinch*

A Tecnologia *Pinch* foi desenvolvida por Linnhoff e colaboradores no final da década de 70 como uma reação a crise energética da época. A metodologia consiste em uma série de técnicas estruturadas para a aplicação da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, permitindo uma melhor percepção da interação processo-utilidades e consequente determinação da melhor configuração para o rede de troca térmica antes mesmo do projeto (AHMAD, 1998).

A Tecnologia *Pinch* é basicamente composta de duas etapas bem definidas. A primeira consiste na determinação das metas de consumo mínimo de energia para o processo em estudo e a segunda na determinação da rede de trocadores que satisfaça as metas obtidas na primeira etapa.

Para o desenvolvimento da metodologia, é necessário o aprofundamento em uma série de conceitos que serão abordados nos itens posteriores.

2.2.1 – Curvas Compostas

O primeiro passo de uma Análise *Pinch* consiste na elaboração das curvas compostas (LINNHOFF et al, 1982) que são os perfis Temperatura-Entalpia do processo. Para a análise da curva composta de um processo é necessário entender sua construção e significado.

As correntes de um processo podem ser energeticamente representadas através em um diagrama Temperatura-Entalpia. Por exemplo, se considerarmos um processo simples com apenas duas correntes, uma que necessita ser resfriada (corrente quente) e outra que necessita ser aquecida (corrente fria), podemos representá-las como na figura 2.2(a). No diagrama, a sobreposição vertical entre as duas retas representa a possibilidade de recuperação de energia entre elas, e a medida que as curvas se aproximam horizontalmente uma da outra, maior será esta possibilidade de troca térmica, até o ponto onde as curvas atingem a menor distância permitida entre elas (diferença mínima de temperatura - ΔTmin). A partir deste ponto a energia restante para suprir as correntes deve ser fornecida pelo

sistema de utilidades, como visto na figura 2.2(b). O deslocamento horizontal das curvas não representa alterações na representação das correntes do processo, uma vez que o eixo X, por representar a entalpia, não possui escala absoluta, e por isso apenas a sua variação deve ser constante. Já um deslocamento vertical das curvas implica em mudanças nas temperaturas das correntes e não pode ser realizado, pois representaria alterações nas condições de processo (LINNHOFF et al, 1998).

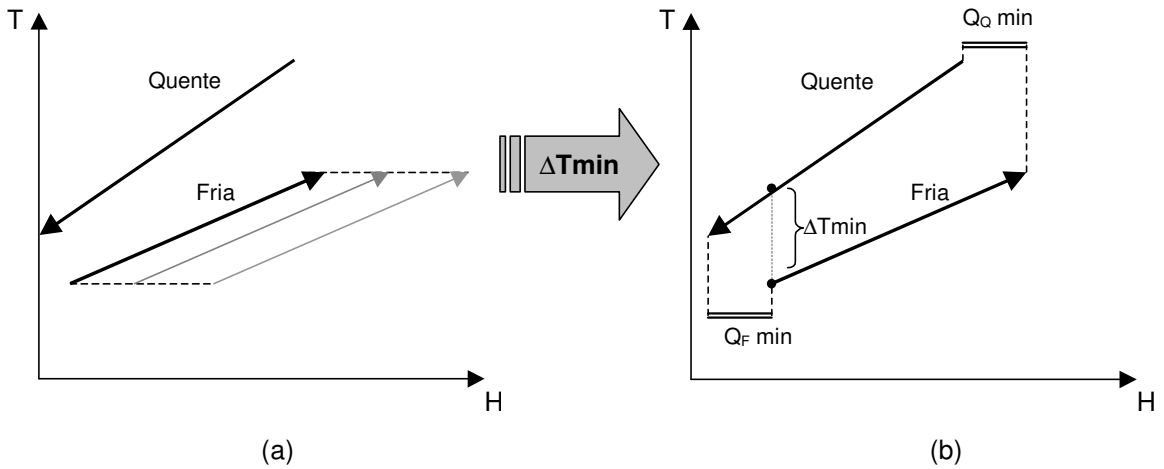


FIGURA 2.2 – Correntes de Processo – Representação Energética

O *Pinch*, que dá nome a metodologia, é o ponto onde as curvas estão mais próximas, ou seja, onde a diferença de temperatura entre elas é igual ao ΔTmin, que é a mínima diferença permitida de temperatura que deve ser considerada entre as correntes de processo para troca térmica. Por isso, ele indica a região onde existirá a maior dificuldade para esta troca. Como o ΔTmin determina a máxima recuperação de calor no processo, ele é uma das variáveis mais importantes na Análise *Pinch* e sua escolha é baseada em critérios econômicos, como será visto posteriormente. Para o caso representado, com apenas duas correntes, o *Pinch* se localiza necessariamente na extremidade de uma delas, fato que nem sempre é verídico para um processo com muitas correntes, como veremos a seguir.

Obviamente, os processos reais não são compostos apenas de duas correntes, ao contrário, temos inúmeras correntes quentes e frias em cada

processo. Neste caso, é necessário agrupar todas as correntes quentes em uma única corrente quente composta, procedimento que deve ser repetido para as correntes frias.

Para descrever o procedimento que deve ser utilizado na construção das curvas compostas é melhor recorrer a um exemplo: um processo com duas correntes quentes (1 e 2) e duas correntes frias (3 e 4) com as respectivas temperaturas de entrada e saída, além da variação de entalpia mostradas na tabela 2.1. A tabela ainda mostra o produto da massa da corrente pela sua capacidade calorífica, que pode ser obtida da variação de entalpia, e vice-versa, pela equação 2.1:

$$\Delta H = M \cdot Cp \cdot \Delta T \qquad (2.1)$$

Em que:

ΔH – Variação de Entalpia

M – Vazão Mássica da Corrente

Cp – Capacidade Calorífica

ΔT – Variação de Temperatura

A equação acima revela que as inclinações das retas do diagrama Temperatura-Entalpia são representadas pelo inverso de MCp.

Tabela 2.1

Corrente	Temperatura Entrada (ºC)	Temperatura Saída (ºC)	Δ H kW	MCp (KW/ºC)
1	180	80	2000	20
2	130	40	3600	40
3	60	100	3200	80
4	30	120	3240	36

A construção das curvas compostas simplesmente envolve a adição das variações de entalpia nos respectivos intervalos de temperatura criados das interseções entre as retas (LINNHOFF et al, 1998). A figura 2.3 mostra o procedimento de obtenção da curva composta quente e fria para o exemplo citado, sendo (a) e (b) a curva composta quente e (c) e (d) a curva composta fria.

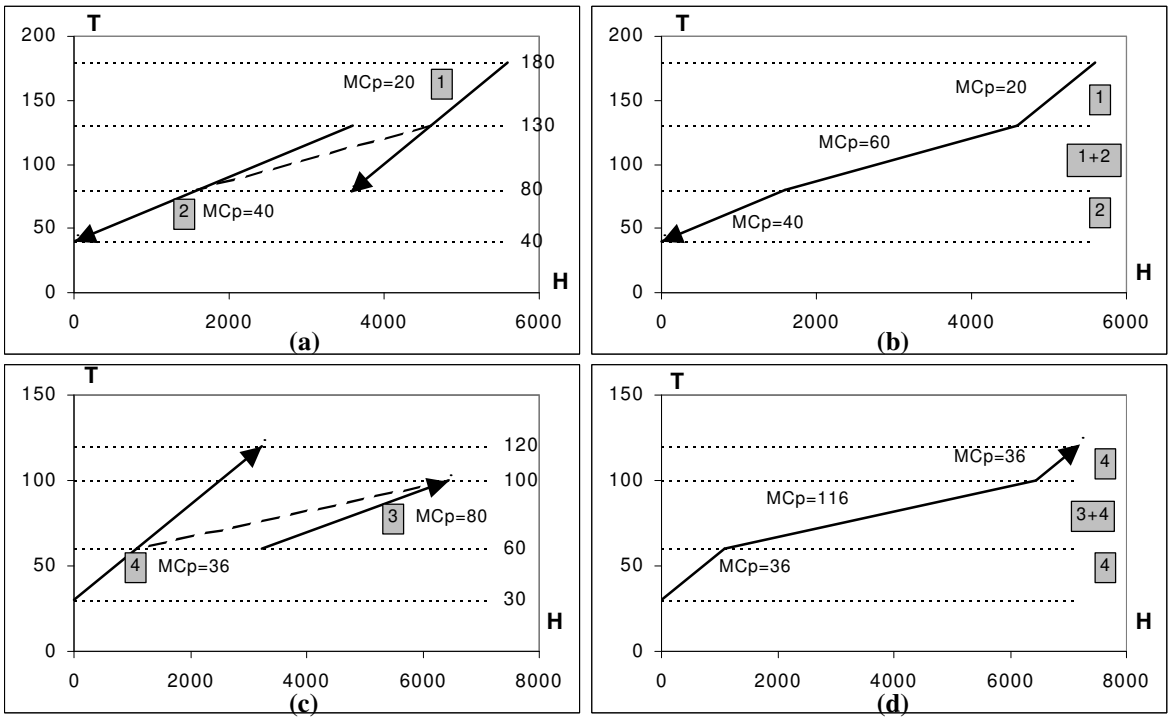


FIGURA 2.3 – Construção das Curvas Compostas Quente e Fria

Após a obtenção de ambas as curvas, a próxima etapa consta apenas em representá-las em um mesmo diagrama temperatura-entalpia e analisar os resultados para um dado ΔT_{min}. A figura 2.4 mostra a representação para dois valores de ΔT_{min}: 10 ºC e 20ºC. Nela podemos determinar a localização do *Pinch* (ponto onde as curvas estão mais próximas) através de seus valores na curva quente (T) (“*Pinch* quente”) e na curva fria (T) (“*Pinch* frio”).

Os valores para consumo de utilidade quente (vapor, por exemplo) e utilidade fria (água de refrigeração, por exemplo) obtidos do diagrama e mostrados juntamente com os valores do *Pinch* na tabela 2.2 representam o consumo mínimo possível de utilidades (metas de consumo de energia) para um dado ΔT_{min}, uma

vez que a disposição das curvas representam a máxima recuperação de calor entre as correntes de processo. A figura 2.4 permite observar que o aumento de ΔTmin implica em um aumento de utilidade necessária para se atingir as metas de temperatura do processo. Isto se deve ao fato do aumento de ΔTmin restringir as trocas de calor entre as correntes de processo.

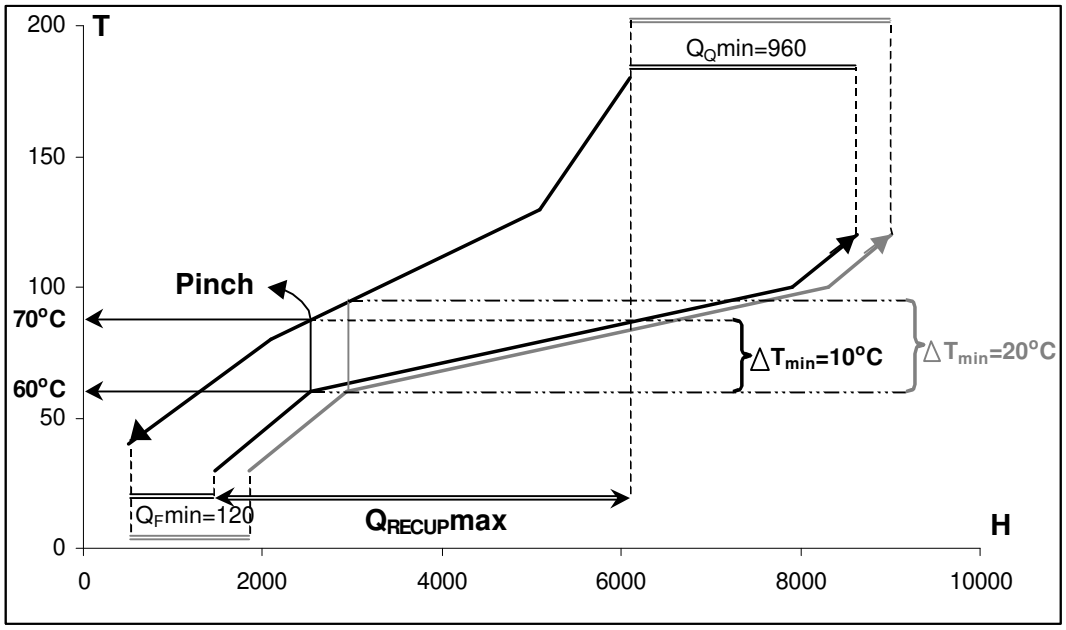


FIGURA 2.4 – Curvas Compostas para 2 ΔTmin

Tabela 2.2

ΔTmin (ºC)	Consumo Utilidade Quente (kW)	Consumo Utilidade Fria (kW)	*Pinch* Quente (ºC)	*Pinch* Frio (ºC)	*Pinch* (ºC)
10	960	120	70	60	65
20	1360	520	80	60	70

Este método, denominado de método gráfico da Análise *Pinch* pode ser aplicado para um processo com inúmeras correntes de forma similar. Com ele podemos obter as seguintes informações do processo:

- Localização do *Pinch*;
- Potencial de recuperação de calor dentro do processo;
- Metas de consumo de mínimo de utilidades quente e fria.

Como foi dito anteriormente, a metodologia *Pinch* permite a obtenção de metas de energia sem a necessidade de realizar o projeto da rede de troca térmica, permitindo assim que mudanças no processo possam ser facilmente avaliadas em relação à economia de energia gerada, ou melhor ainda, a análise do próprio diagrama pode apontar as mudanças necessárias no processo para uma otimização energética.

O método gráfico é fácil de ser aplicado a processos com poucas correntes, porém ele torna-se inviável para um grande número correntes. Por isso foi desenvolvido um algoritmo que permite realizar a análise numericamente: o Algoritmo Tabular.

2.2.2 – Algoritmo Tabular

Uma forma alternativa de obter as metas de energia de um processo é através do Algoritmo Tabular – "Problem Table Algorithm" (LINNHOFF e FLOWER, 1978). O método, que é baseado na divisão do problema em intervalos de temperaturas para posterior realização de balanço energético, é desenvolvido através da construção de uma tabela, que segue alguns passos descritos a seguir.

Primeiramente é necessário dividir as curvas em intervalos de temperatura de forma semelhante à realizada na construção das curvas compostas. Para assegurar que todas as correntes dentro de um mesmo intervalo respeitem o ΔT_{min} e possam trocar calor entre si, é usado o artifício de subtrair e adicionar das temperaturas o valor de $\Delta T_{min}/2$ das correntes quentes e frias respectivamente. Ou seja, subtrai-se este valor de temperatura das correntes quentes, ao mesmo tempo que adiciona-se às frias, fazendo com que as curvas se toquem no *Pinch* e que, dentro de cada novo intervalo deslocado, a troca térmica seja sempre viável.

Após esta etapa, os intervalos são dispostos em uma tabela com os valores de temperatura em ordem decrescente e é realizado um balanço energético em cada um deles, determinando se no intervalo existe um déficit ou

superávit de energia. Então, para o aproveitamento da energia excedente de um intervalo, é realizada a transferência da mesma para o intervalo imediatamente inferior, onde o fluxo de calor é viável (região de menor temperatura), até o último intervalo que deve trocar energia com a utilidade fria.

Realizado este primeiro balanço térmico, é escolhido o valor de maior déficit de energia. Esta energia deficitária deve ser cedida ao sistema pela utilidade quente. Desta forma, é realizado um novo balanço de energia, com a primeira transferência de calor sendo realizada do sistema de utilidade quente para o processo, zerando assim o déficit de energia. O ponto no qual encontramos esta maior deficiência energética é exatamente o *Pinch*, que para ser revelado deve ser somado e subtraído de ΔTmin/2, já que o procedimento havia alterado os valores de temperaturas das correntes.

Para melhor compreensão do algoritmo, a tabela 2.3 mostra a aplicação do método ao exemplo anteriormente mostrado (tabela 2.1) para um ΔTmin de 10°C.

A tabela está dividida em intervalos de temperaturas e mostra em suas colunas os seguintes valores:

- Temperaturas deslocadas das correntes quentes (1 e 2) e frias (3 e 4) respectivamente subtraídas e adicionadas de 5 °C (ΔTmin/2);
- Intervalo de temperatura que as correntes participam;
- Número de intervalos obtidos, variação de temperatura (ΔT), somatório das necessidades de resfriamento das correntes quentes (Q quentes), somatório das necessidades de aquecimento das correntes frias (Q frias) e o balanço de energia (ΔQ) para cada intervalo;
- Transferências de energia entre os intervalos antes e após o ajuste de energia das utilidades quentes.

Como pode ser observado pelo balanço de energia, existe um excedente de energia nos intervalos 1, 2 e 5, contrastando com uma falta em 3 e 4. Para tentar balancear o sistema é realizado uma transferência de energia em cascata, ou seja, dos níveis mais quentes para os níveis imediatamente mais frios. Porém o

sistema não possui energia suficiente para se auto satisfazer, como pode ser observado pela existência de intervalos com saldo de energia negativos, ou seja, necessitando de energia, mesmo após as transferências entre eles. Por isso este déficit de energia deve ser fornecido através de utilidade quente, que é introduzido no sistema para realização de novo balanço térmico, que determina:

- Consumo mínimo de utilidade quente (960 kW);
- Consumo mínimo de utilidade fria (120 kW);
- Determinação do *Pinch*, que ocorre onde não há transferência de energia, entre os intervalos 4 e 5, ou seja, na temperatura deslocada de 65 ºC que corresponde a temperaturas reais de 60 e 70 ºC.

Tabela 2.3

Temp Desloc (°C)	1	2	3	4	Nº	ΔT (°C)	SQ Quentes (kW)	SQ Frias (kW)	ΔQ (kW)	Transf. Energia Inicial (kW)	Transf. Energia Final (kW)
175											**960***
125					1	50	1000	0	1000	1000	1960
105					2	20	1200	720	480	1480	2440
75					3	30	1800	3480	-1680	-200	760
65					4	10	400	1160	-760	-960*	0
35					5	30	1200	1080	120	-840	**120**

***** Valor de energia a ser fornecido pela utilidade quente

Como podemos observar os resultados obtidos para a aplicação do algoritmo tabular ao exemplo proposto são idênticos aos do método gráfico (tabela 2.2).

2.2.3 – Rede de Trocadores de Calor

A Tecnologia *Pinch* não se limita a fornecer as metas de consumo de utilidades de um processo, mas também permite a determinação da rede de

trocadores de calor necessária para atingi-las, o número mínimo de trocadores, a estimativa de área total e o custo da rede. Nesta segunda etapa, através de alguns procedimentos específicos e conceitos que serão abordados a seguir, será possível montar a rede de troca térmica que permite a máxima recuperação de calor no processo e o consequente atendimento das metas obtidas na primeira etapa.

2.2.3.1 – Montagem da Rede

Para montar a rede de troca térmica é necessário primeiramente retomar alguns conceitos. Como já foi dito, o ΔTmin é a mínima diferença de temperatura entre as correntes de processo na qual pode ocorrer troca térmica, e por isso todos os trocadores devem respeitar esta restrição. Como o ΔTmin ocorre no *Pinch* pode-se dividir o problema neste ponto, criando duas regiões, como mostrado na figura 2.5: uma acima do *Pinch*, que se encontra em balanço térmico com o sistema de utilidade quente, sendo um receptor de calor; e outra abaixo do *Pinch*, em balanço térmico com o sistema de utilidade fria, sendo uma fonte de calor.

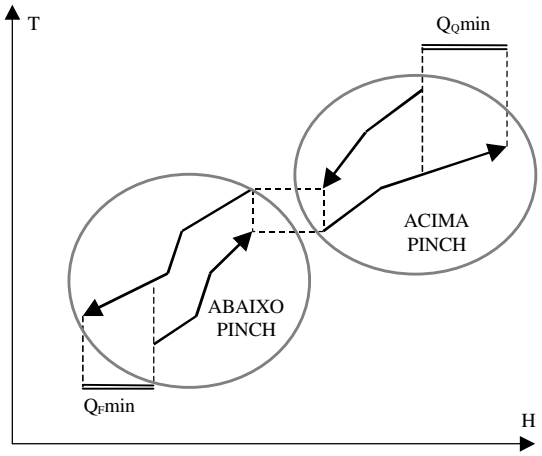


FIGURA 2.5 – Divisão do Processo: Abaixo e Acima do *Pinch*

A troca térmica entre as duas regiões, sem violar a restrição do ΔTmin, só é possível da região acima do *Pinch* para a região abaixo dele. Porém esta troca representaria um acréscimo semelhante na quantidade de energia necessária tanto à utilidade quente como à fria, pois retirar calor de uma corrente quente da

região acima para fornecê-lo a uma outra corrente fria da região abaixo, causaria um déficit de calor na região acima, que só poderia ser compensado com utilidade quente, e um superávit de calor na região abaixo (que originalmente já possuía um excesso de energia), que só restabeleceria o balanço térmico via o sistema de utilidade fria. Analogamente, pode-se estender esta análise ao uso de utilidades, onde o uso de utilidade quente para aquecer uma corrente fria abaixo do *Pinch* e o uso de utilidade fria para resfriar uma corrente quente acima do *Pinch* iria desbalancear o sistema, afastando-o das metas de energia obtidas anteriormente, como está exemplificado na figura 2.6.

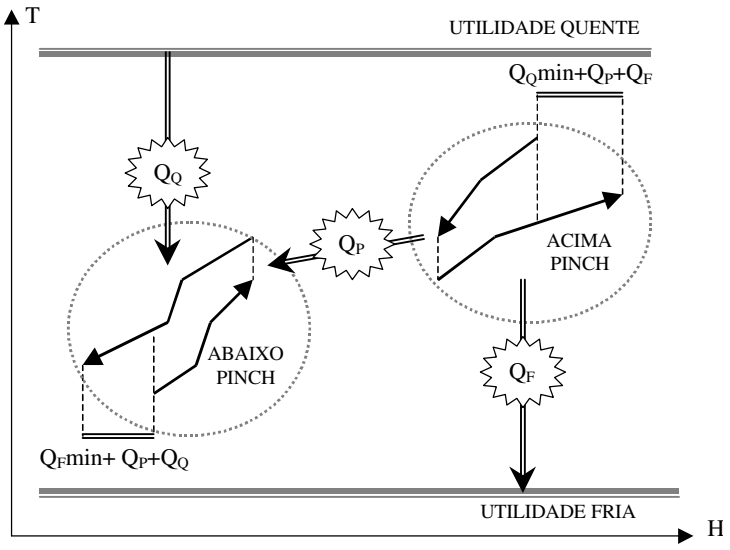


FIGURA 2.6 – Energia Através do *Pinch*

Por isso, para montar uma rede de trocadores que garanta as metas de consumo mínimo de energia previamente estabelecidas, deve-se seguir estas três regras:

1. Não recuperar calor do processo através do *Pinch*;
2. Não utilizar utilidade quente para correntes abaixo do *Pinch*;
3. Não utilizar utilidade fria para correntes acima do *Pinch*.

Estabelecido estes três princípios, pode-se partir para a montagem da rede propriamente dita. Nesta etapa é preferível a utilização do diagrama de grade, para a representação da rede de troca térmica, uma vez que eles facilitam

a localização do *Pinch*, bem como a divisão nas duas regiões e a alocação de trocadores. Nele, apenas as correntes que necessitam de aquecimento ou resfriamento e os trocadores de calor são representados, sendo as correntes quentes retas que vão da esquerda para a direita, correntes frias retas da direita para a esquerda, e os trocadores como dois círculos que interligam duas correntes (trocadores processo-processo) ou círculos simples (trocadores de utilidades) como na figura 2.7.

Para a montagem da rede deve-se seguir uma regra básica: o mais difícil primeiro. Ou seja, devemos iniciar por onde encontramos as maiores dificuldades e restrições, que neste caso é o *Pinch* e caminhar para fora dele. Então, primeiro deve-se dividir o problema no *Pinch*, ficando as regiões acima e abaixo dele localizadas à esquerda e à direita respectivamente, e iniciar as análises pelas correntes próximas a ele. Para saber quais correntes devem ser interligadas primeiro é necessário seguir algumas regras como a regra do "MCp", que ajuda a assegurar o cumprimento à restrição de ΔTmin.

A força motriz da troca térmica, que é a diferença de temperaturas entre as correntes, são menores no *Pinch* e aumentam à medida que se afastam dele. Acima do *Pinch*, a curva composta fria possui um maior MCp (menor inclinação) que a curva composta quente, condição que se inverte abaixo do *Pinch*, que generalizando, significa dizer que o MCp das correntes que saem do *Pinch* são maiores do que as correntes que entram nele. Por isso ao conectar correntes próximas ao *Pinch* em que o MCp da corrente que sai seja sempre maior ou igual ao da corrente que entra no *Pinch*, assegura-se a não violação da restrição do ΔTmin.

Então, seguindo a orientação de resolver o mais difícil primeiro deve-se obedecer a seguinte sequência para a montagem da rede de trocadores:

1. Dividir o problema no *Pinch*;
2. Iniciar a análise no *Pinch* e se afastar;
3. Iniciar com a corrente de maior MCp que entra no *Pinch*;
4. Observar a regra do MCp: $\mathbf{MCp_{sai}} \geq \mathbf{MCp_{entra}}$;

5. Trabalhar primeiro com todas as correntes próximas ao *Pinch*;
6. Maximizar as cargas para satisfazer as correntes escolhidas;
7. Completar a necessidade restante de energia com utilidades.

A figura 2.7 mostra o diagrama de grades para o exemplo anterior, com a rede de troca térmica obtida através da aplicação das regras mostradas. Como esperado, o valor obtido para o consumo de utilidades representa exatamente as metas pré-estabelecidas.

Em alguns casos é necessário recorrer à divisão de correntes para aplicar as regras de montagem da rede e atingir as metas de consumo de energia. Porém a divisão de correntes pode levar a problemas de controlabilidade, tornando-a inviável, e proporcionando penalidades à recuperação de energia do sistema e, consequentemente, a um consumo maior de energia. Problemas como este e outros ligados a operacionabilidade do sistema, como paradas e partidas, só podem ser julgados pelo engenheiro de processo que detém pleno conhecimento do processo, tornando-o indispensável ao projeto final da rede (SMITH, 1995).

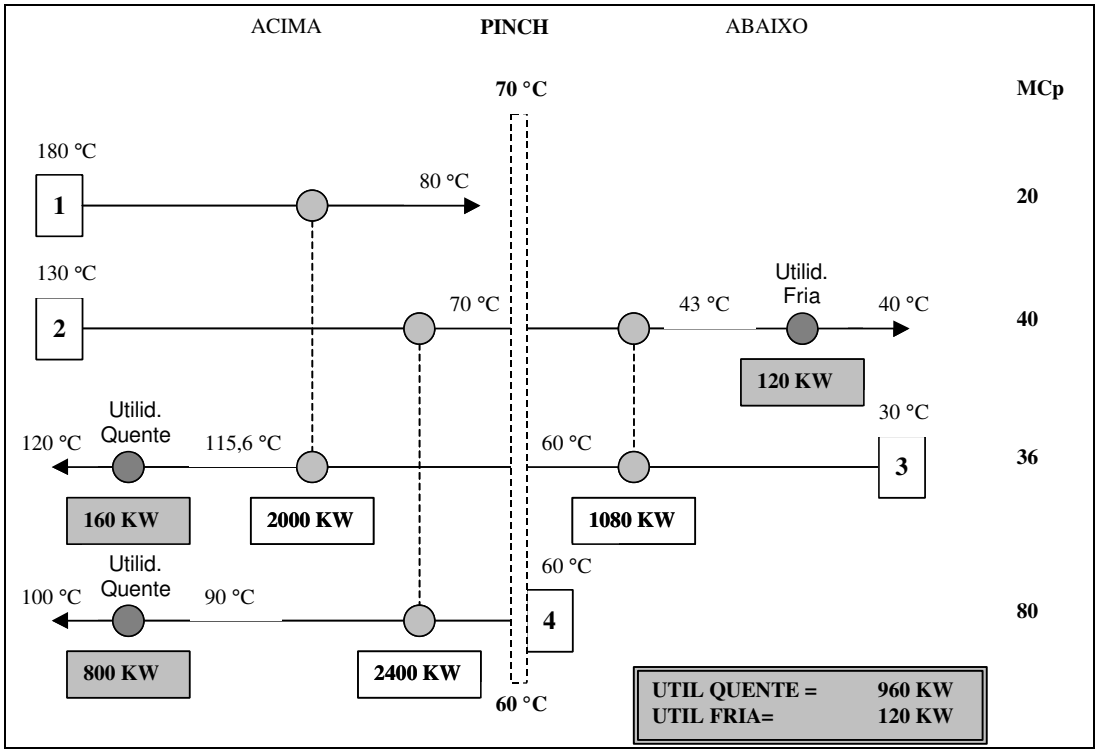


FIGURA 2.7 – Diagrama de Grade

2.2.3.2 – Determinação do Número Mínimo de Trocadores

Além da determinação da rede de troca térmica, é possível estabelecer o número mínimo de trocadores para o processo em estudo, que é um fator de forte peso no custo de capital. A determinação deste mínimo número possível de trocadores é baseada na Teoria dos Gráficos de Euler, que pode ser adaptada para uma rede de troca térmica de acordo com a equação 2.2 (LINNHOFF et al, 1979):

$$\mathbf{N_{troc} = N_{corr} + N_{laços} - N_{sist\ ind}} \qquad (2.2)$$

Em que:

N_{troc} – Número de trocadores

N_{corr} – Número de correntes (incluindo utilidades)

$N_{laços}$ – Número de laços (*loops*)

$N_{sist\ ind}$ – Número de sistemas independentes

Em uma rede de troca térmica o laço (*loop*) é definido por um conjunto de trocadores que realizam trocas térmicas entre as mesmas correntes. Os trocadores participantes do laço podem ser eliminados com a consequente diminuição do número de unidades. Porém, esta eliminação leva necessariamente a um aumento de consumo de utilidades ou uma violação de ΔTmin, com acréscimos nos custos de energia ou na área de troca térmica respectivamente, sendo necessária uma análise para escolha da melhor opção entre custo de capital e energia. A decisão de custo está fundamentada principalmente em três fatores: número mínimo de trocadores, consumo mínimo de utilidades e área mínima de troca térmica. Como só é possível satisfazer apenas dois destes três fatores, a decisão deve ser baseada no custo total do sistema onde é considerado tanto o custo de energia como o de capital.

Para simplificar o cálculo do número mínimo de trocadores pode-se simplificar a equação 2.2, considerando a inexistência de laços e a existência de apenas um sistema independente, na equação 2.3:

$$N_{troc} = N_{corr} - 1 \qquad (2.3)$$

Como na análise *Pinch* o sistema, para a máxima recuperação de calor, é dividido em dois outros (acima e abaixo do *Pinch*), sem possibilidade de troca de calor através deles, é importante ressaltar que a análise deve ser realizada para os dois lados independentemente, como mostrado na equação 2.4:

$$N_{troc} = (N_{corr} - 1)_{\text{Acima } Pinch} + (N_{corr} - 1)_{\text{Abaixo } Pinch} \qquad (2.4)$$

Da comparação das equações 2.3 e 2.4 pode-se deduzir que a configuração de uma rede para máxima recuperação de calor significa a necessidade de um número maior de trocadores que o mínimo possível.

2.2.3.3 – Estimativa da Área de Troca Térmica

Uma outra facilidade da Tecnologia *Pinch* é a estimativa da área mínima de troca térmica e do custo de capital associado, que podem ser obtidos através das curvas compostas. Para tal cálculo, é necessário incorporar as correntes de utilidades às curvas compostas e dividi-las em intervalos verticais de entalpia, determinados pelas mudanças de inclinação das curvas compostas, como ilustrado na figura 2.8. Considerando a troca térmica em contracorrente, a área de cada intervalo é determinada pelas equações 2.5.

$$A_K = \frac{Q_K}{\Delta T_{LM} \cdot U_K} \qquad (2.5_a)$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_Q} + \frac{1}{h_F} \qquad (2.5_b)$$

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \qquad (2.5_c)$$

Em que:

A_K : Área de troca térmica do intervalo K

Q_K : Carga térmica do intervalo K

ΔT_{LM} : Diferença média logarítmica de temperatura

U_K : Coeficiente global de transferência de calor do intervalo K

h_Q : Coeficiente de película das correntes quentes

h_F : Coeficiente de película das correntes frias

ΔT_1 : Diferença de temperatura em um extremo do intervalo

ΔT_2 : Diferença de temperatura no outro extremo do intervalo

Como o coeficiente global de transferência de calor não é constante ao longo do processo, é necessário considerar o efeito individual dos coeficientes de película das correntes de processo, que é realizado pela equação 2.6 (SMITH, 1995):

$$A_K = \frac{1}{\Delta T_{LM,K}} \cdot \left(\sum_i \frac{\Delta H_{i,K}}{h_i} + \sum_j \frac{\Delta H_{j,K}}{h_j}\right) \qquad (2.6)$$

Em que:

K : Intervalo de entalpia

i : Correntes quentes no intervalo K

j : Correntes frias no intervalo K

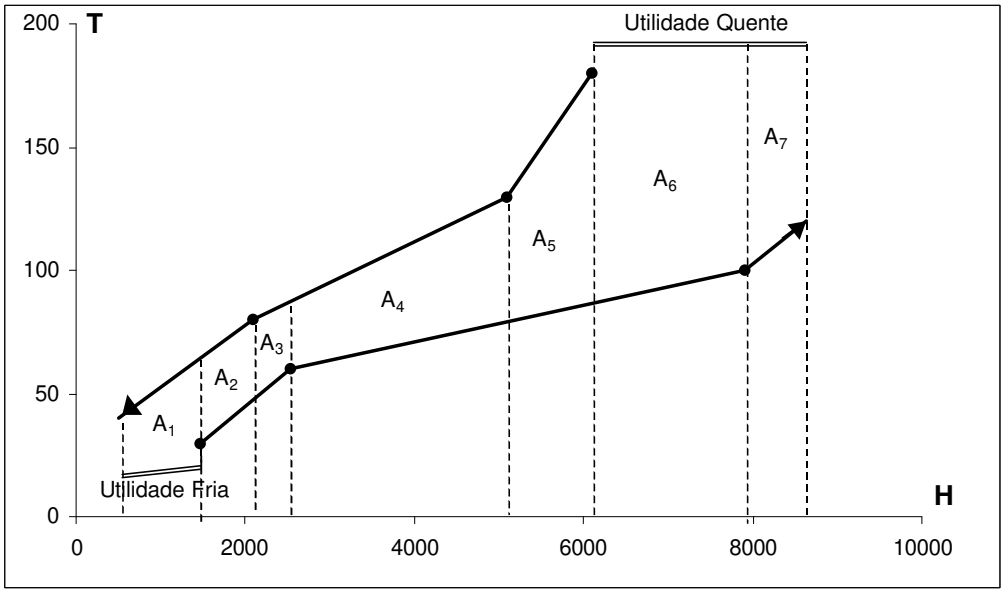


FIGURA 2.8 – Estimativa de Área

A área total de troca térmica da rede de trocadores é obtida pelo somatório das áreas de todos os intervalos de entalpia, como na equação 2.7:

$$A_{REDE} = \sum_{K} A_K \tag{2.7}$$

Após a determinação da área mínima de troca térmica é possível realizar uma estimativa de investimento pelo uso de uma função custo para o trocador, similar à equação 2.8:

$$CustoTrocador = a + b \cdot A^c \tag{2.8}$$

Em que:

a, b e c são constantes de custos que variam de acordo com o trocador

De posse do número mínimo de trocadores já calculado, pode-se estimar o custo total da rede de trocadores de calor pela equação 2.9:

$$CustoTotal\ Estimado = N_{troc} \cdot \left[a + b \cdot \left(A_{REDE} \Big/ N_{troc} \right)^c \right] \tag{2.9}$$

2.2.4 - Determinação do ΔTmin Ótimo

Como já foi mostrado anteriormente na figura 2.4, as metas de consumo de energia variam com o ΔTmin escolhido para o processo. Quanto menor for o seu valor, menor será a quantidade de energia suprida pelo sistema de utilidades. Porém a escolha do melhor valor não leva em consideração apenas este aspecto, sendo necessário a realização de uma análise econômica.

Realmente, quanto menor o ΔTmin, mais as curvas compostas se aproximam e menor será o custo de energia com utilidades. Mas a sua diminuição implica necessariamente em um aumento da área de troca térmica necessária para o serviço proposto, como pode-se observar através da equação 2.10 de transferência de calor, e consequentemente, em um aumento do custo de capital, uma vez que seriam necessários trocadores com áreas maiores.

$$\mathbf{Q = U \cdot A \cdot \Delta T} \qquad (2.10)$$

Em que:

Q = Calor transferido

U = Coeficiente de troca térmica

A = Área de troca térmica

ΔT = Variação de temperatura

Contrariamente, o aumento do ΔTmin significaria um afastamento das curvas com aumento do custo energético e redução do custo de capital, uma vez que necessitaria-se de áreas menores.

Para a determinação do ΔTmin ótimo, é necessário uma análise de sensibilidade, determinando sua influência no custo total (energia + capital). Para isso constroi-se uma curva como a da figura 2.9, que representa a variação do custo energético e do custo de capital anualizado com o ΔTmin. Da composição destas duas curvas obtêm-se a variação do custo total do sistema com o ΔTmin e consequentemente o seu valor otimizado para o mínimo custo total.

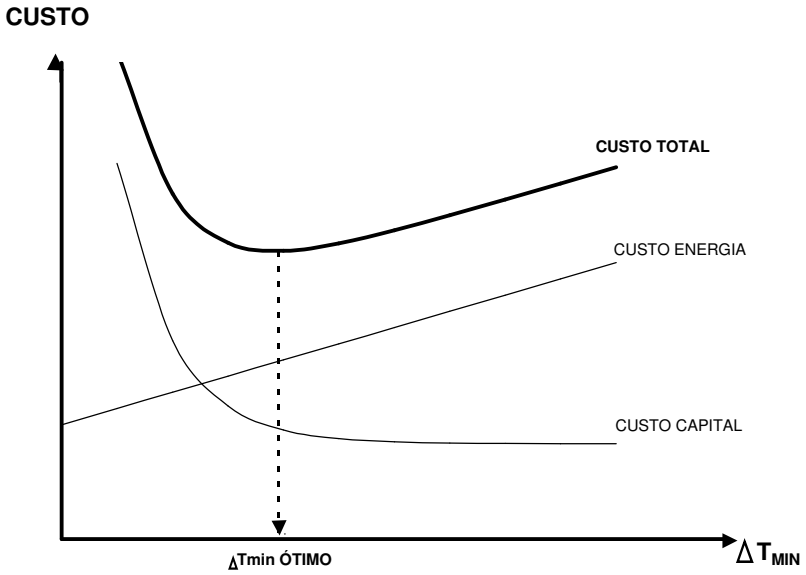


FIGURA 2.9 – ΔTmin Ótimo

2.3 – Múltiplas Utilidades (Grande Curva Composta)

Pela Análise *Pinch* consegue-se determinar a quantidade mínima de utilidade que um processo necessita. Porém, em uma indústria, existem vários tipos diferentes de utilidades que podem ser usados para aquecimento e resfriamento, como por exemplo vapor a várias pressões, gás de combustão (fornos), exaustos de turbinas a gás, água de refrigeração, refrigeração, entre outros, e que devem ser alocados da melhor forma possível para redução de custos.

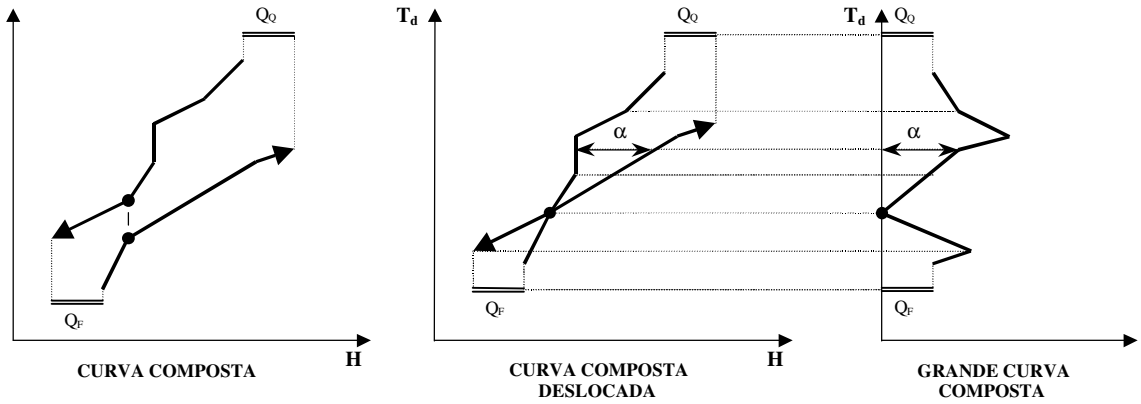
Os diversos níveis de temperaturas das utilidades disponíveis estão diretamente ligados aos seus custos. Geralmente, as utilidades quentes de maior temperatura e as utilidades frias de menor temperatura possuem um custo maior, ou seja, quanto mais afastada da temperatura ambiente, mais cara é a utilidade, sendo então preferível maximizar o uso de utilidades com temperaturas mais próximas à ambiente. Por esta razão a seleção e alocação de utilidades se torna uma etapa fundamental na minimização dos custos do sistema.

Para tal, pode-se utilizar as curvas compostas, porém esta tarefa se torna muito trabalhosa pela necessidade de incluir cada utilidade intermediária que se queira alocar na própria curva composta. Esta tarefa requer que as curvas sejam

“cortadas” e separadas para cada nível intermediário de utilidade, modificando assim o seu formato original. Este procedimento se torna mais complexo a medida que novos níveis de utilidades são adicionados, tornando-o inadequado para este tipo de análise. Por esta dificuldade, é preferível utilizar a Grande Curva Composta para seleção e alocação de utilidades (LINNHOFF et al, 1982).

A Grande Curva Composta (GCC) é derivada das curvas compostas e representa a necessidade líquida de aquecimento ou resfriamento em cada patamar de temperatura após a máxima recuperação de calor entre as correntes de processo. Ou seja, ela representa a parcela da energia que não é utilizada nos mesmos níveis de temperatura e que é transferida para outros níveis, como mostrado no algoritmo tabular.

O procedimento de determinação da GCC está representado na figura 2.10. Para a sua construção, primeiramente é necessário, da mesma forma que é realizado no algoritmo tabular, deslocar as temperaturas de ΔTmin/2, sendo este valor adicionado à curva fria e subtraído da curva quente. Esta medida assegura que a recuperação de calor entre as correntes de processo seja sempre viável, uma vez que estabelece que a diferença de temperatura entre as correntes quentes e frias seja no mínimo igual ao ΔTmin. As curvas resultantes deste procedimento são denominadas de curvas compostas deslocadas e se tocam no *Pinch*. Como a GCC representa o calor residual em cada nível de temperatura do processo, o segundo passo para a sua determinação consta da representação da diferença entre as entalpias da curva fria e da curva quente ao longo do eixo da temperatura deslocada, ou seja, a representação das distâncias horizontais entre as curvas compostas deslocadas. O formato final da GCC está representado na figura 2.10 (c), nela visualiza-se facilmente o ponto de *Pinch*, que fica em destaque ao tocar o eixo de temperatura, dividindo o processo em dois, e as metas de energia do processo que são, naturalmente, iguais às obtidas pelas curvas compostas.



(a) (b) (c)

FIGURA 2.10 – Grande Curva Composta

A GCC é uma importante ferramenta da Análise *Pinch*, pois ajuda na melhor alocação dos vários níveis de utilidades existentes em uma planta industrial, ao proporcionar a maximização do uso de utilidades mais baratas. A figura 2.11 representa bem a análise de alocação de utilidades que a GCC permite realizar. As curvas compostas apenas indicam a quantidade de energia necessária em um nível de temperatura que satisfaça todo o processo, porém a GCC permite uma análise do nível de temperatura necessário para cada trecho do processo, permitindo um uso mais racional das diferentes utilidades disponíveis. Esta análise é possível, pois na GCC já está sendo considerada a melhor integração possível entre as correntes de processo, ou seja, as correntes que normalmente necessitariam de utilidades mais caras são priorizadas na integração. Como a representação das utilidades também é realizada com as temperaturas deslocadas, sendo as utilidades quentes subtraídas de $\Delta T_{min}/2$ e as utilidades frias adicionadas de $\Delta T_{min}/2$, a diferença mínima de temperatura entre as correntes de processo e as utilidades estão asseguradas mesmo quando elas se encostam no gráfico.

