

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

**SÍNTESE DE SISTEMAS DE UTILIDADES USANDO  
ANÁLISE PINCH E TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO**

Autor: Amarildo de Marchi Lopes

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

Dezembro de 2001

**UNICAMP**  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE Be  
 CHAMADA T/UNICAMP  
L881s  
 EX  
 OMBO BCI 49626  
 ROC 16-837102  
 D Y  
 REÇO R\$ 11,00  
 ATA 14/06/02  
 CPD

CM00169424-1

lib ID 245755

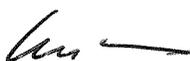
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

L881s      Lopes, Amarildo de Marchi  
             Síntese de sistemas de utilidades usando análise pinch  
             e técnicas de otimização / Amarildo de Marchi Lopes.--  
             Campinas, SP: [s.n.], 2001.

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

1. Otimização matemática. 2. Energia. 3.  
 Termodinâmica. I. Zemp, Roger Josef. II. Universidade  
 Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
 Química. III. Título.

Tese de Mestrado defendida por Amarildo de Marchi Lopes e aprovada em 17 de dezembro de 2001 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



---

Prof. Dr. Roger Josef Zemp – Orientador – FEQ/UNICAMP



---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Maria Tereza Moreira Rodrigues – FEQ/UNICAMP

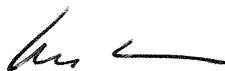


---

Prof. Dr. Luis Gimeno Latre – FEEC/UNICAMP

2002.1.6506

Esta versão corresponde à redação final da Tese de Mestrado defendida por Amarildo de Marchi Lopes e aprovada pela banca examinadora em 17 de dezembro de 2001.



---

Prof. Dr. Roger Josef Zemp – Orientador – FEQ/UNICAMP

## AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de sabedoria e bondade, que nos dá força e alegria para lutar por nossos objetivos.

Ao apoio de meus pais, Hugo e Laura, à meus irmãos e à Florinda sempre incentivado em todos os momentos.

A orientação e dedicação do amigo e orientador prof. Dr. Roger, sempre presente com sugestões e explicações.

A Capes pelo apoio Financeiro.

Aos amigos do “DESQ” André, Candíce, Arnaldo, Luciana Saliba, Luciana Santos, Tatiana, Gisele, Julio, Juliana, Jones, Elaine, entre outros, que sempre estiveram presentes incentivando e proporcionando bons momentos.

A Joseane e Andréia, pela ajuda e dicas com os softwares e computadores utilizados.

A banca examinadora pelas críticas e sugestões, fundamentais para o aperfeiçoamento da tese.

## RESUMO

Um novo procedimento de cálculo de custos de capital e síntese de sistemas de utilidades sob integração energética é proposto. Este novo procedimento permite que utilidades cuja sua temperatura varie dentro de um processo possam ser incluídas no cálculo do consumo de utilidades em um processo quando se tem disponíveis múltiplas utilidades com comportamentos diferentes.

A utilização de utilidades onde sua temperatura permanece constante durante o processo (vapore de alta, média e baixa pressão) é bastante simples. Porém quando se tem utilidades onde a temperatura decresce durante o processo (óleo quente ou gás de combustão), o seu uso torna os problemas mais complexos, e tem sido pouco explorado na área de integração energética.

As dificuldades decorrentes da adição de utilidades em que suas temperaturas decrescem durante o processo, levam ao uso de uma nova estratégia de estudo, que deve analisar a quantidade de calor desta utilidade que pode ser utilizada no processo, e também analisar a quantidade de calor presente nesta utilidade que não poderá ser utilizada devido restrições do processo ou devido a esta utilidade alcançar uma temperatura baixa o suficiente que não possa mais trocar de calor com o processo. Esta estratégia é constituída pela resolução de um problema linear que calcula o consumo mínimo de utilidades em um processo, e analisa as utilidades que possam ser utilizadas no processo e faz-se a escolha do conjunto de utilidades de menor custo.

Apresentaremos também uma abordagem para a síntese automática de sistemas de utilidades considerando se a alocação de máquinas térmicas. Isto é muito interessante, pois podemos obter sistemas mais eficientes aproveitando o calor disponível para gerar energia e utilidades, portanto obteremos sistemas mais economicamente viáveis. Esta abordagem dará um enfoque especial á utilização de turbinas a gás, pois este tipo de máquina térmica além de produzir trabalho, seus gases de exaustão podem ser utilizados como utilidade de aquecimento.