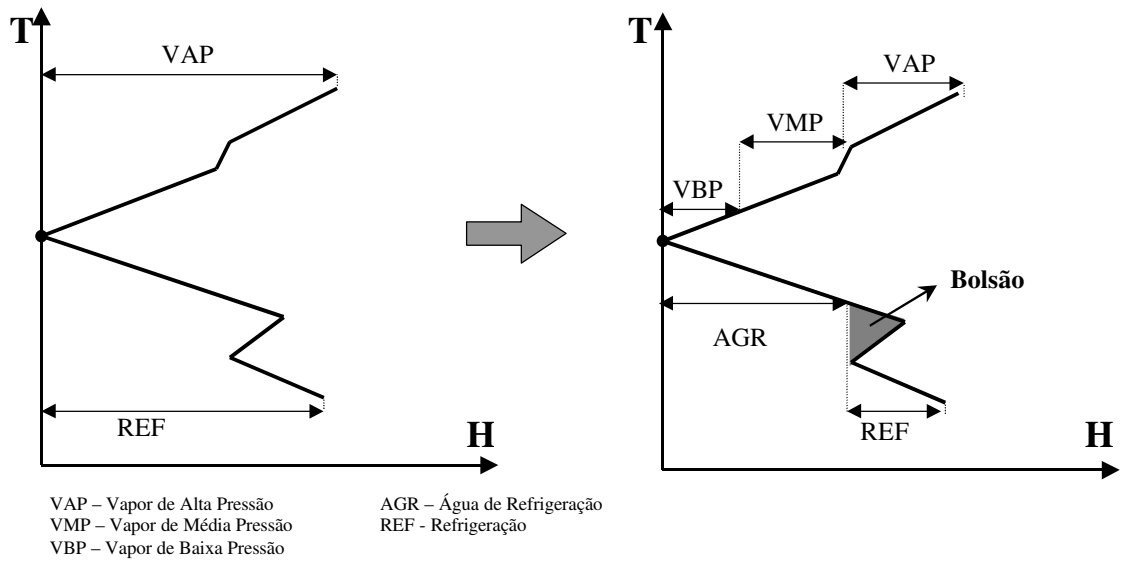


FIGURA 2.11 – Alocação de Utilidades

Uma outra informação que a GCC evidencia são as recuperações de calor adicionais entre as correntes de processos que podem ocorrer pela existência de regiões com disponibilidade líquida de energia acima do *Pinch* e/ou necessidade líquida abaixo do *Pinch*, podendo assim serem utilizadas para troca dentro do próprio processo. Estas regiões são denominadas de bolsões e representam partes do processo onde não é necessário o uso de utilidades, pois o processo é energeticamente auto-suficiente.

2.4 – Outras Aplicações

Além das análises anteriormente mostradas, a Análise *Pinch* pode ser utilizada em outras aplicações, permitindo uma melhor configuração de um processo. Com a técnica *Pinch*, é possível realizar análises de melhor alocação no processo de máquinas térmicas, bombas de calor, colunas de destilação, evaporadores, fornos e qualquer outra operação unitária, que podem ser representadas em termos de fontes e receptores de calor.

Além destas análises tradicionais, a Análise *Pinch* evoluiu ao longo dos anos englobando outros aspectos. Dentre as novas áreas de aplicação da metodologia se destacam as seguintes (LINNHOFF, 1993a):

- Otimização de queda de pressão;
- Projeto para múltiplos casos base;

- Perfis de coluna de destilação;
- Projeto de processos de baixa temperatura;
- Integração de processos a batelada;
- Minimização de água e resíduos;
- Análise Energética Global - Integração *Total Site*;
- Metas de emissões atmosféricas.

Dentre estas novas aplicações, a Análise Energética Global - *Total Site* é o tema deste trabalho e será detalhado no próximo capítulo.

2.5 – Limitações

Como foi visto, a Análise *Pinch* tradicional tem um enorme campo de atuação em processos industriais, e a aplicação de sua metodologia resulta em grandes benefícios através de uma sensível redução de seus custos energéticos. Porém, uma unidade industrial raramente é composta de um único processo, ao contrário, geralmente tem-se diversos processos diferentes que são interligados por um sistema único de utilidades. A aplicação da metodologia *Pinch* a cada processo individual traz ganhos energéticos, porém estes ganhos não são completamente materializados em todo o complexo (DAVISON, 1993).

Geralmente, para uma dada melhoria realizada em um processo, a redução do consumo de energia global (em todo o complexo) é tipicamente apenas 40% do potencial de redução indicado ao nível do processo. Este problema é causado pela interdependência dos processos e pelo neglicenciamento do sistema de utilidades. Com isso, melhorias realizadas em uma área podem ter um impacto negativo em outra, causando penalidades, principalmente na disponibilidade de co-geração do complexo.

Estas penalidades são resultantes de uma das principais falhas da melhoria energética clássica realizada pouco-a-pouco: os processos são tratados como discretos. Desta forma a infra-estrutura de utilidades é negligenciada, e mais importante, as interações entre os processos e a demanda por utilidade ficam de fora da análise.

Este problema foi solucionado pelo aparecimento de uma nova metodologia desenvolvida por DHOLE e LINNHOFF em 1993, na UMIST – *The University of Manchester Institute of Science and Technology* , que estendeu a técnica *Pinch* para todo o complexo, de uma forma que as utilidades são consideradas como parte do problema, desacoplando assim a interação entre processos e utilidades, e aumentando o potencial de ganho energético do complexo.

Esta nova metodologia é denominada Análise "*Total Site*" (Análise Energética Global), e é o tema do trabalho em questão que será desenvolvido nos capítulos posteriores.

Capítulo 3 – A Análise Energética Global ("*Total Site*")

3.1 – Definição de Complexo ("*Site*")

As plantas petroquímicas raramente operam de forma isolada, geralmente elas fazem parte de complexos industriais que agrupam vários processos distintos. Este fato é ainda mais contundente nas indústrias fornecedoras de matérias primas básicas, uma vez que este tipo de indústria lida com uma vasta gama de produtos que necessitam de diferentes processamentos. Este tipo de operação conjunta traz uma série de vantagens econômicas, ao proporcionar ganhos de escala, na medida que um único sistema de utilidades supre a necessidade energética dos diversos processos.

Este conceito de complexo industrial também é conhecido pelo nome de "*Total Site*", que, em outras palavras, é uma fábrica incorporando diversos processos que são servidos e interligados por um sistema central de utilidades (DHOLE, 1993). A figura 3.1 traz uma representação esquemática de um complexo "*Total Site*" típico. Nele, os diversos processos tem suas necessidades energéticas de aquecimento e refrigeração supridas por uma central de utilidades, que pela queima de combustível, gera vapor de super alta pressão (VSAP) que é reduzido a níveis inferiores de pressão através de um sistema de turbinas, disponibilizando trabalho mecânico de co-geração (W), que pode ser utilizado para a geração de energia elétrica ou no acionamento de máquinas do processo, como compressores por exemplo. Os diversos níveis de pressão gerados – alta pressão (VAP), média pressão (VMP), baixa pressão (VBP) – além da água de refrigeração (AGR) são consumidos pelos diversos processos que compõe o complexo. Alguns destes processos podem inclusive ser produtores de vapor, que é incorporado ao sistema de distribuição central, ou até mesmo serem consumidores de combustível, caso o processo utilize uma fornalha para aquecimento.

Um outro aspecto que fica claro, é que neste tipo de operação interligada, a demanda de vapor dita a demanda de combustível e o potencial de co-geração do complexo (DHOLE, 1993). Este fato é de fundamental importância para o entendimento das penalidades energéticas causadas a todo o complexo pela

redução do consumo de vapor de um processo, já citadas anteriormente, e cuja discussão será aprofundada a seguir.

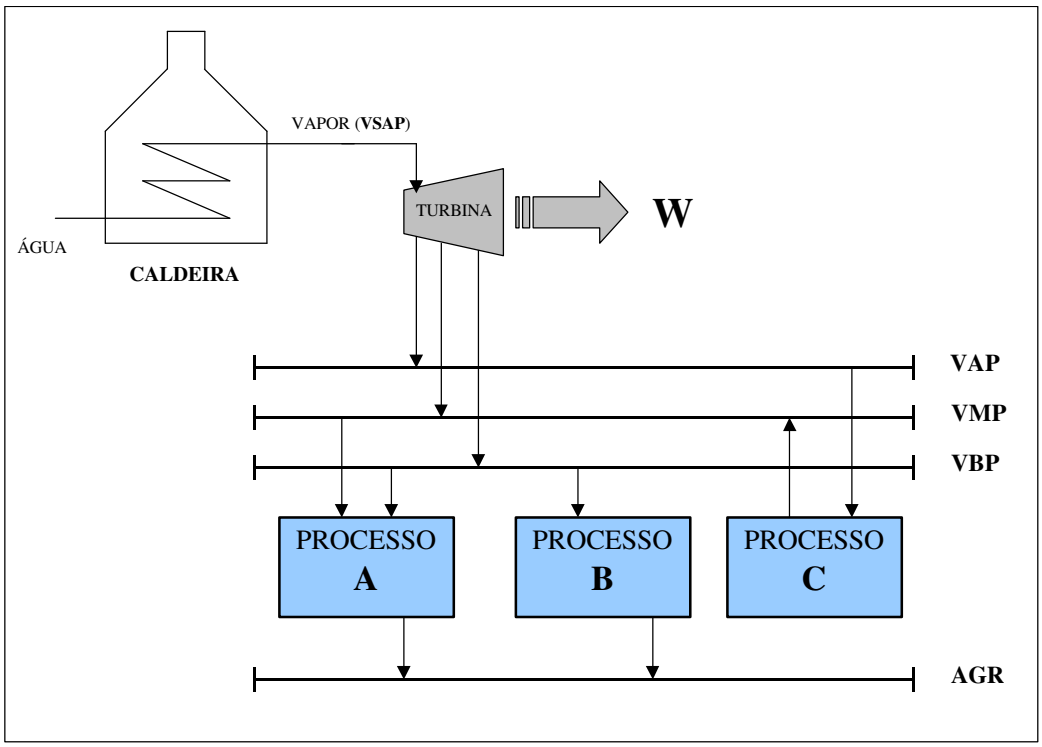


FIGURA 3.1 – Complexo "*Total Site*"

3.2 – Integração Energética de Processos Separados

Como já foi dito, a aplicação da Análise *Pinch* tradicional a processos pertencentes a grandes complexos não apresenta os ganhos indicados, quando o envoltório da análise engloba todo o complexo. Este fato ocorre porque os processos, apesar de estarem separados, são interligados pelo sistema de utilidades, e por isso são interdependentes, não podendo ser analisados separadamente, pois ganhos em algumas unidades podem ocasionar penalidades ao sistema como um todo. Geralmente, as maiores penalidades são na disponibilidade de co-geração, pois, como foi visto, ela está diretamente ligada à demanda de vapor do complexo. Ou seja, uma redução de consumo de vapor em uma unidade tem como consequência imediata a redução na geração de energia, uma vez que menos vapor passará pela turbina. Como estas mudanças podem ter um efeito total negativo, em complexos industriais, a otimização energética só pode ser alcançada através de um estudo que permita realizar uma análise global,

onde todas as áreas de importância energética são analisadas simultaneamente, e em conjunto com o sistema de utilidades.

A integração energética direta entre processos separados, na qual correntes dos dois processos trocam calor entre si é totalmente inviável, não só por problemas operacionais que acarretariam, principalmente nas partidas e paradas, mas também pelas distâncias envolvidas, que implicariam em uma enorme quantidade extra de tubulações para realizar as trocas térmicas necessárias. Por esta razão, a única forma de concretizar uma integração inter-processos é através do sistema de utilidades, que é comum a todos, onde um determinado processo, por exemplo, poderia maximizar sua geração de vapor para suprir a deficiência de um outro. Esta análise deve ser realizada de uma forma que as penalidades sejam minimizadas ou até mesmo evitadas, e para isto, o estudo pode ser realizado à luz das Grandes Curvas Compostas (GCC) dos processos envolvidos.

Como estas curvas permitem uma melhor compreensão da interface processo-utilidades, elas se tornam úteis no estudo de integração entre os processos. Para realizar esta análise, é necessário construir as GCC dos processos que se deseja integrar em um mesmo diagrama, pois, desta forma, é possível visualizar as alternativas viáveis de integração. A figura 3.2 exemplifica a utilização das GCC neste tipo de análise. Nela, um processo “C”, que trabalha em um patamar de temperatura superior a um outro processo “A” pertencente ao mesmo complexo, gera vapor de média pressão que é adicionado ao sistema comum de utilidades para ser consumido pelo processo “A”. A sobreposição das duas curvas permite avaliar os impactos que modificações em um processo impõem ao outro, e, mais ainda, possibilita enxergar as alterações possíveis que podem ser realizadas em um processo em benefício do outro.

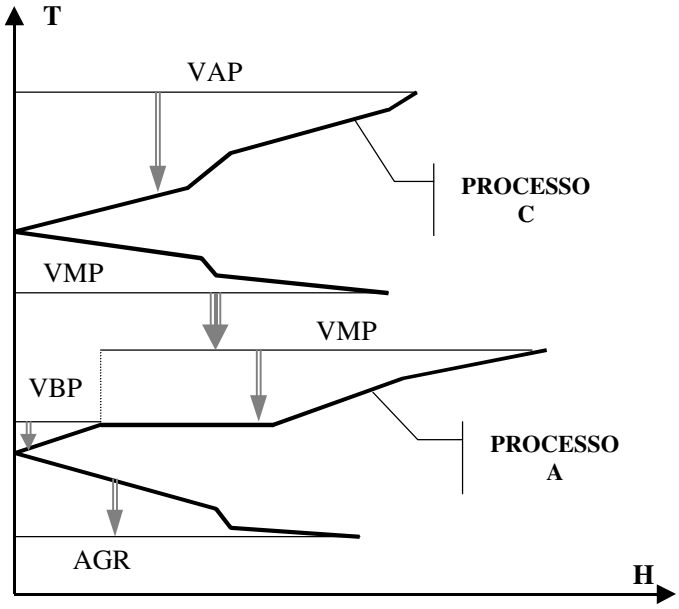


FIGURA 3.2 – Integração entre Processos Utilizando a GCC

Esta alternativa apresenta-se como uma boa solução para questão da interdependência entre os processos, porém ela tem pouco potencial prático de utilização. A maioria dos complexos são constituídos de muitos processos, chegando alguns a possuírem dezenas deles, e a aplicação da técnica proposta acima seria extremamente confusa e difícil. A figura 3.3 dá uma idéia de quanto ficaria complicada uma análise deste tipo em um complexo com muitos processos. Além disto, este tipo de análise não aborda os impactos no sistema de geração de utilidades.

Para solucionar esta limitação das GCC, utiliza-se a metodologia da Análise Energética Global - "*Total Site*", que através de simples procedimentos, permite uma avaliação energética consistente de todo o sistema.

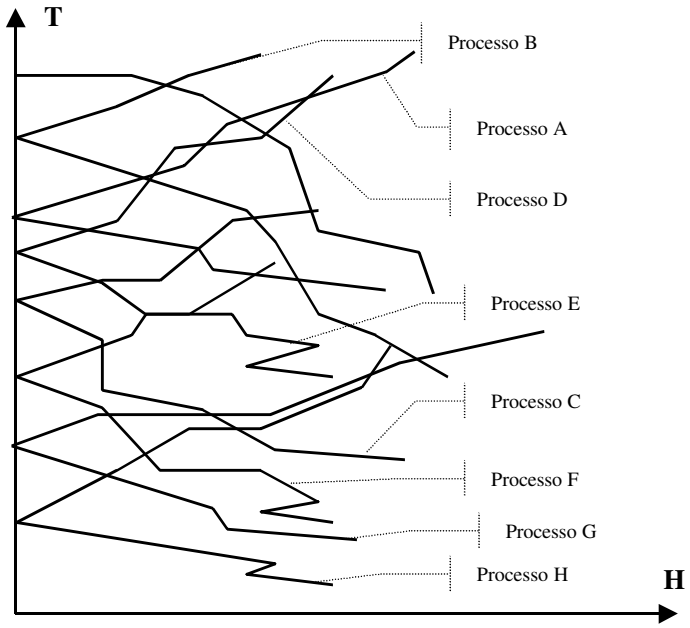


FIGURA 3.3 – GCC de um Complexo Industrial

3.3 – Análise Energética Global ("*Total Site*")

A Análise Energética Global ("*Total Site*") foi desenvolvida por DHOLE e LINNHOFF (1993), permitindo estender a técnica *Pinch* da escala de processo para todo o complexo. Através de procedimentos simples, a metodologia traduz todas as GCC do complexo em apenas duas curvas denominadas Perfis Térmicos, transformando muita informação aparentemente complexa em simples gráficos que dão uma clara visão de alternativas de otimização energética (LINNHOFF, 1993a). Como estas curvas são obtidas a partir das GCC de cada processo, o conceito de trabalhar com metas de energia é mantido também na Análise Energética Global.

3.3.1 – Construção dos Perfis Térmicos do Complexo

Toda a Análise Energética Global é baseada nos Perfis Térmicos Quente e Frio do complexo, que são duas curvas que representam, respectivamente, toda a necessidade de resfriamento e aquecimento do complexo. Estas curvas são derivadas das GCC e a sua construção é composta de várias etapas que serão abordadas a seguir.

As GCC representam a necessidade líquida de aquecimento ou resfriamento em cada patamar de temperatura após uma máxima recuperação de

calor entre as correntes de processo, e a primeira etapa da construção dos Perfis Térmicos consta em dividi-las no *Pinch*. Esta divisão origina duas regiões bem distintas: uma acima do *Pinch*, que representa as correntes receptoras de calor; e uma outra abaixo do *Pinch*, que representa as correntes fornecedoras de calor, como ilustrado na figura 3.4.

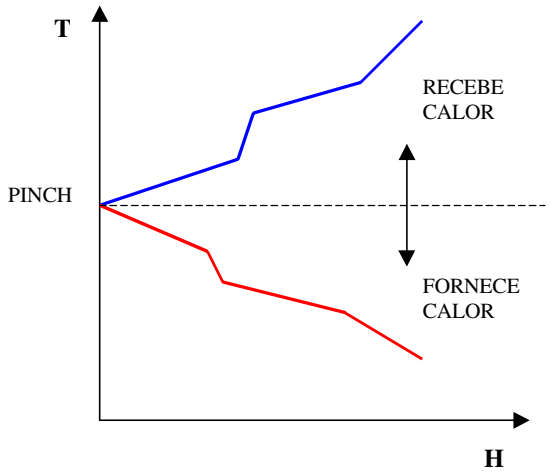


FIGURA 3.4 – Divisão da GCC

A etapa seguinte consta da retirada dos bolsões das GCC, que se faz necessário pelo fato da Análise Energética Global considerar como premissa que a integração inter-processos é realizada apenas com as correntes que não podem ser aproveitadas dentro do próprio processo, ou seja, apenas fazem parte da análise as correntes que obrigatoriamente necessitam de uma fonte externa de energia. As demais correntes devem ser aproveitadas para a otimização energética dentro de cada processo, e, neste caso, se enquadram as correntes que compõem os bolsões, que representam regiões que podem realizar troca térmica entre si, sendo auto suficientes em energia, como já foi visto anteriormente. Este procedimento inclusive evita, na análise global, a possibilidade de, inadvertidamente, considerar a troca térmica direta entre correntes de processos diferentes (AHMAD, 1998), que já foi visto ser inviável na maioria dos casos.

A etapa posterior é a de translação de temperatura dos elementos receptores e fornecedores de calor das GCC. Para isto, a região receptora, acima

do *Pinch*, é acrescida de ΔTmin/2, enquanto a região fornecedora, abaixo do *Pinch*, é subtraída de ΔTmin/2. Este procedimento retorna as correntes às suas temperaturas reais, que haviam sido deslocadas na confecção das GCC, e, por esta razão, o ΔTmin utilizado deve ser o mesmo usado em cada processo.

Após realizadas todas estas fases, de divisão das GCC no *Pinch*, retirada dos bolsões e translação de temperatura, a etapa final de construção dos perfis envolve a simples geração de Curvas Compostas, da mesma forma como é realizada na Análise *Pinch* tradicional (figura 2.3), apenas que neste caso são utilizadas as GCC deslocadas dos vários processos. O Perfil Térmico Frio é formado pela composição das curvas que recebem calor (acima do *Pinch*), enquanto o Perfil Térmico Quente é formado pelas curvas que são fontes de calor (abaixo do *Pinch*) e deve ser alocado no eixo negativo da entalpia. A figura 3.5 ilustra todo o processo de construção dos perfis.

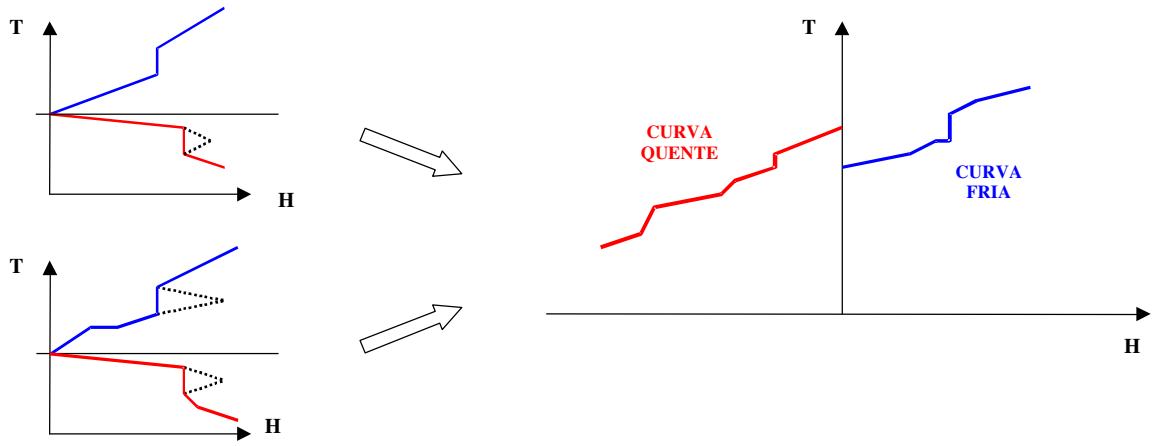


FIGURA 3.5 – Construção dos Perfis Térmicos do Complexo

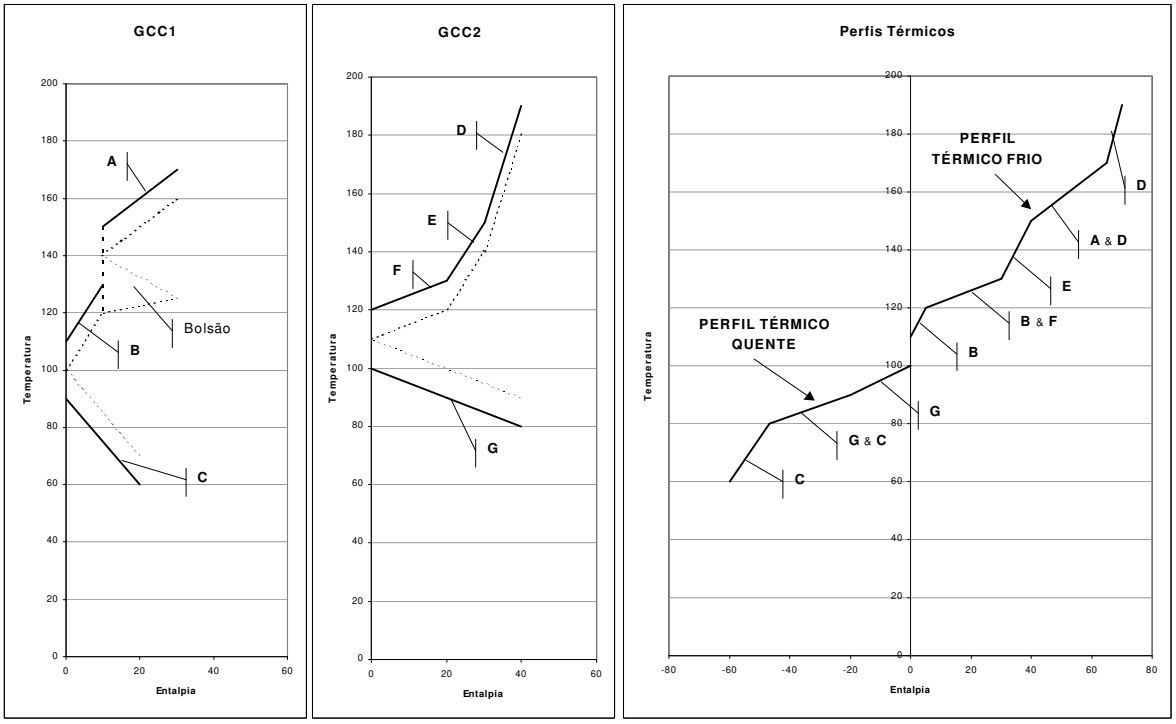
Para uma melhor compreensão da obtenção das curvas, será mostrado um exemplo prático envolvendo dois processos cujas GCC estão determinadas na tabela 3.1, em que o ΔTmin utilizado para ambos os processos é de 20 °C.

Tabela 3.1

PROCESSO 1 (GCC1)		PROCESSO 2 (GCC2)	
Temperatura Deslocada (°C)	Entalpia (kW)	Temperatura Deslocada (°C)	Entalpia (kW)

70	20	90	40
100	0	110	0
120	10	120	20
125	30	140	30
140	10	180	40
160	30	-	-

A partir destes dados, as duas GCC são montadas e trabalhadas para a obtenção dos dois Perfis Térmicos, como mostrado na figura 3.6. Nas figuras 3.6(a) e 3.6(b) pode-se observar todo o procedimento descrito anteriormente, onde os bolsões existentes são retirados e as curvas deslocadas de ΔTmin/2 (10 °C), sendo a região acima do *Pinch* acrescida deste valor e a região abaixo subtraída. Após este procedimento obtêm-se na primeira curva três segmentos de reta (A, B e C), e na segunda mais quatro (D, E, F e G). Estes segmentos são reagrupados na figura 3.6(c) de acordo com filosofia de construção das Curvas Compostas, na qual duas novas curvas serão geradas, sendo uma englobando as curvas acima do *Pinch* (A, B, D, E e F), que recebem calor e formam o Perfil Térmico Frio do complexo, e outra com os trechos abaixo do *Pinch* (C e G), que formam o Perfil Térmico Quente, representando as correntes que fornecem calor.



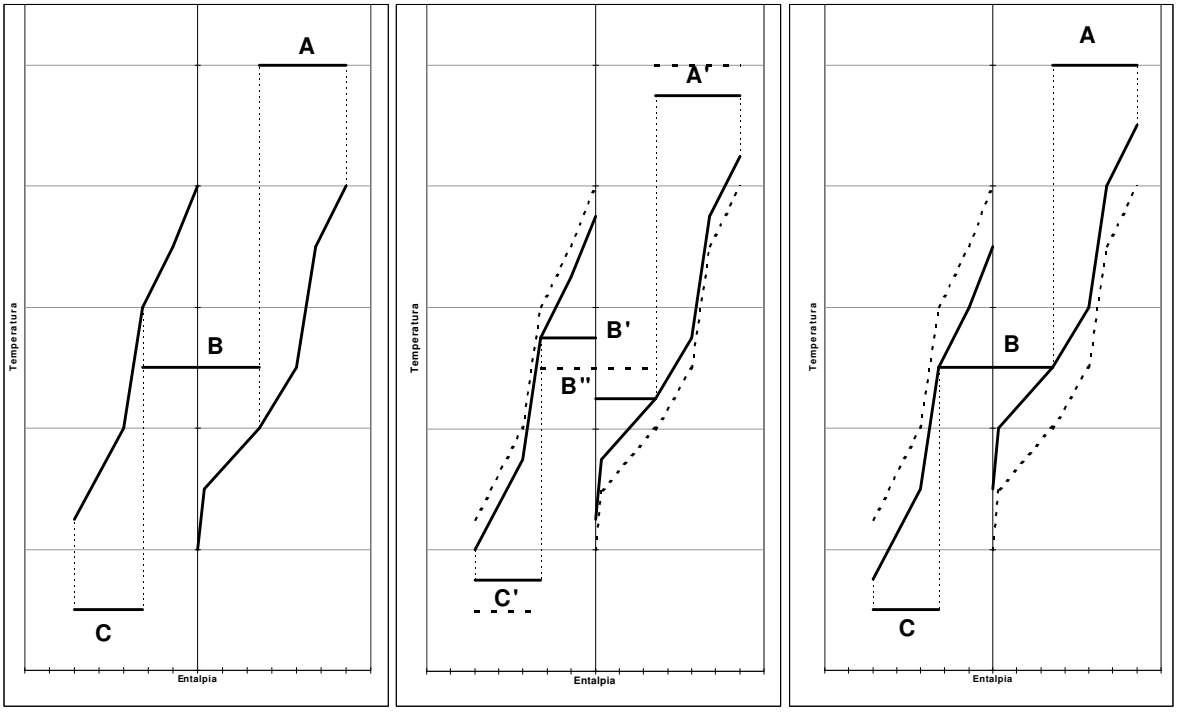
(a) (b) (c)

FIGURA 3.6 – Exemplo de Construção dos Perfis Térmicos do Complexo

Apesar do exemplo mostrado englobar apenas dois processos, este procedimento de construção dos perfis pode ser extrapolado para tantos processos quantos se queira modelar, podendo ser aplicado para grandes complexos industriais, resolvendo assim, o problema da inviabilidade do uso das GCC para análises de otimização energética.

3.3.2 – Determinação das Metas Energéticas do Complexo

Após a construção dos Perfis Térmicos, é possível obter as metas de consumo energético para todo o complexo. Para isso porém, é necessário incluir na análise o sistema de utilidades, que é realizada pela alocação dos diversos níveis de utilidades junto aos Perfis Térmicos, como mostrado na figura 3.7(a), que representa um complexo qualquer com três níveis de utilidades: A, B e C.



(a) (b) (c)

FIGURA 3.7 – Inclusão das Utilidades

Porém, antes de prosseguir a análise, é necessário, da mesma forma que realizado na construção da GCC, recorrer a um artifício para assegurar o ΔTmin entre as correntes de processo e as utilidades (SHENOY, 1995). Desta forma é necessário diminuir a temperatura de todo o perfil quente e aumentá-la no perfil frio em ΔTmin/2. Analogamente, as utilidades também devem ter seus valores de temperatura modificados, porém as utilidades que servem a curva quente devem ser acrescidas de ΔTmin/2, enquanto as que servem a curva fria devem ser diminuídas, com está mostrado na figura 3.7(b), onde novos perfis e utilidades são obtidos.

Porém, este procedimento ocasiona um inconveniente que pode ser claramente visto ainda na figura 3.7(b). Como algumas utilidades interagem com ambos os perfis, sendo gerada por um perfil e consumida pelo outro, elas sofrem duas operações opostas, gerando duas representações distintas para uma mesma utilidade, como ocorre na utilidade B do exemplo. Esta descontinuidade gera uma série de contratempos e impedimentos à análise global do sistema, e por esta razão deve ser eliminada. Para resolver este problema e ainda garantir o ΔTmin,

deve-se utilizar uma estratégia diferente da usada na geração da GCC. Por isso, ao invés de efetuar a translação de temperatura nos perfis e nas utilidades, deve-se apenas modificar a temperatura dos perfis, que neste caso deve ser alterada em ΔTmin, mantendo as utilidades nas suas temperaturas originais. A curva obtida está mostrada na figura 3.7(c) e encontra-se pronta para a análise de metas, uma vez que o ΔTmin está garantido mesmo quando as curvas se encostam.

É importante ressaltar que o ΔTmin utilizado para este procedimento, não mais se reporta aos processos individuais, pois na Análise Energética Global surge um novo valor de ΔTmin global, que estabelece a mínima diferença de temperatura entre as correntes de processo e as utilidades, e deve ser especificada para cada caso.

Após equacionada a construção da interface processo-utilidades para todo o complexo, pode-se partir para a análise propriamente dita, que determinará as metas de energia do complexo como um todo. Para isto, será utilizado uma curva de uma Análise Energética Global típica, representando um sistema mais complexo.

A figura 3.8 mostra o sistema de utilidades de um complexo industrial. Nele, através da queima de combustível, é gerado vapor de super alta pressão (VSAP), que por sua vez é reduzido a dois níveis inferiores de pressão em um sistema de turbinas, fornecendo trabalho mecânico (W). A extração das turbinas gera vapor de alta pressão (VAP) e vapor de média pressão (VMP), que são injetados no sistema de distribuição do complexo. Os processos, por sua vez, consomem VAP e VMP, sendo que parte deste último pode ser gerado pelos próprios processos. Para finalizar, é utilizada água de refrigeração (AGR) para complementar as necessidades energéticas do complexo.

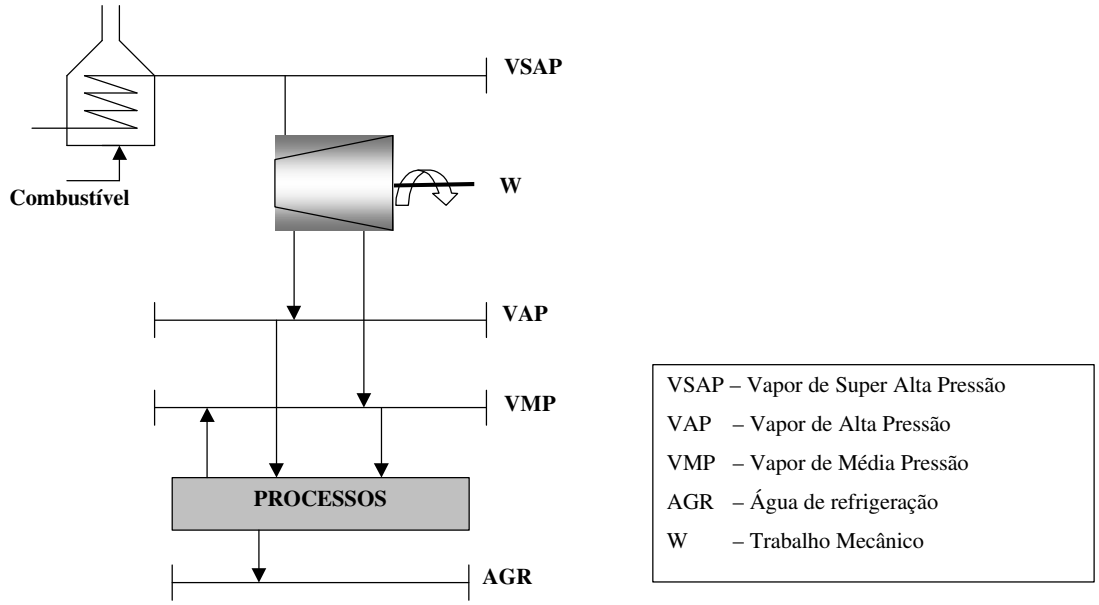


FIGURA 3.8 – Sistema de Utilidades de um Complexo Típico

A representação dos Perfis Térmicos destes processos, juntamente com o sistema de utilidades pode ser visto na figura 3.9, que representa a Análise Energética Global do complexo, da qual pode-se obter todas as suas metas de energia, ou seja, a quantidade mínima de energia necessária para satisfazê-lo. Para os níveis de utilidades existentes, o gráfico mostra que o processo pode gerar uma quantidade D de VMP, através de parte das correntes que compõem a curva quente, sendo o restante dela satisfeita com uma quantidade E de AGR. Também pode-se determinar que a curva fria além de consumir todo o VMP gerado pelos processos (D), ainda tem sua demanda complementada em C pelo sistema de turbinas, que também supre toda a demanda (B) de VAP. Baseadas nestas demandas de vapor extraídos da turbina, pode-se identificar a necessidade de VSAP (A) e o total de trabalho gerado (W), através da simulação da turbina que deve ser realizada à parte. Esta necessidade de VSAP determina a capacidade do sistema de geração de vapor. O consumo de combustível é obtido pela projeção do perfil de temperatura do gás de combustão no eixo da entalpia (F), e de posse desta quantidade, é possível, conhecendo-se a composição do combustível, determinar a meta de emissão de poluentes (CO_2, SO_x , NO_x , etc.) do complexo através de correlações que os relacionem.

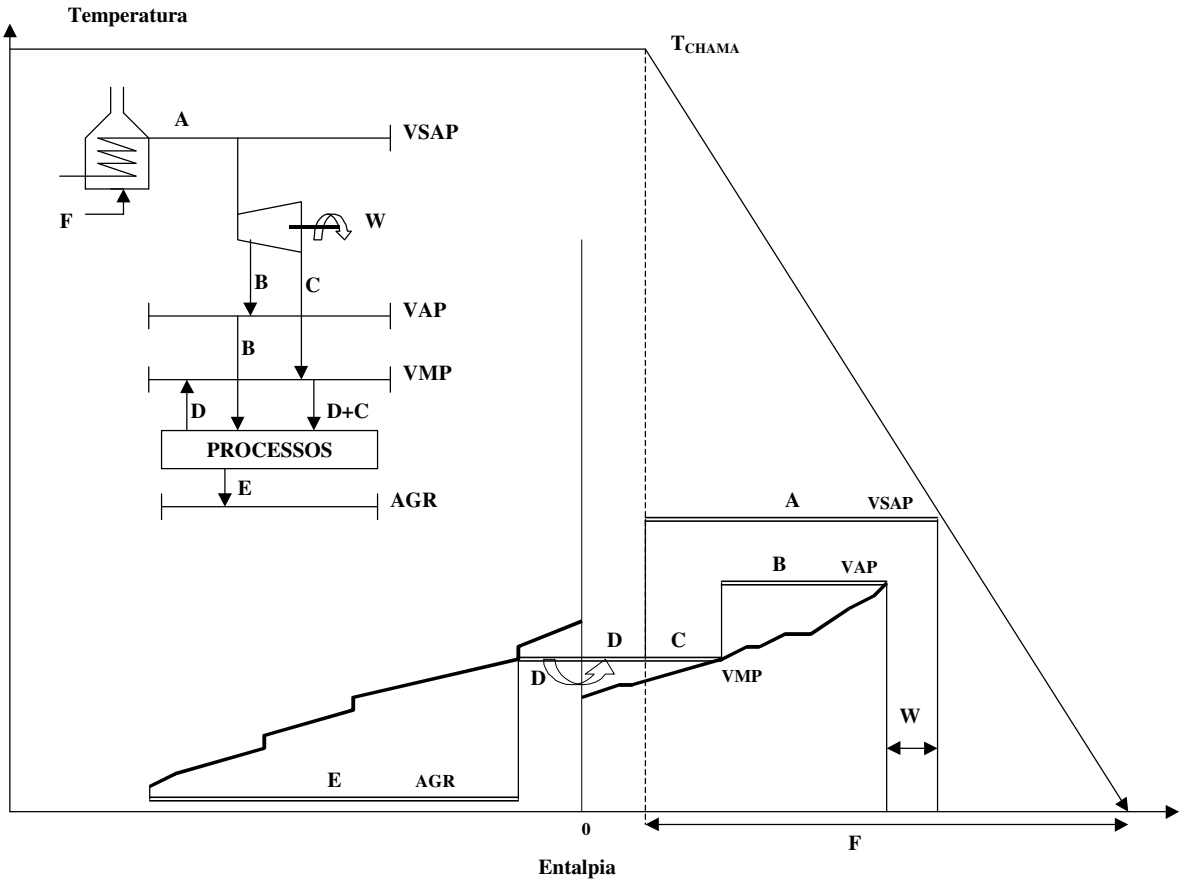


FIGURA 3.9 – Análise Energética Global de um Complexo

Então, a partir das Grandes Curvas Compostas dos processos individuais, é possível obter as seguintes metas do complexo (DHOLE, 1993):

- Combustível;
- Co-geração;
- Emissão de Poluentes;
- Refrigeração;
- Aquecimento.

3.3.3 – Análise Exergética do Sistema de Turbinas

Como visto, a meta de co-geração do complexo não é obtida diretamente da Análise Energética Global, sendo necessária a simulação do sistema de turbinas. A depender da complexidade deste sistema, a simulação não é trivial, pois pode envolver diversas turbinas de diferentes configurações, que

transformaria esta etapa em um ponto crítico, podendo comprometer toda a análise.

Para evitar este problema, é preciso realizar uma abordagem diferente do sistema de turbinas, recorrendo à análise exergética, como explicitado a seguir (DHOLE, 1993).

Primeiramente é necessário definir exergia. O conceito de exergia é apresentado por vários autores, podendo ser sintetizada como a parte da energia que pode ser completamente convertida em qualquer outra forma de energia (RANT – in TORRES, 1999), ou seja, a energia útil, e está diretamente associada à Segunda Lei da Termodinâmica e ao conceito de geração de entropia, ou seja, destruição de potencial de geração de trabalho útil.

Como a variação de exergia a uma temperatura constante é dada pela equação 3.1 (LINNHOFF, 1989) e o Fator de Carnot (η_C) pela equação 3.2, as exergias de duas correntes podem ser obtidas de um gráfico η_C x H, como mostrado a seguir.

$$\Delta Ex = \Delta H \cdot \left[1 - T_0 / T\right] \tag{3.1}$$

$$\eta_C = 1 - T_0 / T \tag{3.2}$$

Em que:

ΔEx – Variação de Exergia

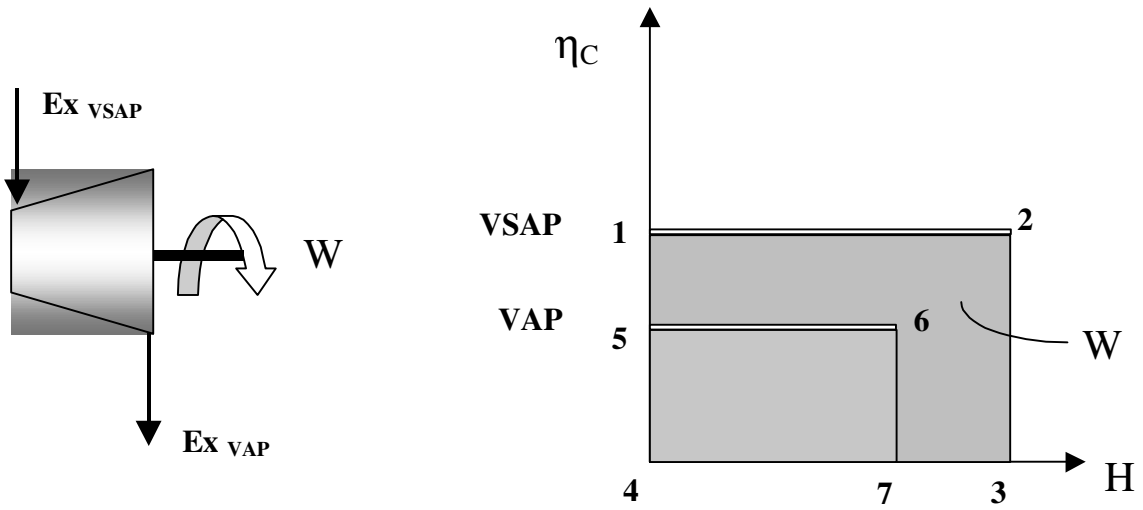
ΔH – Variação de Entalpia

T_0 – Temperatura ambiente

T – Temperatura

η_C – Fator de Carnot

A figura 3.10(a) representa uma turbina de contra-pressão, com alimentação de vapor de super alta pressão (VSAP) e extração em vapor de alta pressão (VAP). As exergias destas correntes podem ser obtidas pelas áreas de um gráfico η_C x H. Na figura 3.10(b) tem-se a exergia do VSAP representada pela Área 1234 (A_{1234}), e a exergia do VAP pela Área 4567 (A_{4567}).



(a) (b)

FIGURA 3.10 – Análise Exergética de uma Turbina

Como a variação de exergia das duas correntes representa o trabalho útil realizado, o trabalho ideal realizado pela turbina é determinado pela diferença entre as áreas, ou seja, pela Área 123765 (A_{123765}). O trabalho real do sistema é determinado pela eficiência exergética do sistema (η_{EX}), como mostrado nas equações 3.3 e 3.4.

$$W_{IDEAL} = (Ex_{VSAP} - Ex_{VAP}) \quad (3.3)$$

$$W_{REAL} = \eta_{EX} \cdot W_{IDEAL} = \eta_{EX} \cdot (Ex_{VSAP} - Ex_{VAP}) \quad (3.4)$$

Em que:

W – Trabalho realizado pela turbina

η_{EX} – Eficiência exergética da turbina

Ex – Exergia das correntes de entrada e saída

Ao aplicar este procedimento aos Perfis Térmicos do complexo através da substituição do eixo Temperatura pelo eixo Fator de Carnot, o trabalho realizado pelo sistema de turbinas pode ser calculado pelas áreas entre os níveis de vapor,

dispensando assim a simulação deste sistema. A figura 3.11 mostra esta nova representação, onde o trabalho pode ser calculado pela área em cinza.

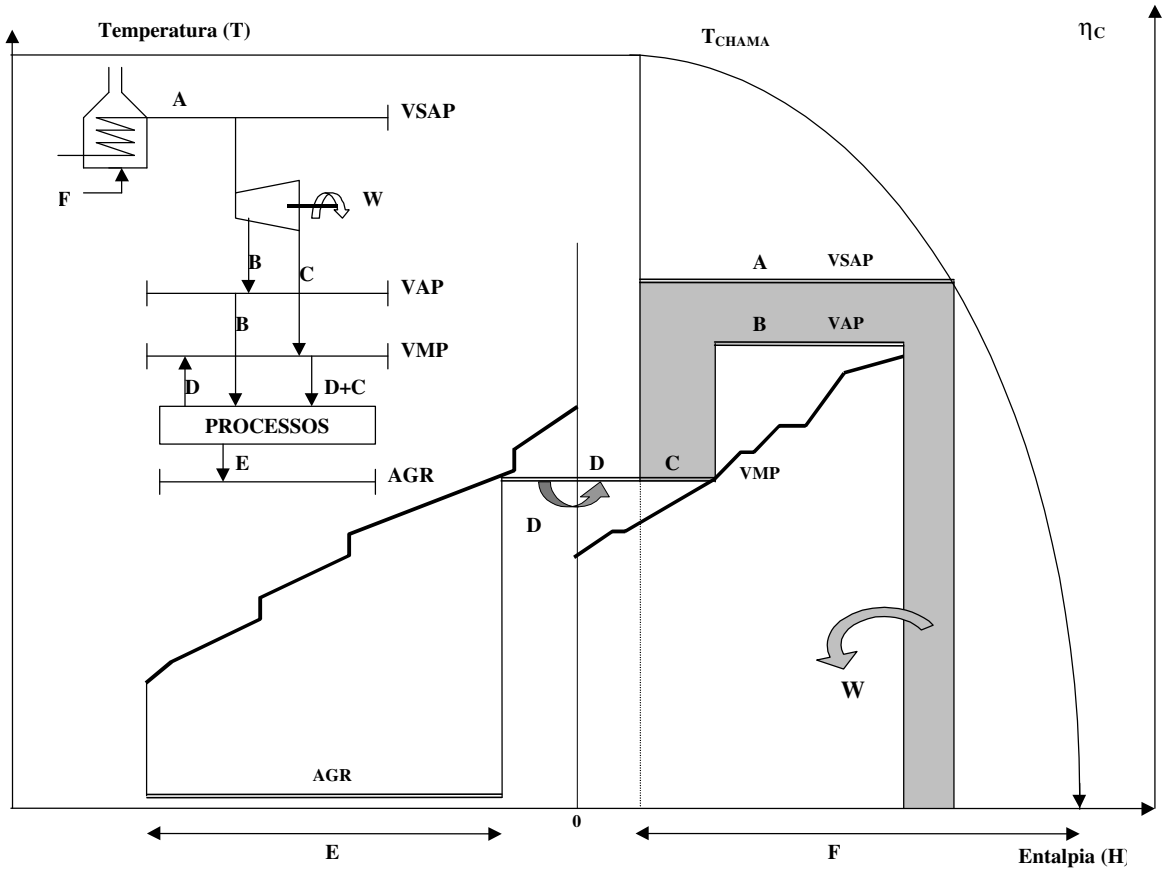


FIGURA 3.11 – Análise Energética Global de um Complexo com Análise Exergética

3.4 – Aplicações e Benefícios

A implementação da mudança proposta acima proporciona à Análise Energética Global um grande poder de análise, uma vez que toda a estrutura energética do complexo fica mapeada e quantificada. Através das curvas da Análise Energética Global é possível analisar os impactos que mudanças nos processos e no sistema de utilidades impõem à configuração energética do complexo e, com isso, tomar decisões mais seguras tanto nas mudanças operacionais, como nos investimentos propostos.

Em complexos industriais, a análise dos impactos que mudanças isoladas nas unidades podem causar ao sistema energético global é um grande desafio à engenharia, uma vez que a interdependência dos sistemas pode tornar esta análise muito complexa. Porém, a metodologia de Análise Energética Global, aqui

apresentada, torna esta análise infinitamente mais simplificada, apresentando-se como uma poderosa ferramenta de análise de impactos. Mudanças nos processos, tanto temporárias, a exemplo de paradas para manutenção, como permanentes, no caso de modificações de projetos ou novas unidades, podem ser facilmente analisadas, assim como as mudanças no sistema de utilidades, envolvendo alterações de níveis de pressão de vapor ou troca de turbinas.

Além disso, a análise do perfil energético do complexo pode indicar e orientar modificações a serem realizadas para um aumento da eficiência energética global. Como exemplo, tem-se o complexo mostrado anteriormente na figura 3.8, cuja representação energética na figura 3.11 mostra claramente que uma pequena mudança no nível de vapor de vapor de média pressão (VMP) pode tornar as unidades auto-suficientes em VMP, não mais necessitando de sua geração via extração nas turbinas. Esta mudança está mostrada na figura 3.12, que mostra também a sua consequência: uma grande redução na capacidade de co-geração da planta, que deve ser levada em consideração na análise de viabilidade técnico-econômica.

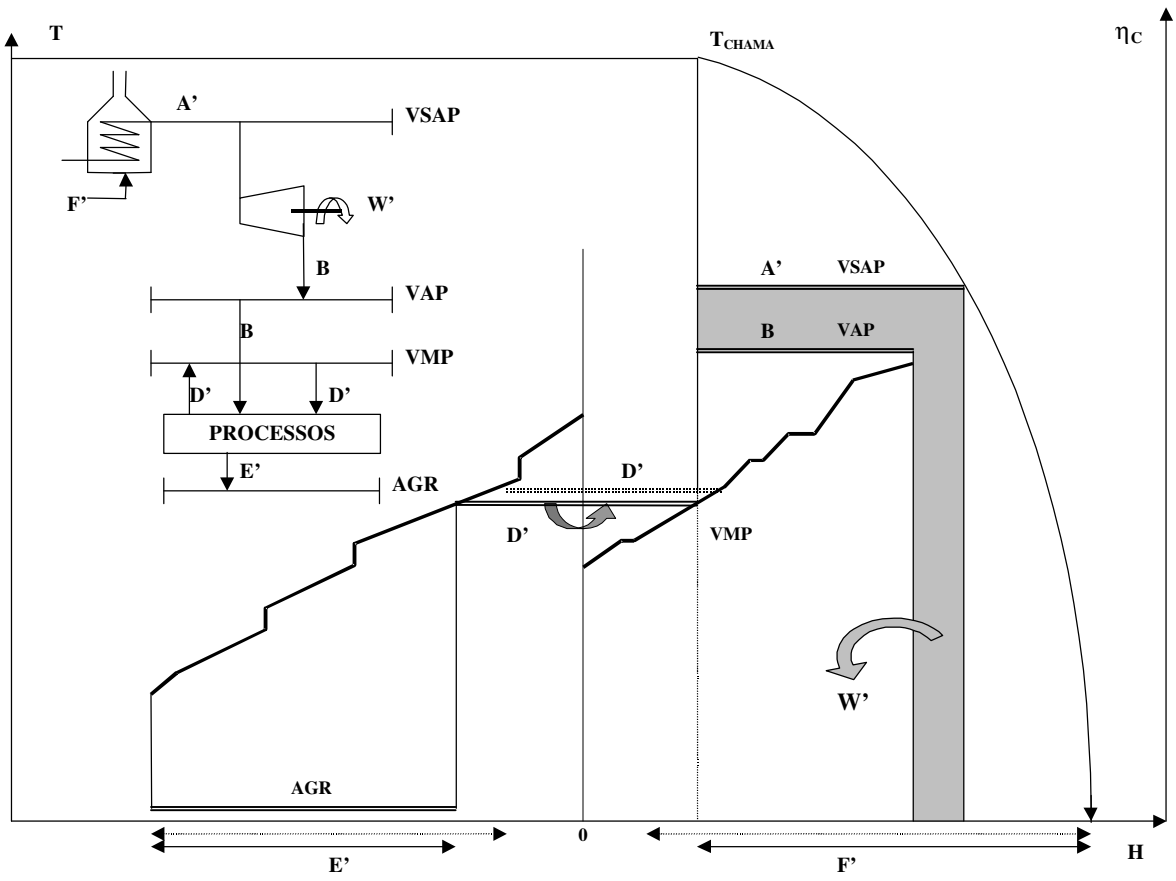


FIGURA 3.12 – Modificação do Nível de VMP

Esta mudança ocorre pelo fato da redução do nível de temperatura do VMP permitir que uma maior quantidade seja gerada pelo próprio processo (D'), zerando assim a necessidade de fornecimento via turbina (C) e, consequentemente, diminuindo a quantidade de VSAP (A'), combustível (F') e trabalho realizado (W'). Obviamente esta informação é muito mais útil na fase de projeto do complexo, quando os sistemas ainda não estão montados, já que um investimento apenas para esta alteração no processo dificilmente se viabilizaria economicamente. Porém, esta informação não pode ser desprezada caso a planta já esteja em operação, pois ela pode ser posta em prática em uma ampliação de produção, ou em uma substituição necessária da turbina. Ainda mais, informações deste tipo servem para de guiar investimentos de grande porte, podendo redirecioná-los para mudanças mais atrativas.

Outra utilidade da Análise Energética Global está mostrada na figura 3.13: impactos de alterações nos processos no perfil energético do complexo.

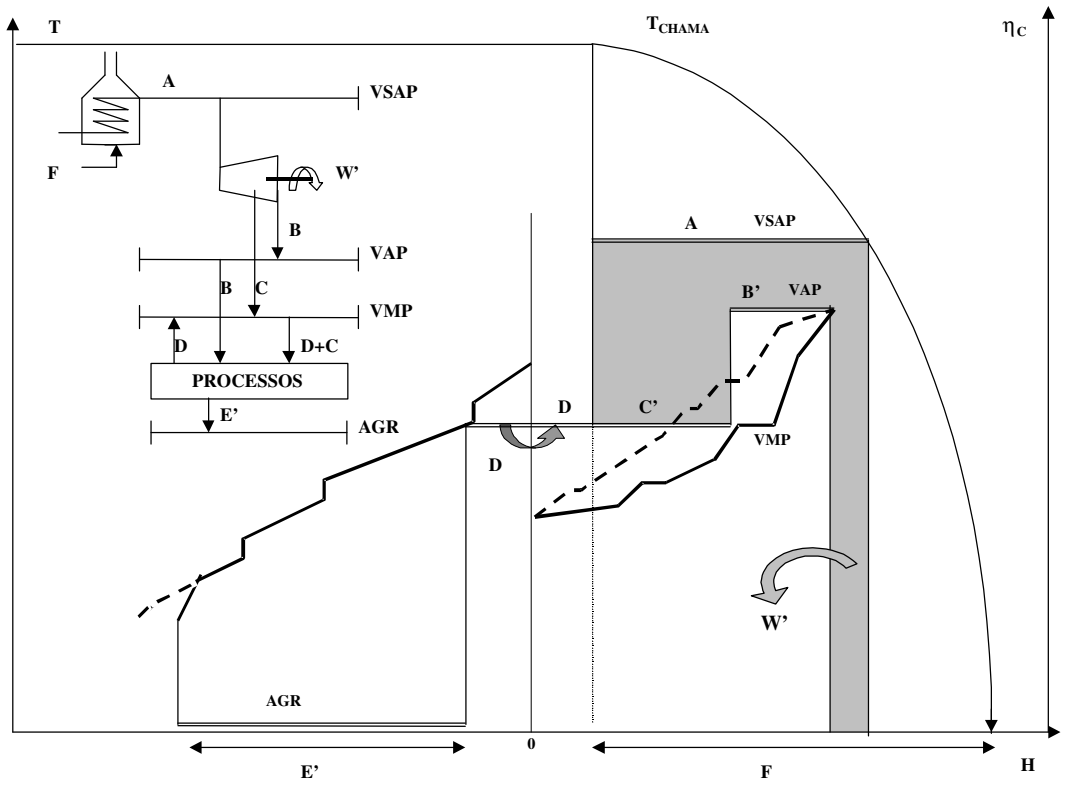


FIGURA 3.13 – Modificação nos Processos

As modificações nos processos, bem com parada ou inclusões de novas unidades operacionais irão causar modificações nas curvas quente e fria, e a análise irá mostrar claramente os impactos globais previstos. Neste exemplo, o impacto ocorre na AGR (E') e na distribuição de vapor extraído das turbinas (B' e C').

Os exemplos mostrados anteriormente são uma amostra do potencial da técnica de Análise Energética Global. Como foi visto, grandes modificações nas plantas industriais, tais como paradas provisórias ou permanentes de unidades; operação de novas unidades ou novos equipamentos; substituição de grandes máquinas; entre outros, podem ser facilmente analisadas sob o ponto de vista energético, tornando-a uma ferramenta de grande utilidade à engenharia tanto no projeto inicial, como em projetos de ampliações e modificações.

Como a Análise Energética Global trabalha com metas de energia, é possível avaliar o quão longe do mínimo consumo energético uma planta está, e a partir desta constatação, propor mudanças graduais que levem a um melhor desempenho energético da unidade. Estas mudanças podem ocorrer tanto nos processos, como no sistema de utilidades. A metodologia ainda permite ao projetista escolher a mais promissora opção de mudança, ainda no estágio inicial do projeto, determinando as metas sem a necessidade de projetar o sistema de utilidades.

Mesmo que a análise do complexo aponte para modificações de grande porte, que inviabilizem economicamente um projeto exclusivo para aumento de eficiência energética, os resultados podem ser utilizados para compor um guia de alocação de capitais, propondo re-direcionamento de investimentos já aprovados, (ampliações, trocas de máquinas, etc) que levem gradualmente à condição ótima.

No tangente a custos, a Análise Energética Global não os mostra diretamente, ela apenas trabalha com a configuração energética do complexo. Por isso, em uma análise de mudanças operacionais, onde é necessário um estudo de viabilidade econômica, a Análise Energética Global deve ser complementada por uma análise econômica.

Na Análise Energética Global, a valoração do vapor não é necessária, o que constitui-se em uma grande vantagem, uma vez que esta valoração é geralmente muito problemática. Como a análise olha o processo como um todo, ela só está preocupada com as suas fronteiras, e por isso só existem três componentes majoritários para o custo energético total: combustível da central de geração de vapor; combustível utilizado nos processos; e energia elétrica adquirida externamente (LINNHOFF, 1993b).

Uma outra grande utilidade da ferramenta é a sua aplicação nos estudos de limites de emissões atmosféricas. Como a análise determina o menor consumo energético possível do complexo, tem-se o limite mínimo possível de emissões, e consequentemente, as modificações e os investimentos necessários para sua redução e cumprimento dos requisitos legais de emissões, que tendem a ser um grave limitante operacional.

A Análise Energética Global preenche uma lacuna deixada pela Análise *Pinch* para complexos industriais. Com ela é possível obter uma fotografia energética do complexo, através da determinação gráfica das metas de consumo energético de uma forma simples e confiável antes mesmo do projeto. A sua fácil utilização e a alta aplicabilidade a habilita a ser uma ferramenta de grande utilidade à engenharia, uma vez que, além de indicar possíveis mudanças na planta, permite a rápida avaliação das mesmas, levando à otimização energética do complexo.

Capítulo 4 – Análise *Pinch* do Complexo

4.1 – Metodologia

Para consolidar os fundamentos e melhor explorar a ferramenta apresentada, a metodologia será aplicada a central de matérias primas e utilidades do Complexo Petroquímico de Camaçari: a Unidade de Insumos Básicos da BRASKEM – antiga COPENE, que se encaixa perfeitamente na definição de complexo apresentada no capítulo anterior, e cuja Análise Energética Global é totalmente aplicável.

Inicialmente serão apresentados os processos escolhidos e suas respectivas Curvas Compostas, obtidas através do software *WinPinch*, de autoria de ROGER ZEMP, que reproduz a técnica descrita no capítulo 2. Para alimentar o software foi realizado um amplo trabalho de levantamento de dados, no qual foi obtida a variação de temperatura e entalpia de todas as correntes de processo de cada unidade que compõe o complexo. Estes dados foram obtidos através de simulações realizadas no software comercial ASPEN PLUS.

4.2 – Descrição do Complexo

A partir da década de 50, o uso do plástico no Brasil intensificou-se, gerando a necessidade de criação de um parque industrial próprio para substituir as importações. Em meados dos anos 60, com a criação da Petroquímica União, nascia o primeiro Pólo Petroquímico brasileiro, em Capuava, no interior paulista. Posteriormente, a indústria petroquímica brasileira continuou a crescer com a criação do segundo Pólo Petroquímico em Camaçari na Bahia na década de 70 e do terceiro em Triunfo no Rio Grande do Sul já nos anos 80.

O segundo Pólo, objeto do estudo em questão, entrou em operação em 1978 com a entrada em operação da COPENE - Central de Matérias Primas e Utilidades do Complexo Petroquímico de Camaçari. Sendo o primeiro complexo totalmente planejado do país, ele foi concebido de tal forma que toda a produção de matérias primas e utilidades fosse concentrada em uma única empresa e distribuída por dutovias às indústrias vizinhas. Estruturado para funcionar de maneira integrada, o Pólo conta ainda com serviços especializados de uma

empresa-líder em Manutenção Industrial e uma empresa de Proteção Ambiental, que centraliza todo o tratamento final de efluentes líquidos e resíduos sólidos.

Toda a produção de matérias primas e utilidades é concentrada na Unidade de Insumos Básicos da BRASKEM (BRASKEM-IB), empresa criada em 2002 pela fusão da COPENE com diversas empresas da segunda geração da cadeia petroquímica, que recebe derivados de petróleo da Petrobrás, principalmente a nafta, e os transforma em petroquímicos básicos: Eteno, Propeno, Benzeno, Tolueno, Butadieno, Xilenos, Solventes, Gasolina Automotiva e outros. Além disto, a BRASKEM-IB fornece todas as utilidades necessárias à operação das demais plantas industriais: vapor a vários níveis de pressão, energia elétrica, água e ar comprimido.

A unidade industrial da BRASKEM-IB é composta por duas unidades de Olefinas, duas unidades de Aromáticos (cada uma composta por diversos processos independentes), uma unidade Termoelétrica e uma unidade de Tratamento de Água. A estrutura operacional destas unidades, todas interligadas pelo sistema comum de utilidades, foi de tal forma concebida, que o sistema global apresenta um alto grau de interdependência.

Os processos industriais que compõe a BRASKEM-IB são:

- **UO-1 – Unidade de Olefinas I**
    - A-1100 – Craqueamento de Nafta I
    - A-1200 – Compressão de Gás de Carga I
    - A-1300 – Demetanização e Purificação do Hidrogênio I
    - A-1400 – Fracionamento e Purificação do Etileno I
    - A-1500 – Sistema de Propileno Refrigerante I
    - A-1600 – Sistema de Etileno Refrigerante I

- **UO-2 – Unidade de Olefinas II**
    - A-4100 – Craqueamento de Nafta II
    - A-4200 – Compressão de Gás de Carga II

- A-4300 – Demetanização e Purificação do Hidrogênio II
- A-4400 – Fracionamento e Purificação do Etileno II
- A-4500 – Sistema de Propileno Refrigerante II
- A-4600 – Sistema de Etileno Refrigerante II

- **UA-1 – Unidade de Aromáticos I**
  - A-100 – Fracionamento de Nafta
  - A-300 – Hidrogenação de Gasolina de Pirólise I
  - A-350 – Extração de Butadieno I
  - A-400 – Hidrodessulfurização de Nafta
  - A-450 – Reforma Catalítica
  - A-500 –Extração de Aromáticos I
  - A-550 I – Fracionamento de Aromáticos
  - A-550 II – Fracionamento de Xilenos
  - A-650 – Isomerização de Xilenos - Isomar
  - A-700 – Extração de Paraxileno – Parex
  - A-6600 – Desproporcionamento de Tolueno II – Mobil

- **UA-2 – Unidade de Aromáticos II**
  - A-2300 – Hidrogenação de Gasolina de Pirólise II
  - A-2350 – Extração de Butadieno II
  - A-2500 –Extração de Aromáticos II
  - A-3500 – Extração de Aromáticos II

- A-2550 – Fracionamento de Aromáticos II
- A-5000 – MTBE I
- A-5100 – Separação de Buteno I
- A-5200 – Extração de Isopreno
- A-5300 – MTBE II

- **Utilidades**
  - UTE – Unidade Termoelétrica
  - UTA – Unidade de Tratamento de Água

- **Outras Unidades**
  - A-150 – Fracionamento de Gás Natural
  - A-900 – Sistema de Coleta de Condensados e geração de Vapor
  - A-1060 – Neutralização I
  - A-4060 – Neutralização II
  - Sistema de Flare
  - Tancagem
  - Transferências

4.3 – Análise *Pinch* dos Processos

Para o estudo em questão, foram utilizados apenas os processos de maior peso energético, que compreende os processos da UTE (Sistema de Utilidades), UO-1, UO-2 e UA-1. A figura 4.1 mostra um diagrama de blocos representando os processos produtivos e as correntes que os interligam, com destaque para os processos que compõem o estudo.

A seguir, cada processo envolvido será descrito e as suas Curvas Compostas serão apresentadas. Por uma questão de sigilo industrial, os dados

apresentados foram alterados, porém sem representar nenhuma distorção que comprometesse os resultados obtidos.

Para as Análises *Pinch* realizadas, foram utilizados ΔTMIN padrões para os processos (LINNHOFF et al, 1998). Para os processos a baixa temperatura, como as áreas frias das UO-1 e UO-2, foi utilizado 5°C, enquanto para os demais foi utilizado 10°C.

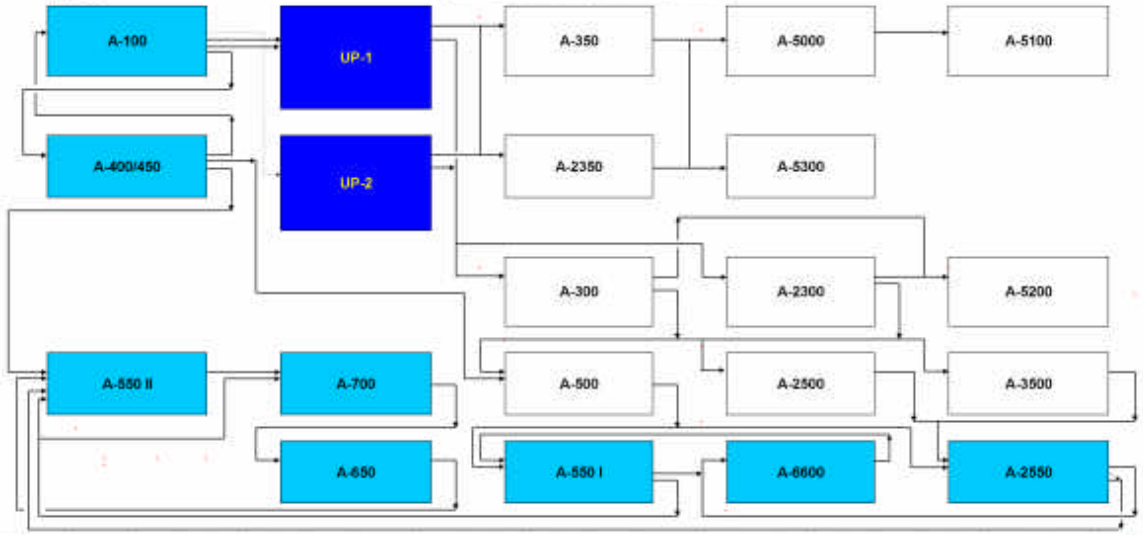


FIGURA 4.1 – Processos BRASKEM-IB

4.3.1 – UTE - Unidade Termoeletrica

A central termoeletrica – UTE – é responsável pela produção de vapor, energia elétrica e ar comprimido de todo o complexo, constituindo-se de um amplo e integrado sistema de cogeração.

O sistema de vapor é composto por quatro níveis de vapor superaquecido, conforme tabela 4.1.

Tabela 4.1

Vapor	Pressão (Kgf/cm^2)	Temperatura (°C)
V120	120	538
V42	42	385
V15	15	280
V3,5	3,5	190

O vapor é gerado no nível mais alto de pressão (V120) em 6 caldeiras aquotubulares, sendo 5 com capacidade de produzir 400 t/h e 1 caldeira de recuperação que gera 100 t/h, aproveitando os gases de exaustão de uma turbina a gás. Para geração deste vapor são prioritariamente utilizados os combustíveis residuais líquidos e gasosos gerados pelas unidades de processos, sendo o restante da matriz energética complementada por gás natural e óleo combustível adquirido externamente. Parte do vapor V120 é exportado para as unidades de Olefinas para servir como força motriz dos compressores de processo, sendo o restante rebaixado em 2 turbogeradores de contrapressão que geram o vapor V42 e V15, além de produzirem energia elétrica. O sistema ainda é composto por um terceiro turbogerador condensante que pode operar com V15 ou V3,5 e válvulas redutoras de pressão que são utilizadas para rebaixar o vapor em falhas das turbinas ou em casos especiais de operação. Algumas unidades de processo também reduzem vapor em turbinas ou até mesmo o produzem em fornos de processo.

O sistema elétrico trabalha com diversos níveis de tensão: 230kV, 69 kV, 13,8 kV, 4,16 kV e 480 V. A energia elétrica produzida internamente pelos turbogeradores complementa a energia fornecida pela concessionária para ser distribuída aos diversos usuários internos e externos. Além da energia gerada nas 3 máquinas de contrapressão citadas anteriormente, cada uma com uma capacidade de 45 MW, existem ainda duas turbinas à gás de 32 MW cada: uma operando em ciclo combinado com uma caldeira de recuperação na UTE; e outra alimentando ar quente para os fornos de pirólise na UO-2.

Toda a produção de V120 e energia elétrica está diretamente condicionada à demanda de vapor imposta pelas unidades consumidoras. A figura 4.2 ilustra de forma esquemática a unidade produtiva da UTE.

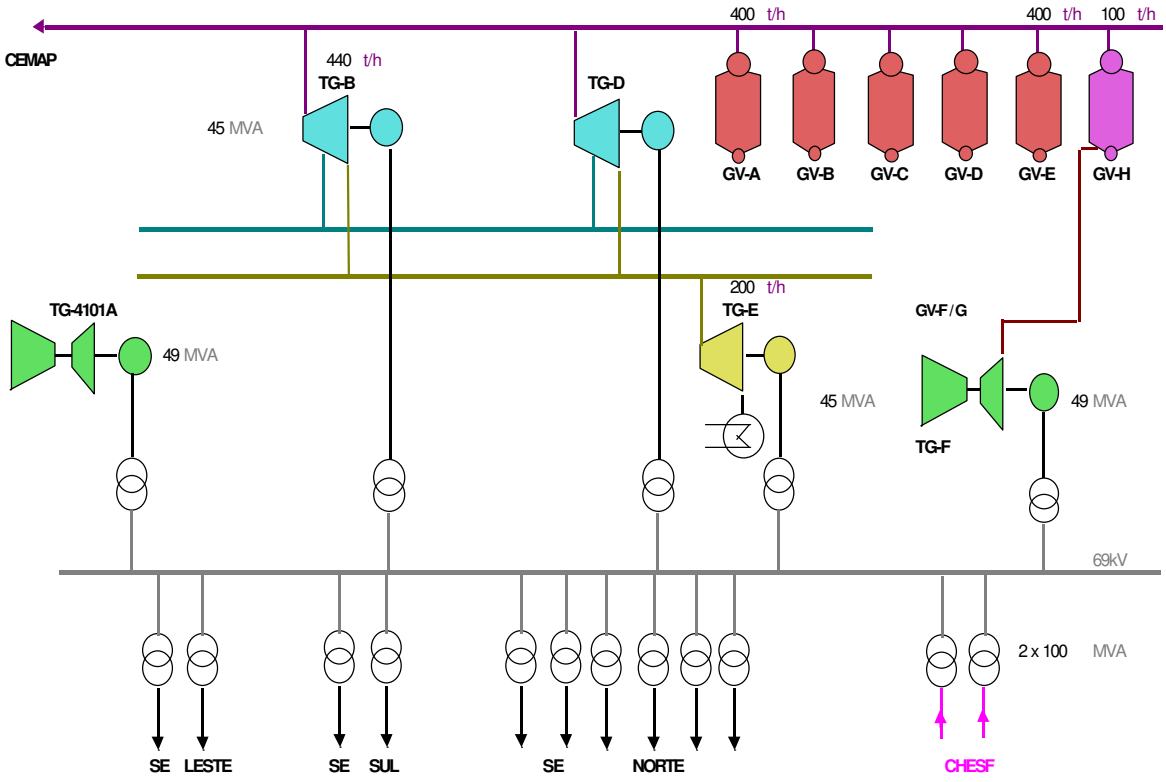


FIGURA 4.2 – Diagrama UTE

Além destas utilidades, o complexo industrial ainda possui um sistema de AGR a uma temperatura de 30°C e dois sistemas de refrigeração, internos às unidades de Olefinas, que serão descritos posteriormente.

No processo de geração de V120 na UTE, a água que alimenta as caldeiras é pré aquecida de 60 ºC até 260 ºC nos desaeradores e em dois pré-aquecedores a vapor (V42 e V15) que operam em série. Como esta necessidade de aquecimento destas correntes é muito relevante sob o ponto de vista energético, ela deve ser considerada como uma corrente de processo durante a Análise Energética Global.

A Curva Composta desta corrente esta mostrada na figura 4.3, representando uma necessidade de 596 Gcal/h.

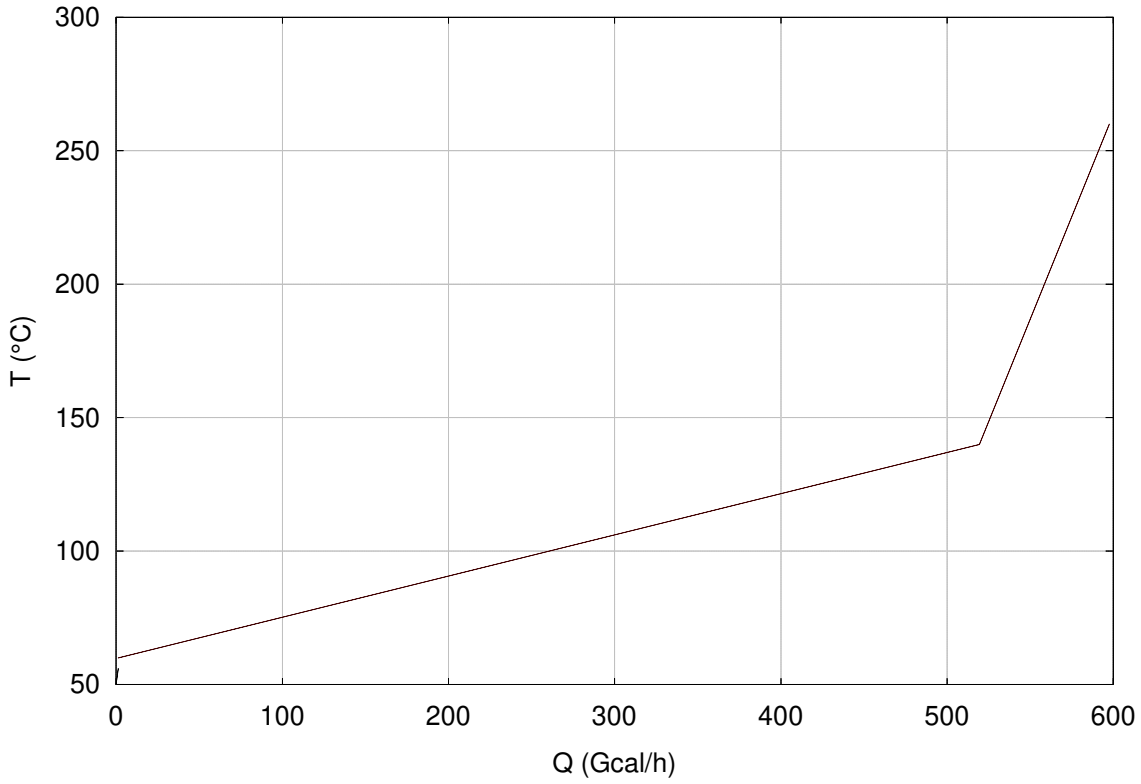


FIGURA 4.3 – Pré Aquecimento Água UTE

4.3.2 – UO-1 - Unidade de Olefinas I

A Unidade de Olefinas, a partir do craqueamento da Nafta, produz a principal matéria prima do complexo, Etileno, além de diversos outros subprodutos, que também são utilizados como matéria prima ou como carga das unidades de Aromáticos. Ela é composta por 6 áreas sequenciais, dividida em duas seções principais: Área Quente (A-1100) e Área Fria (A-1200/1300/1400/1500/1600).

Na **A-1100**, a nafta é craqueada em fornos de pirólise que operam em paralelo, onde além do Etileno, uma enorme gama de produtos também é formada. Com a finalidade de parar a reação de pirólise, o efluente dos fornos tem sua temperatura bruscamente reduzida em trocadores de calor especiais – TLE –

que geram vapor a 120 kgf/cm^2. Este vapor saturado é posteriormente superaquecido em dois superaquecedores para serem incorporados ao sistema de V120. Após resfriado, o efluente segue para a primeira seção de fracionamento, onde o gás de carga é separado e enviado à área fria para compressão e fracionamento criogênico. Os resíduos pesados oriundos destas separações são enviados para unidades de Aromáticos ou incorporados ao sistema de combustível líquido.

Na **A-1200**, o gás de carga é comprimido para possibilitar sua separação. A compressão é realizada em 5 estágios, com resfriamento/condensação entre cada um deles para melhorar a eficiência, sendo separados e removidos os compostos mais pesados. Nesta unidade o gás de carga ainda é tratado para remoção de gases ácidos e secagem.

Após sua secagem, o gás de carga é resfriado sucessivamente na **A-1300**, atigindo temperaturas baixas em vários níveis, em que são separadas as correntes líquidas até a purificação do H_2. Este resfriamento é conseguido através das próprias correntes de processo, já separadas e resfriadas, juntamente com os sistemas de refrigeração a Proprileno e Etileno. O resfriamento é realizado em trocadores de calor do tipo "*Kettle*" e em trocadores especiais tipo placas múltiplas, que utilizam diversas correntes dispostas em arranjos com alta eficiência de troca. Os hidrocarbonetos condensados nos primeiros quatro vasos alimentam a demetanizadora, separando o metano dos compostos mais pesados (C_2^+). Ainda nesta unidade o hidrogênio é purificado pela remoção do CO presente, pela passagem da corrente por um metanador com catalisador a base de níquel, e eliminação da água resultante da reação, primeiro por resfriamento e, posteriormente em uma peneira molecular.

A **A-1400** pode ser divida em seções como descrito a seguir. Primeiro o Sistema de C_2 , que tem por finalidade separar a corrente de C_2 dos hidrocarbonetos mais pesados oriundos do fundo da demetanizadora; além da hidrogenação seletiva do acetileno presente na corrente C_2 ; secagem e separação do Etileno do Etano por destilação criogênica. O Etileno produto pode ser diretamente enviado aos consumidores ou armazenado, enquanto o etano é reciclado para ser craqueado nos fornos de pirólise ou é enviado para a corrente

de gás combustível. Já o Sistema de C_3 , tem por finalidade separar os hidrocarbonetos C_3 provenientes do fundo da "*stripper*" de condensados da A-1200 e da deetanizadora; além da hidrogenação seletiva do Propadieno/Metilacetileno que são convertidos a Propileno/Propano; e finalmente, após secagem, o fracionamento de uma parte da corrente C_3 para obter Propeno a alta pureza (Propeno grau polímero), que é enviado para os consumidores ou para armazenagem criogênica. A parcela de C_3 não fracionada corresponde ao Propeno grau químico, que possui menor pureza, e também pode ser enviada para consumo direto ou para tancagem à temperatura ambiente. Além destes dois sistemas, a debutanizodora proporciona a separação das correntes C4 e C5 oriundos do fundo das deproponizadoras, que serão utilizados como cargas de outras unidades da central de matérias primas.

As duas áreas restantes (**A-1500** e **A-1600**) tem por finalidade a produção de utilidades refrigerantes a partir dos próprios produtos, para utilização nas diversas destilações criogênicas existentes no processo. A A-1500 tem como finalidade a produção de Proprileno refrigerante para proporcionar níveis de refrigeração menores que os conseguidos pela água de refrigeração, a fim de possibilitar o resfriamento e/ou condensação de algumas correntes da planta. O sistema é constituído por quatro estágios de compressão, e, consequentemente, quatro níveis de refrigeração a 21°C, 3°C, -24°C e –40°C, respectivamente nas pressões 9,0 kgf/cm^2, 5,5 kgf/cm^2 ,1,5 kgf/cm^2 e 0,4 kgf/cm^2. A A-1600 produz Etileno refrigerante, proporcionando níveis de refrigeração inferiores aos obtidos pelo sistema de Propileno refrigerante. O sistema é constituído por três estágios de compressão, com os seguintes níveis de refrigeração: -54°C, -75°C e -101°C, com pressões de 8,12 kgf/cm^2, 3,1 kgf/cm^2 e 0,06 kgf/cm^2.

Para a Análise *Pinch*, a UO-1 foi dividida em duas seções: Área Quente e Área Fria, por apresentarem operações bem distintas. As Curvas Compostas destas áreas são apresentadas nas figuras 4.4 e 4.5 e tabelas 4.2 e 4.3. As correntes de processo das unidades A-1500 e A-1600 não foram incorporadas às curvas compostas uma vez que estas duas unidades tem por finalidade produzir utilidades que são utilizadas no próprio processo.

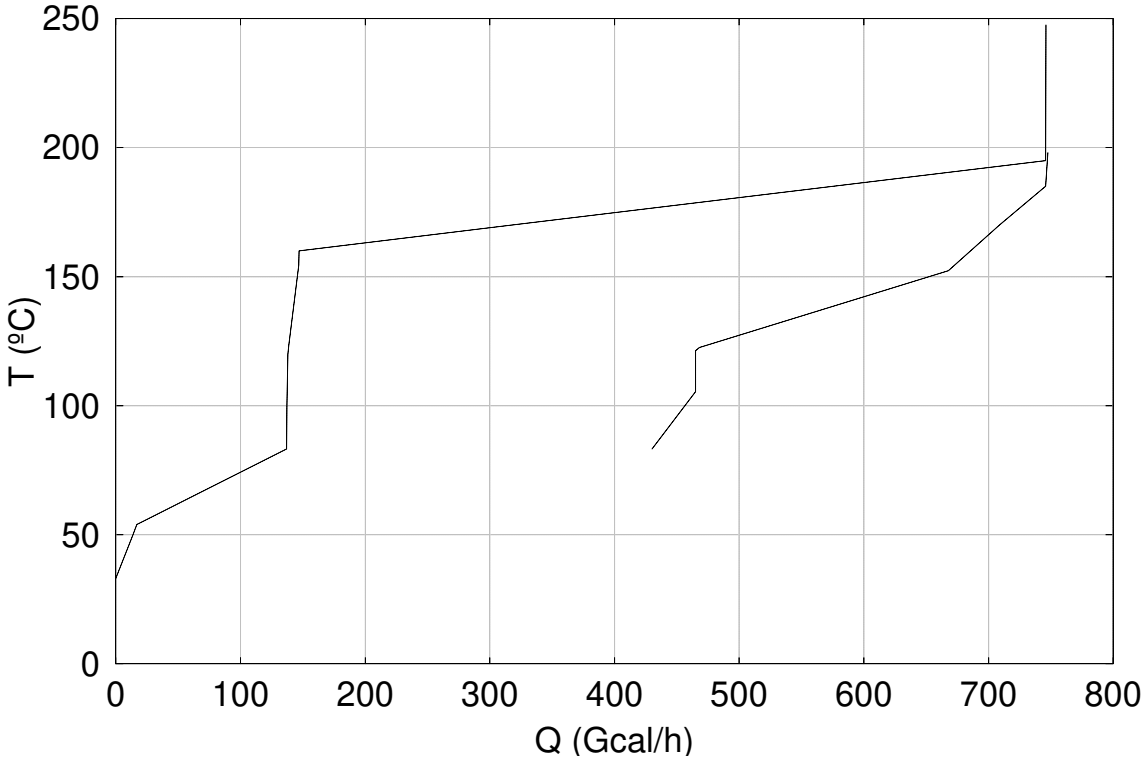


FIGURA 4.4 – Curva Composta UO-1 (Área Quente)

Tabela 4.2

Análise *Pinch* UO-1 (Área Quente)	
ΔTMIN (°C)	10
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	190
Utilidade Quente (Gcal/h)	1,466
Utilidade Fria (Gcal/h)	430,12

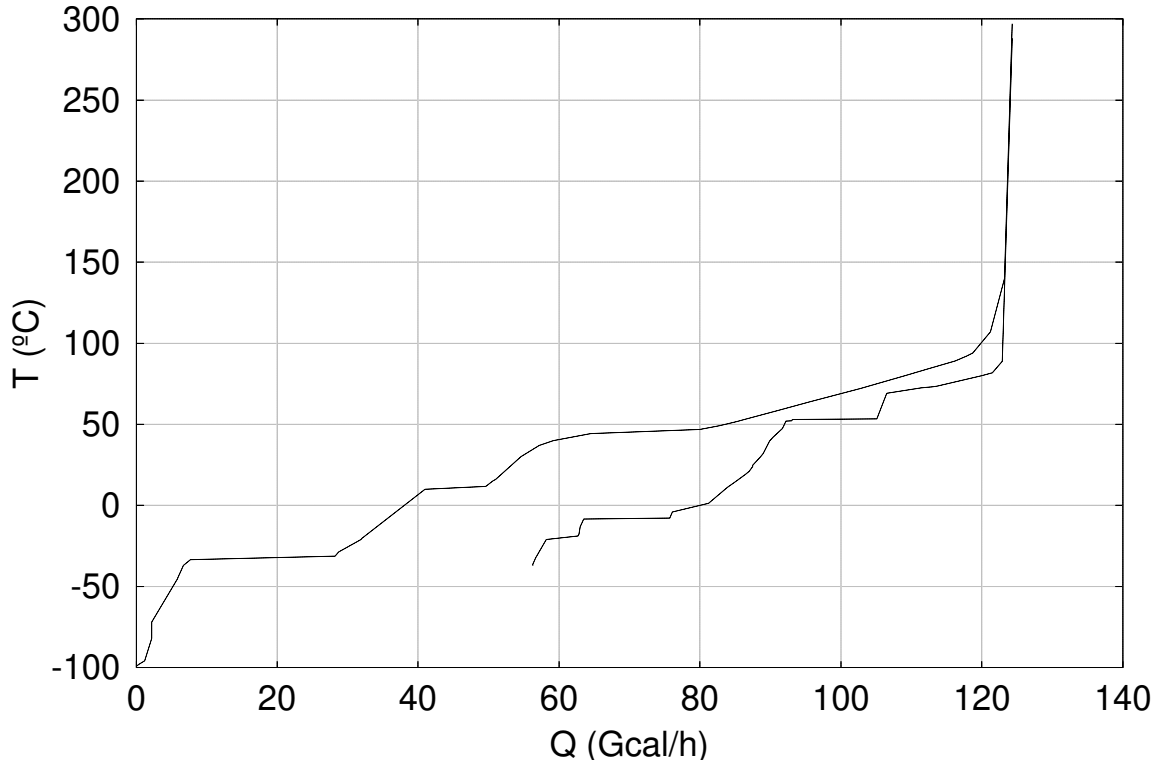


FIGURA 4.5 – Curva Composta UO-1 (Área Fria)

Tabela 4.3

Análise *Pinch* UO-1 (Área Fria)	
ΔTMIN (°C)	5,0
N° *Pinch*s	0
Temperatura do *Pinch* (°C)	-
Utilidade Quente (Gcal/h)	-
Utilidade Fria (Gcal/h)	56,251

A análise da UO-1 apresenta uma característica singular por não possuir ponto de *Pinch*. Isto se deve ao fato do processo ser auto suficiente em relação ao aquecimento, não necessitando de utilidade quente. É importante relembrar que os valores obtidos da Análise *Pinch* são metas de consumo de energia, ou seja, a mínima quantidade teórica de energia que se pode consumir nesta unidade. Porém, não necessariamente é sempre possível atingir tal configuração, devido a restrições impostas pela viabilidade operacional do processo.

4.3.3 – UO-2 - Unidade de Olefinas II

A Unidade de Olefinas II (UO-2) possui um processo bastante semelhante à UO-1 anteriormente descrita, ocorrendo apenas mudanças sutis entre elas. As grandes diferenças ocorrem principalmente na região dos fornos de pirólise, onde na UO-2 existe uma turbina a gás que gera energia elétrica para o sistema e, por realizar a combustão com um grande excesso de ar, alimenta até seis fornos com ar quente, aumentando assim a eficiência energética do sistema. Além disto, uma outra grande diferença existente está na geração de vapor nos fornos. Diferentemente da UO-1, onde cada forno gera vapor saturado para ser superaquecido em dois fornos a parte, na UO-2, cada forno, por possuir um projeto mais eficiente, que permite uma melhor recuperação de calor, já produz vapor de 120kgf/cm^2 superaquecido, pronto para se incorporar ao sistema de V120.