Palavras chaves: análise *Pinch*, otimização, sistemas de utilidades.

## ABSTRACT

A new procedure for capital cost estimation and the synthesis of utility systems is proposed in this work. The new feature of the procedure is the capability of dealing with variable-temperature utilities simultaneously with constant-temperature utilities.

Due to the variable-temperature nature of some utilities (flue gas, for example), not all the heat available can be used for process heating, and some heat has to be rejected to the environment. The new procedure extends the traditional energy targeting linear programming to include variable-temperature utilities and their restrictions. Both energy and power requirements (and costs) are included in the formulation. The result is the optimal operating cost utility requirement (both level and load)

In a further step, the utility system is design to achieve the lowest capital cost, by formulating the utility system design as a superstructure of a gas turbine, boilers, steam levels, steam turbines and heat recovery exchanger. The resulting mixed-integer linear model is solved and the best structure is identified.

## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – Introdução á tese.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Processos Químicos e Integração Energética.....	1
1.2 - Abrangência do trabalho.....	3
<b>Capítulo 2 – Integração Energética.....</b>	<b>5</b>
2.1 - Introdução.....	5
2.2 - Síntese de Processos Químicos.....	5
2.3 - <i>Pinch Technology</i> .....	7
2.3.1 - Consumo Mínimo de Utilidades.....	8
2.3.2 - Método Gráfico.....	9
2.3.3 - Algoritmo Tabular.....	11
2.4 - Grande Curva Composta.....	16
2.5 - Alocação de utilidades na Grande Curva Composta.....	18
<b>Capítulo 3 - Cálculo do consumo de utilidades para um sistema com múltiplas utilidades.....</b>	<b>25</b>
3.1- Introdução.....	25
3.2 - <i>Transshipment Model</i> .....	27
3.3 - Formulação matemática para a obtenção do custo mínimo de utilidades pelo <i>Transshipment Model</i> .....	30
3.4 - Comportamento das utilidades de temperatura variável no processo.....	37
3.5 - Exemplo numérico para a obtenção do consumo de utilidades, com múltiplas utilidades.....	39
3.5.1-Tratamento de dados.....	40
3.5.2 – Modelagem. ....	44

3.5.3 - Resultados.....	47
3.5.4 - Resumo dos resultados.....	55
3.5.5 – Discussão dos resultados.....	56
<b>Capítulo 4 - Síntese de Sistemas de Utilidades.....</b>	<b>57</b>
4.1 – Introdução.....	57
4.2 - Turbinas a gás.....	58
4.2.1 - Histórico e generalidades.....	58
4.2.2 - Ciclo padrão de ar Brayton (Ideal).....	60
4.2.3 - Ciclos reais de turbinas a gás e tendências de desenvolvimento de novos ciclos.....	61
4.3 – Equacionamento matemático para síntese de uma planta de utilidades.....	63
4.3.1 - Balanços de energia para as turbinas.....	68
4.3.2 - Cálculos das quantidades de vapor que podem ser produzidos a partir dos gases de exaustão da turbina a gás.....	71
4.3.3 - Balanços de massa nas linhas de vapor.....	74
<b>Capítulo 5 – Estudo de caso.....</b>	<b>77</b>
5.1 - Exemplo numérico para a obtenção de um sistema de utilidades.....	77
5.2 – Modelo MIP para síntese de sistemas de utilidades.....	79
5.3 - Resultados.....	83
5.4 – Discussão dos resultados.....	95
<b>Capítulo 6 – Conclusões e propostas para trabalhos futuros.....</b>	<b>97</b>
<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>101</b>

## NOMENCLATURA

$B(I)$	coeficiente de existência da caldeira I.
$CT(I)$	custo da turbina I
$CC(I)$	custo da caldeira I
$c_p$	capacidade calorífica.
$F$	vazão de vapor que entra ou sai da turbina
$H$	entalpia
$k$	razão entre calores específicos $c_p/c_v$
$M$	vazão
$MV_{hp}$	massa de vapor de alta pressão produzido pelos gases da turbina a gás.
$MV_{mp}$	massa de vapor de média pressão produzido pelos gases da turbina a gás.
$MV_{lp}$	massa de vapor de baixa pressão produzido pelos gases da turbina a gás.
$P$	pressão
$Q$	carga térmica
$r$	calor residual
$T$	temperatura
$V(I)$	válvula de expansão I
$VLP$	vapor de baixa pressão exportado para o processo
$VMP$	vapor de média pressão exportado para o processo
$VPC(I)$	vapor produzido pela caldeira I
$W(I)$	trabalho requerido pelo processo
$WT(I)$	Trabalho realizado pela turbina I
$y_{ij}$	variáveis binárias que determinam a existência e a condição de trabalho das turbinas

xiv

$Z$  função objetivo.