As demais áreas: **A-4100**, **A-4200**, **A-4300**, **A-4400**, **A-4500** e **A-4600** são análogas às respectivas áreas da UO-1. A figura 4.6 apresenta a Curva Composta da Área Quente e figura 4.7 da Área Fria da UO-2. As tabelas 4.4 e 4.5 explicita os valores da análise.

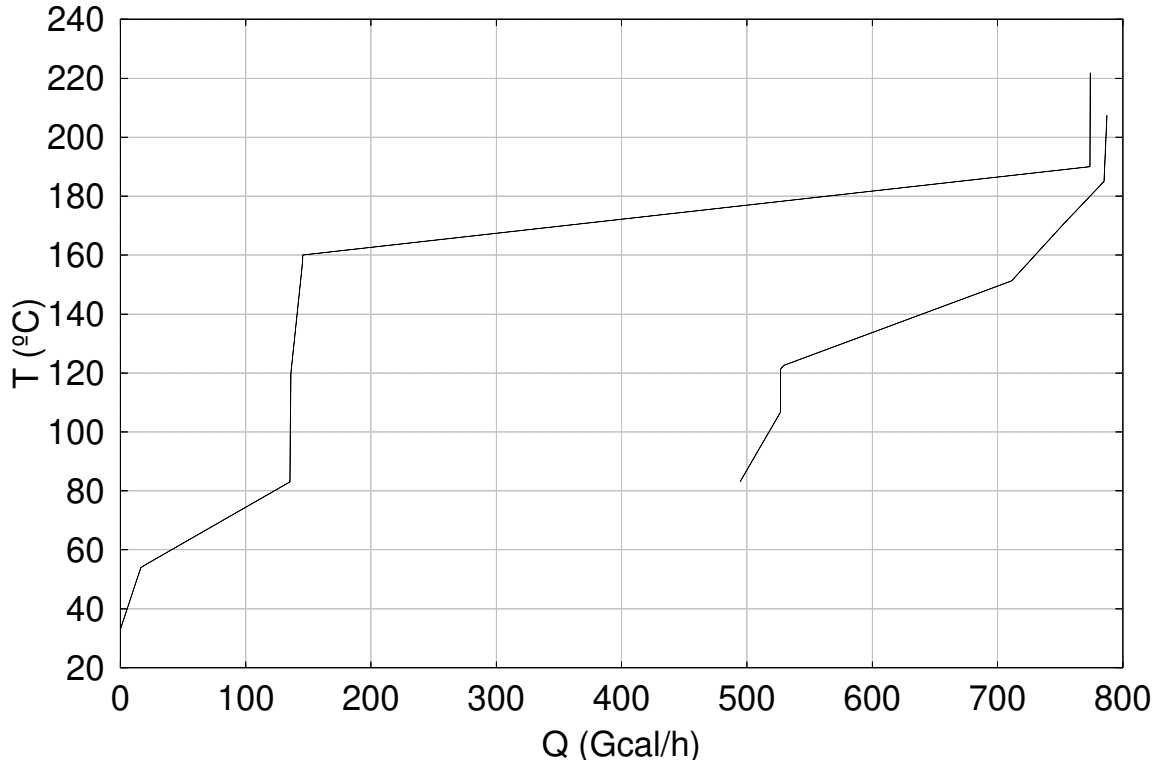


FIGURA 4.6 – Curva Composta UO-2 (Área Quente)

Tabela 4.4

Análise *Pinch* UO-2 (Área Quente)	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	185,5
Utilidade Quente (Gcal/h)	13,214
Utilidade Fria (Gcal/h)	494,61

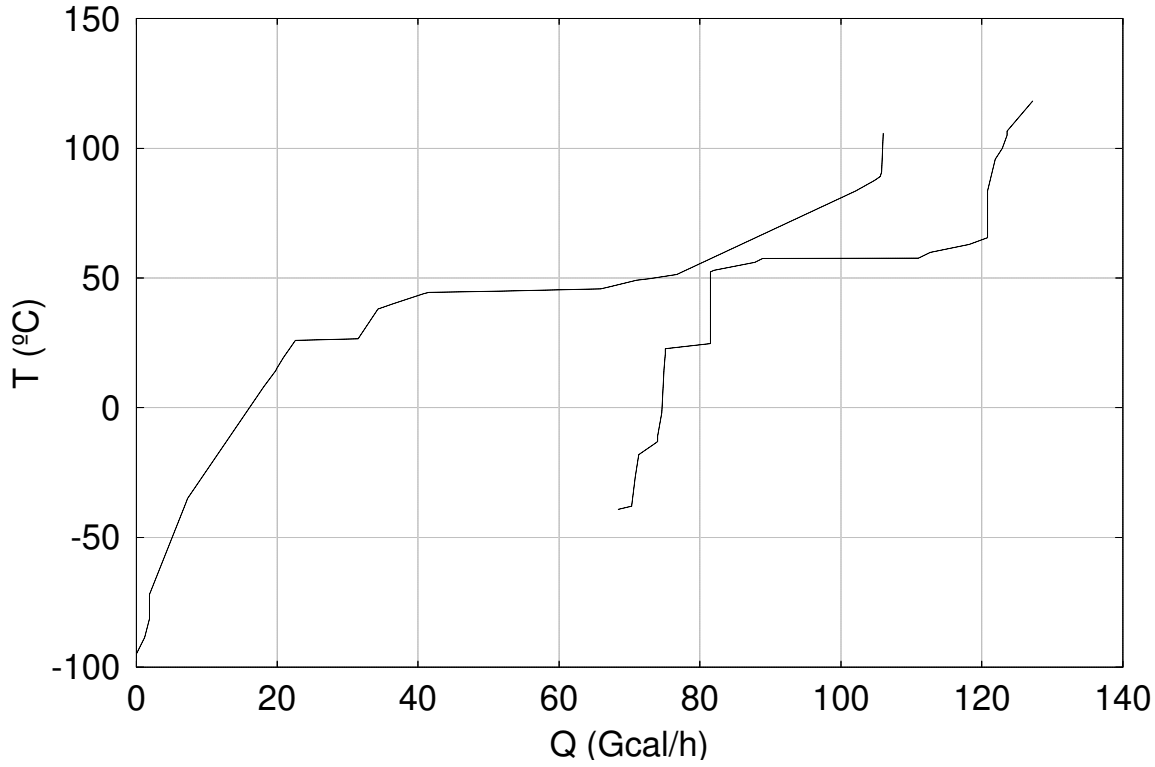


FIGURA 4.7 – Curva Composta UO-2 (Área Fria)

Tabela 4.5

Análise *Pinch* UO-2 (Área Fria)	
ΔTMIN (°C)	5,0

N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	55,5
Utilidade Quente (Gcal/h)	21,254
Utilidade Fria (Gcal/h)	68,371

4.3.4 – UA-1 - Unidade de Aromáticos I

A Unidade de Aromáticos I (UA-1) é composta de diversos processos relativamente independentes entre si. Por este motivo, a análise energética de cada área será realizada separadamente, diferente da realizada nas unidades de Olefinas, onde as áreas são de tal forma interligadas, que não podem operar separadamente, funcionando como uma única unidade.

É importante ressaltar as vantagens desta forma de análise separada que foi realizada na UA-1, uma vez que ela permite analisar o impacto de cada unidade no perfil energético do complexo.

A primeira unidade a ser analisada é a **A-100** – Fracionamento de Nafta – cuja finalidade é produzir um corte intermediário na nafta, adequando-a para a produção de aromáticos na unidade de Reforma Catalítica (A-450). A unidade processa a Nafta Bruta, bem como algumas correntes oriundas de outras unidades de Aromáticos, separando-as em 3 outros cortes além da Nafta Média: GLP, Nafta Leve e Nafta Pesada, que são processadas nas unidades de Olefinas. O processo de separação é realizado por destilação direta, realizada em 3 torres de fracionamento, contando ainda com uma lavagem cáustica para tratamento do GLP. Na primeira coluna é realizada a remoção pelo topo da maior parte dos hidrocarbonetos de 6 átomos de carbono e mais leves, com o intuito de minimizar o envio para a Reforma dos compostos precursores da formação de Benzeno. A corrente de fundo segue para outra torre, onde é separada a Nafta Média da Pesada, buscando a maximização de hidrocarbonetos com até 8 átomos de carbono na corrente de Nafta Média, evitando a presença de compostos que possam formar aromáticos C9 na Reforma. A corrente de topo da primeira coluna ainda sofre uma separação para recuperar o GLP contida nesta corrente.

Os resultados da Análise *Pinch* da A-100 são mostrados na figura 4.8 e na tabela 4.6.

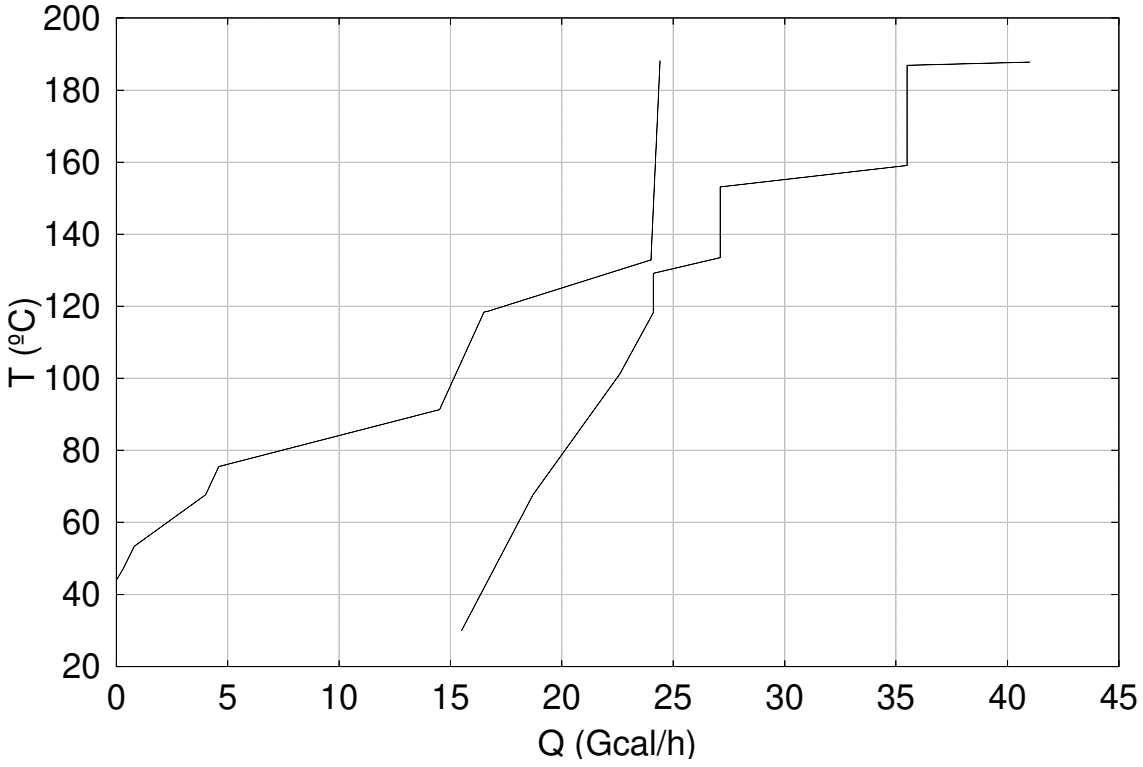


FIGURA 4.8 – Curva Composta A-100

Tabela 4.6

Análise *Pinch* A-100	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	134,2
Utilidade Quente (Gcal/h)	16,599
Utilidade Fria (Gcal/h)	15,483

A Nafta Média produzida na A-100 é então encaminhada à **A-400** – Hidrodessulfurização de Nafta, que tem por finalidade a retirada de impurezas da Nafta (nitrogênio, oxigênio, metais e, principalmente, enxofre), para ser

processada na Reforma Catalítica. Nesta unidade é realizada a hidrogenação dos compostos de enxofre, nitrogênio e oxigênio, que se apresentam sob a forma de mercaptanas, sulfetos, dissulfetos, sulfetos cíclicos, piridina, quinolina, pirolidina e fenóis; saturação das olefinas cíclicas; remoção de metais e haletos. Para isso, é utilizado um reator axial com catalisador de Cobalto/Molibdênio e Níquel/Molibdênio, com reciclo de gás e um consumo de hidrogênio proveniente da A-450. A carga do reator é aquecida em um forno de processo. Os sais formados nas reações são retirados pela injeção de água e posterior separação em uma coluna, que elimina água ácida e H_2S pelo topo.

O fundo desta coluna alimenta a **A-450** – Reforma Catalítica, que tem por objetivo transformar as parafinas e naftênicos, presentes na Nafta Média, em aromáticos. As transformações ocorrem ao longo de 4 reatores, com catalisadores de Platina/Rênio em base de Alumina, que operam em série, intercalados por 4 fornos de pré-aquecimento. O efluente desta reação é condensado, sendo a parte gasosa, com teor de H_2 acima de 60%, reciclada para os reatores para evitar a formação de coque. A parte líquida é enviada para a depentanizadora para retirada da parcela leve ($C5^-$), e posteriormente para uma deheptanizadora, onde separa-se a fração C6/C7 no topo e $C8^+$ no fundo. Estas correntes são destinadas as outras unidades para produção de Benzeno, Tolueno, Xilenos (para e Orto-Xilenos e Xilenos mistos) e solventes C9 e $C10^+$.

Como as unidades A-400 e A-450 somente operam como uma única unidade, a Análise *Pinch* foi realizada conjuntamente. Os resultados são apresentados na figura 4.9 e na tabela 4.7.

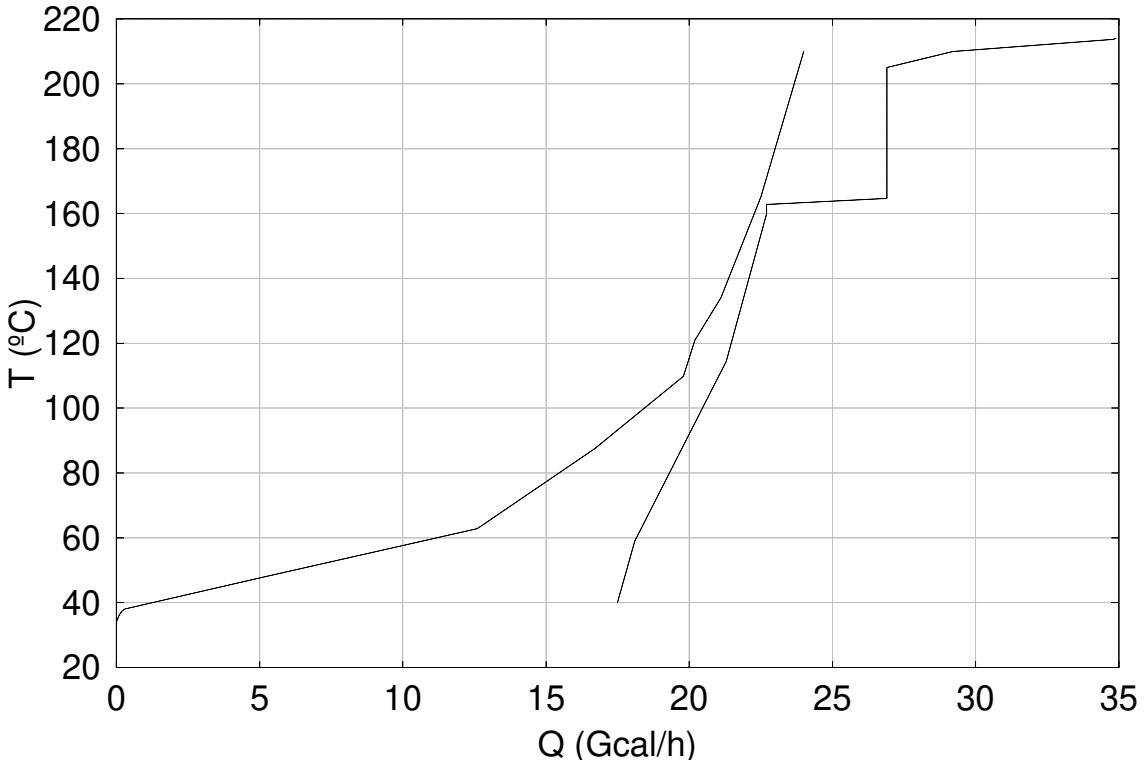


FIGURA 4.9 – Curva Composta A-400/450

Tabela 4.7

Análise *Pinch* A-400\450	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	167,8
Utilidade Quente (Gcal/h)	10,862
Utilidade Fria (Gcal/h)	17,532

Após a Reforma Catalítica, os aromáticos, juntamente com correntes provenientes das unidades de Hidrogenação de Gasolina de Pirólise (A-300 e A-2300) seguem para as unidades de Extração de Aromáticos (A-500, A-2500 e A-3500), onde é recuperada uma corrente rica em aromáticos, que são encaminhadas para as **A-550-I** e **A-2550** – Fracionamento de Aromáticos, onde serão produzidos Benzeno, Tolueno e Xilenos de alta pureza. A separação é realizada por destilação binária em três torres que operam em série e são

alimentadas pelo produto de fundo de cada uma delas. Primeiramente, a carga é tratada com argila ativada, que remove componentes insaturados presentes, como olefinas e diolefinas que comprometem a pureza dos aromáticos no referente à cor e ainda são prejudiciais à peneira molecular da A-700, que recebem parte destas correntes. A primeira coluna é a Torre de Benzeno que produz uma corrente de 99,95% de Benzeno retirada lateralmente, e pelo topo uma corrente que retorna à extração. A corrente de fundo alimenta a Torre de Tolueno, onde o Tolueno é extraído no topo e a corrente de fundo, composta por Xilenos e C9, segue para a Torre Separadora de C8/C9, onde os Xilenos são obtidos na corrente de topo e a fração C9 pelo fundo.

A Análise *Pinch* das unidades A-550-I e A-2550 são mostradas, respectivamente, nas figuras 4.10 e 4.11 e tabelas 4.8 e 4.9.

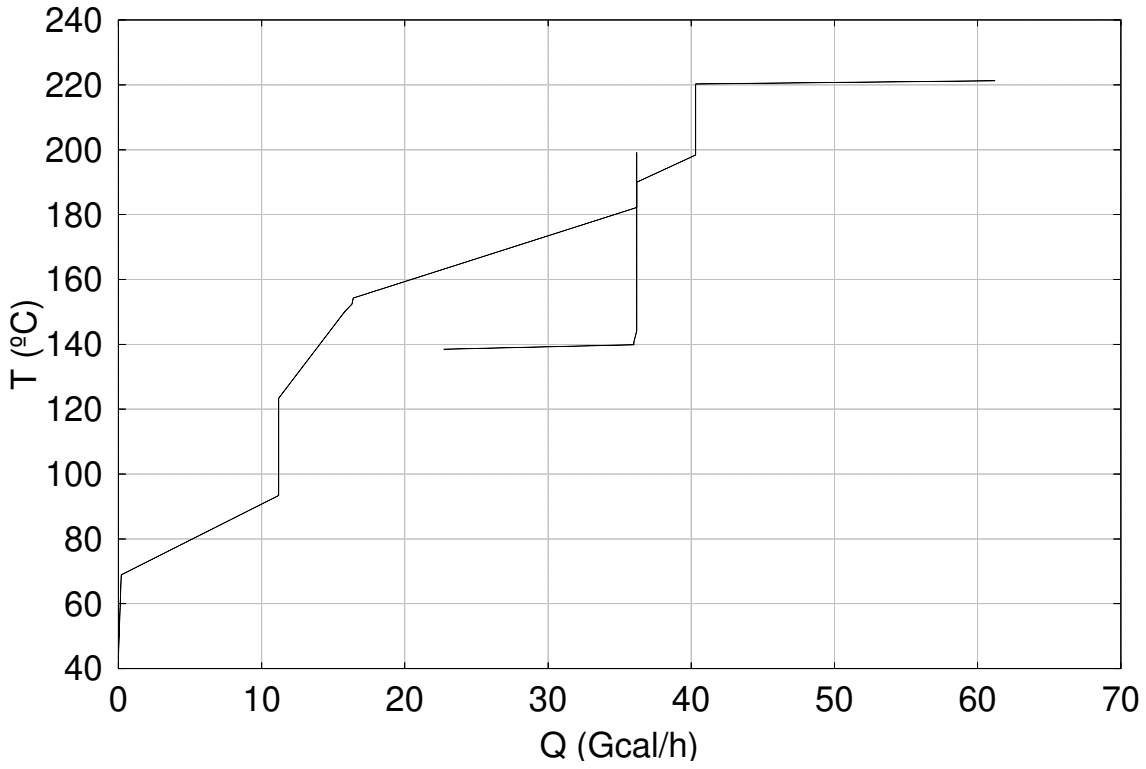


FIGURA 4.10 – Curva Composta A-550-I

Tabela 4.8

Análise *Pinch* A-550 I	
ΔTMIN (°C)	10,0

N° *Pinch*s	3
Temperatura do *Pinch* (°C)	195,0 / 194,2 / 177,0
Utilidade Quente (Gcal/h)	24,981
Utilidade Fria (Gcal/h)	22,746

A A-550-I apresenta uma outra singularidade: Nela existem três pontos de *Pinch* para o ΔTmin utilizado.

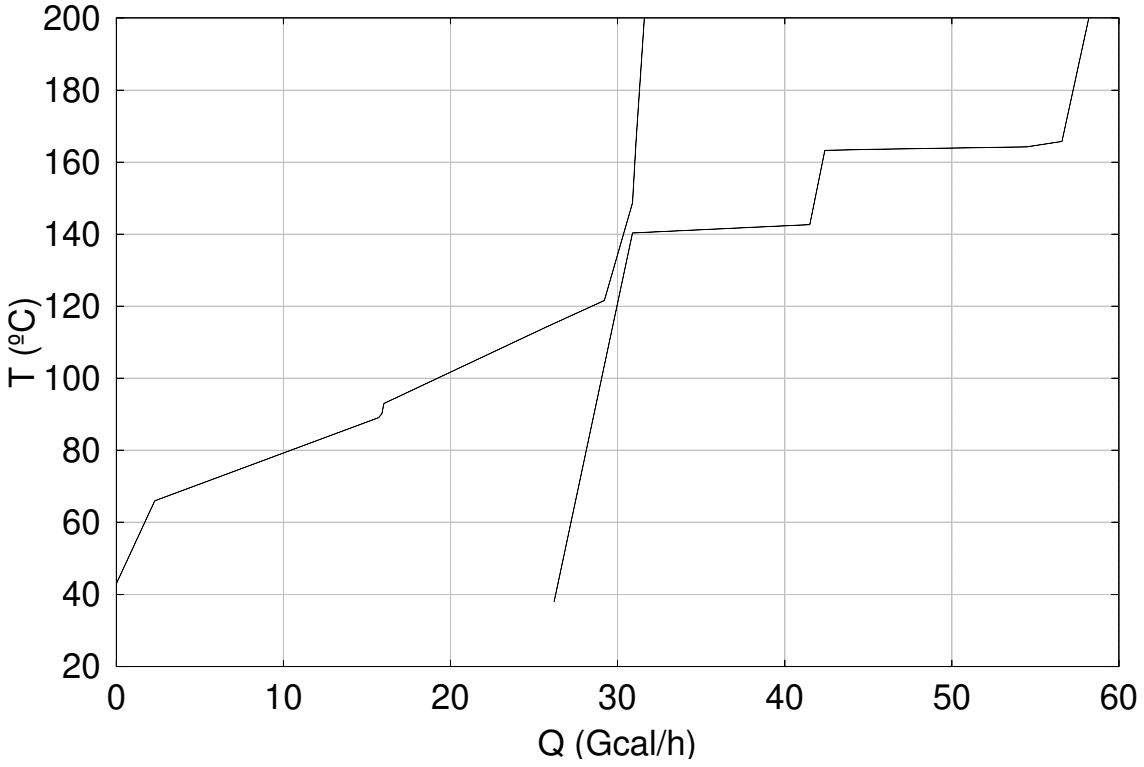


FIGURA 4.11 – Curva Composta A-2550

Tabela 4.9

Análise *Pinch* A-2550	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	143,7
Utilidade Quente (Gcal/h)	25,440

Utilidade Fria (Gcal/h)	28,138

Além da separação descrita nas unidades acima, na **A-550-II** – Fracionamento de Xilenos ocorre a separação do Orto-xileno com uma pureza mínima de 98%. Tendo como carga o reformado pesado da A-450 e os Xilenos das A-550-I, A-2550 e A-650, a separação é realizada em três seções. Na primeira operam duas torres em paralelo que separam Orto-xilenos e aromáticos pesados pelo fundo e os demais Xilenos e Etil-benzeno pelo topo, que seguem para a A-700. O fundo destas colunas alimentam a Torre de Orto-xileno que separa o Orto-Xileno pelo topo. O fundo desta torre alimenta a última seção que separa o C9 aromático pelo topo e o C10+ aromático pelo fundo.

A figura 4.12 e a tabela 4.10 mostram a Análise *Pinch* da A-550-II.

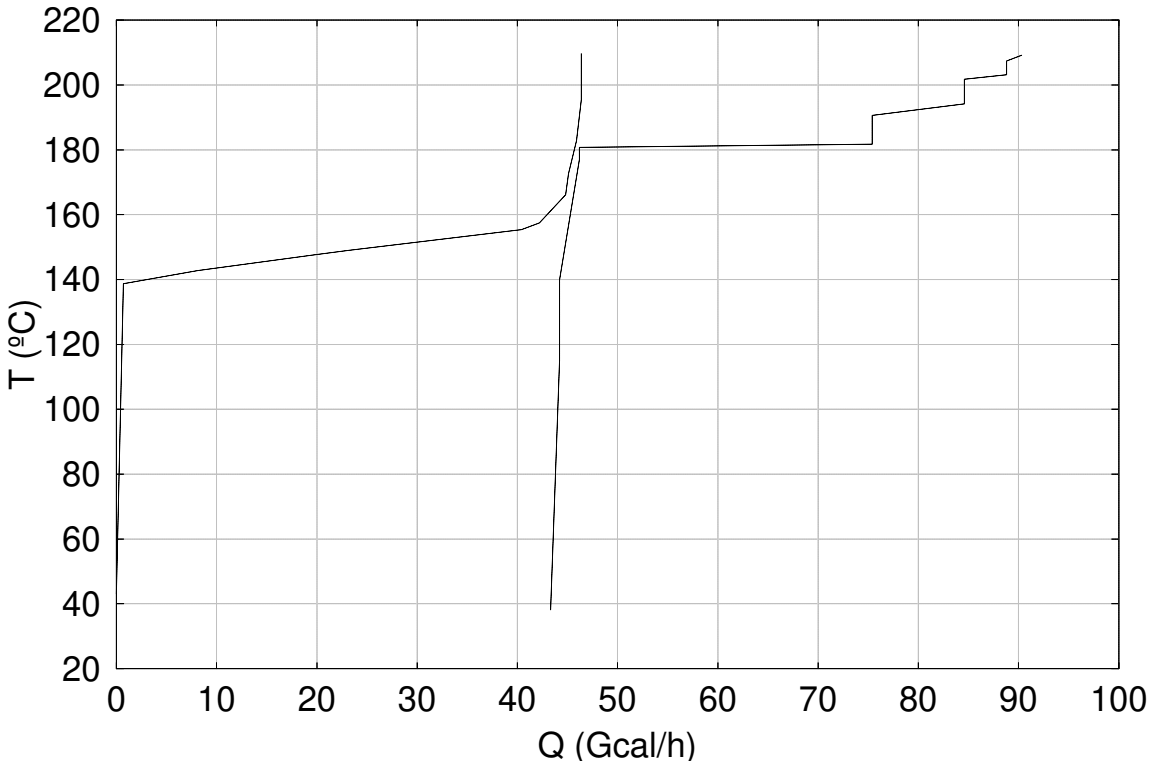


FIGURA 4.12 – Curva Composta A-550-II

Tabela 4.10

Análise *Pinch* A-550 II	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	185,8
Utilidade Quente (Gcal/h)	43,862
Utilidade Fria (Gcal/h)	43,288

O Tolueno produzido nas unidades de fracionamento é enviado à **A-6600** – Desproporcionamento de Tolueno para produção de Xilenos com um alto teor de Para-xileno, que será recuperado na A-700. A carga é inicialmente sêca em um vaso coalescedor e em secadores com peneira molecular, sendo então misturada com o gás de reciclo rico em hidrogênio e, antes de entrar no reator, aquecida em intercambiadores de calor e em um forno de processo. No reator ocorre o desproporcionamento do Tolueno em Xilenos (ricos em Para-xileno) e Benzeno, que ocorre na fase vapor. O efluente, após pré-aquecer a carga, passa por um vaso separador a alta pressão, onde alguns gases leves e hidrogênio são retirados pelo topo e o fundo segue para a torre estabilizadora, que por sua vez também separa os gases leves pelo topo, e uma corrente contendo C6+ pelo fundo. Esta corrente passa por um Torre de Argila e é então enviada para a unidade de fracionamento A-550-I, onde o Benzeno, Tolueno, Xilenos e C9+ são separados.

A Análise *Pinch* da A-6600 encontra-se na figura 4.13 e na tabela 4.11.

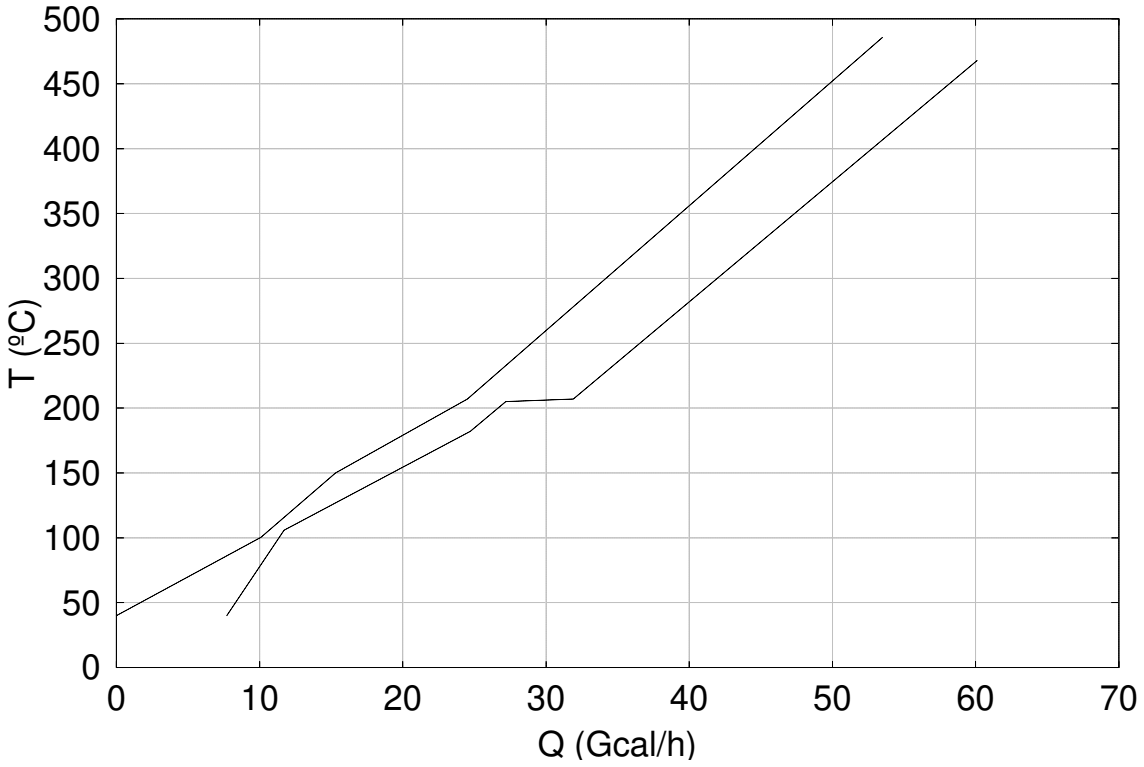


FIGURA 4.13 – Curva Composta A-6600

Tabela 4.11

Análise *Pinch* A-6600	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	110,8
Utilidade Quente (Gcal/h)	6,556
Utilidade Fria (Gcal/h)	7,663

Ainda com objetivo de produzir Para-xileno, a **A-650** - Isomerização de Xilenos processa uma mistura de aromáticos C8 oriunda da A-700. A mistura, com baixa presença de Para-xileno e quantidade de Meta-xileno e Etil-benzeno acima do equilíbrio, é misturado com o gás de reciclo, aquecido em um forno de processo e introduzido no reator, onde sofre isomerização, readquirindo a composição de equilíbrio. O efluente do reator passa por um vaso separador, onde

o hidrogênio é reciclado para o reator, e segue para a deheptanizadora, onde os aromáticos pesados que foram craqueados no reator são separados pelo topo. O fundo da coluna com a mistura de Xilenos é enviado para a A-700 para separação do Para-xileno, passando antes por uma Torre de Argila.

A Análise *Pinch* da A-650 encontra-se na figura 4.14 e tabela 4.12.

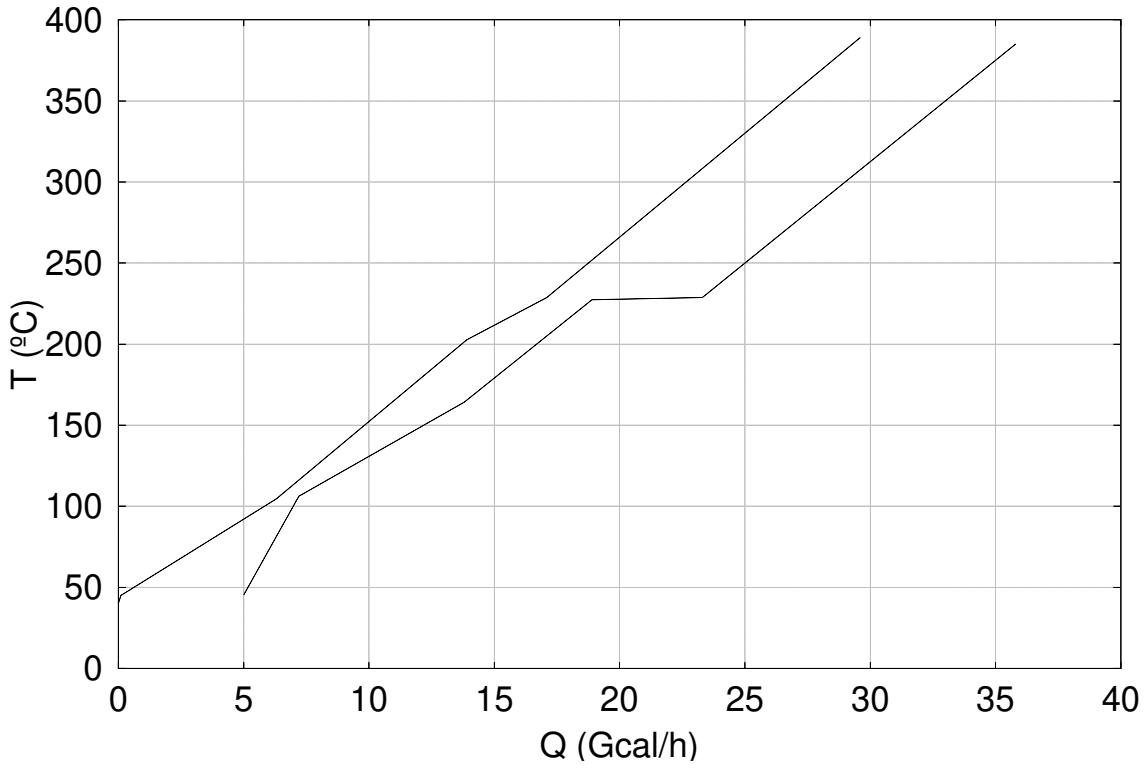


FIGURA 4.14 – Curva Composta A-650

Tabela 4.12

Análise *Pinch* A-650	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	1
Temperatura do *Pinch* (°C)	111,2
Utilidade Quente (Gcal/h)	6,229
Utilidade Fria (Gcal/h)	5,037

A mistura C8 aromáticos proveniente da unidade de fracionamento é encaminhada à **A-700** – Extração de Paraxileno, para produção de Paraxileno e de uma corrente naftênica C8 que alimenta a A-650. A carga entra em uma adsorvedora, onde o Paraxileno é preferencialmente adsorvido e separado dos demais componentes. O Paraxileno separado é recuperado dos poros do adsorvente pela sua substituição por outro líquido de ponto de ebulição diferente: o dessorvente. A coluna adsorvedora é um complexo sistema composto por vários leitos interligados por uma válvula rotativa de 24 vias, cuja operação simula um leito móvel contracorrente de um sólido e um líquido – Sistema Parex (UOP). Duas correntes líquidas saem da coluna: Paraxileno diluído com dessorvente e outros componentes da carga diluídos pelo dessorvente. A primeira alimenta uma coluna, onde o dessorvente é recuperado pelo fundo e pelo topo, uma mistura naftênica C8 com menos Paraxileno que a condição de equilíbrio, que serve de carga da A-650. A segunda corrente alimenta uma outra torre para recuperação do dessorvente pelo fundo, que retorna à adsorvedora, e cujo topo alimenta duas colunas em paralelo que separam Tolueno pelo topo e Paraxileno a alta pureza pelo fundo.

A Análise *Pinch* da A-700 está representada na figura 4.15 e tabela 4.13.

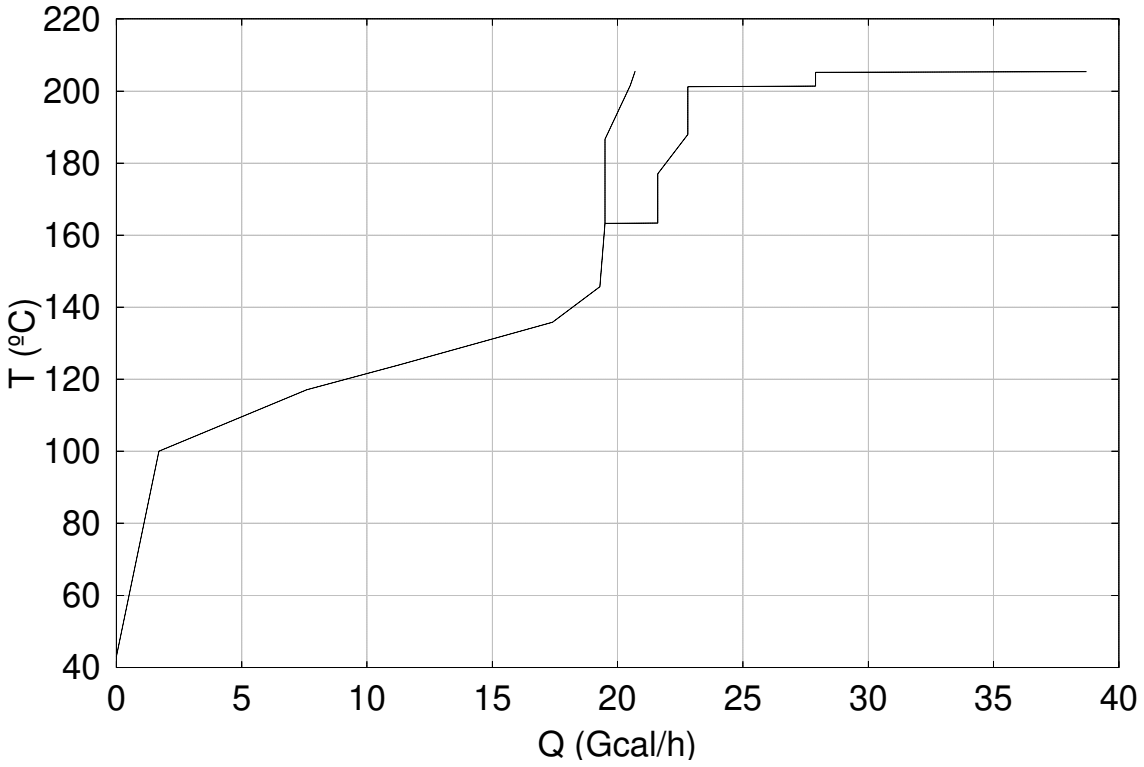


FIGURA 4.15 – Curva Composta A-700

Tabela 4.13

Análise *Pinch* A-700	
ΔTMIN (°C)	10,0
N° *Pinch*s	2
Temperatura do *Pinch* (°C)	168,3 / 158,3
Utilidade Quente (Gcal/h)	17,967
Utilidade Fria (Gcal/h)	19,453

4.3.5 – Transferências de Vapor

Por produzir vapor para todo o Polo Petroquímico, o sistema de utilidades apresenta um aspecto singular: parte do vapor gerado é enviado para fora do complexo, para suprir as demais empresas.

Esta particularidade deve ser abordada de uma forma especial na Análise Energética Global, uma vez que estas correntes, apesar de serem geradas pelo sistema de utilidades não podem ser utilizadas para aquecimento das correntes de

processo do complexo, devendo ser tratadas à parte, através de uma abordagem não tradicional.

O vapor é comercializado nos níveis de pressão V42 e V15, com as seguintes quantidades médias:

- V42 = 195 t/h
- V15 = 535 t/h

A partir destas Análises *Pinch* é possível realizar Análise Energética Global, como visto no capítulo posterior.

4.4 – Levantamento de Dados

Para a construção das curvas mostradas neste capítulo foi necessário realizar um amplo trabalho de levantamento de dados. Primeiramente foram escolhidas as unidades mais importantes sob o ponto de vista energético, e selecionadas as simulações que melhor as representassem. Destas simulações, realizadas no software ASPEN PLUS, foi extraída as informações de variação de temperatura e variação de entalpia de cada corrente dos processos analisados. É importante ressaltar que o conceito de corrente de processo utilizado na Análise *Pinch* não considera a estrutura de troca térmica existente, mas sim os objetivos de temperatura (temperatura final e inicial) de cada corrente. Nesta etapa foram analisadas mais de 500 correntes, sendo a metade delas selecionadas para a análise final.

Para assegurar que os Perfis Térmicos reflitam a realidade do complexo, o ideal seria realizar medições e análises em cada corrente utilizada. Porém, este trabalho se torna impraticável para complexos com um grande número de processos, tornando o uso de simulações uma alternativa viável, que facilita em muito este levantamento. Porém, é necessário ter o cuidado de verificar se as simulações estão validadas e representam o caso operacional mais frequente.

Esta etapa de levantamento de dados é a mais trabalhosa, por envolver uma enorme quantidade de informações, e também a mais importante da Análise

Energética Global, pois toda análise de futuras decisões de modificações estará fundamentada nesta base de dados. Por esta razão, especial atenção deve ser dedicada a esta etapa.

Capítulo 5 – Análise Energética Global do Complexo

5.1 – Metodologia

Após o levantamento das Curvas Compostas do complexo em estudo, a próxima etapa do trabalho consta da construção dos Perfis Térmicos do complexo, das quais será realizada a Análise Energética Global (AEG).

Para isto, serão apresentadas as Grandes Curvas Compostas Monotônicas de cada processo estudado no capítulo anterior, a partir das quais serão construídos os Perfis Térmicos e apresentada a análise energética do complexo, com a definição das metas de consumo de combustível; trabalho de co-geração; refrigeração; aquecimento; e emissão de poluentes. Uma análise simplificada de custos também será apresentada.

5.2 – Curvas Compostas Monotônicas

Após a confecção das Curvas Compostas, apresentadas no capítulo anterior, deve-se gerar as Grandes Curvas Compostas Monotônicas, que são as Grandes Curvas Compostas sem os bolsões. Como foi visto no capítulo 3, os bolsões são regiões que podem realizar troca térmica entre si, e devem ser excluídas da análise, uma vez que ela se propõe apenas a realizar a integração com as correntes que não podem ser aproveitadas no próprio processo.

As figuras 5.1 a 5.12 apresentam as grandes curvas monotônicas de cada processo analisado, que foram obtidas a partir das GCC construídas conforme explicado no capítulo 2 (figura 2.10). Nas figuras, pode-se visualizar os bolsões térmicos, representados por linhas pontilhadas, apesar de não serem utilizados na composição dos Perfis Térmicos.