Letras Gregas:

$\Delta$  diferença

$\eta$  eficiência da turbina

superescritos:

$UF$  utilidade fria

$UQ$  utilidade quente

$HP$  alta pressão

$MP$  media pressão

$LP$  baixa pressão

$GC$  gás de combustão da caldeira

$GT$  gás de combustão da turbina

subscritos:

$i$  correntes quentes

$j$  correntes frias

$I$  intervalo de temperatura

$s$  isentrópico

$desp$  utilidade desperdiçada

$min$  mínima

$max$  máxima.

## Capítulo 1 – Introdução à tese.

### 1.1 - Processos Químicos e Integração Energética

A grande maioria dos processos químicos industriais consomem e rejeitam grandes quantidades de energia. Antes da crise mundial de energia, no início dos anos 70, não havia uma grande preocupação da utilização eficiente de energia em processos industriais. O petróleo, principal fonte de energia, era barato e os custos relacionados ao consumo de energia não provocavam impacto significativo nos custos globais do processo, sendo, portanto desconsiderados em análises econômicas. Entretanto, devido à escassez de petróleo, gerada pela crise mundial, seu preço aumentou consideravelmente, elevando os custos de energia em processo químicos, que passou a ser significativa na análise econômica.

A elevação dos custos globais dos processos industriais, por consequência do aumento do preço do petróleo, criou a necessidade de estudos que levassem à redução do consumo de energia em processos químicos. Estes estudos tinham por finalidade aumentar a integração de calor entre as correntes de processos químicos, e a geração de redes de trocadores de calor elevando os níveis de recuperação de energia. Esta linha de pesquisa mais tarde denominou-se integração energética de processos.

A maioria dos processos industriais são constituídos por correntes que precisam ser aquecidas ou resfriadas entre as etapas de uma planta química. Entretanto, este aquecimento ou resfriamento pode ser realizado de duas formas:

- uso direto de utilidades;
- aproveitamento da energia disponível pelas correntes de processo.

Entre estas duas formas, a mais econômica consiste no aproveitamento da energia das correntes de processo, porém, por mais energia que o sistema tenha disponível, dificilmente ele será energeticamente auto-suficiente, sendo necessário o uso de utilidades. Desta forma, primeiramente se utiliza a energia disponível pelo processo, e o déficit de energia resultante é satisfeito por utilidades, portanto, o princípio básico da integração energética é maximizar a troca de calor entre as correntes, e reduzir o consumo de

utilidades. Esta "integração" pode ser realizada através da confecção de uma rede de trocadores de calor entre as correntes do processo.

Após a alocação de trocadores entre as correntes é que serão consumidas as utilidades, quentes ou frias, para o suprimento de energia nas correntes que não foram satisfeitas, reduzindo assim o consumo de energia na rede. Este princípio já era aplicado antes da crise mundial de energia, com a alocação dos trocadores sendo realizada através dos conhecimentos do engenheiro de projeto, baseada portanto na intuição do engenheiro. No entanto, havia a necessidade do desenvolvimento de técnicas eficazes que guiassem a alocação dos trocadores.

Na década de 80 um grande avanço na área de síntese de processo foi dado pelo desenvolvimento de uma metodologia, denominada de *Pinch Technology*, por Linnhoff e colaboradores (1982). Esse avanço se deu através do desenvolvimento de um método para a síntese de sistemas de recuperação de calor, usando redes de trocadores de calor, e a integração energética das diferentes partes de um processo químico. Utilizando esta metodologia é possível se estabelecer, de antemão, o consumo mínimo de utilidades, e as configurações necessárias para tal condição. Desta forma é possível fazer um balanço econômico do consumo energético sem a necessidade de realizar o projeto completo do sistema de recuperação de calor. O projeto do sistema de utilidades é então realizado visando suprir as deficiências energéticas restantes do processo após a integração.

Apesar da metodologia proposta por Linnhoff e colaboradores (1982) ter trazido um grande avanço na área de síntese de processos, seu método apesar de calcular as quantidades de utilidades quentes e frias necessárias no processo, ele não nos traz o melhor sistema de utilidades que pode ser utilizado, para satisfazer as necessidades térmicas do processo.