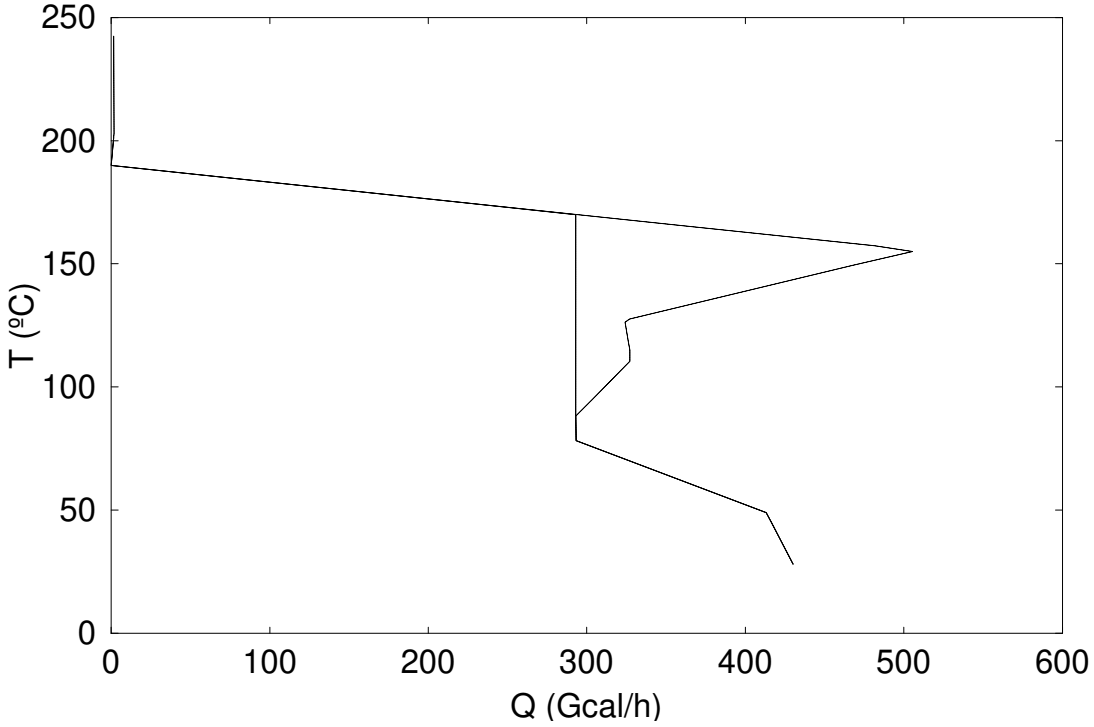


FIGURA 5.1– Grande Curva Composta Monotônica UO-1 (Área Quente)

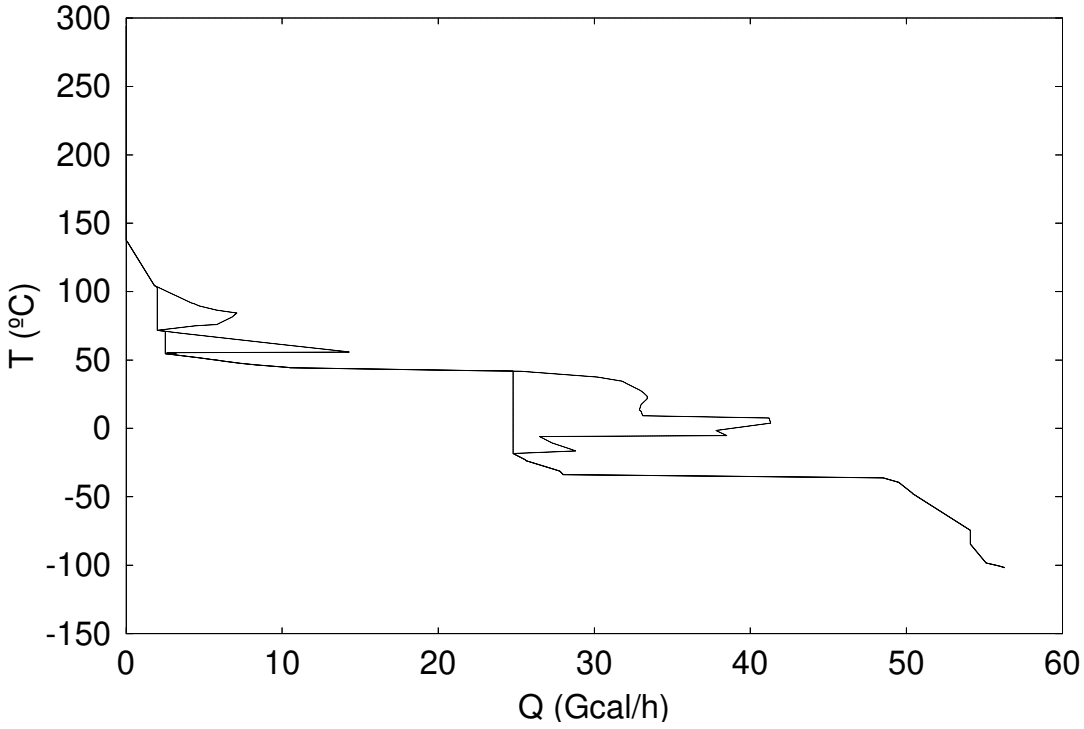


FIGURA 5.2 – Grande Curva Composta Monotônica UO-1 (Área Fria)

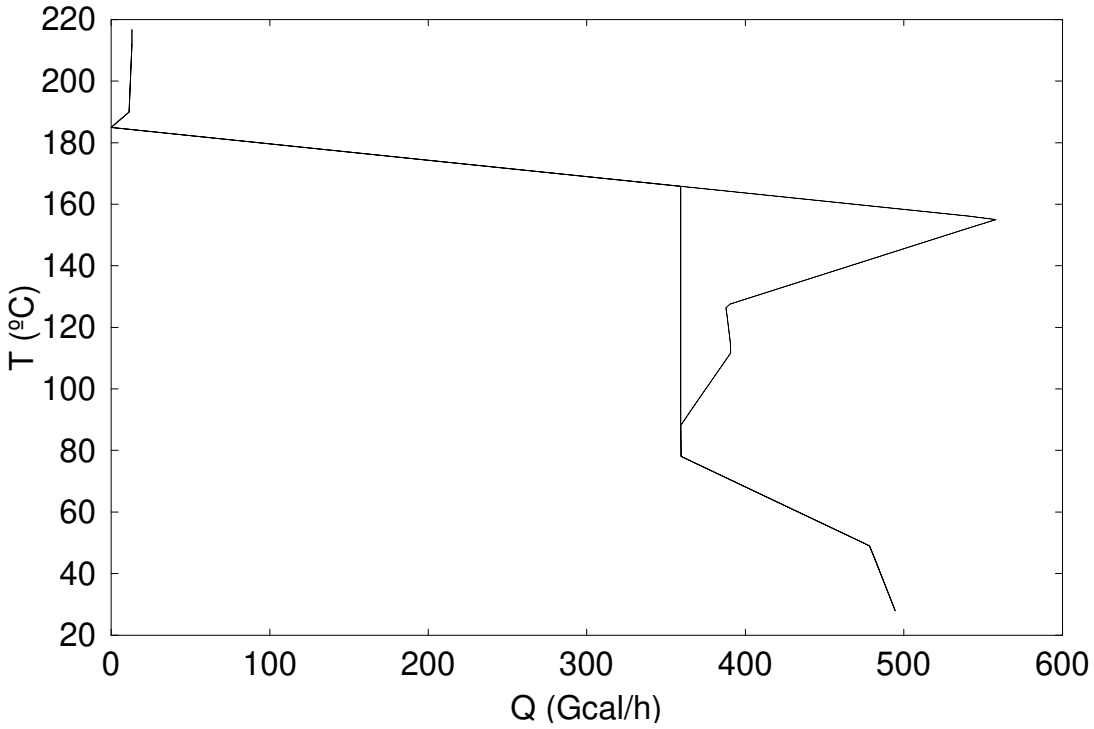


FIGURA 5.3– Grande Curva Composta Monotônica UO-2 (Área Quente)

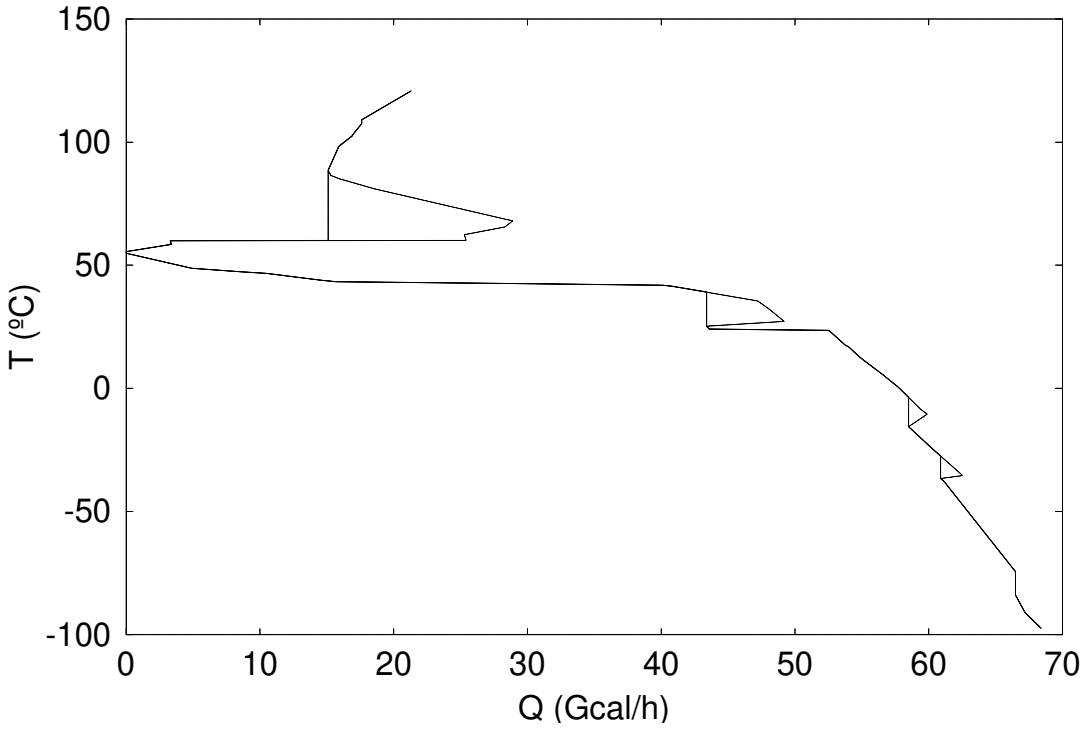


FIGURA 5.4 – Grande Curva Composta Monotônica UO-2 (Área Fria)

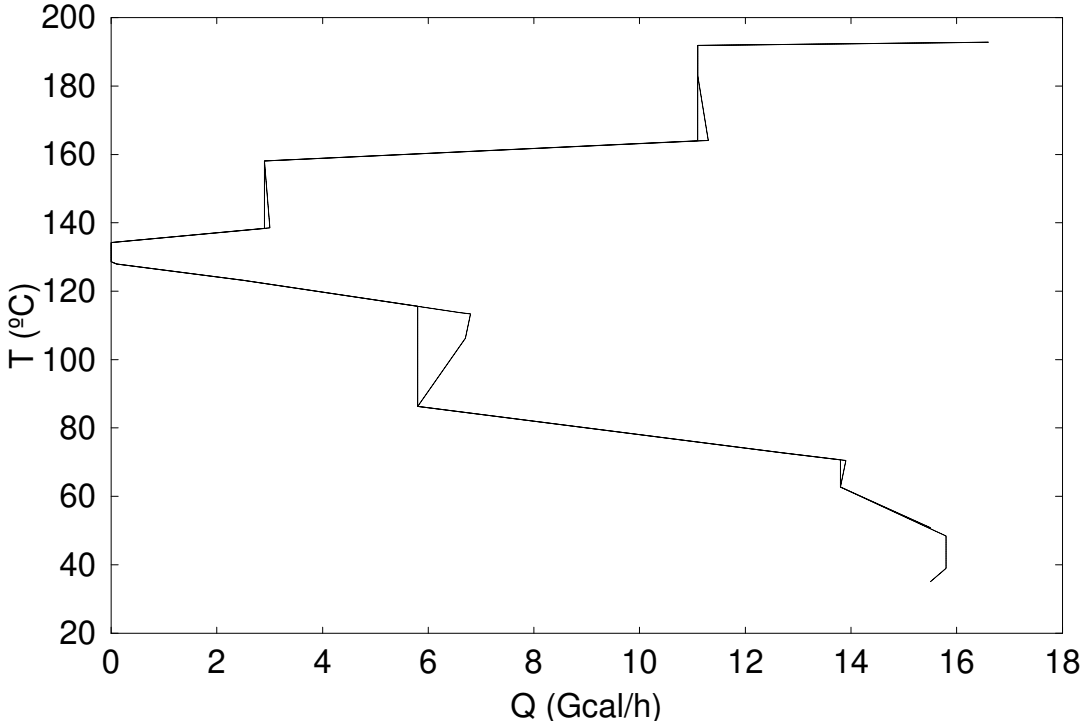


FIGURA 5.5 – Grande Curva Composta Monotônica A-100

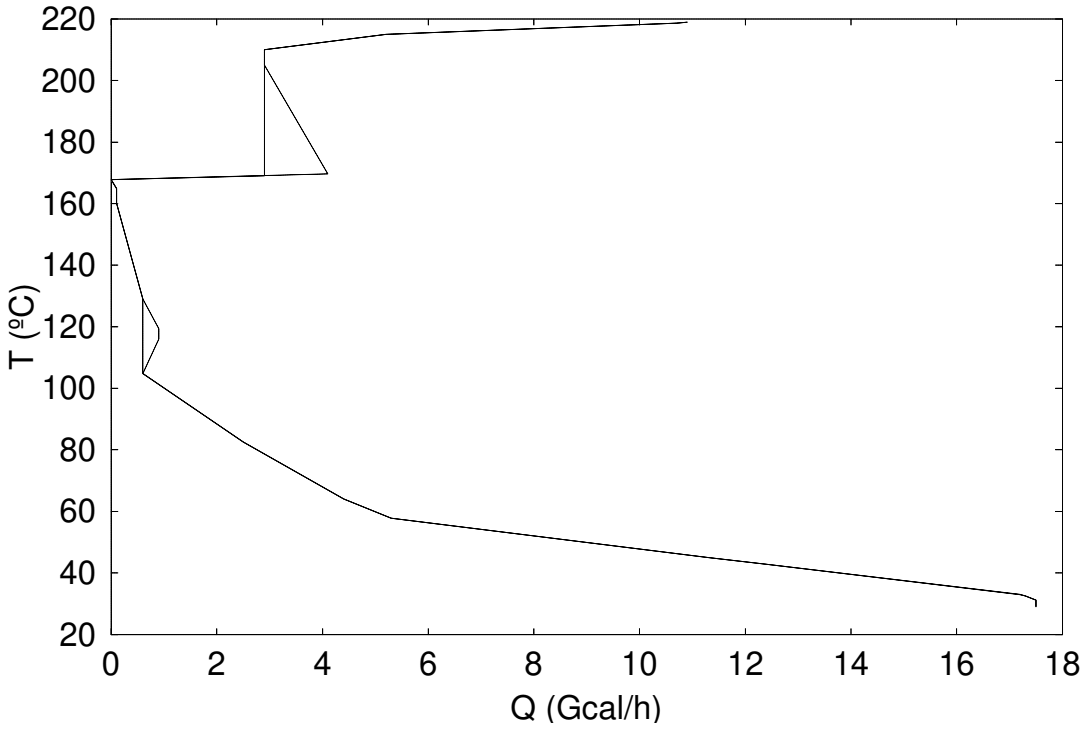


FIGURA 5.6 – Grande Curva Composta Monotônica A-400/450

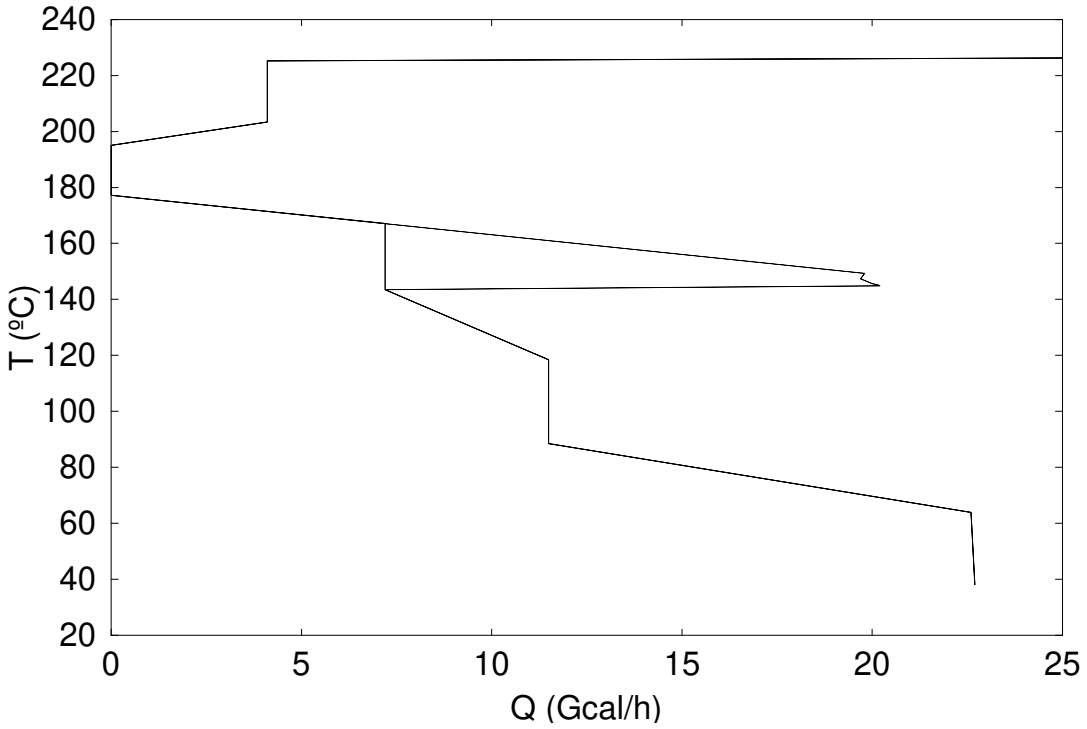


FIGURA 5.7 – Grande Curva Composta Monotônica A-550 I

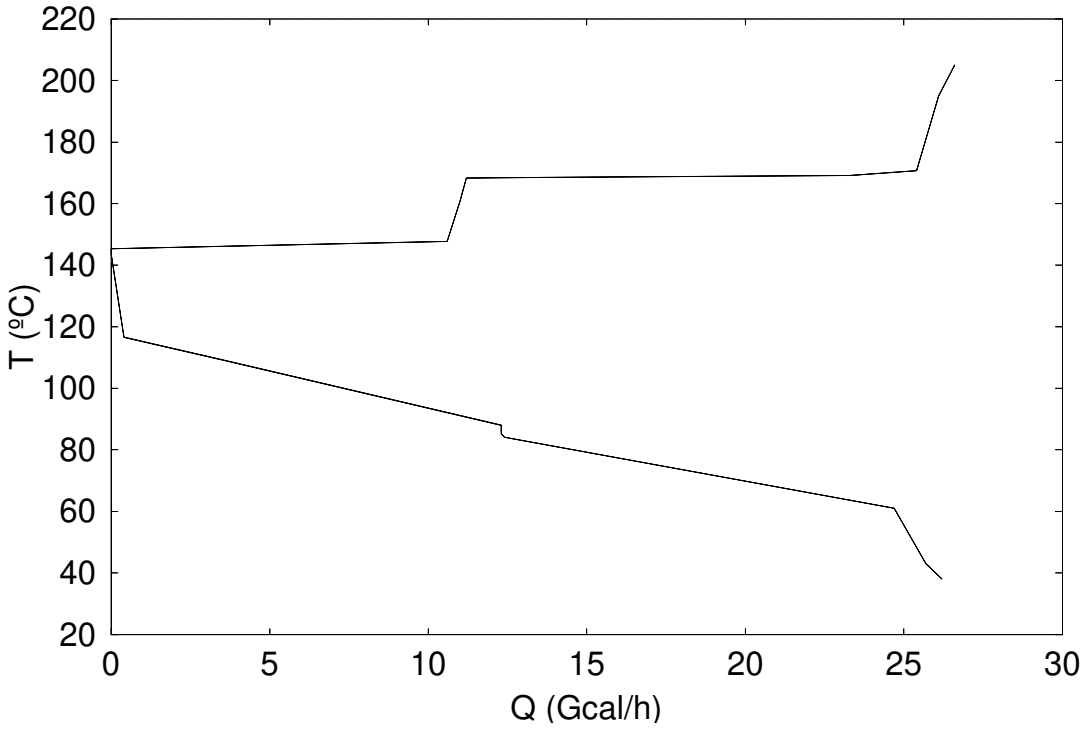


FIGURA 5.8 – Grande Curva Composta Monotônica A-2550

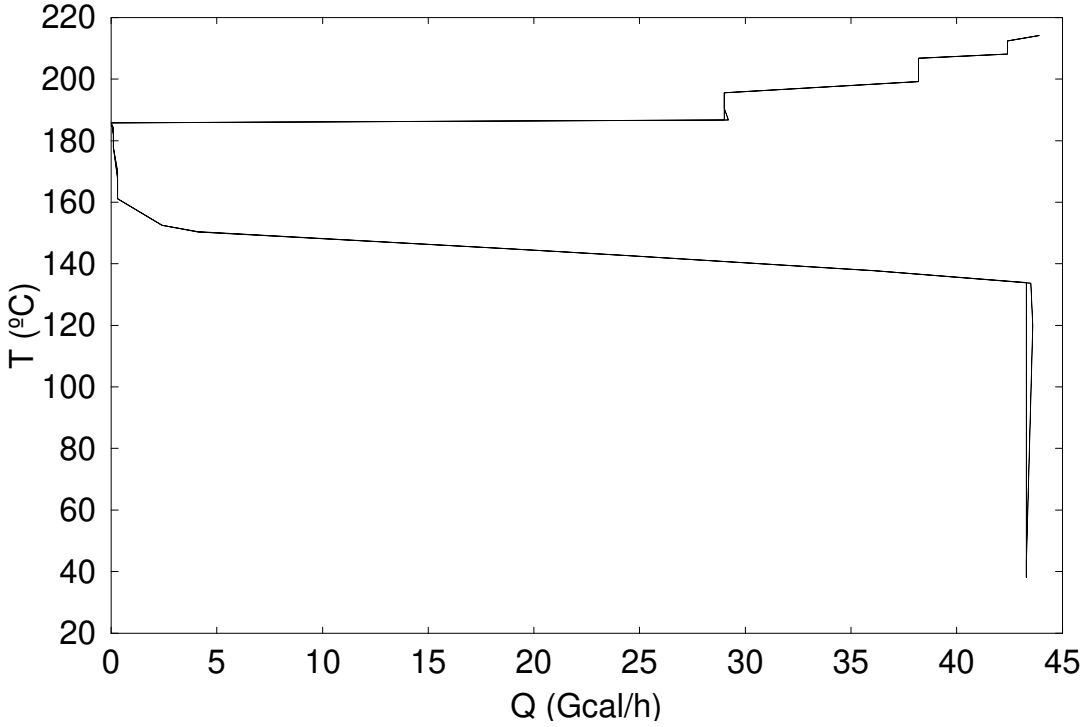


FIGURA 5.9 – Grande Curva Composta Monotônica A-550 II

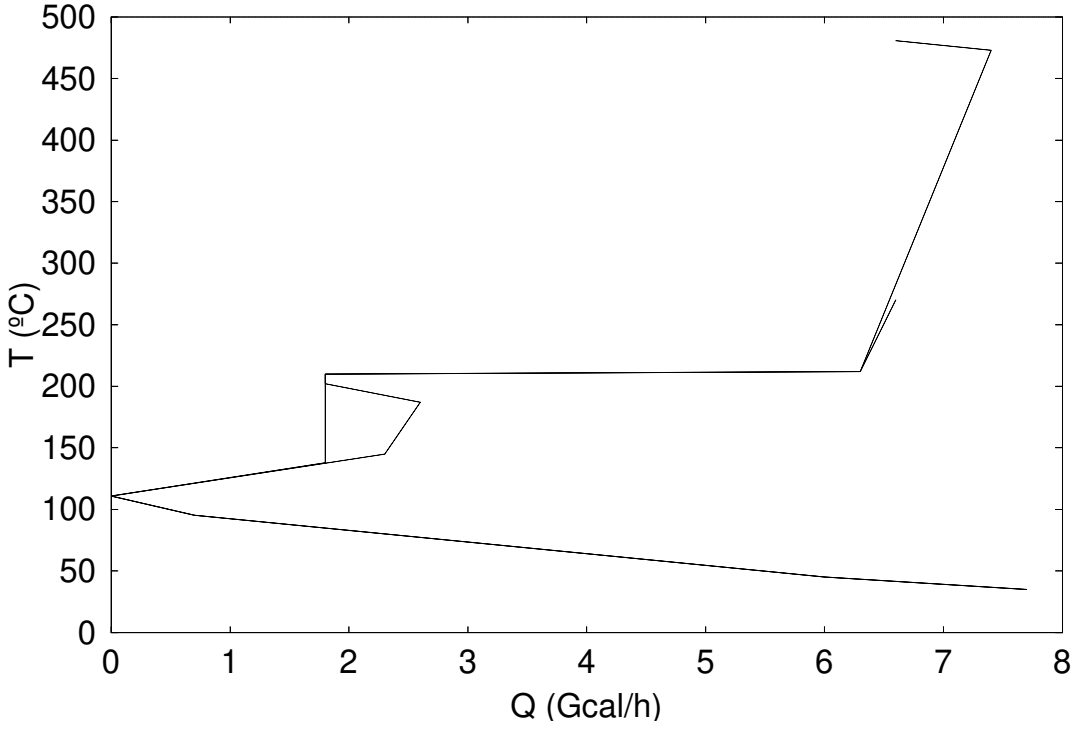


FIGURA 5.10 – Grande Curva Composta Monotônica A-6600

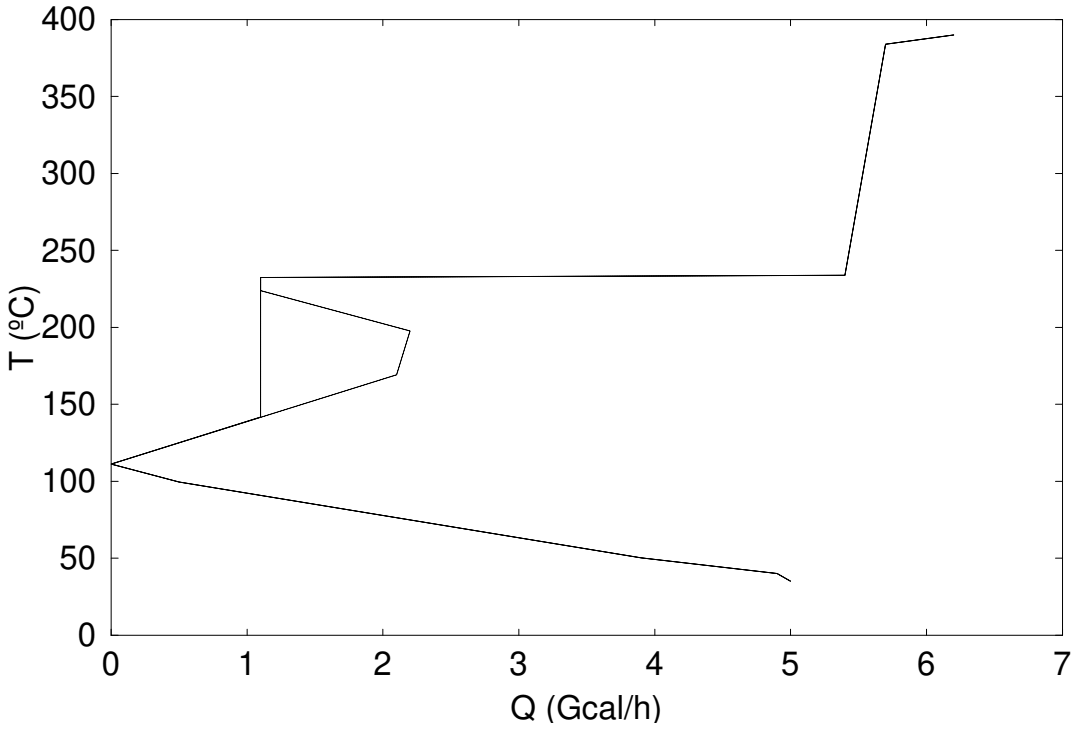


FIGURA 5.11 – Grande Curva Composta Monotônica A-650

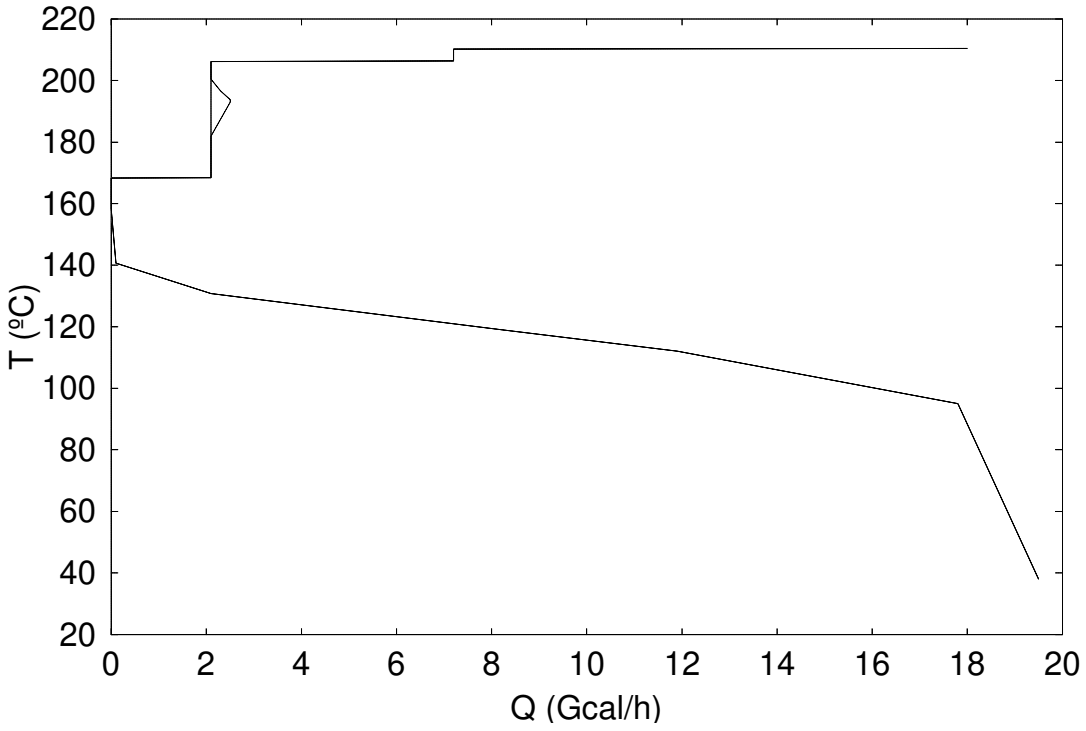


FIGURA 5.12 – Grande Curva Composta Monotônica A-700

5.3 – Abordagem Especial do Sistema de Utilidades do Complexo

Devido a enorme complexidade do sistema estudado, foi necessário desenvolver uma abordagem especial do sistema de utilidades, não descrita na literatura pesquisada.

A central de utilidades do complexo apresenta particularidades, que necessitam ser tratadas de forma especial. Dentre elas, pode-se destacar duas características peculiares: parte do vapor é gerado fora da central de utilidades (V120 e V15); e, principalmente, parte do vapor gerado (V42 e V15) não é utilizado para aquecimento das correntes de processo, pois são comercializados a outras empresas do Pólo Petroquímico. Para lidar com estas características foi necessário criar duas modalidades especiais de utilidades:

- Utilidade Importada;
- Utilidade Exportada.

A Utilidade Importada é aquela que é gerada fora da central de utilidades, através do aproveitamento de correntes de processo especiais ou pela recuperação de calor dos gases de combustão em fornos de processo. Estas duas categorias de correntes não foram incorporadas à Análise *Pinch* por restrição ao seu uso para integração energética. Neste caso se enquadra a corrente efluente dos fornos de pirólise, que deve ser resfriada rapidamente para parar a reação de pirólise e maximizar a produção de petroquímicos de alto valor agregado. Para esta corrente, são utilizados trocadores especiais (TLE), que geram V120, que é incorporado ao sistema. Nota-se que esta utilidade foi gerada sem consumo de combustível específico para esta finalidade na central de utilidades, mas pode ser utilizada para geração de trabalho e/ou aquecimento do processo. Nesta categoria ainda se enquadra o vapor que foi gerado por expansão em válvulas de redução.

A Utilidade Exportada é aquela que é gerada na central de utilidades, com consumo de combustível específico para este fim, mas não pode ser utilizada para geração de trabalho e/ou aquecimento do processo, pois já tem um destino especial, como a venda a clientes externos, ou ainda, utilização direta no processo, como vapor de diluição ou vapor de separação injetado em torres de

destilação. Neste caso também se enquadra o vapor que foi utilizado pelas válvulas redutoras de pressão.

Para melhor esclarecer a abordagem dada a estas correntes, será mostrado um exemplo simples que elucida o tratamento aplicado. É necessário recorrer a este exemplo, e não à curva do complexo em estudo, pois a mesma apresenta um alto grau de complexidade, que dificultaria o entendimento da abordagem proposta.

A figura 5.13 ilustra um Perfil Térmico qualquer, com 5 níveis de utilidades: vapor a 500 ºC (vapor de alta pressão que alimenta a turbina), 300 ºC e 150 ºC ; água de refrigeração a 30 ºC ; e refrigeração a – 50 ºC. Para avaliar a nova abordagem proposta, foi realizado vários testes de importação e exportação de cada nível de vapor. A área em cinza representa a meta de trabalho (W) do complexo. A Análise Energética Global de cada caso está mostrado na tabela 5.1.

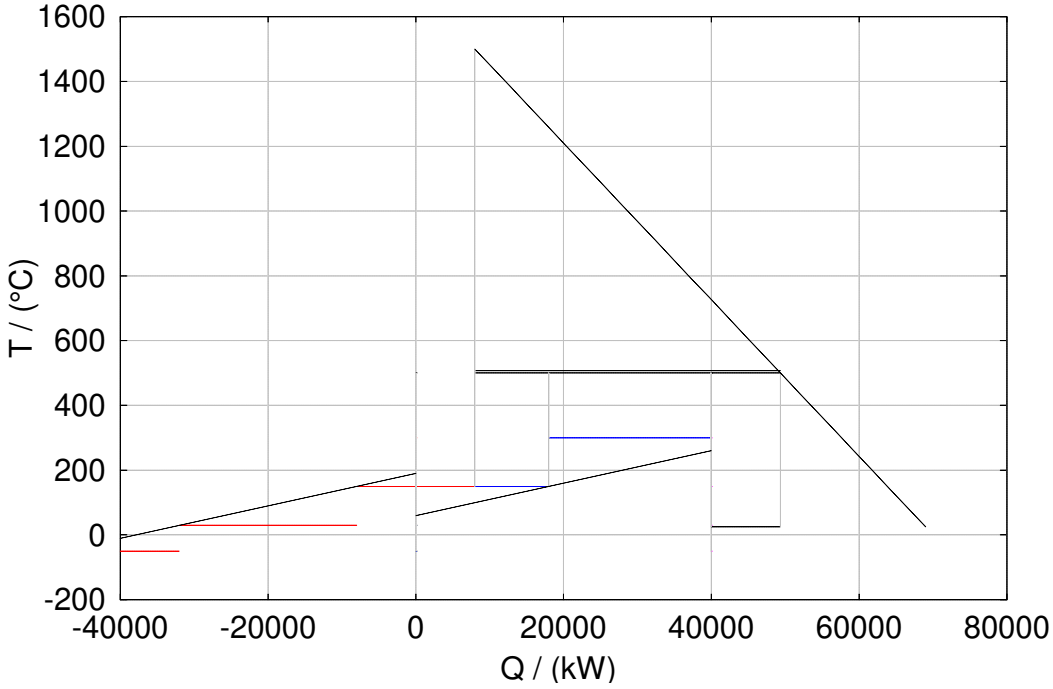


FIGURA 5.13 – AEG – Exemplo_Caso Base

Tabela 5.1

Análise Energética Global – Exemplo							
Caso	**Base**	Importa V500	Exporta V500	Importa V300	Exporta V300	Importa V150	Exporta V150

W real	**9.343**	9.343	9.343	8.321	10.365	6.920	11.766
V500	**41.343**	36.343	41.343	35.321	47.365	33.920	48.766
Combustível	**60.981**	53.606	68.356	52099	69..864	50.032	71.930

A primeira modificação proposta se refere à importação de uma quantidade de V500. A parcela deste vapor importada se junta ao gerado pela central de utilidades, mantendo a capacidade de geração de trabalho, que é determinada pelo consumo de vapor de baixa pressão. Consequentemente, ocorre uma redução do combustível necessário, visto que menos V500 necessitará ser produzido. A figura 5.14 ilustra as mudanças ocorridas.

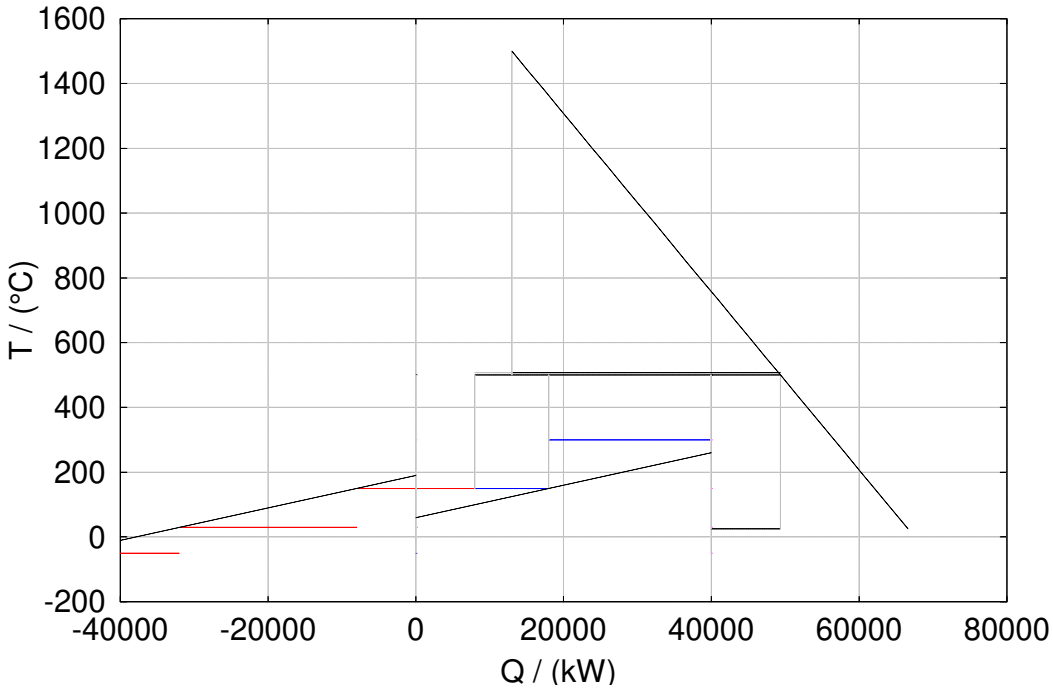


FIGURA 5.14 – AEG – Exemplo_Importação V500

No caso de exportação de V500, ocorrerá um aumento de consumo de combustível, sem representar aumento da capacidade de trabalho, pois este vapor gerado a mais será destinado a outra finalidade que não a geração de trabalho ou aquecimento. A figura 5.15 ilustra a situação.

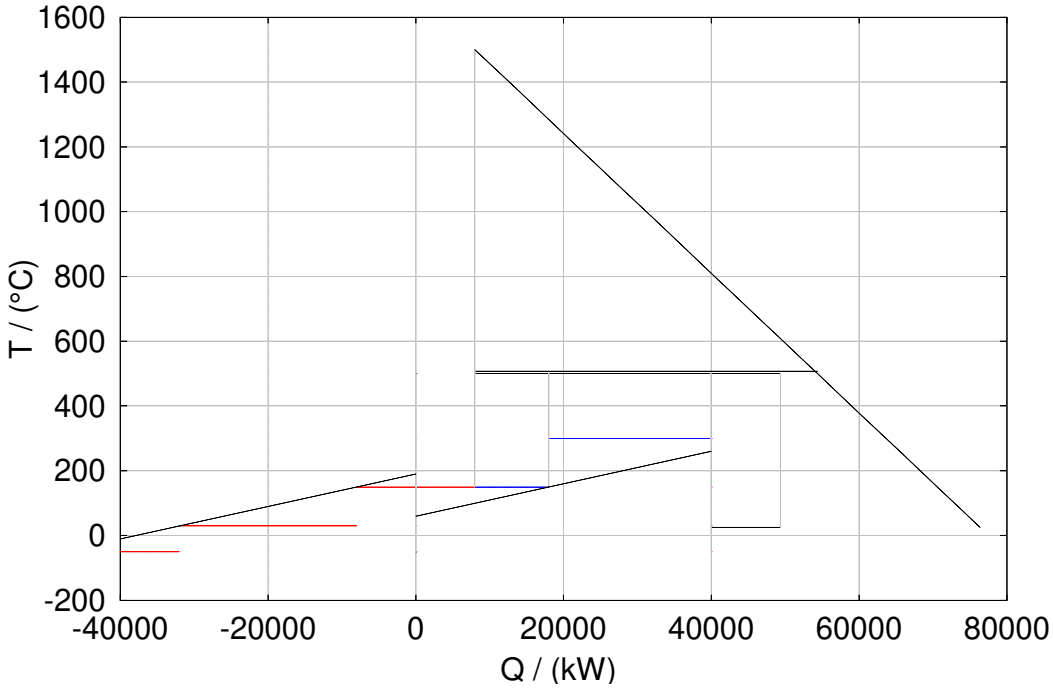


FIGURA 5.15 – AEG – Exemplo_Exportação V500

Na importação de V300, o trabalho é menor, visto que esta parcela importada se incorpora ao sistema, para suprir as necessidades de aquecimento do processo, sem ter passado pelas turbinas para gerar trabalho. Em compensação, a produção de V500 e o consumo de combustível reduzem. A figura 5.16 ilustra a situação.

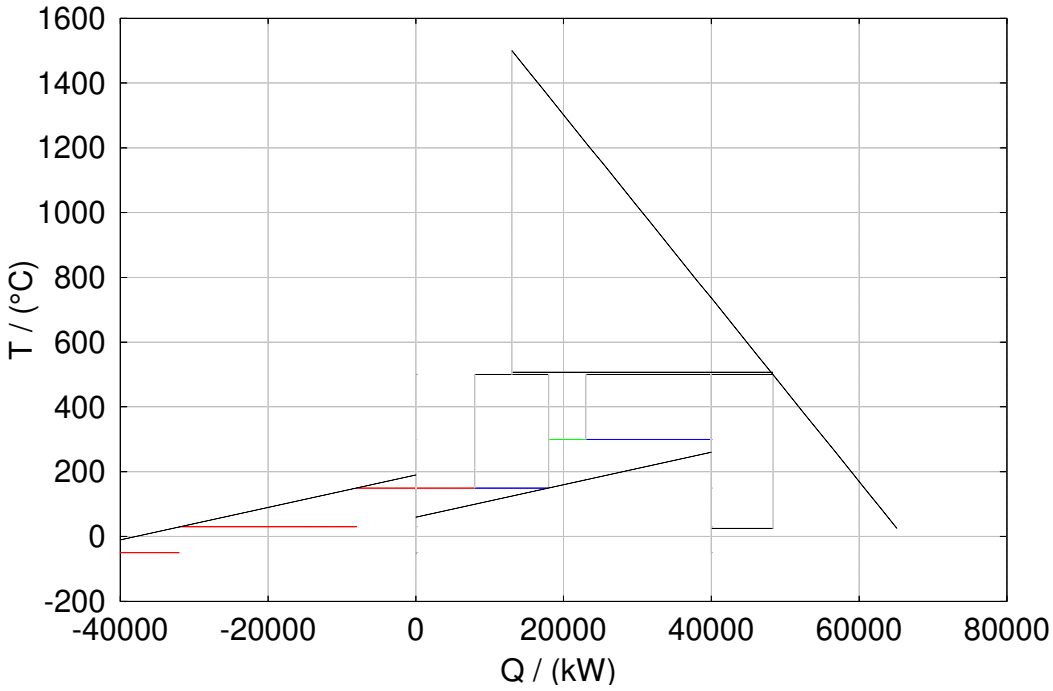


FIGURA 5.16 – AEG – Exemplo_Importação V300

Para a exportação de V300, teremos um acréscimo de trabalho, V500 e combustível, visto que será necessário gerar uma quantidade extra de vapor de baixa pressão, que é produzido em V500 e reduzido pelas turbina, gerando trabalho. Como este vapor já está comprometido e não pode atender ao processo, ainda é necessário continuar gerando as mesmas demandas do caso base, além desta nova parcela. A figura 5.17 mostra a situação.