No entanto nos processos atuais podemos dispor de vários tipos de utilidades com níveis de temperaturas diferentes e com comportamentos diferentes nos processos. Então há a necessidade do desenvolvimento de novas metodologias que preveja a presença de varias utilidades e determine o melhor sistema de utilidades para um processo.

## 1.2 – Abrangência do trabalho.

O presente trabalho tem como objetivo realizar a integração energética de processos químicos, com o intuito de calcular o melhor sistema de utilidades para um processo, quando se dispõe de um conjunto de utilidades com níveis de temperatura e comportamentos diferentes. Para isso será analisado o custo das utilidades, obtendo assim um sistema com menor custo e consumo mínimo de utilidades.

Também será estudado um modelo para o cálculo da síntese de sistemas de utilidades, dadas às condições do processo e os equipamentos disponíveis para a escolha do melhor conjunto de equipamentos necessários para satisfazer as necessidades térmicas do processo. Para isso será analisado o custo dos equipamentos, obtendo assim um conjunto de equipamentos de custo.

Em linhas gerais o trabalho está dividido em uma série de capítulos, com a finalidade de tornar mais clara a apresentação deste trabalho.

O Capítulo 2 trata dos aspectos teóricos, à qual esta fundamentado o presente trabalho. Este capítulo apresenta uma série de definições e metodologias usadas para o cálculo do consumo de utilidades em um processo.

O Capítulo 3 destina-se ao cálculo do melhor sistema de utilidades para um processo, quando se dispõe de um conjunto de utilidades com níveis de temperatura e comportamentos diferentes. Neste capítulo será apresentado um modelo para o cálculo do consumo de utilidades, baseado nos custos das utilidades, obtendo assim um sistema com menor custo e consumo mínimo de utilidades.

No Capítulo 4 é apresentado um modelo para a síntese de uma planta de utilidades, dada às condições do processo e os equipamentos disponíveis para a escolha do melhor conjunto de equipamentos necessários para satisfazer as necessidades térmicas do processo. Para analisar o modelo o Capítulo 5 apresenta um estudo de caso, para verificar a eficácia e flexibilidade do modelo. Para tanto é apresentado um problema contendo as condições de um processo e os custos dos equipamentos disponíveis, para se calcular qual o

4

melhor sistema de utilidades para este processo, obtendo assim um planta com menor custo de equipamentos.

O capítulo 6 é destinado as considerações finais, com a apresentação das principais conclusões sobre os resultados obtidos com o trabalho, e algumas propostas para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 – Integração Energética.

### 2.1 - Introdução.

Este capítulo apresenta uma série de definições e metodologias necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho, enfocando principalmente o cálculo do consumo de utilidades em um processo. O capítulo está dividido em partes de forma a tornar a exposição do assunto clara e objetiva.

Sendo a síntese de processos um assunto relativamente novo e pouco conhecido, apesar do grande número de publicações na literatura, há a necessidade de situar o problema num contexto global dentro da engenharia química. Portanto, a primeira parte deste capítulo é dedicada à síntese de processos, onde são introduzidas algumas definições importantes.

Na segunda parte deste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a resolução do trabalho. Esta metodologia é apresentada detalhadamente, incluindo seus conceitos e algoritmos.

Finalizando, é feita uma apresentação do comportamento das utilidades dentro de um processo através de gráficos.

### 2.2 - Síntese de Processos Químicos.

Quando se inicia o projeto de um determinado processo, tem-se como objetivo colocar no mercado um novo produto, ou simplesmente um produto, de forma que este seja viável economicamente e satisfaça as necessidades de um mercado alvo. O que está por trás deste objetivo simples e claro, não é tão simples e nem tão claro. O processo que deve ser desenvolvido envolve a tomada de decisões, uma grande quantidade de dados de auxílio e a necessidade da utilização de ferramentas complexas.

A necessidade de buscar processos químicos mais eficientes, sob o ponto de vista energético, aliado à necessidade de satisfazer critérios mais rígidos quanto ao controle ambiental, levam ao surgimento de novos conceitos e tecnologias para a análise e o desenvolvimento desses processos.

Entretanto, um dos grandes problemas encontrados em síntese de novos processos químicos corresponde a grande quantidade de configurações possíveis. Uma forma de minimizar este problema corresponde a sua divisão em diferentes níveis de decisão. Esta idéia é representada pelo conhecido “*Onion Diagram*” (Smith R.,1995), figura 2.1.