A importação e exportação do V150 apresentam o mesmo comportamento do V300 e estão ilustrados nas figuras 5.18 e 5.19 respectivamente.

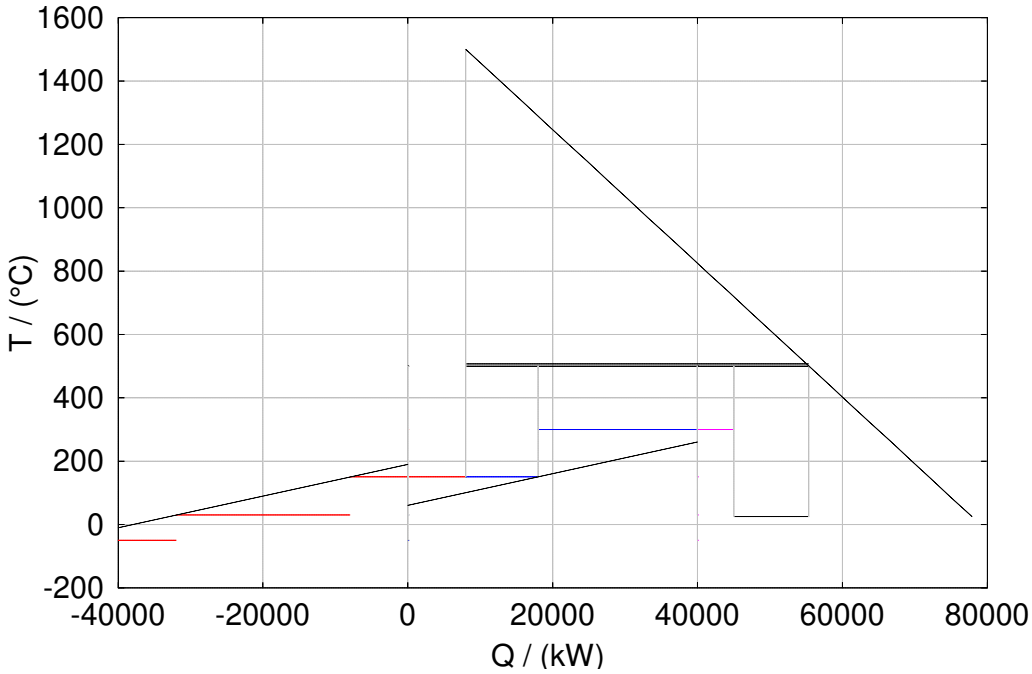


FIGURA 5.17 – AEG – Exemplo_Exportação V300

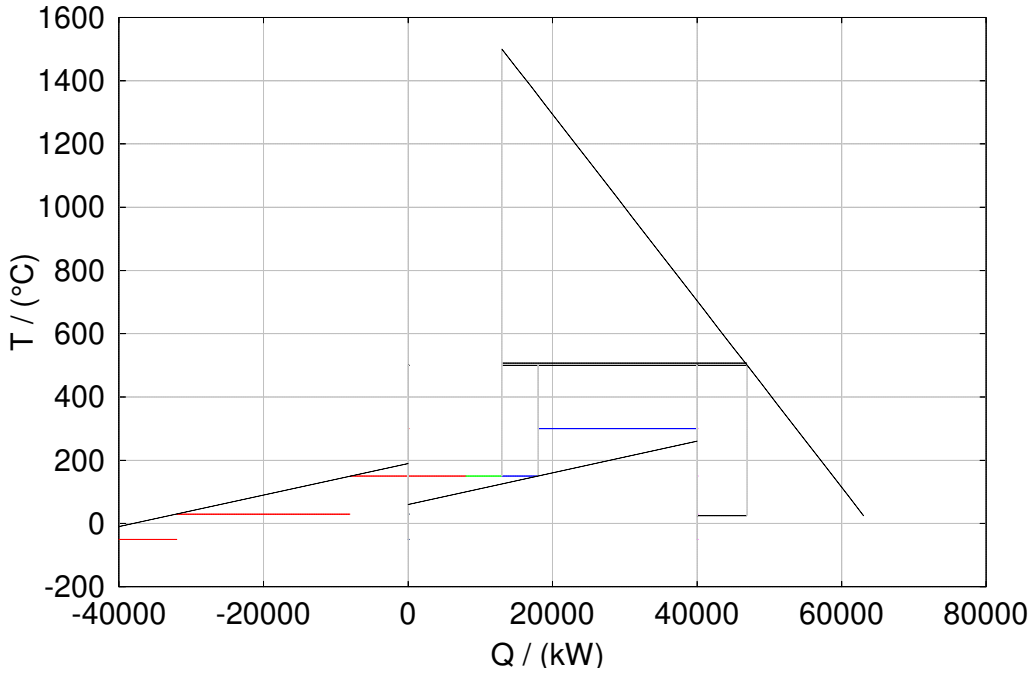


FIGURA 5.18 – AEG – Exemplo_Importação V150

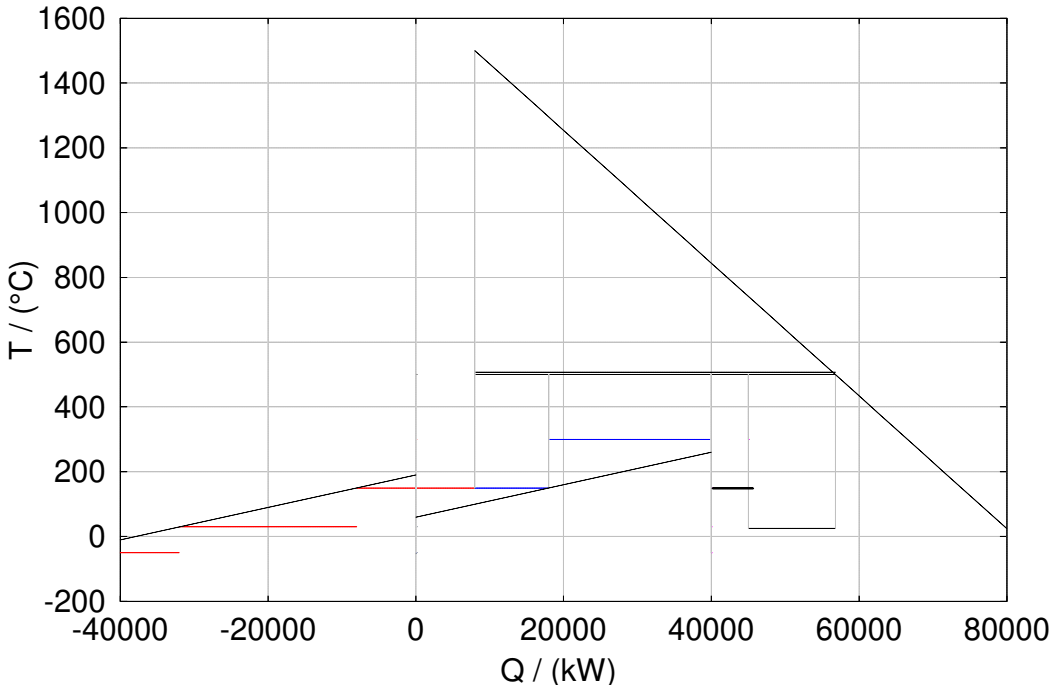


FIGURA 5.19– AEG – Exemplo_Exportação V150

5.4 – Análise Exergética do Sistema de Utilidades

Antes de iniciar a análise energética do complexo, é necessário determinar a eficiência exergética (η_{EX}) do seu sistema de co-geração para a determinação da meta de trabalho real (W real).

TORRES, em sua Tese de Doutorado (UNICAMP, 1999) – "Avaliação Exergética e Termoeconômica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico", realizou um estudo desta mesma central de utilidades, determinando a eficiência exergética de todos os equipamentos, entre eles as turbinas de contra-pressão.

Apesar do sistema contar com 4 turbinas, apenas duas são necessárias: TG-A e TG-C. Os resultados de eficiência exergética obtidos neste estudo foram:

- $\eta_{EX\ (TG\text{-}A)} = 0{,}7974$
- $\eta_{EX\ (TG\text{-}C)} = 0{,}7743$

Como a utilização das duas máquinas ocorre de forma equivalente (metade da carga para cada uma), para o estudo em questão, foi utilizado a eficiência exergética média das duas turbinas:

- $\eta_{EX\ (MÉDIA)} = 0,7858$

5.5 – Análise Energética Global do Complexo

De posse das curvas monotônicas e da eficiência exergética do sistema, é possível montar os Perfis Térmicos Quente e Frio, que determinam a necessidade de aquecimento e resfriamento do complexo, e assim realizar a Análise Energética Global. A construção dos perfis segue os procedimentos descritos no capítulo 3 (figura 3.6), com a divisão das curvas no *Pinch*; posterior translação de temperatura em $+\Delta Tmin/2$ para as curvas acima do *Pinch* e $-\Delta Tmin/2$ para as curvas abaixo dele; e, finalmente, a geração de curvas compostas. Vale relembrar que o $\Delta Tmin$ usado nesta operação é o mesmo utilizado na Análise *Pinch*, ou seja 5°C para as áreas frias das UO's e 10°C para as demais unidades.

Para a determinação das metas energéticas do complexo, é necessário inserir na análise os perfis energéticos das utilidades e realizar uma última translação de temperatura, conforme mostra o capítulo 3 (figura 3.7). Nesta translação, os perfis térmicos são alterados em $+\Delta Tmin_g$ (perfil frio) e $-\Delta Tmin_g$ (perfil quente). Nesta última operação foi utilizado o $\Delta Tmin$ global ($\Delta Tmin_g$), que representa a mínima diferença de temperatura entre as correntes de processo e as utilidades. No estudo, os $\Delta Tmin_g$ considerados estão listados na tabela 5.2, de acordo com cada área.

Tabela 5.2

ΔTmin Global Utilizado	
ÁREA	**ΔTmin Global (ºC)**
UO-1 (Área Fria)	5
UO-1 (Área Quente)	10
UO-2 (Área Fria)	5
UO-2 (Área Quente)	10
UA-1	15

UTE	20

A figura 5.20 traz o Perfis Térmicos do complexo em estudo, que representa, em uma única curva, todos os processos até então estudados.

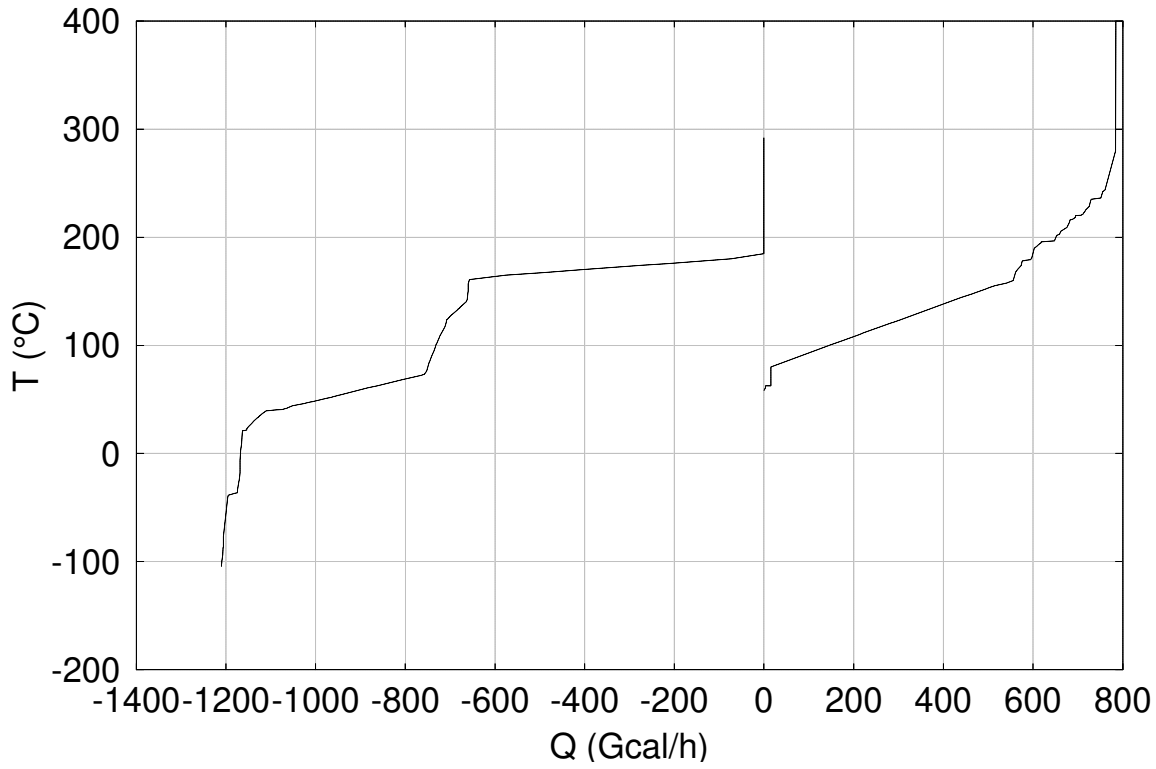


FIGURA 5.20– Perfil Térmico do Complexo

Para compor a interface processo-utilidades, e assim determinar as metas do complexo, foram consideradas as utilidades listadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3

Utilidades do Complexo		
Utilidade	Tipo	Temperatura (°C)
V120	Vapor	538
V42	Vapor	385

V15	Vapor	280
V3,5	Vapor	190
AGR	Água	30
P+21	Propileno Refrigerante	21
P+3	Propileno Refrigerante	3
P-24	Propileno Refrigerante	-24
P-40	Propileno Refrigerante	-40
E-54	Etileno Refrigerante	-54
E-75	Etileno Refrigerante	-75
E-101	Etileno Refrigerante	-101

Também foram incorporados à análise as utilidades especiais, explicadas anteriormente, conforme tabela 5.4.

Tabela 5.4

Utilidades Especiais			
Utilidade	Tipo	Origem / Destino	Quantidade (Gcal/h)
V120	Importada	UO-1 e UO-2	610
V42	Exportada	Venda	145
V15_a	Exportada	Venda	384
V15_b	Importada	UA-1	27

Com todas estas informações, é possível montar a Análise Energética Global propriamente dita, conforme figura 5.21.

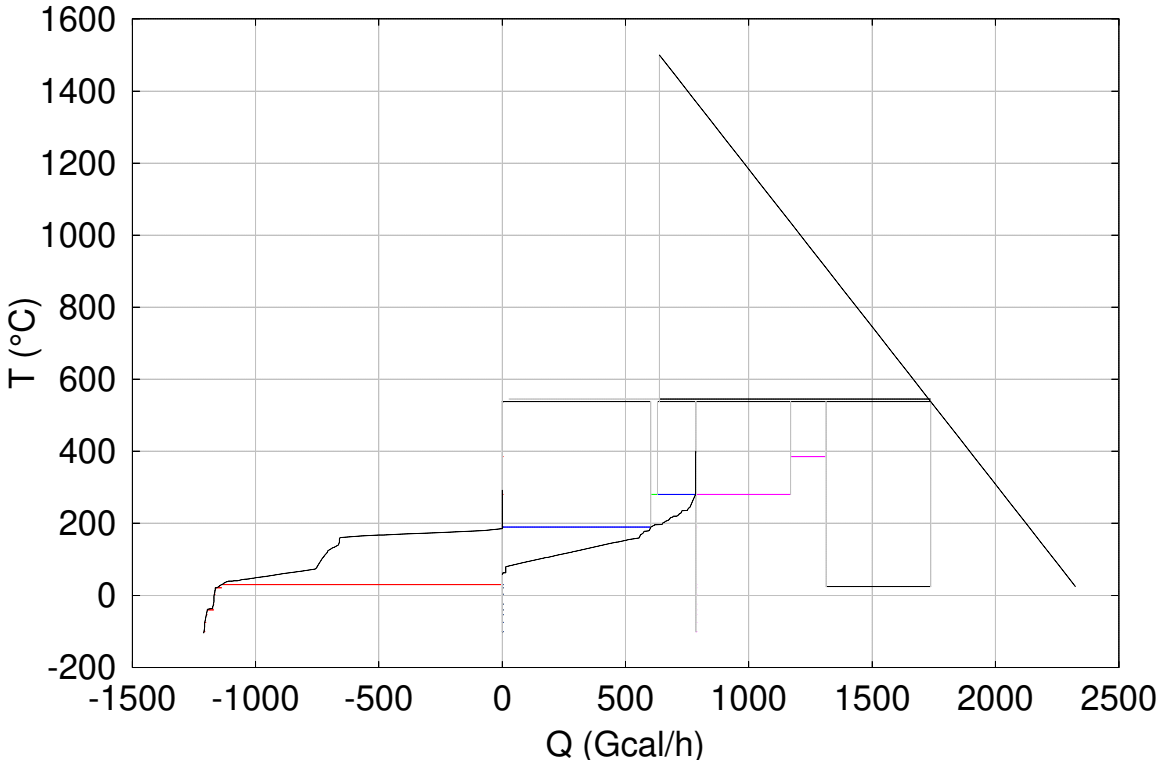


FIGURA 5.21– AEG do Complexo

Os resultados principais obtidos da Análise Energética Global estão listados na tabela 5.5.

Tabela 5.5

Análise Energética Global	
Meta	Energia (Gcal/h)
W Ideal	737,7
W Real	579,7
V120	1099,8
Combustível	1686,3

Da análise ainda é possível obter as informações de metas de consumo e produção de utilidades, mostrados na tabela 5.6, além da quantidade de trabalho gerado por cada nível de extração de vapor, mostrados na tabela 5.7.

Tabela 5.6

Metas de Utilidades		
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)
V120	0,498	-
V42	0,211	0
V15	181,151	0,028
V3,5	602,879	0
AGR	1137,526	-
P+21	25,127	-
P+3	4,096	-
P-24	3,586	-
P-40	25,012	-
E-54	4,052	-
E-75	5,943	-
E-101	3,531	-

Tabela 5.7

Metas de Trabalho	
Meta	Produção (Gcal/h)
W V42	19,4
W V15	144,1
W V3,5	260,1
W cond	156,1

Da AEG realizada, pode-se obter algumas características do complexo.

Em relação à refrigeração, nota-se uma pequena necessidade de refrigeração sub-ambiente em comparação à grande necessidade de AGR. Isto se deve ao fato do uso de propileno e etileno refrigerante se restringir apenas a algumas torres de destilação das unidades de Olefinas, enquanto que o uso da AGR se estende por todo o complexo industrial. Uma outra característica marcante é o fato de nenhuma corrente de processo estar apta a gerar vapor,

devido ao elevado patamar de temperatura do primeiro nível de utilidade quente do complexo (190 ºC).

Em relação ao aquecimento, nota-se que grande parte do processo pode ter suas necessidades atendidas pelo V3,5, sendo o restante suprido por V15, quase não ocorrendo necessidade de V42. Na prática, esta situação não ocorre, uma vez que o complexo possui um elevado consumo de V42 e V15, em detrimento do pouco uso do V3,5, que muitas vezes é descartado para a atmosfera por excedente de produção. Obviamente que um projeto para modificar todo o sistema de aquecimento do complexo seria inviável, devido ao grande número de modificações necessárias. Porém, esta percepção é muito importante para guiar futuros investimentos, podendo inclusive redirecionar o capital a ser investido para a realização de algumas modificações, aproximando a realidade do complexo à configuração de máximo aproveitamento de energia como indicado pela AEG (metas de energia).

A AEG do complexo ainda mostra a parcela de vapor importada das unidades de processo e o vapor comercializado. Na figura 5.20 é fácil visualizar o V120 das unidades de olefinas (parcela inicial do V120 no gráfico), que apesar de não ter utilizado combustível da central para a sua geração, podem ser utilizadas nas turbinas, gerando trabalho; o V15 das unidades de aromáticos que ficam fora do cálculo de geração de trabalho, pois não foi gerado nas turbinas; e o V42 e V15 que geram trabalho, mas não são utilizados para aquecimento do processo, pois serão comercializados.

O trabalho gerado pela extração de cada nível de vapor é determinado pelo seu consumo no processo, por isso temos a maior parcela de trabalho sendo gerada pelo V3,5. Este trabalho total gerado está relacionado não apenas aos turbo-geradores da central termelétrica, que geram energia elétrica, mas também ás turbinas que movimentam máquinas de processo, como compressores, por exemplo. É importante relembrar que estes valores estão relacionados a metas de geração.

5.6 – Emissões Atmosféricas do Complexo

Umas das vantagens da Análise Energética Global é a possibilidade de determinar a meta de emissões atmosféricas do complexo. Esta análise é realizada por estimativa, a partir da quantidade de combustível utilizado (determinada pela AEG) e da composição do mesmo.

A central de utilidades utiliza diversos combustíveis, que podem ser classificados em três categorias:

- Óleo Combustível (OC1A e RAP - Resíduo Aromático de Pirólise)
- Combustível Leve (C10+)
- Gás Combustível (Gás Natural e Gás de Processo)

A tabela 5.8 traz informações sobre estes combustíveis. A informação de geração de CO_2 foi obtida por balanço estequiométrico utilizando-se o aplicativo ACOMB 4.2 do IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. As informações do combustível equivalente foram calculadas a partir do percentual de utilização de cada combustível.

Tabela 5.8

Combustíveis Utilizados				
Combustível	Percentual de Utilização (% massa)	Poder Calorífico Inferior (Gcal/t)	Geração de CO_2 (t_{CO2} / t_{comb})	Custo (R$/t)
Óleo Combustível	44	9,5	2,13	380,00
Combustível Leve	17	10,5	2,10	310,00
Gás Combustível	39	11,5	1,83	280,00
Combustível Equivalente	**100**	**10,45**	**2,00**	**329,10**

Com as informações acima, é possível obter a quantidade de CO_2 lançada para a atmosfera por um simples balanço de massa e energia, pela equação 5.1.

Emissão de CO_2 = [Meta Combustível] * [Emissão CO_2] (5.1)

Com isso, conclui-se que a emissão de CO_2 do complexo é de **323,5 t/h**.

5.7 – Análise de Custos

Para concluir o estudo, é necessário desenvolver uma análise de custos referente às metas de energia encontradas. Como já foi dito anteriormente, na AEG apenas os custos referentes ao combustível e a energia elétrica adquirida externamente são considerados.

O custo do combustível já foi mostrado na tabela 5.8, enquanto o custo do trabalho de co-geração está diretamente relacionado com a energia elétrica adquirida e deve ser custeado como tal. Isto ocorre porque o trabalho de co-geração realizado na central de utilidades é destinado a geração interna de energia elétrica, e um aumento ou diminuição da mesma terá um impacto imediato na quantidade de energia elétrica importada, reduzindo-a ou aumentando-a respectivamente, por deslocamento.

Como o custo médio composto (composição do horário de ponta e fora de ponta) da energia elétrica adquirida é de R$ 75,00/MWh, ou seja, R$ 87,16/Gcal, é possível estabelecer o custo horário total de consumo de energia (combustível e trabalho). Porém, como o trabalho realizado desloca a energia elétrica adquirida, ele deve ser considerado como um crédito. A tabela 5.9 mostra o resultado desta análise.

Tabela 5.9

Análise de Custos				
Energia	Custo (R$/Gcal)	Consumo/Produção (Gcal/h)	Custo Parcial (R$/h)	Custo Total (R$/h)
Combustível	50,37	1.686,3	84.936,17	**48.013,55**
Trabalho	87,16	423,6	(36.922,62)	

Este formato de custeio não representa o custo total de energia do complexo, porém ele se apresenta como uma boa e simples abordagem de custos, que pode ser utilizada para verificação do impacto econômico (positivo ou negativo) proporcionado por mudanças no complexo, como será visto no próximo capítulo.

Capítulo 6 – Estudos de Casos

6.1 – Metodologia

Com o objetivo de testar as potencialidades da ferramenta Análise Energética Global (AEG), será realizado uma série de estudos de casos que representam diversas configurações de operação que podem ocorrer no complexo, como paradas de unidades para manutenção, modificações de processo, inclusão de novos processos e modificações no sistema de utilidades.

Serão apresentados a AEG de 7 casos e comparados com a análise realizada no capítulo anterior, denominada de Caso Base, que representa todo o complexo operando. São eles:

- **Caso 1**: Parada da UO-1
- **Caso 2**: Parada da UO-2
- **Caso 3**: Parada da UA-1
- **Caso 4**: Parada da CEMAP-1 (UO-1 e UA-1)
- **Caso 5**: Retirada dos Pré-Aquecedores da UTE
- **Caso 6**: Entrada de Nova Unidade
- **Caso 7**: Mudança de Temperatura de Utilidade

6.2 – Caso 1 - Parada da UO-1

As paradas para manutenção das unidades são situações operacionais comuns na indústria petroquímica, ocorrendo a cada 5 ou 6 anos, com duração variável (em média 30 dias). Estas paradas implicam em uma grande mudança no perfil energético do complexo, afetando toda a configuração operacional do sistema de utilidades.

O primeiro caso a ser estudado é a parada da UO-1. As figuras 6.1 e 6.2 trazem, respectivamente, o novo Perfil Térmico do complexo e a nova interface processo-utilidade, que surgem com a parada desta unidade.

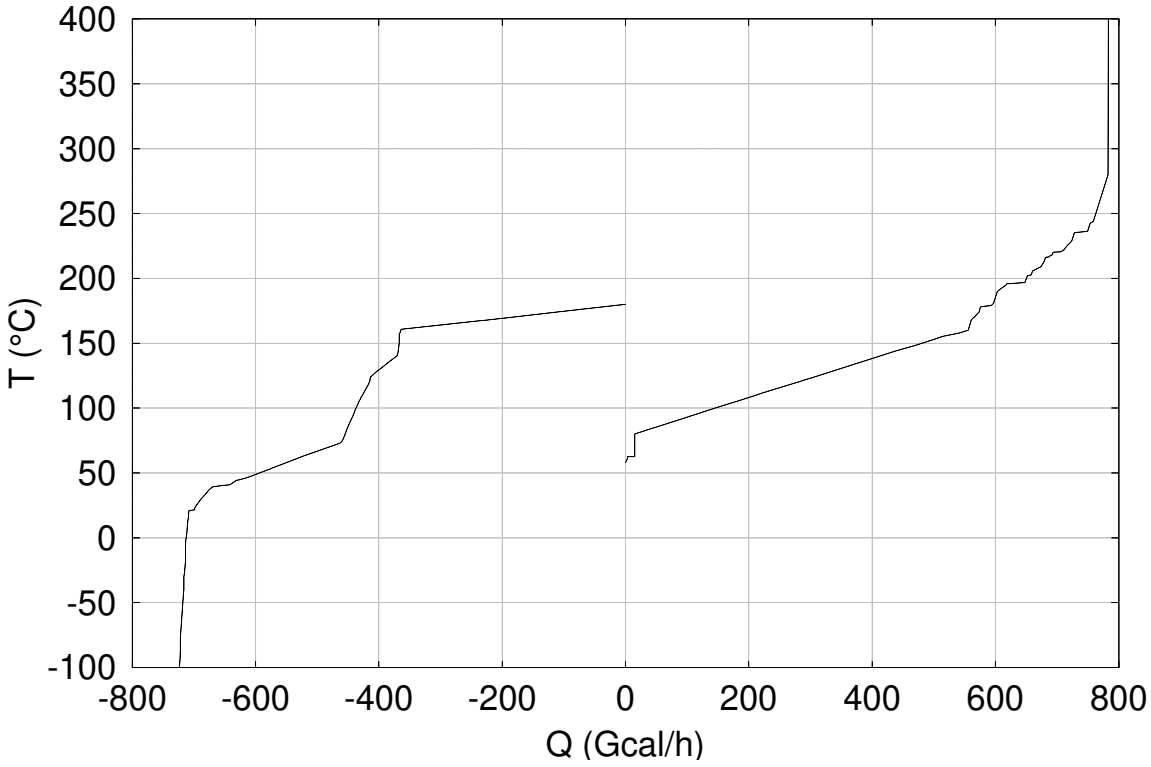


FIGURA 6.1– CASO 1 - Perfil Térmico do Complexo

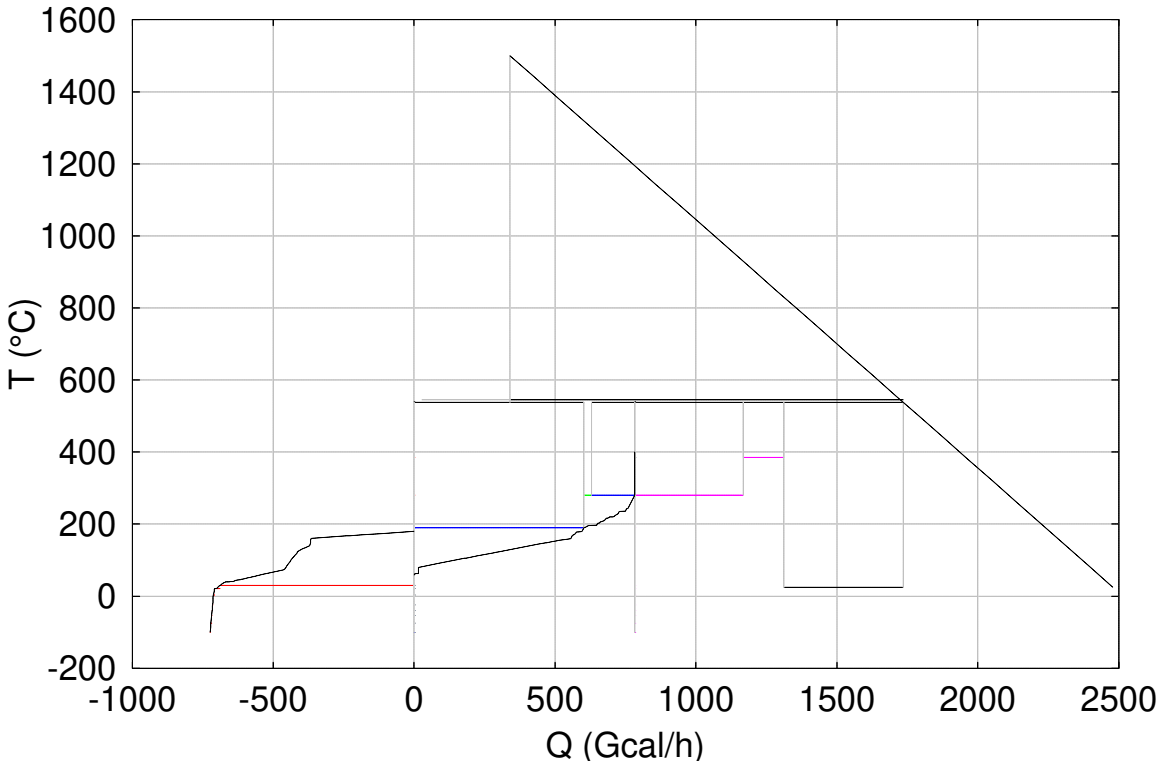


FIGURA 6.2– CASO 1 - AEG do Complexo

A comparação das figuras acima com as figuras 5.20 e 5.21, respectivamente, mostra claramente as modificações introduzidas ao sistema pela parada desta unidade. As tabelas 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4 trazem os resultados da AEG do Caso 1 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

Tabela 6.1

Análise Energética Global – Caso 1		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	737,1	-0,1%
W Real	579,2	-0,1%
V120	1395,0	26,8%
Combustível	2138,9	26,8%

Tabela 6.2

Metas de Utilidades – Caso 1				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0,498	-	0%	-
V42	0,211	0	0%	0%
V15	179,685	0	-0,8%	-100%
V3,5	602,879	0	0%	0%
AGR	688,257	-	-39,5%	-
P+21	19,471	-	-22,5%	-
P+3	4,096	-	0%	-
P-24	3,082	-	-14,1%	-
P-40	1,408	-	-94,4%	-
E-54	2,076	-	-48,8%	-
E-75	3,066	-	-48,4%	-
E-101	2,164	-	-38,7%	-

Tabela 6.3

Metas de Trabalho – Caso 1		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,3827	0%
W V15	143,7297	-0,3%
W V3,5	260,0984	0%
W cond	156,0	-0,1%

Tabela 6.4

Emissão CO_2 e Custo – Caso 1		
Meta	Caso 1	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**410,3**	**26,8%**
Custo Combustível (R$/h)	107.732,11	26,8%
Custo Trabalho (R$/h)	(36.889,06)	-0,1%
Custo Total (R$/h)	**70.843,05**	**47,5%**

A análise dos resultados permite estabelecer algumas conclusões a respeito da parada da UO-1 e de sua contribuição para o sistema de utilidades. Como a UO-1 é um grande contribuinte para o sistema de V120, a sua parada determina um acréscimo de sua geração na central termelétrica (UTE), para suprir as necessidades de vapor das demais unidades do complexo que continuam em operação. Este aumento de vapor tem como consequência imediata o aumento no consumo de combustível, visto que a parcela de V120 gerada na UO-1 não era oriunda da queima direta de combustível, e sim da recuperação de calor de uma corrente de processo.

No referente à refrigeração, percebe-se uma grande redução na necessidade de AGR do complexo, bem como da necessidade de refrigeração

sub-ambiente, principalmente a P-40, concluindo que a UO-1 é responsável pela quase totalidade de seu consumo. Estas observações revelam uma característica importante da AEG: pela simulação de retirada de unidade ou pela simulação de unidades isoladas, é possível identificar a contribuição de cada unidade para a composição do perfil energético do complexo, podendo orientar o foco de ações que visam racionalizar o uso da energia. Por exemplo, com a parada da UO-1, todo o V15 gerado no Caso Base foi zerado, levando a óbvia conclusão que a UO-1 é a única responsável pela sua produção.

Como a unidade praticamente não consome vapor, a redução na produção de trabalho é insignificante. Observa-se também um aumento da emissão de poluentes, provocado pelo acréscimo na demanda de combustíveis, que também proporciona um aumento no custo energético total. Ou seja, a parada desta unidade leva o complexo a um nível de eficiência energética inferior, devido à grande contribuição que ela proporciona ao sistema de utilidades.

6.3 – Caso 2 - Parada da UO-2

O segundo caso a ser estudado é a parada da outra unidade de Olefinas, a UO-2. As figuras 6.3 e 6.4 trazem, respectivamente, o novo Perfil Térmico e a interface processo-utilidade do complexo.

Os resultados da AEG do Caso 2 são mostrados nas tabelas 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8, bem como a sua variação percentual em relação ao Caso Base.

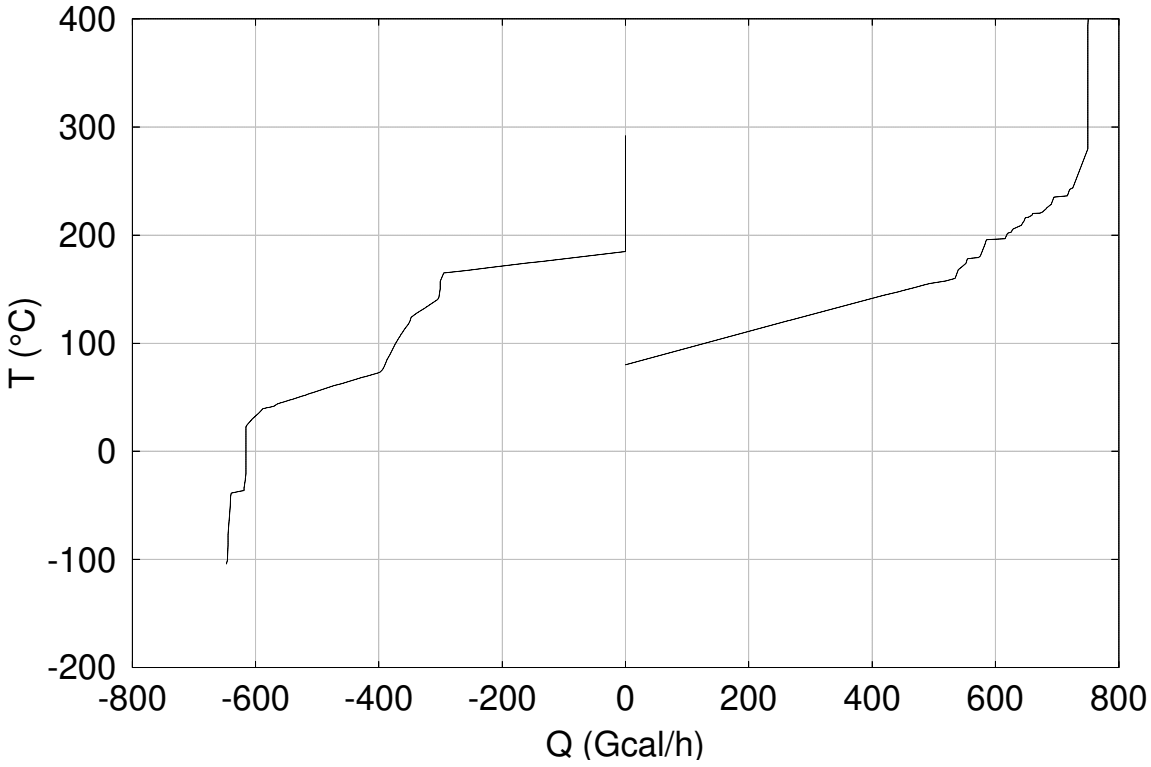


FIGURA 6.3– CASO 2 - Perfil Térmico do Complexo

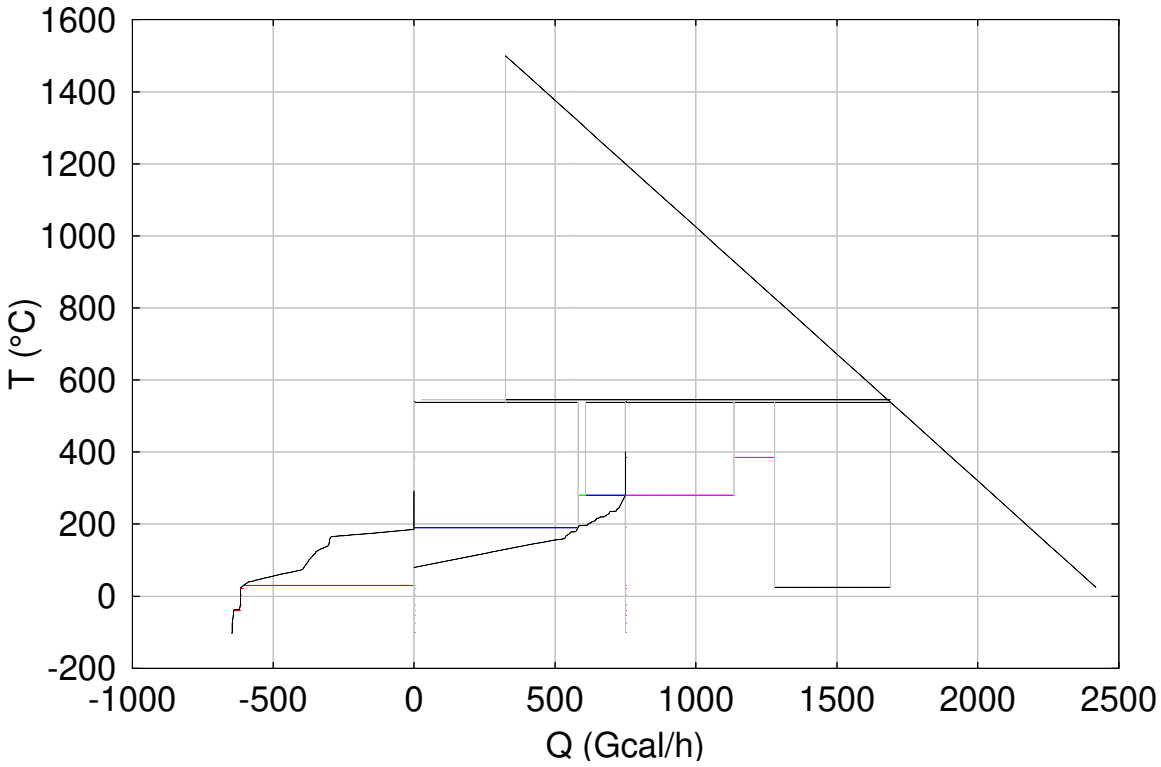


FIGURA 6.4– CASO 2 - AEG do Complexo

Tabela 6.5

Análise Energética Global – Caso 2		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	715,6	-3,0%
W Real	562,3	-3,0%
V120	1365,6	24,2%
Combustível	2093,9	24,2%

Tabela 6.6

Metas de Utilidades – Caso 2				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0,498	-	0%	-
V42	0,211	0	0%	0%
V15	167,938	0,028	-7,3%	0%
V3,5	581,622	0	-3,5%	0%
AGR	604,924	-	-46,8%	-
P+21	10,592	-	-57,8%	-
P+3	0,046	-	-98,9%	-
P-24	0,504	-	-85,9%	-
P-40	23,604	-	-5,6%	-
E-54	1,976	-	-51,2%	-
E-75	2,877	-	-51,6%	-
E-101	1,367	-	-61,3%	-

Tabela 6.7

Metas de Trabalho – Caso 2		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,3827	0%
W V15	140,576	-2,5%
W V3,5	250,9275	-3,5%
W cond	151,4	-3,0%

Tabela 6.8

Emissão CO_2 e Custo – Caso 2		
Meta	Caso 2	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**401,7**	**24,2%**
Custo Combustível (R$/h)	105.464,88	24,2%
Custo Trabalho (R$/h)	(35.814,76)	-3,0%
Custo Total (R$/h)	**69.650,12**	**45,1%**

O comportamento do complexo com a parada da UO-2 é bem semelhante ao caso anterior, devido a semelhança entre os dois processos. Como esta unidade também é uma grande produtora de V120, a sua parada impõe à UTE uma necessidade adicional de produção de V120, e consequentemente de combustível, aumentando assim a emissão de CO_2 e o custo operacional do complexo.

Percebe-se também uma grande redução nas necessidades de refrigeração, com AGR, Propileno e Etileno refrigerante, principalmente nos níveis P+3 e P-24.

6.4 – Caso 3 - Parada da UA-1

Uma outra possibilidade de parada é a manutenção de todas as unidades de Aromáticos. Por isso o próximo caso a ser estudado é a parada da UA-1. As figuras 6.5 e 6.6 mostram o Perfil Térmico e a interface processo-utilidade do complexo com a parada desta unidade.

As tabelas 6.9, 6.10, 6.11 e 6.12 trazem os resultados da AEG do Caso 3 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

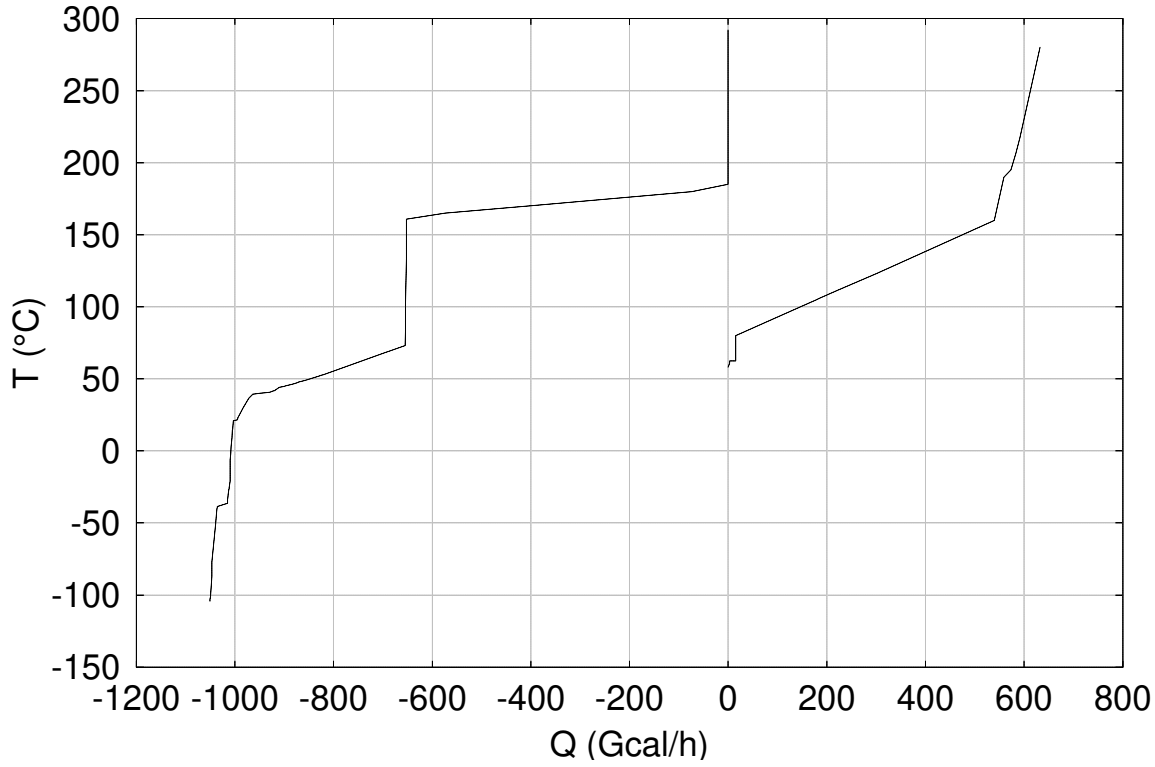


FIGURA 6.5– CASO 3 - Perfil Térmico do Complexo

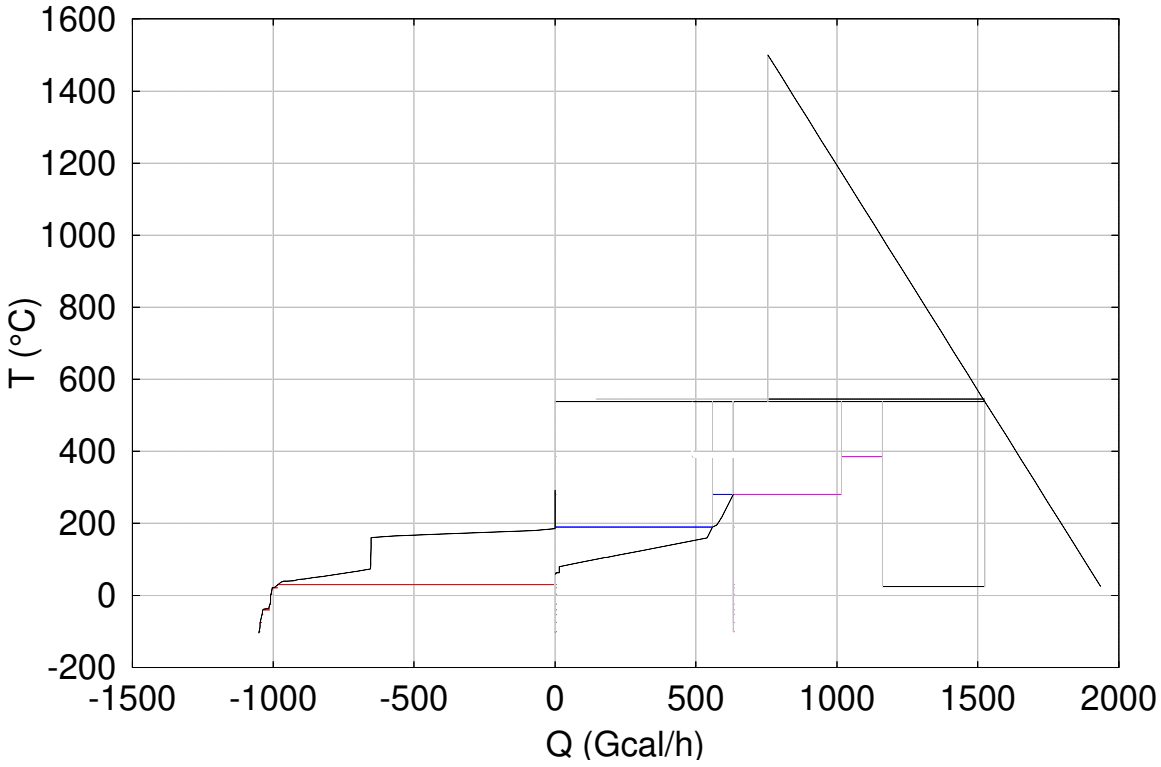


FIGURA 6.6– CASO 3 - AEG do Complexo

Tabela 6.9

Análise Energética Global – Caso 3		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	633,3	-14,2%
W Real	497,6	-14,2%
V120	769,8	-30,0%
Combustível	1180,4	-30,0%

Tabela 6.10

Metas de Utilidades – Caso 3				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0	-	-100%	-
V42	0	0	-100%	0%
V15	73,36	0,028	-59,5%	0%
V3,5	558,897	0	-7,3%	0%
AGR	983,166	-	-13,6%	-
P+21	20,191	-	-19,6%	-
P+3	4,05	-	-1,1%	-
P-24	3,586	-	0%	-
P-40	25,012	-	0%	-
E-54	4,052	-	0%	-
E-75	5,943	-	0%	-
E-101	3,531	-	0%	-

Tabela 6.11

Metas de Trabalho – Caso 3		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	0	-100%
W V15	122,478	-15,0%
W V3,5	241,1233	-7,3%
W cond	134,0	-14,2%

Tabela 6.12

Emissão CO_2 e Custo – Caso 3		
Meta	Caso 3	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**226,5**	**-30,0%**
Custo Combustível (R$/h)	59.452,52	-30,0%
Custo Trabalho (R$/h)	(31.693,17)	-14,2%
Custo Total (R$/h)	**27.759,34**	**-42,2%**

A UA-1 é uma grande consumidora de vapor, por isso sua parada proporciona, além de uma redução na produção de vapor de alta pressão e combustível, uma forte redução na produção de trabalho, uma vez que menos vapor passará pelas turbinas.

Os resultados ainda apontam para uma redução de consumo de AGR e líquido refrigerante. Este último, não é consumido nas plantas de aromáticos, tendo seu uso restrito às unidades de Olefinas. A AEG indicou uma redução pelo fato dela trabalhar com metas de consumo de utilidades, e não com a configuração real do sistema de utilidades. O mesmo ocorre com a meta de V120 para aquecimento. Na prática, este vapor não é utilizado para aquecimento devido ao alto nível de pressão, que exigiria trocadores de calor especiais, elevando muito o custo de capital da unidade. Nestes casos, geralmente são utilizados fornos de processo, que aquecem as correntes até o patamar de temperatura desejado.

Com a parada da unidade, todo o consumo de V42 do complexo é eliminado, levando a conclusão que a UA-1 é a única unidade que necessita deste nível de utilidade. Consequentemente, o trabalho realizado pela extração do V42 também é paralisado.

A redução de consumo de combustível reduz o impacto ambiental da operação do complexo, bem como o seu custo total.

A diferença de comportamento entre a parada de umas das unidades de Olefinas e a de Aromáticos, reside no fato da grande quantidade de vapor que olefinas exporta para o sistema, que causa enorme perturbações ao sistema de utilidades como visto nos Casos 1 e 2. Apesar da unidade de aromáticos também exportar vapor (V15) para o sistema, a quantidade é insignificante em comparação aos impactos proporcionados pela parada de suas unidades.

6.5 – Caso 4 - Parada da CEMAP-1 (UO-1 e UA-1)

Muitas vezes as paradas da UO-1 e UA-1 (CEMAP 1 - Central de Matérias Primas 1) ocorrem simultaneamente. As figuras 6.7 e 6.8 trazem o novo Perfil Térmico do complexo e a interface processo-utilidade com a parada destas unidades.

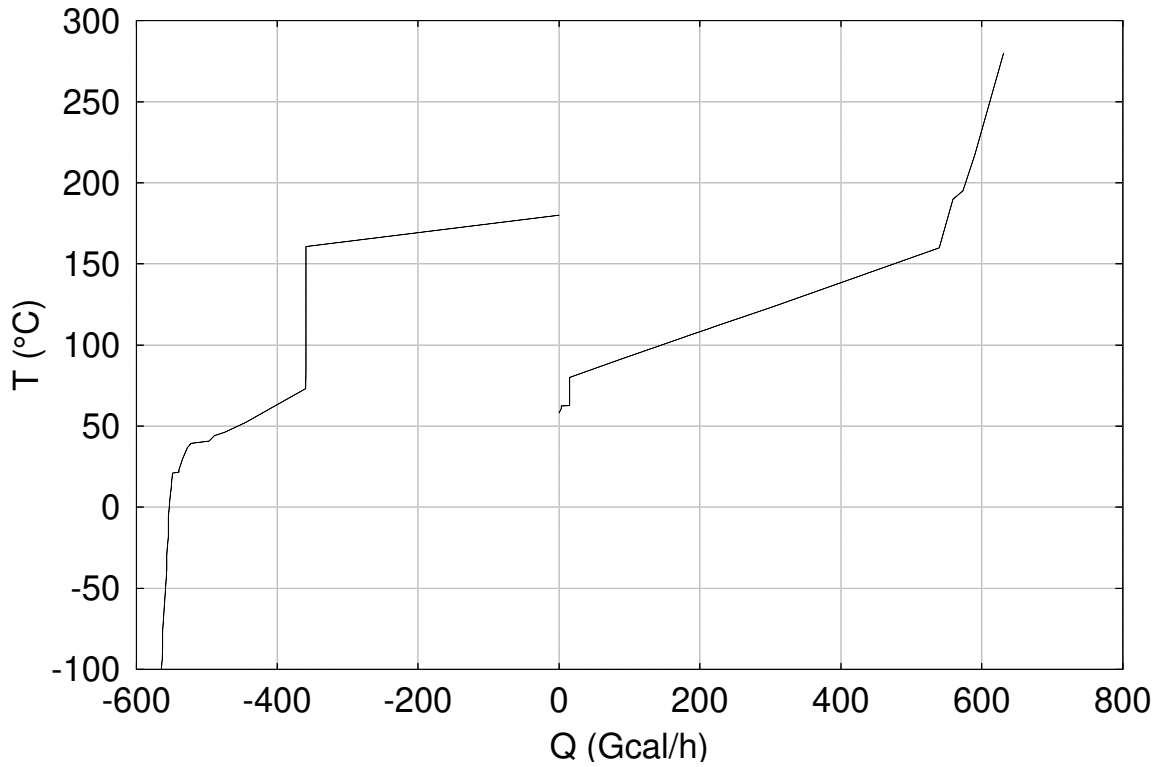


FIGURA 6.7– CASO 4 - Perfil Térmico do Complexo

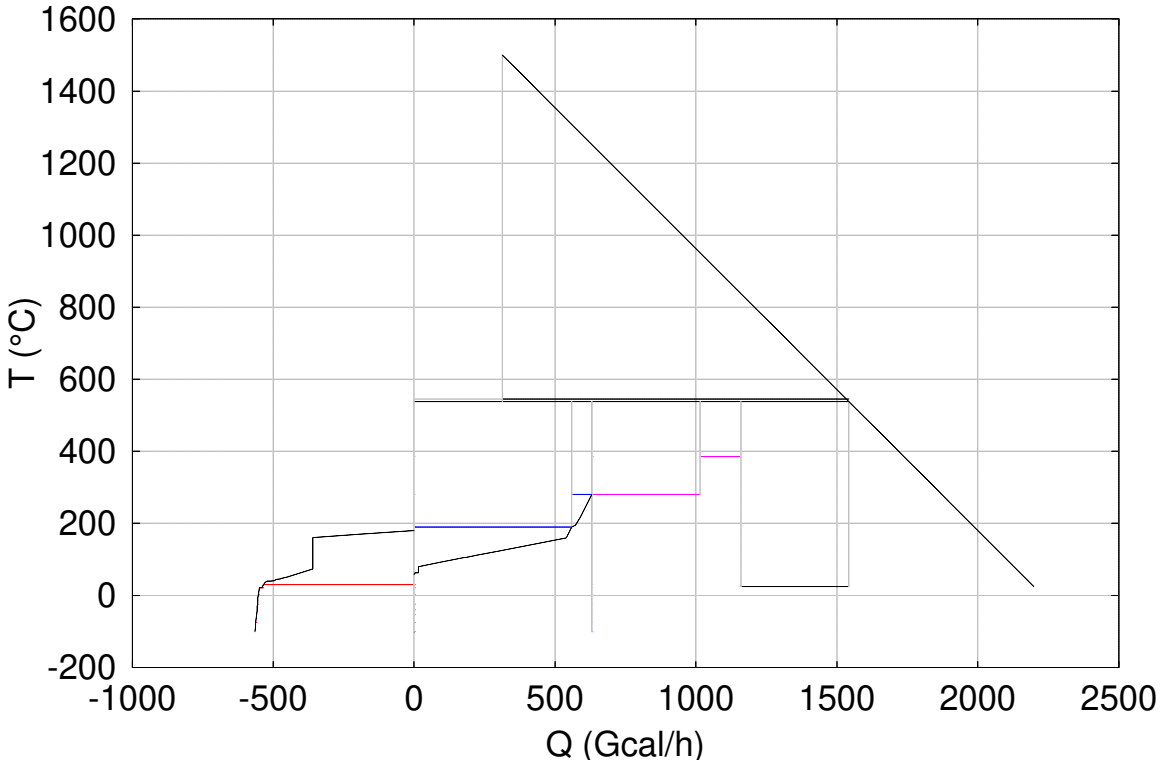


FIGURA 6.8– CASO 4 - AEG do Complexo

As tabelas 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 trazem os resultados da AEG do Caso 4 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

Tabela 6.13

Análise Energética Global – Caso 4		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	666,3	-9,7%
W Real	523,6	-9,7%
V120	1229,4	11,8%
Combustível	1884,9	11,8%

Tabela 6.14

Metas de Utilidades – Caso 4				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0	-	-100%	-
V42	0	0	-100%	0 %
V15	71,894	0	-60,3%	-100%
V3,5	558,897	0	-7,3%	0%
AGR	533,897	-	-53,1%	-
P+21	14,535	-	-42,2%	-
P+3	4,05	-	-1,1%	-
P-24	3,082	-	-14,1%	-
P-40	1,408	-	-94,4%	-
E-54	2,076	-	-48,8%	-
E-75	3,066	-	-48,4%	-
E-101	2,164	-	-38,7%	-

Tabela 6.15

Metas de Trabalho – Caso 4		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,3546	-0,1%
W V15	122,0929	-15,3%
W V3,5	241,1233	-7,3%
W cond	141,0	-9,7%

Tabela 6.16

Emissão CO_2 e Custo – Caso 4		
Meta	Caso 4	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**361,6**	**11,8%**
Custo Combustível (R$/h)	94.941,25	11,8%
Custo Trabalho (R$/h)	(33.346,69)	-9,7%
Custo Total (R$/h)	**61.594,56**	**28,3%**

A parada conjunta das duas unidades impõe ao complexo um somatório dos efeitos do Caso 1 e do Caso 3. Percebe-se uma redução no trabalho gerado, devido a redução de consumo de vapor na UA-1, porém não suficiente para anular os efeitos da redução de V120 no sistema, causado pela saída da UO-1. A redução no AGR e na refrigeração é bem elevada.

Com o aumento no consumo de combustível, a emissão de CO_2 e o custo operacional também aumentam.

6.6 – Caso 5 - Retirada dos Pré-Aquecedores da UTE

Uma questão bastante discutida pela engenharia do complexo, se refere a retirada de operação dos pré-aquecedores de água de alimentação das caldeiras. A grande dúvida sobre a operação ou não destes, reside no fato deles, apesar de apresentarem um grande consumo de vapor, também induzem uma grande quantidade de trabalho nas turbinas. Para esta avaliação a AEG se apresenta como uma excelente ferramenta.

As figuras 6.9 e 6.10 trazem as modificações no Perfil Térmico e a interface processo-utilidade, que esta modificação no processo impõe ao complexo.

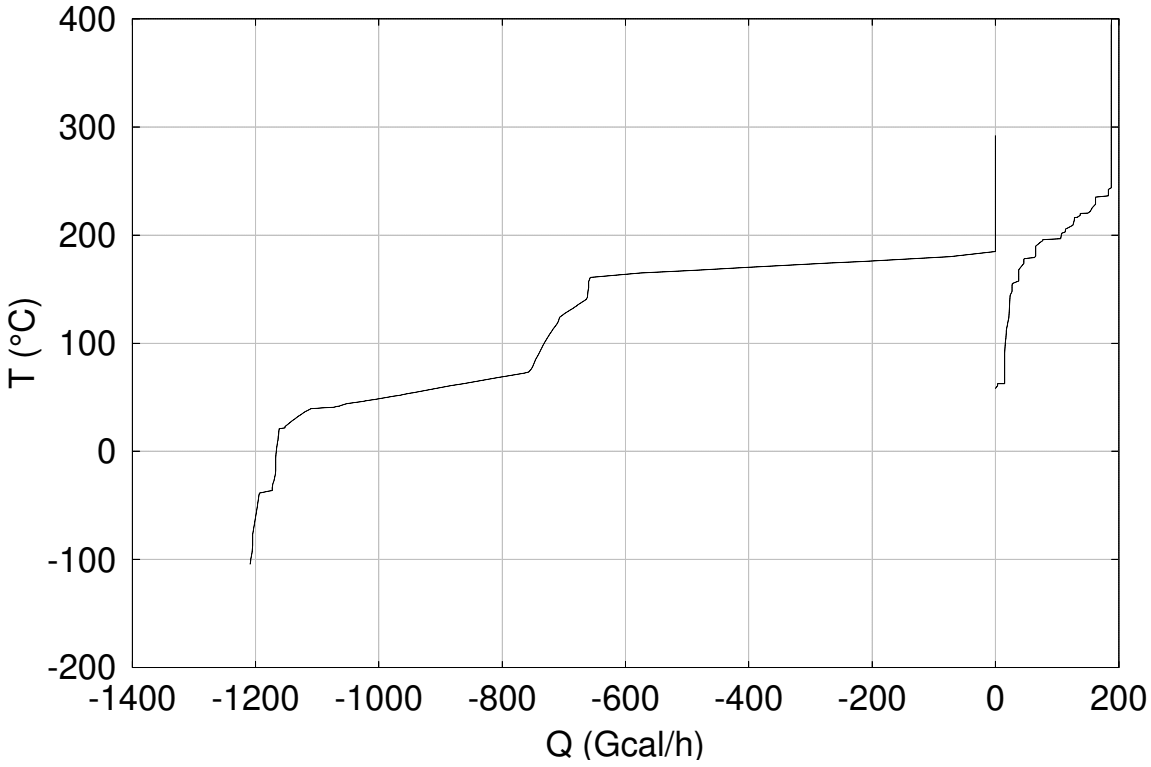


FIGURA 6.9– CASO 5 - Perfil Térmico do Complexo

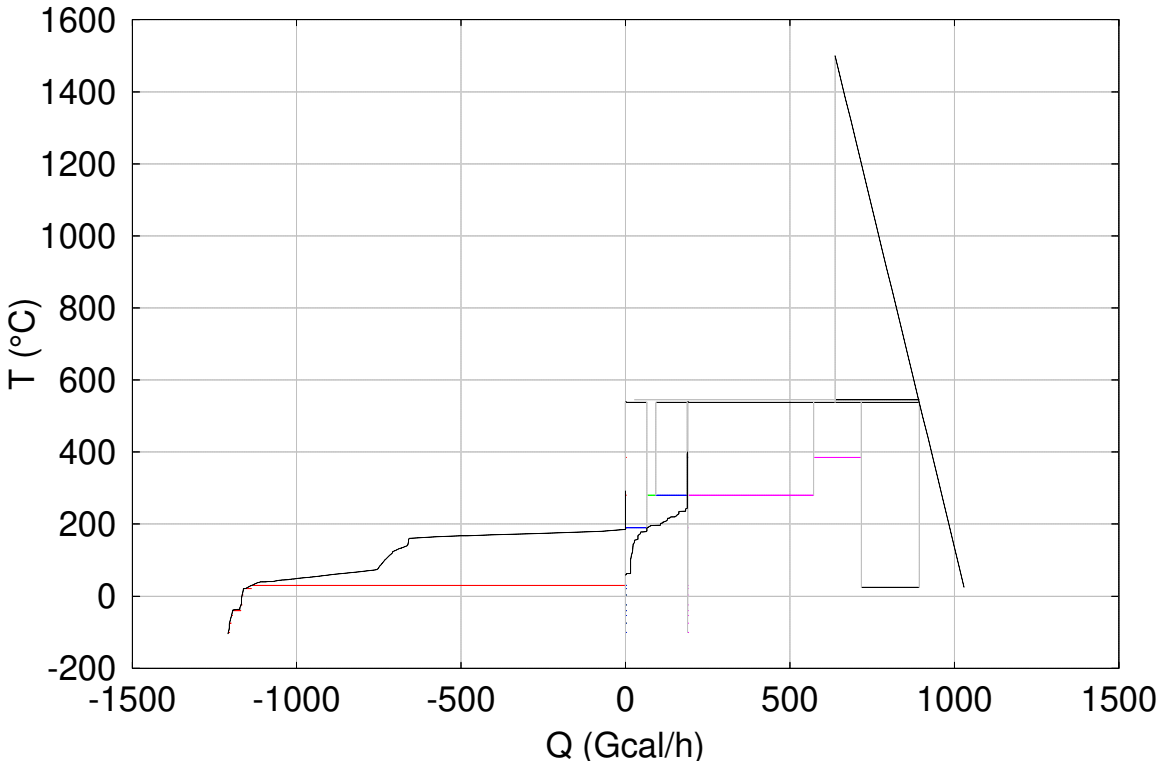


FIGURA 6.10– CASO 5 - AEG do Complexo

As tabelas 6.17, 6.18, 6.19 e 6.20 trazem os resultados da AEG do Caso 3 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

Tabela 6.17

Análise Energética Global – Caso 5		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	306,4	-58,5%
W Real	240,8	-58,5%
V120	255,8	-76,7%
Combustível	392,2	-76,7%

Tabela 6.18

Metas de Utilidades – Caso 5				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0,498	-	0%	-
V42	0,211	0	0%	0%
V15	122,471	0,028	-32,4%	0%
V3,5	65,239	0	-89,2%	0%
AGR	1136,229	-	-0,1%	-
P+21	25,127	-	0%	-
P+3	4,096	-	0%	-
P-24	3,586	-	0%	-
P-40	25,012	-	0%	-
E-54	4,052	-	0%	-
E-75	5,943	-	0%	-
E-101	3,531	-	0%	-

Tabela 6.19

Metas de Trabalho – Caso 5		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,3827	0%
W V15	128,3997	-10,9%
W V3,5	28,1459	-89,2%
W cond	64,8	-58,5%

Tabela 6.20

Emissão CO_2 e Custo – Caso 5		
Meta	Caso 5	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**75,3**	**-76,7%**
Custo Combustível (R$/h)	19.756,61	-76,7%
Custo Trabalho (R$/h)	(15.334,71)	-58,5%
Custo Total (R$/h)	**4.421,90**	**-90,8%**

A drástica mudança no Perfil Térmico Frio do complexo com a retirada dos pré-aquecedores, indica que os mesmos são grandes responsáveis pelo consumo de vapor de aquecimento, nos níveis V3,5 e V15, no complexo. A retirada destes equipamentos implica diretamente em uma redução no V120 gerado e, consequentemente, na redução do consumo de combustível. Porém, como penalidade a esta redução, a capacidade de co-geração do complexo também é reduzida significativamente.

A definição quanto a viabilidade desta modificação deve ser realizada sob o ponto de vista econômico. Como o combustível da central apresenta um elevado custo, em detrimento do baixo custo do trabalho (custo da energia elétrica adquirida), esta mudança operacional apresenta uma alta atratividade econômica.

Além disto, esta modificação proporciona uma grande redução no impacto ambiental da central, pela queda na emissão de poluentes.

Porém, a implementação desta modificação operacional deve ser precedida de uma minuciosa análise da engenharia, visto que ela impõe algumas restrições ao sistema, sendo a principal delas, a redução na capacidade de geração das caldeiras.

6.7 – Caso 6 - Entrada de Nova Unidade

Outra grande utilidade da AEG, está no fato dela prever facilmente o comportamento do sistema com a entrada em operação de novas unidades de processo, ainda na fase inicial do projeto.

Neste caso será estudado o impacto proporcionado pela partida de uma nova unidade, que tem por objetivo separar nafta de um condensado de petróleo, por fracionamento. As figuras 6.11 e 6.12 trazem, respectivamente, a Curva Composta e a Grande Curva Composta Monotônica desta nova unidade.

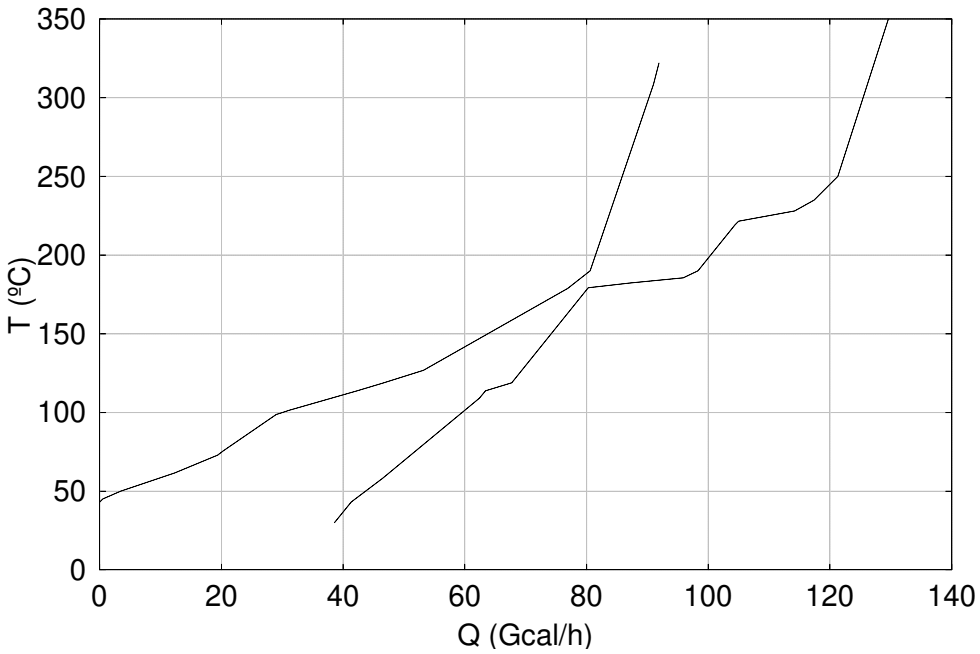


FIGURA 6.11– Curva Composta da Nova Unidade

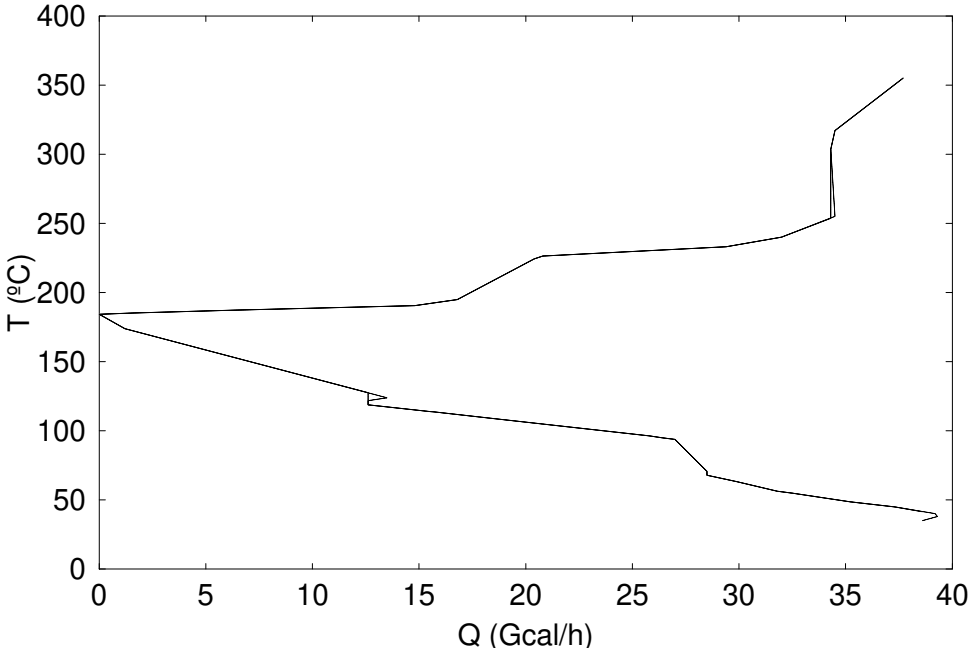


FIGURA 6.12– Grande Curva Composta Monotônica da Nova Unidade

Com esta nova curva é possível construir os novos Perfis Térmicos do complexo e a sua interface com o sistema de utilidades, visto nas figuras 6.13 e 6.14, respectivamente.

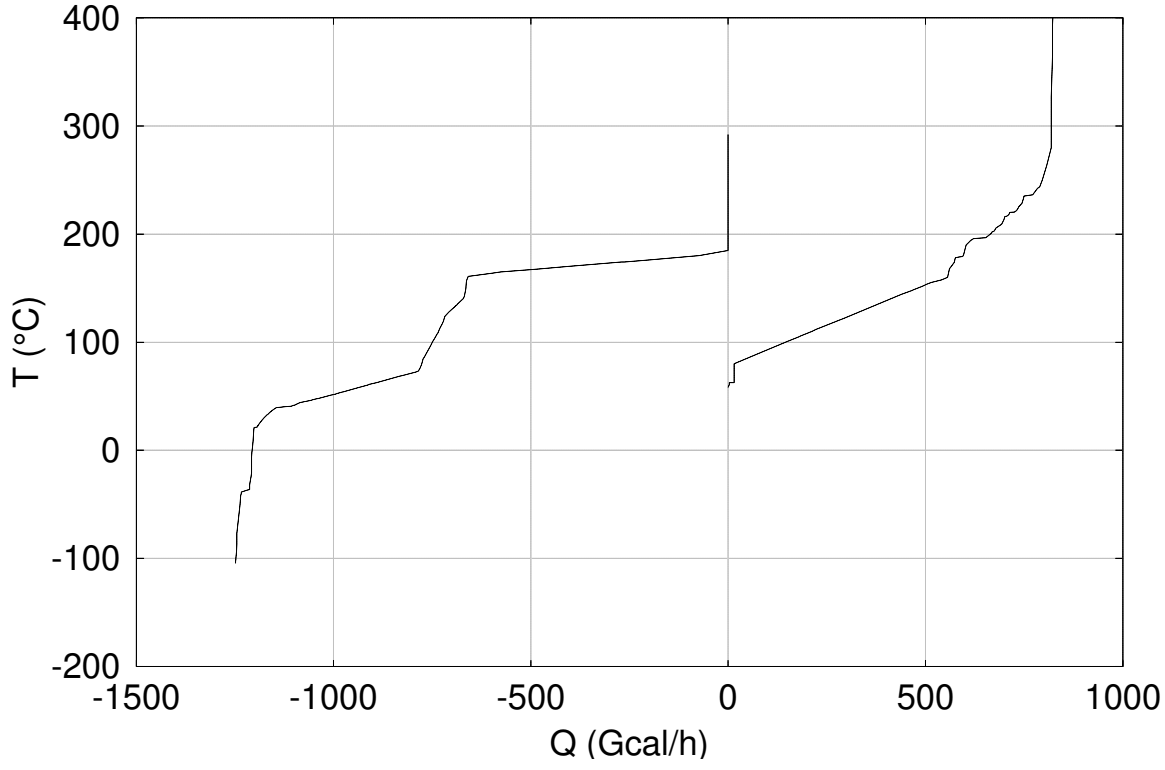


FIGURA 6.13– CASO 6 - Perfil Térmico do Complexo

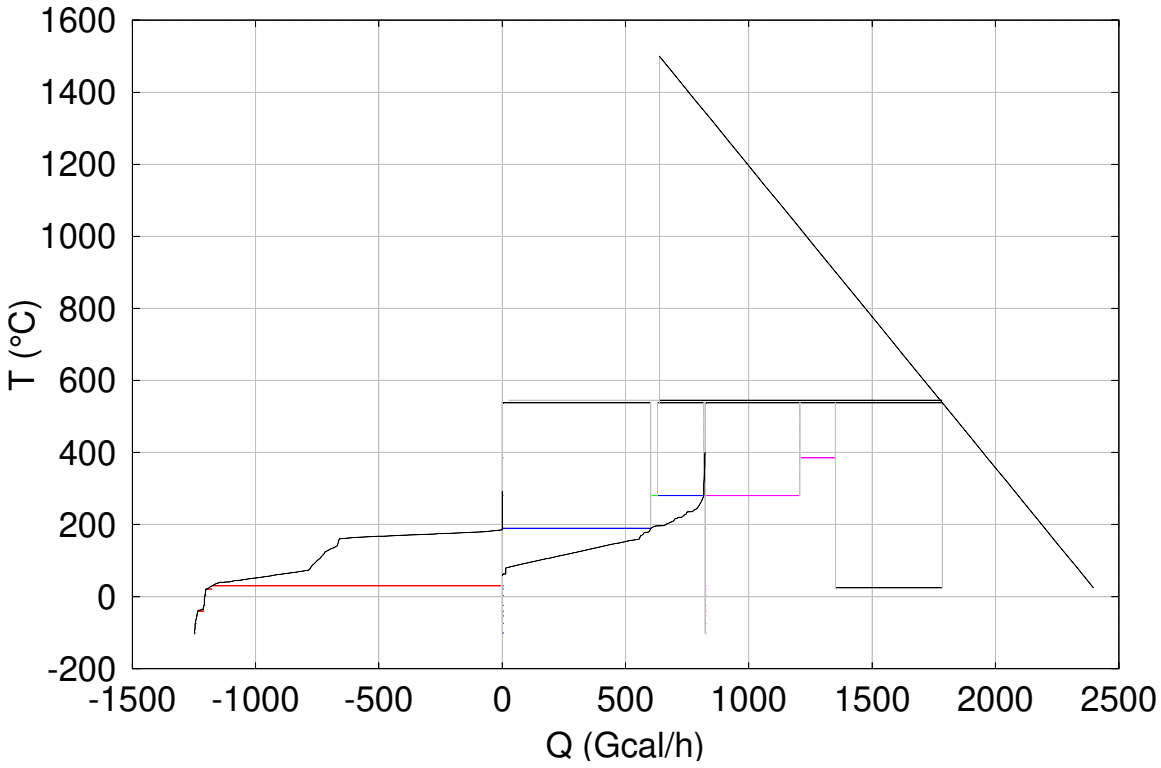


FIGURA 6.14– CASO 6 - AEG do Complexo

As tabelas 6.21, 6.22, 6.23 e 6.24 trazem os resultados da AEG do Caso 6 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

Tabela 6.21

Análise Energética Global – Caso 6		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	754,5	2,3%
W Real	592,9	2,3%
V120	1147,1	4,3%
Combustível	1758,9	4,3%

Tabela 6.22

Metas de Utilidades – Caso 6				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0,498	-	0%	-
V42	3,606	0	1609%	0%
V15	215,439	0,028	18,9%	0%
V3,5	602,879	0	0%	0%
AGR	1176,157	-	3,4%	-
P+21	25,127	-	0%	-
P+3	4,096	-	0%	-
P-24	3,586	-	0%	-
P-40	25,012	-	0%	-
E-54	4,052	-	0%	-
E-75	5,943	-	0%	-
E-101	3,531	-	0%	-

Tabela 6.23

Metas de Trabalho – Caso 6		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,8359	2,3%
W V15	153,2973	6,4%
W V3,5	260,0984	0%
W cond	159,7	2,3%

Tabela 6.24

Emissão CO_2 e Custo – Caso 6		
Meta	Caso 6	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**337,4**	**4,3%**
Custo Combustível (R$/h)	88.590,50	4,3%
Custo Trabalho (R$/h)	(37.762,54)	2,3%
Custo Total (R$/h)	**50.827,96**	**5,9%**

A entrada em operação desta nova unidade irá proporcionar um aumento no consumo total de vapor, com consequente aumento de combustível e trabalho gerado. Também é notado um aumento significativo no consumo do V42, isto se deve ao fato da unidade processar óleo pesado, e necessitar de utilidades com temperaturas elevadas nos refervedores das colunas de destilação. Nota-se também um aumento no consumo de AGR.

O impacto final desta unidade para complexo é um aumento na emissão de poluentes e no custo operacional.

6.8 – Caso 7 - Mudança de Temperatura de Utilidade

A AEG não é apenas capaz de avaliar mudanças no processo. Ela também pode ser utilizada para avaliar e até propor mudanças no sistema de utilidades. Pela análise do Perfil Térmico do complexo, realizada através da figura 5.21 (Caso Base), é fácil perceber que uma pequena redução na temperatura da utilidade V3,5, iria colocá-la em um patamar que permitiria a sua geração pela correntes de processo, e não apenas pela extração em turbinas. Para realizar esta análise, a temperatura do V3,5 foi reduzida de 190 ºC para 170 ºC.

A figura 6.15 traz o Perfil Térmico, que se mantém inalterado, pois não houve modificações nos processos, e a figura 6.16 mostra as grandes mudanças ocorridas na interface processo-utilidade com esta mudança no sistema de utilidades.

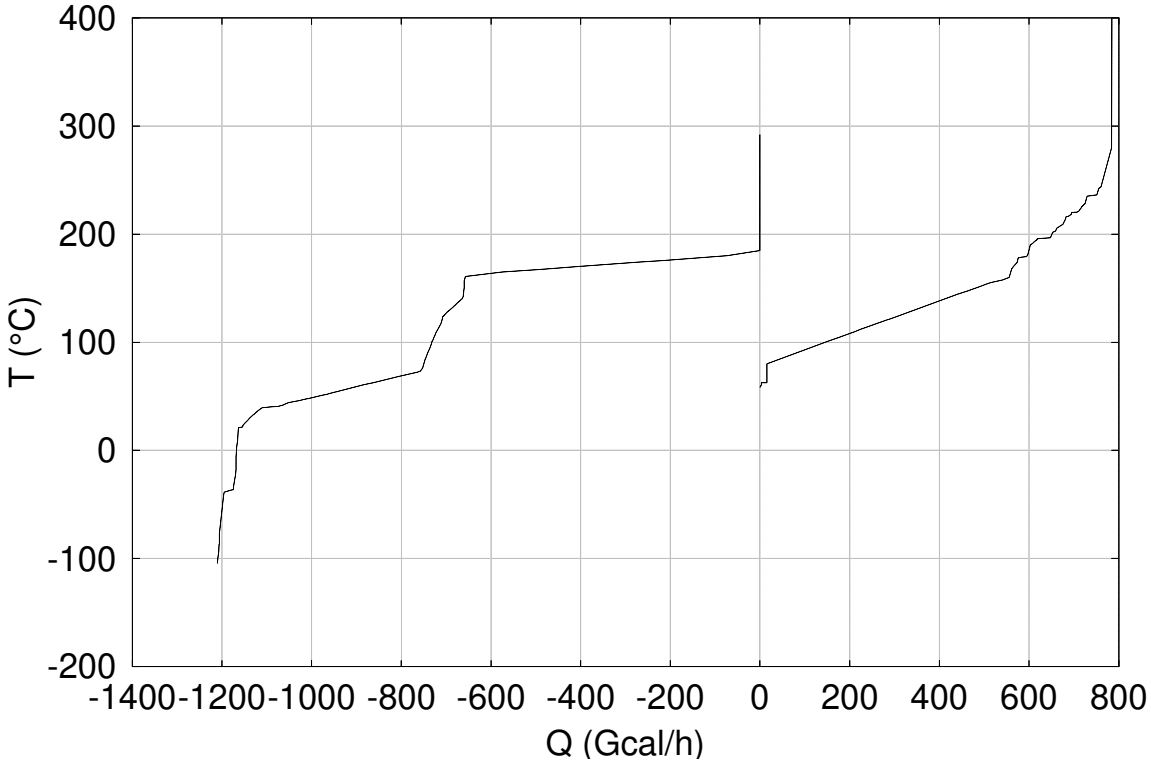


FIGURA 6.15– CASO 7 - Perfil Térmico do Complexo

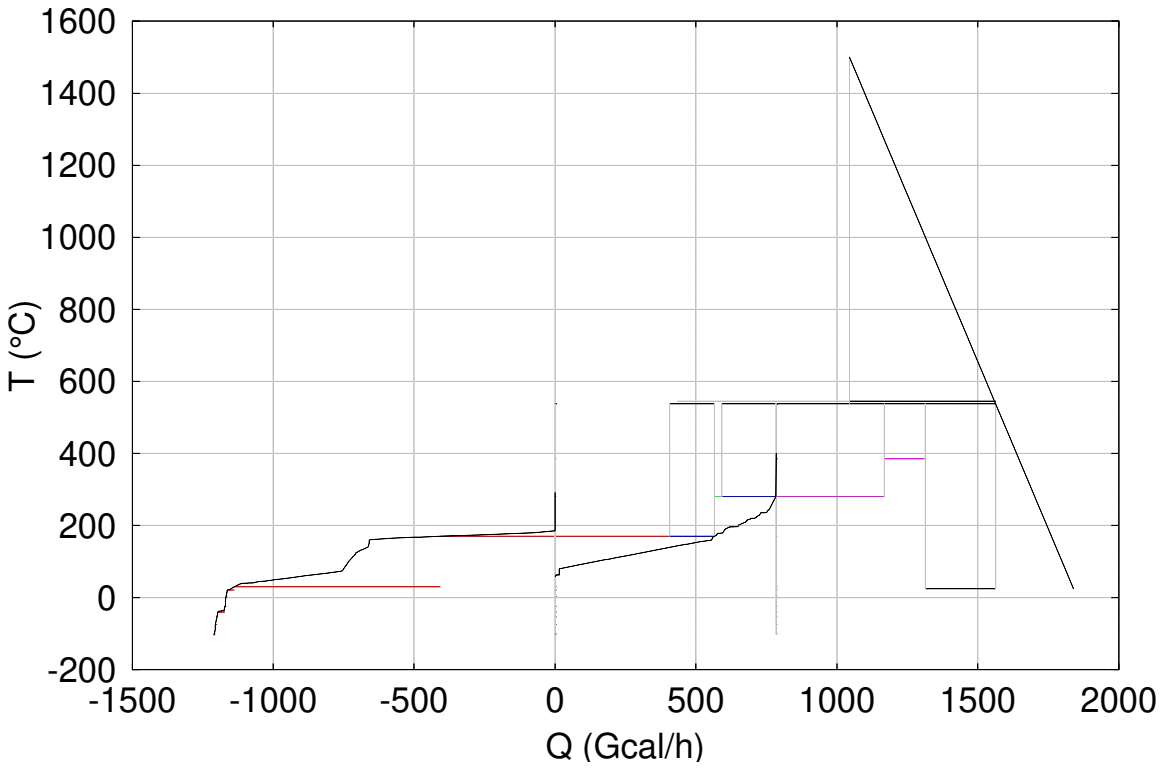


FIGURA 6.16– CASO 7 - AEG do Complexo

As tabelas 6.25, 6.26, 6.27 e 6.28 trazem os resultados da AEG do Caso 7 e a variação percentual em relação ao Caso Base.

Tabela 6.25

Análise Energética Global – Caso 7		
Meta	Energia (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W Ideal	433,8	-41,2%
W Real	340,9	-41,2%
V120	518,5	-52,9%
Combustível	795,0	-52,9%

Tabela 6.26

Metas de Utilidades – Caso 7				
Meta	Consumo (Gcal/h)	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)	
V120	0,498	-	0%	-
V42	0,211	0	0%	0%
V15	219,115	0,028	21,0%	0%
V3,5	564,916	406,766	-6,3%	100%
AGR	730,759	-	-35,8%	-
P+21	25,127	-	0%	-
P+3	4,096	-	0%	-
P-24	3,586	-	0%	-
P-40	25,012	-	0%	-
E-54	4,052	-	0%	-
E-75	5,943	-	0%	-
E-101	3,531	-	0%	-

Tabela 6.27

Metas de Trabalho – Caso 7		
Meta	Produção (Gcal/h)	Variação – Caso Base (%)
W V42	19,3827	0%
W V15	154,2818	7,1%
W V3,5	75,4075	-71,0%
W cond	91,8	-41,2%

Tabela 6.28

Emissão CO_2 e Custo – Caso 7		
Meta	Caso 2	Variação – Caso Base (%)
Emissão CO_2 (t/h)	**152,5**	**-52,9%**
Custo Combustível (R$/h)	40.044,25	-52,9%
Custo Trabalho (R$/h)	(21.710,29)	-41,2%
Custo Total (R$/h)	**18.333,97**	**-61,8%**

Esta modificação na temperatura do V3,5 leva à possibilidade de boa parte desta utilidade ser gerada pelas próprias correntes de processo, implicando em uma grande redução no uso de AGR, uma vez que o resfriamento destas correntes serão realizadas pela própria geração do V3,5.

Uma penalidade direta para esta redução na temperatura do V3,5, consiste no fato que parte das correntes frias, que antes podiam ser aquecidas por esta utilidade, não mais poderão ser atendidas por ela, sendo necessário o uso da utilidade com temperatura imediatamente superior. Isto explica o aumento no uso do V15.

Como parte do vapor que será utilizado para aquecimento, é agora gerado pelo próprio processo, a quantidade de vapor de super alta pressão (V120), que necessita ser gerado, reduz, com a consequente redução no consumo de combustível e geração de trabalho. Assim como no Caso 5, o resultado final é positivo, devido ao maior custo dos combustíveis em relação à energia elétrica. A redução de combustível leva à redução da emissão de poluentes e do impacto ambiental causado pelo complexo.