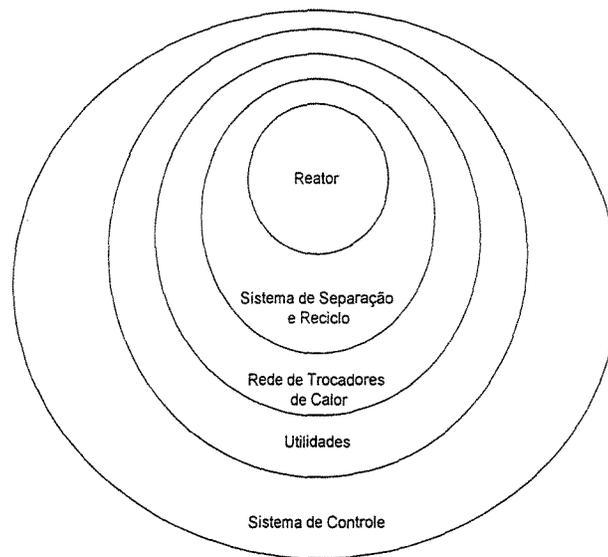


Figura 2.1 – “*Onion Diagram*”

Este diagrama mostra que em um processo químico a escolha do sistema de separação e a determinação de suas características dependem da escolha inicial do sistema de reatores e o caminho de reação escolhida. Em seguida, o sistema de recuperação de energia e a escolha do sistema de utilidades só poderão ser especificados e projetados, caso o sistema de separação tenha sido determinado. E como etapa final do projeto, tem-se a determinação do sistema de controle, uma vez que os níveis anteriores já foram escolhidos.

Porém, a hierarquia representada no diagrama não é rigorosamente verdadeira. O fluxo de informações não ocorre somente de dentro para fora, mas sim em ambos os sentidos. Por exemplo, a escolha de um determinado tipo de reator pode comprometer a

eficiência na etapa de separação e provocar dificuldades com o sistema de controle, levando a uma nova análise na etapa de definição dos sistemas de reatores.

Entre estas etapas hierárquicas que compõem o projeto de um processo químico, uma grande contribuição para o entendimento da síntese de um processo foi o estabelecimento da *Pinch Technology* (Linnhoff e colaboradores, 1982). Este avanço se deu através do desenvolvimento de uma metodologia para a síntese de sistemas de energia, usando redes de trocadores de calor e a integração energética das diferentes partes do processo químico. Utilizando esta metodologia é possível se estabelecer o consumo mínimo de utilidades e as configurações necessárias para tal condição. Desta forma é possível fazer um balanço econômico do consumo energético sem a necessidade de realizar o projeto completo do sistema de recuperação de energia.

### **2.3 – *Pinch Technology*.**

A tecnologia *Pinch* é o método termodinâmico mais utilizado para a integração energética de processos químicos. Apesar do método ter sido desenvolvido inicialmente para solucionar problemas de redes de trocadores de calor, atualmente esta tecnologia não esta restrita apenas a síntese de redes.

Na maioria dos processos industriais encontramos correntes que precisam ser aquecidas (correntes frias) ou resfriadas (correntes quentes). Para satisfazer as temperaturas de entrada e saída dessas correntes de forma a aproveitar a própria energia disponível no processo recorre-se a síntese de uma rede de trocadores de calor, a qual proporcionará a integração energética entre as várias correntes do processo.

Entretanto, os processos químicos em geral, são constituídos por várias correntes de processo, o que torna difícil saber antecipadamente quais correntes devem ser cruzadas e qual seqüenciamento deve ter os trocadores de calor. Para realizar a síntese de rede de trocadores de calor, dois métodos são conhecidos: o matemático e o baseado em conceitos termodinâmicos conhecido como *Pinch Technology*.

A aplicação da tecnologia *Pinch* para obter a integração energética entre um conjunto de correntes de processo pode ser dividida em duas etapas: uma que envolve a determinação do consumo mínimo de utilidades, estimativas de área mínima e custos, e a

outra que envolve a definição dos cruzamentos entre as correntes e o seqüenciamento entre os trocadores.

A tecnologia *Pinch* apresenta várias vantagens frente a outros métodos de síntese. As principais são:

- Método de fácil entendimento;
- Método de fácil aplicação;
- Não necessita de poderosas ferramentas computacionais;
- Inclui análise termodinâmica na integração energética;
- Possibilidade de acompanhar a síntese passo a passo, e poder interferir na resolução do problema.