Obviamente que uma mudança deste porte, em um sistema de utilidades já existente, seria muito complexo, visto que exigiria transformações profundas na estrutura do sistema de utilidades, bem como no próprio processo. Porém esta qualidade de informação é de extrema utilidade na fase inicial do projeto, quando é realizado a escolha das utilidades. Muitas vezes esta escolha é baseada apenas

na cultura operacional do projetista ou na tradição da empresa. Com o uso da AEG, é possível determinar, ainda na fase do projeto, a melhor estrutura do sistema de utilidades para um determinado complexo, podendo, inclusive, realimentar o projeto das unidades, introduzindo mudanças, que conduzam a uma maior eficiência energética.

Existe ainda a possibilidade de utilizar esta informação para propor mudanças durante grandes intervenções nas unidades, a exemplo de ampliações, onde o capital a ser investido pode ser redirecionado. Ou ainda, pode-se propor a criação de um sub-nível de utilidade para uso localizado em determinadas unidades do complexo.

Capítulo 7 – Conclusão e Sugestões

7.1 – A Análise Energética Global

Visto a crescente importância dos custos energéticos e dos aspectos ambientais na indústria petroquímica, a redução do consumo energético, e, consequentemente, das reduções de emissões atmosféricas, se tornaram um fator de competitividade essencial ao setor. Dentre os diversos esforços obtidos no sentido de otimizar energeticamente as plantas petroquímicas, algumas novas metodologias surgiram, dentre elas a Análise Energética Global (AEG).

A Análise Energética Global, que amplia a Análise *Pinch* a todo o complexo, se baseia nos Perfis Térmicos Quente e Frio, que representam toda a necessidade de aquecimento e resfriamento das correntes de processos, e são obtidos a partir das Grandes Curvas Compostas dos processos. Com estes perfis é possível determinar as metas energéticas e ambientais do complexo:

- Consumo de vapor;
- Consumo de refrigeração;
- Consumo de combustível;
- Geração de trabalho;
- Emissões de poluentes.

Estas metas descritas acima são obtidas diretamente dos Perfis Térmicos, com exceção da geração de trabalho, que necessita da eficiência exergética do sistema de turbinas para sua determinação.

No presente trabalho, esta metodologia, proposta por DHOLE e LINNHOFF, em 1993, foi apresentada e aplicada.

7.2 – Análise Energética Global de um Complexo Petroquímico

O potencial da ferramenta foi testado através da sua aplicação à central de matérias primas e utilidades do Pólo Petroquímico de Camaçari – a Unidade de

Insumos Básicos da Braskem. Composto por diversos processos servidos por um único sistema de utilidades, o complexo estudado se encaixa perfeitamente à definição de complexo proposta pela metodologia.

Para a aplicação da AEG a este complexo, foi necessário desenvolver uma abordagem especial para algumas correntes específicas de utilidades, como o vapor produzido pelo processo e incorporado ao sistema de utilidades; e o vapor destinado a comercialização ou com algum uso específico, como vapor de diluição ou separação. Estas correntes foram denominadas Utilidade Importada e Utilidade Exportada, respectivamente, e tiveram uma abordagem diferenciada das utilidades tradicionais.

Primeiramente, foi realizada a Análise Energética Global do Caso Base com todos os processos em operação, da qual foram obtidas todas as metas de consumo energético, emissão de CO_2, além de uma análise simplificada de custo operacional. Em uma segunda etapa, foram realizados diversos estudos de casos que caracterizam algumas operações especiais do complexo, devido a paradas para manutenção; além da entrada em operação de uma nova unidade; e mudanças na estrutura do sistema de utilidades. Os casos estudados foram:

- Caso 1: Parada da UO-1
- Caso 2: Parada da UO-2
- Caso 3: Parada da UA-1
- Caso 4: Parada da CEMAP-1 (UO-1 e UA-1)
- Caso 5: Retirada dos Pré-Aquecedores da UTE
- Caso 6: Entrada de Nova Unidade
- Caso 7: Mudança de Temperatura de Utilidade

Destas análises realizadas, e de sua comparação com o Caso Base, foi possível obter o perfil energético característico deste complexo, bem como os impactos causados pela retirada de operação de algumas unidades. Um resumo dos resultados obtidos encontra-se no Apêndice I.

Uma primeira percepção da utilidade da AEG, foi obtida através destes estudos de casos, quando foi possível identificar a parcela de contribuição de cada unidade isolada, para a composição do todo, sob o ponto de vista energético.

Pela análise geral destes resultados, percebe-se que o sistema de utilidades é muito dependente das unidades de Olefinas, devido à grande contribuição destas duas unidades ao sistema de vapor de super alta pressão (V120). Este fato leva a um enorme aumento de custo operacional, quando da retirada de uma destas unidades para manutenção.

Percebe-se também, que a própria central de utilidades tem um forte peso no consumo de vapor do complexo, pelo pré-aquecimento de água de alimentação das caldeiras. A análise deste caso indica que a parada destes equipamentos pode levar a uma grande economia de combustível e consequente redução da emissão de poluentes. Este é um aspecto importante da AEG: a ferramenta permite identificar facilmente as mudanças operacionais ou as modificações que necessitam serem implantadas para propiciar uma redução no impacto ambiental do complexo. Esta qualidade de análise é muito importante, na medida que as leias ambientais venham a se impor como uma restrição à operação de uma indústria.

O grande motivador da viabilidade da modificação comentado acima (Caso 5) é a relação existente entre o custo do combustível e o custo do trabalho de co-geração. Apesar do custo específico do trabalho de co-geração ser superior ao custo do combustível, ele ainda encontra-se em um nível, que os benefícios globais obtidos pela retirada de operação de um grande consumidor de vapor é muito superior às penalidades causadas (redução do trabalho de co-geração). Em uma unidade existente, o limite para esta redução encontra-se, primeiramente, na possibilidade de substituir este trabalho, que deixou de ser gerado, por energia elétrica adquirida externamente, e, em seguida, pela confiabilidade deste fornecimento. Esta avaliação é muito sensível à mudança dos preços de energia elétrica e de combustível, devendo ser reavaliado constantemente.

Uma outra característica marcante deste complexo é a impossibilidade de geração de utilidades por resfriamento das correntes quentes de processo. Isto se

deve ao fato do menor nível de utilidade (V3,5) apresentar um nível de temperatura tal, que esta troca se torna inviável. O Perfil Térmico do complexo permite identificar facilmente que uma pequena redução na temperatura desta utilidade permitiria uma mudança radical neste cenário. Na simulação realizada (Caso 7), uma redução de 20 ºC na temperatura do V3,5 proporcionaria uma grande mudança conceitual no sistema de utilidades, levando a uma grande redução de custos.

Também nota-se que boa parte das correntes que necessitam de aquecimento podem ser supridas pelo vapor V3,5. Porém, na prática, poucas correntes de processo utilizam esta utilidade para aquecimento, aumentando o consumo de vapor V15 e V42. É importante ressaltar, que neste caso, antes de qualquer modificação no sentido de substituir tais utilidades, é necessário um estudo de viabilidade econômica, uma vez que, ao se utilizar um vapor com temperatura menor, necessita-se de um trocador com área maior, aumentando o custo de capital.

Estas duas informações relacionadas ao V3,5, seriam muito mais úteis na fase de projeto, quando mudanças conceituais como estas seriam facilmente analisadas e implementadas. Porém, estas informações não podem ser desprezadas para um complexo já existente, pois elas servem de base para novos projetos e futuras modificações nas unidades, quando alguma modificação pode ser implementada sem custo adicional, pelo redirecionamento do capital a ser investido.

A conclusão mais importante extraída destas análises é que, para se obter uma boa análise energética de um complexo, é imperativo que ela seja realizada de forma conjunta, levando em consideração todos os processos e a central de utilidades.

7.3 – Sugestões para Trabalhos Futuros

Pelo fato da AEG trabalhar com metas de consumo energético, a configuração do sistema de turbinas proposto por ela visa atender a estas metas. Isto pode causar uma certa distorção em relação a realidade, caso o sistema existente não tenha sido concebido de forma otimizada, como proposto.

Por esta razão, propõe-se para um trabalho futuro, a adaptação da AEG, para permitir que o sistema de turbinas e troca térmica seja implementado na análise como ele é realmente. Isto permitiria uma comparação mais rápida do ideal com o real, e indicaria, diretamente, as modificações necessárias no sistema de utilidades para se obter uma otimização energética.

Com esta modificação, a análise de impactos operacionais seria ainda mais realista. Além disto, a configuração existente poderia ser encarada como uma restrição a modificações propostas.

7.4 – Conclusão Final

A Análise Energética Global, estudada neste trabalho, se mostrou uma ferramenta de extrema utilidade para obter a excelência no consumo energético. A sua utilização na fase de projeto proporciona um grande ganho a esta etapa, uma vez que permite, de forma simples, uma visão integrada das unidades de processo e do sistema de utilidades, apontando mudanças nos processos, ou no próprio sistema de utilidades, que permitam um menor consumo energético total, ainda na fase inicial do projeto. A ferramenta também se mostrou extremamente útil para a análise de impactos de mudanças operacionais, possibilitando um melhor planejamento energético do complexo.

Referência Bibliográfica

AHMAD, S., HALL, S. G., MORGAN, S.W., PARKER, S.J., Pratical Process Integration: An Introduction to Pinch Technology, Cambridge: Aspen Technology Inc. – www.aspentech.com, 1998

DAVISON, R., Pinch Helps Energy Efficiency Drive, European Chemical News, July, 1992

DAVISON, R., Extending Pinch to the Site Boundary, European Chemical News, July, 1993

DHOLE, V. R., LINNHOFF, B., Total Site Targets for Fuel, Co-generation, Emissions and Cooling, European Symposium on Computer Aided Process Engineering 2, p. S105-S109, 1993

FREITAS, V. A. , Eficiência Energética de Processos – Análise Pinch, Uma Nova Abordagem, Química Industrial, Nº 50, 1996

HUI, C.W., AHMAD, S., Total Site Heat Integration Using the Utility System, Computers Chem. Engng, Vol 18, N^{o} 8, p. 729-742, 1994a

HUI, C.W., HASEGAWA S., NATORI, Y., Total Site Energy Optimisation, Proceedings of PSE'94, p. 733-737, 1994b

KLEMES J., DHOLE, V. R., RAISSI, K., PERRY, S. J., PUIGJANER, L., Targeting and Design Methodology for Reduction of Fuel, Power and CO_2 on Total Sites, Applied Thermal Engineering, Vol 17, N^{o} 8-10, p. 993-1003, 1997

LINNHOFF, B., FLOWER, J. R., Synthesis of Heat Exchanger Networks, Part I, Systematic Generation of Energy Optimal Networks, AIChE Journal, v. 24, p. 633-642, 1978

LINNHOFF, B., TOWNSEND, D. W., BOLAND, D., HEWITT, G. F., THOMAS, B. E. A., GUY, A. R., MARSLAND, R.H., A User Guide on Process Integration for Efficient Use of Energy, Rugby: IchemE: Warwick Printing Company Ltd, 1982

LINNHOFF, B., SMITH, R., The Pinch Principle, Mechanical Engineering, February, 1988

LINNHOFF, B., Pinch Technology for the Synthesis of Optimal Heat and Power Systems, Journal of Energy Resources Technology, Vol 111, 1989

LINNHOFF, B., DHOLE, V. R, Shaftwork Targets for Low-Temperature Process Design, Chemical Engineering Science, Vol 47, N^{o} 8, p. 2081-2091, 1992

LINNHOFF, B., DHOLE, V. R., Targeting for CO_2 Emissions for Total Sites, Chem. Eng. Technol. 16, p.252-259, 1993a

LINNHOFF, B., Pinch Analysis – A State-Of-Art Overview, Trans IchemE, Vol. 71, part A, 1993b

LINNHOFF, B., et al, Introduction to Pinch Technology, Northwich: Linnhoff March, www.linnhoffmarch.com, 1998

MARÉCHAL, F., KALITVENTZEFF, B., Energy Integration of Industrial Sites: Tools, Methodology and Application, Applied Thermal Engineering, 18, p. 921-933, 1998

NURMINEN, M., TAMMINEN, E., Experiences of Optimizing Refinery Energy Use with Process Integration, Proceedings of 15th World Petroleum Congress, John Wiley & Sons, p. 991-995, 1998

PEREIRA, A. C., SILVA, M. A. S., Processos de Produção da Copene, BRASKEM – Publicação Interna, Julho, 2000

PRETTY, B. L., RUTKOWSKI, M.A., Strategic Energy Assessment Using Pinch Analysis, National Petroleum Refiners Association – Annual Meeting, 1994

ROSSITER, A. P., RUTKOWSKI, M. A., DHOLE, V.K., Industrial Site Targets for Energy and Emissions, PWR-Vol.20, Industrial power Conference, ASME, 1993

ROSSITER, A., Process Integration and Pollution Prevention, AIChE Symposium Series, No 303, Vol 90, 1994

RUDMAN, A., Process Integration: Planning Your Total Site, Chemical Technology Europe, Jan-Feb, 1995

SANTOS, L. C., Síntese de Sistemas de Recuperação de Energia para Trocadores do Tipo Casco e Tubos com Restrições de Troca Térmica, UNICAMP, Tese de Mestrado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2000

SHENOY, U. V., Heat Exchanger Network Systhesis: Process Optimization by Energy and Resource Analysis, Houston: Gulf Publisihing Company, 1995

SKELLAND, J., PETELA, E., Optimization of Total Site Energy and Utility Systems Using Pinch Analysis Concepts, kemia-Kemi, Vol 20, p.305-308, 1993

SMITH, R., Chemical Process Design, New York: McGraw-Hill, 1995

TAMMINEN, E., Total Site Analysis of Neste Oy Porvoo Refinery, AspenWorld 97, 1997

TORRES, E. A., Avaliação Exergética e Termoeconômica de um Sistema de Cogeração de um Pólo Petroquímico, Tese de Doutorado, UNICAMP, Campinas, São Paulo, 1999

TOWNSEND, D. W., LINNHOFF, B., “Surface Area Targets for Heat Exchanger Networks”, IchemE Annual Research Mtg, Bath, April, 1984

UMEDA, T., HARADA, T., SHIROKO,K., A Themodynamic Approch to the Synthesis of Heat Integration Systems in Chemical Process, Computers & Chemical Engineering, Vol 3, p 273-282, 1979

YODA, H., SHIBUYA H., An Approch to Minimum Energy plant Design Incorporating Pinch Technology and State-of-Art Equipment, National Petroleum Refiners Association – Annual Meeting, 1995

Apêndice I – Resumo dos Resultados

A.1 – Análise Energética Global - Resultados

Caso	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Descrição	Todo Complexo Operando	Parada UO-1	Parada UO-2	Parada UA-1	Parada CEMAP-1 (UO-1 E UA-1)	Parada Pré-Aquecedores Água UTE	Nova Área em Operação	Mudança de Nível de Vapor (V3,5 T=170)
W Ideal	737,7	737,1	715,6	633,3	666,3	306,4	754,5	433,8
W Real	579,7	579,2	562,3	497,6	523,6	240,8	592,9	340,9
V120	1099,8	1395,0	1365,6	769,8	1229,4	255,8	1147,1	518,5
Combustível	1686,3	2138,9	2093,9	1180,4	1884,9	392,2	1758,9	795,0
V42 Gerado	0	0	0	0	0	0	0	0
V15 Gerado	0,028	0	0,028	0,028	0	0,028	0,028	0,028
V3,5 Gerado	0	1E-10	0	0	0	0	0	406,766
V120 Consumido	0,498	0,498	0,498	0	0	0,498	0,498	0,498
V42 Consumido	0,211	0,211	0,211	0	0	0,211	3,606	0,211
V15 Consumido	181,151	179,685	167,938	73,36	71,894	122,471	215,439	219,115
V3,5 Consumido	602,879	602,879	581,622	558,897	558,897	65,239	602,879	564,916
AGR	1137,526	688,257	604,924	983,166	533,897	1136,229	1176,157	730,759
P+21	25,127	19,471	10,592	20,191	14,535	25,127	25,127	25,127
P+3	4,096	4,096	0,046	4,05	4,05	4,096	4,096	4,096
P-24	3,586	3,082	0,504	3,586	3,082	3,586	3,586	3,586
P-40	25,012	1,408	23,604	25,012	1,408	25,012	25,012	25,012
E-54	4,052	2,076	1,976	4,052	2,076	4,052	4,052	4,052
E-75	5,943	3,066	2,877	5,943	3,066	5,943	5,943	5,943
E-101	3,531	2,164	1,367	3,531	2,164	3,531	3,531	3,531
W V42 gerado	19,3827	19,3827	19,3827	0	19,3546	19,3827	19,8359	19,3827
W V15 gerado	144,1148	143,7297	140,576	122,478	122,0929	128,3997	153,2973	154,2818
W V3,5 gerado	260,0984	260,0984	250,9275	241,1233	241,1233	28,1459	260,0984	75,4075
W Cond	156,1185	155,9762	151,4341	134,0076	140,9981	64,8395	159,6690	91,7970
CO2	323,5	410,3	401,7	226,5	361,6	75,3	337,4	152,5
Custo Total	48.014	70.843	69.650	27.759	61.595	4.422	50.828	18.334

Trabalho - [Gcal/h]

Utilidades - [Gcal/h]

CO_2 - [t/h]

Custo Total - [R$/h]

A.2 – Análise Energética Global – Variação Percentual

Caso	Caso Base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7
Descrição	Todo Complexo Operando	Parada UO-1	Parada UO-2	Parada UA-1	Parada CEMAP-1 (UO-1 E UA-1)	Parada Pré-Aquecedores Água UTE	Nova Área em Operação	Mudança de Nível de Vapor (V3,5 T=170)
W Ideal	0,0%	-0,1%	-3,0%	-14,2%	-9,7%	-58,5%	2,3%	-41,2%
W Real	0,0%	-0,1%	-3,0%	-14,2%	-9,7%	-58,5%	2,3%	-41,2%
V120	0,0%	26,8%	24,2%	-30,0%	11,8%	-76,7%	4,3%	-52,9%
Combustível	0,0%	26,8%	24,2%	-30,0%	11,8%	-76,7%	4,3%	-52,9%
V42 Gerado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V15 Gerado	0,0%	-100,0%	0,0%	0,0%	-100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V3,5 Gerado	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V120 Consumido	0,0%	0,0%	0,0%	-100,0%	-100,0%	0,0%	0,0%	0,0%
V42 Consumido	0,0%	0,0%	0,0%	-100,0%	-100,0%	0,0%	1609,0%	0,0%
V15 Consumido	0,0%	-0,8%	-7,3%	-59,5%	-60,3%	-32,4%	18,9%	21,0%
V3,5 Consumido	0,0%	0,0%	-3,5%	-7,3%	-7,3%	-89,2%	0,0%	-6,3%
AGR	0,0%	-39,5%	-46,8%	-13,6%	-53,1%	-0,1%	3,4%	-35,8%
P+21	0,0%	-22,5%	-57,8%	-19,6%	-42,2%	0,0%	0,0%	0,0%
P+3	0,0%	0,0%	-98,9%	-1,1%	-1,1%	0,0%	0,0%	0,0%
P-24	0,0%	-14,1%	-85,9%	0,0%	-14,1%	0,0%	0,0%	0,0%
P-40	0,0%	-94,4%	-5,6%	0,0%	-94,4%	0,0%	0,0%	0,0%
E-54	0,0%	-48,8%	-51,2%	0,0%	-48,8%	0,0%	0,0%	0,0%
E-75	0,0%	-48,4%	-51,6%	0,0%	-48,4%	0,0%	0,0%	0,0%
E-101	0,0%	-38,7%	-61,3%	0,0%	-38,7%	0,0%	0,0%	0,0%
W V42 gerado	0,0%	0,0%	0,0%	-100,0%	-0,1%	0,0%	2,3%	0,0%
W V15 gerado	0,0%	-0,3%	-2,5%	-15,0%	-15,3%	-10,9%	6,4%	7,1%
W V3,5 gerado	0,0%	0,0%	-3,5%	-7,3%	-7,3%	-89,2%	0,0%	-71,0%
W Cond	0,0%	-0,1%	-3,0%	-14,2%	-9,7%	-58,5%	2,3%	-41,2%
CO2		26,8%	24,2%	-30,0%	11,8%	-76,7%	4,3%	-52,9%
Custo Total		47,5%	45,1%	-42,2%	28,3%	-90,8%	5,9%	-61,8%

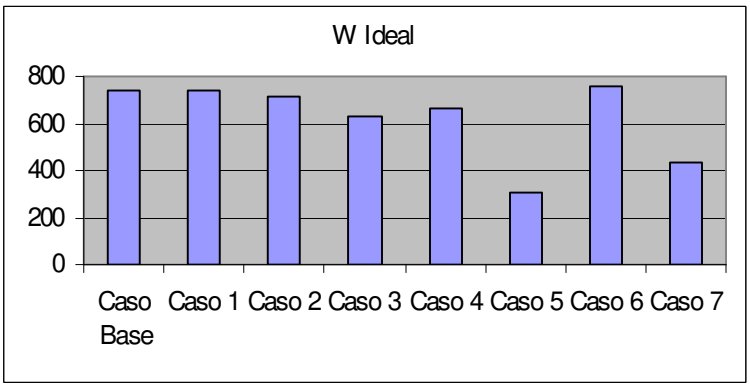
Trabalho - [%]

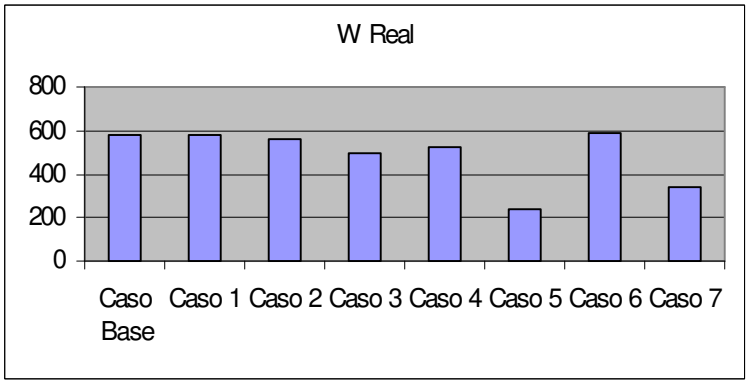
Utilidades - [%]

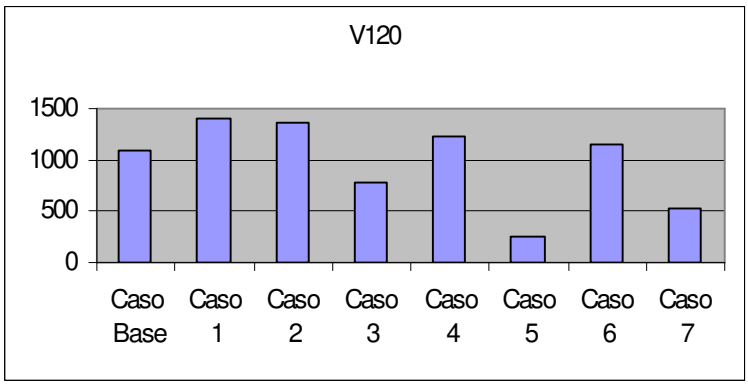
CO_2 - [%]

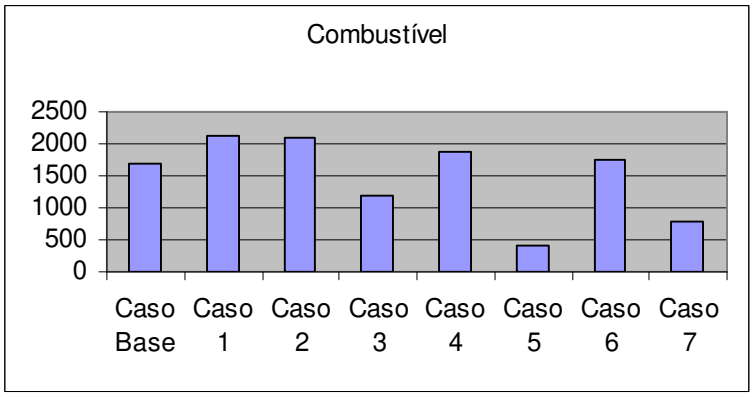
Custo Total - [%]

A.3 – Análise Energética Global – Gráficos

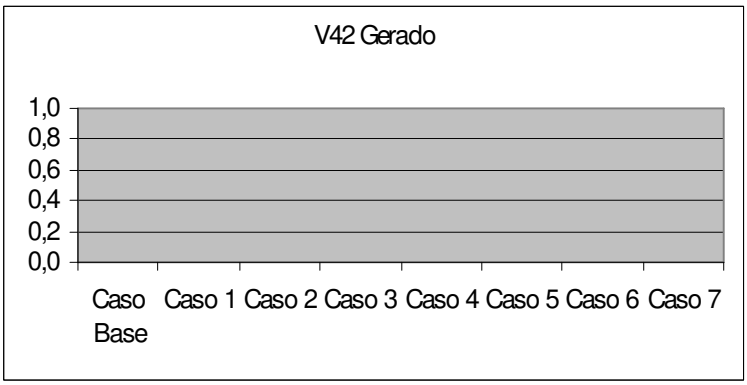


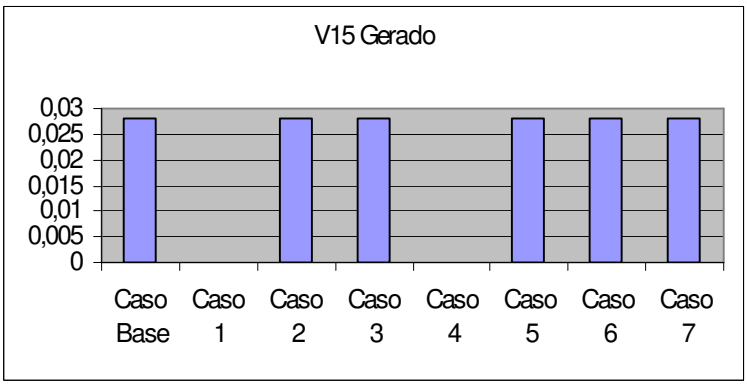


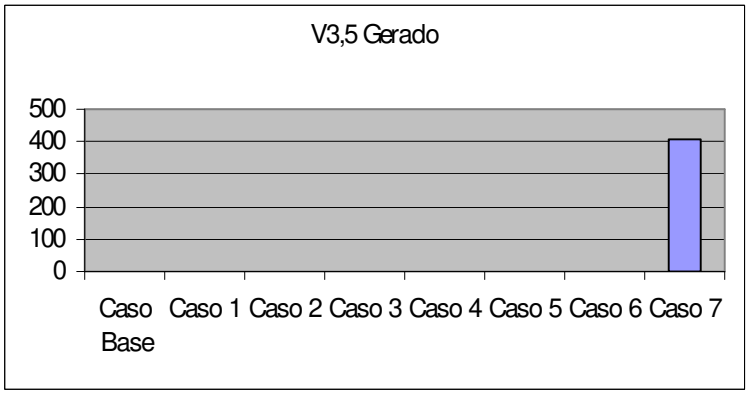




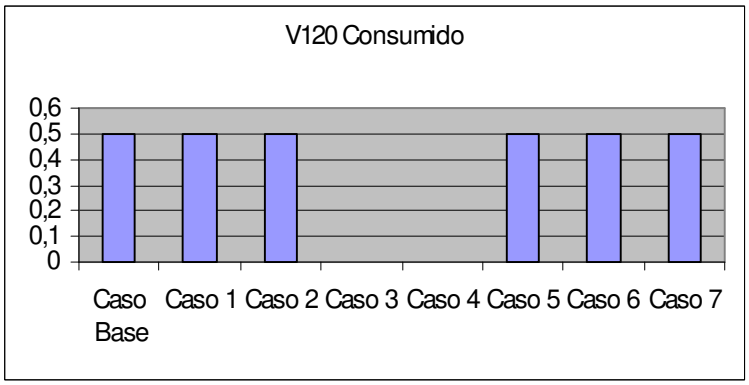
A.4 – Utilidades Geradas – Gráficos

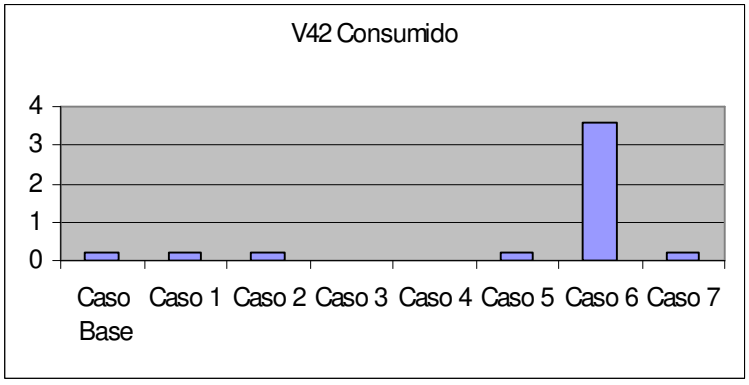


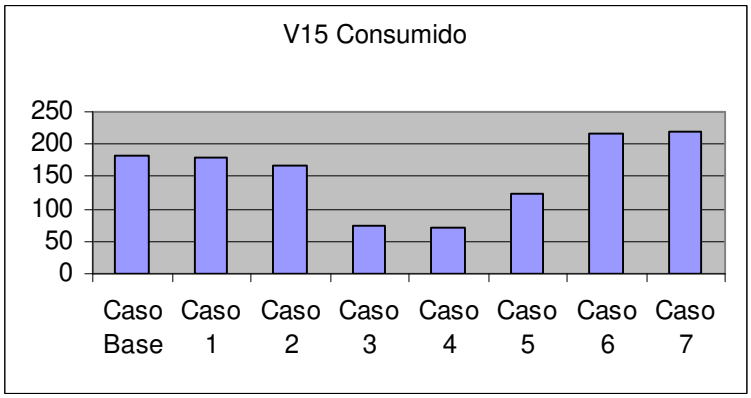


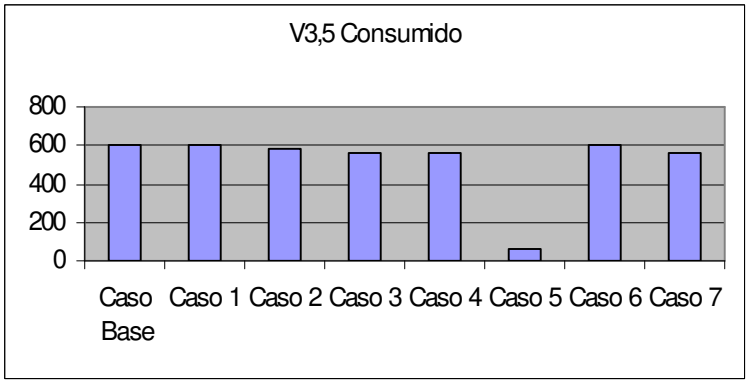


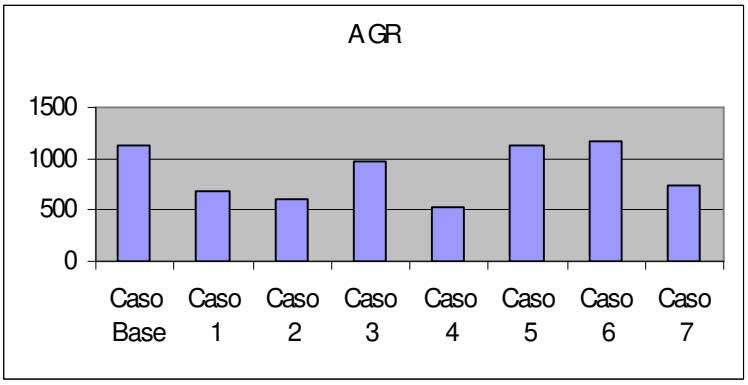
A.5 – Utilidades Consumidas – Gráficos

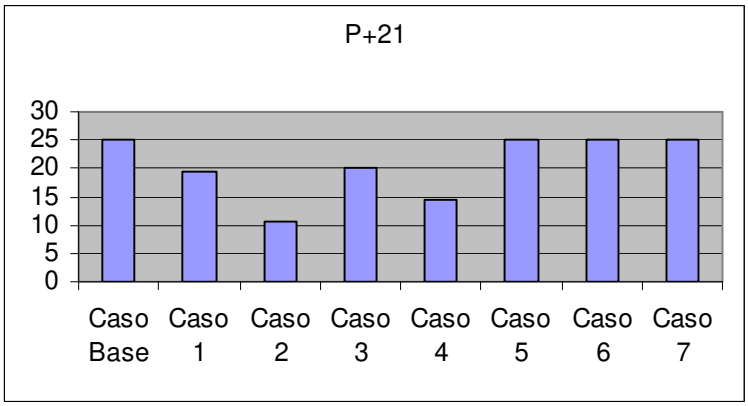


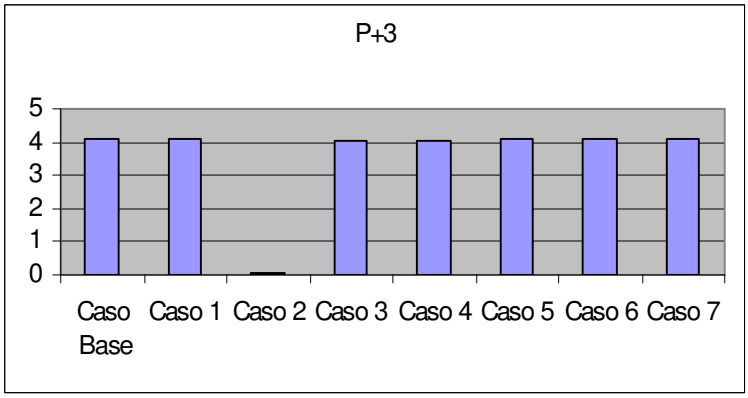


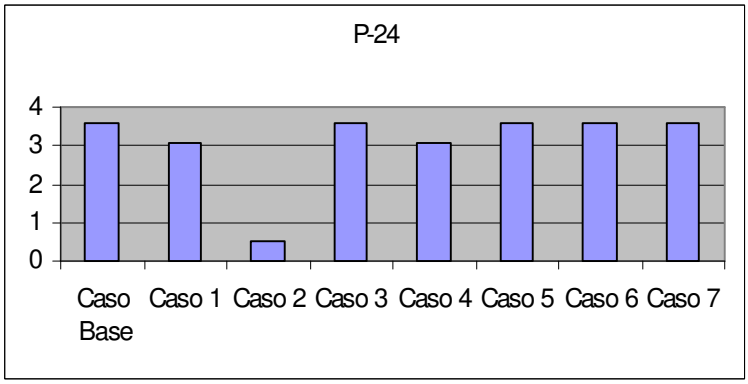

V15 Consumido
250
200
150
100
50
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

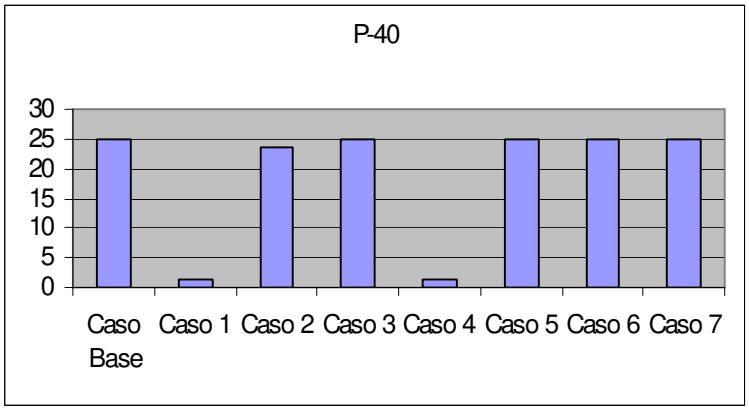

V3,5 Consumido
800
600
400
200
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

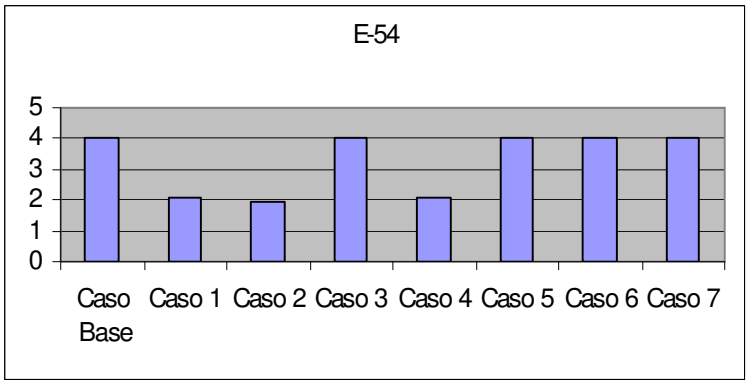

AGR
1500
1000
500
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

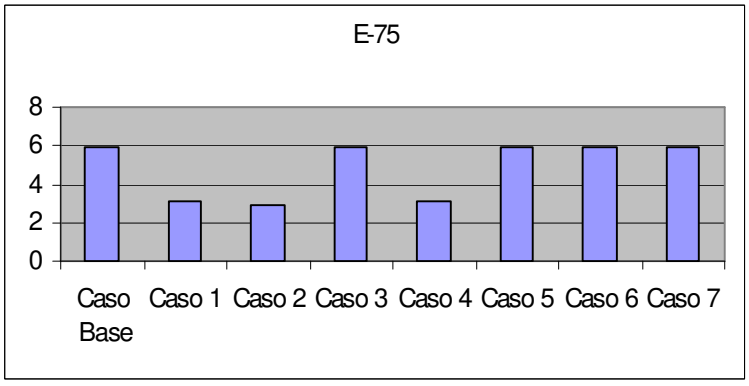

P+21
30
25
20
15
10
5
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

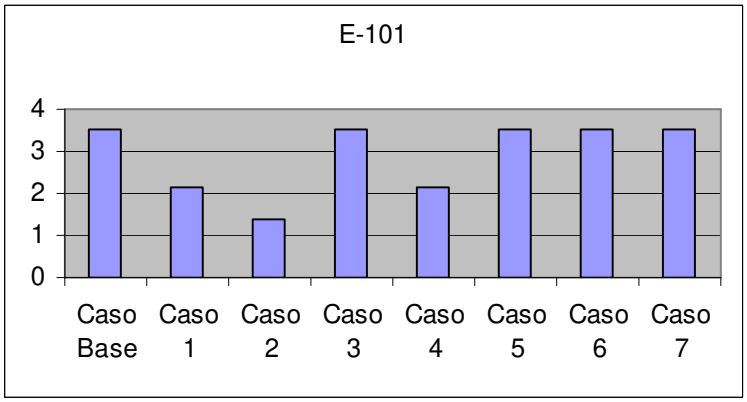

P+3
5
4
3
2
1
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7


P-24
4
3
2
1
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

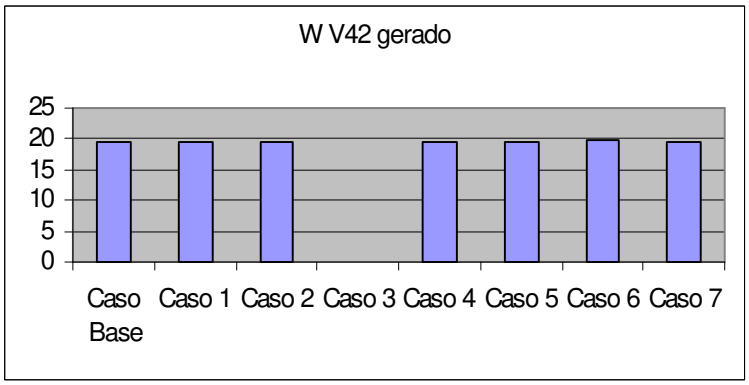

P-40
30
25
20
15
10
5
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

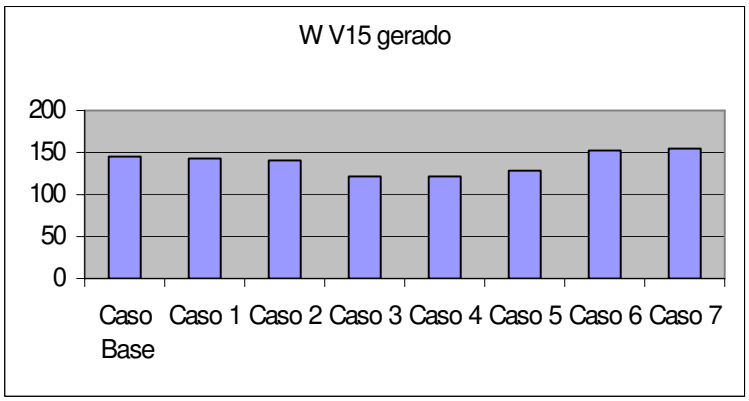

E-54
5
4
3
2
1
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

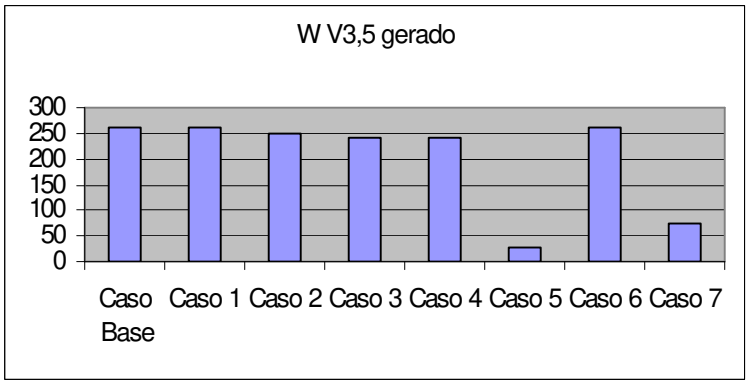

E-75
8
6
4
2
0
Caso Base
Caso 1
Caso 2
Caso 3
Caso 4
Caso 5
Caso 6
Caso 7

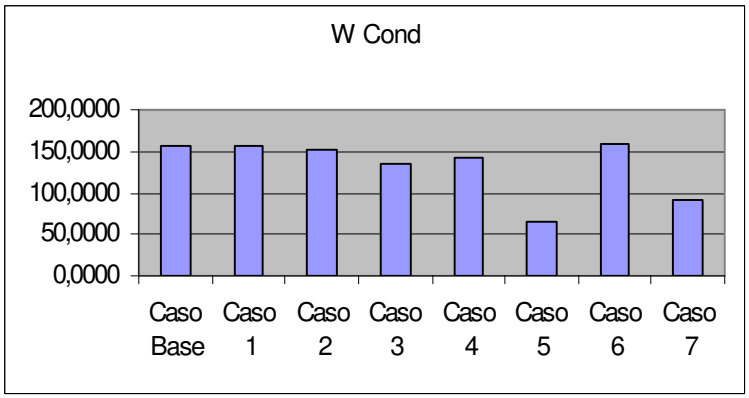


A.6 – Trabalho Gerado – Gráficos

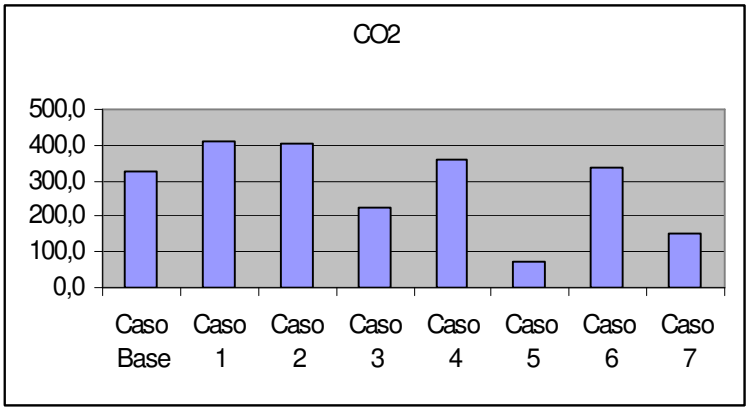
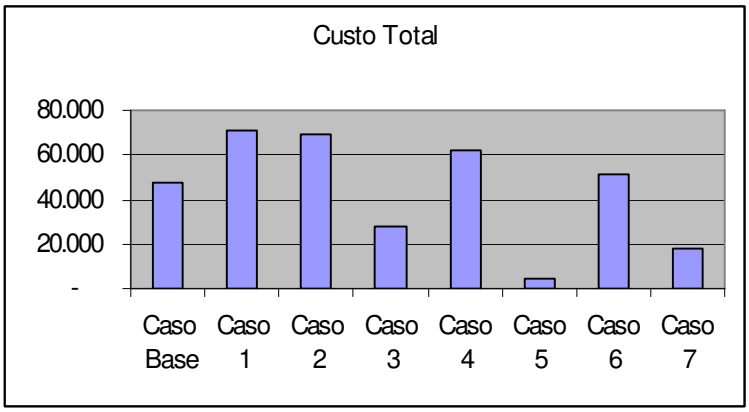








A.7 – Emissão de CO2 – Gráfico



A.8 – Custo Total – Gráfico