Estas características tornam a tecnologia *Pinch* um método interessante, principalmente para as aplicações em cálculos manuais, onde a dificuldade de resolver o problema aumenta linearmente com o aumento do tamanho do problema. Ao passo que em modelagens matemáticas de problemas complexos, a dificuldade de resolução cresce “exponencialmente” com a dificuldade do problema.

A tecnologia *Pinch* é um método muito versátil, pois possibilita tratar desde problemas altamente simplificados a problemas com um nível de complexidade muito grande, sem que haja mudanças consideráveis no tratamento.

### **2.3.1 - Consumo mínimo de utilidades.**

O consumo mínimo de utilidades para um conjunto de correntes de processo pode ser determinado por dois métodos, um gráfico e outro matemático. O método gráfico resulta da construção da Curva Composta para as correntes de processo e o matemático da aplicação de um algoritmo conhecido como *Problem Table* (Algoritmo Tabular) proposto por Linnhoff e Flower (1978).

Para a aplicação de ambos os métodos, é necessário o conhecimento das temperaturas de entrada e saída, capacidade calorífica e vazões das correntes do processo,

bem como estabelecer uma diferença mínima de temperatura entre as correntes, conhecida como  $\Delta T_{min}$ .

O valor do  $\Delta T_{min}$  é fundamental no cálculo do consumo de utilidades, isto porque todos os passos são dependentes do valor do  $\Delta T_{min}$ . No caso da tecnologia *Pinch*, na análise termodinâmica já está embutida a contribuição do  $\Delta T_{min}$ .

As proximidades do ponto *Pinch* é uma região onde a troca de calor é restrita e imposta pela mínima diferença de temperatura, portanto o  $\Delta T_{min}$  determina o grau de recuperação de energia na rede e logicamente está diretamente relacionado com o consumo de utilidades e com o custo global do processo. Então, é importante que se tenha um valor de  $\Delta T_{min}$  que diminua o consumo de utilidades, e este valor é geralmente o menor valor possível para que se tenha uma troca térmica em um processo, mas a medida que se diminui o valor do  $\Delta T_{min}$  aumenta-se a área de troca térmica dos trocadores de calor, então é necessário que se faça uma otimização do  $\Delta T_{min}$ , para que este valor não leve a um consumo excessivo de utilidades ou a uma rede de trocadores de calor de alto custo.

O valor ótimo do  $\Delta T_{min}$  é obtido através da minimização da função custo, mas o valor encontrado para o  $\Delta T_{min}$  é um valor global para o sistema, e não apresenta um valor ótimo para cada trocador. Alguns autores propõem métodos para o cálculo de  $\Delta T_{min}$  para cada trocador, mas os resultados obtidos utilizando-se o  $\Delta T_{min}$  global são geralmente satisfatórios.

Neste trabalho será utilizado um  $\Delta T_{min}$  padrão, pois o trabalho será voltado ao consumo mínimo de utilidades, não se preocupando portanto com o custo da rede de trocadores de calor.

### 2.3.2 - Método Gráfico.

Correntes de processo podem ser representadas em um diagrama por duas curvas, uma para as correntes quentes (curva composta quente) e a outra para as correntes frias (curvas compostas fria) onde a abscissa representa a variação de entalpia e a ordenada a temperatura das correntes. A construção das curvas compostas, quente ou fria, resulta simplesmente na soma das variações de entalpias para as correntes existentes em um mesmo intervalo de temperatura.

As curvas compostas quente e fria podem ser representada no mesmo diagrama  $T \times H$  (temperatura x entalpia) estabelecida uma diferença mínima de temperatura entre elas,  $\Delta T_{min}$ . A figura 2.2 esquematiza tal situação.

Na figura 2.2 pode-se observar que a abertura horizontal superior entre as curvas compostas representa a necessidade de utilidade quente, e a abertura inferior representa a necessidade de utilidade fria. A região entre estas duas aberturas indica a máxima integração energética que pode haver entre as duas correntes do processo para o  $\Delta T_{min}$  estabelecido. O local onde as duas curvas estão mais próximas é conhecido como ponto de estrangulamento energético, *Pinch*. Este ponto limita o grau de integração energético possível no processo e permite que o problema seja dividido em duas regiões energeticamente independentes, uma acima e a outra abaixo do *Pinch*.

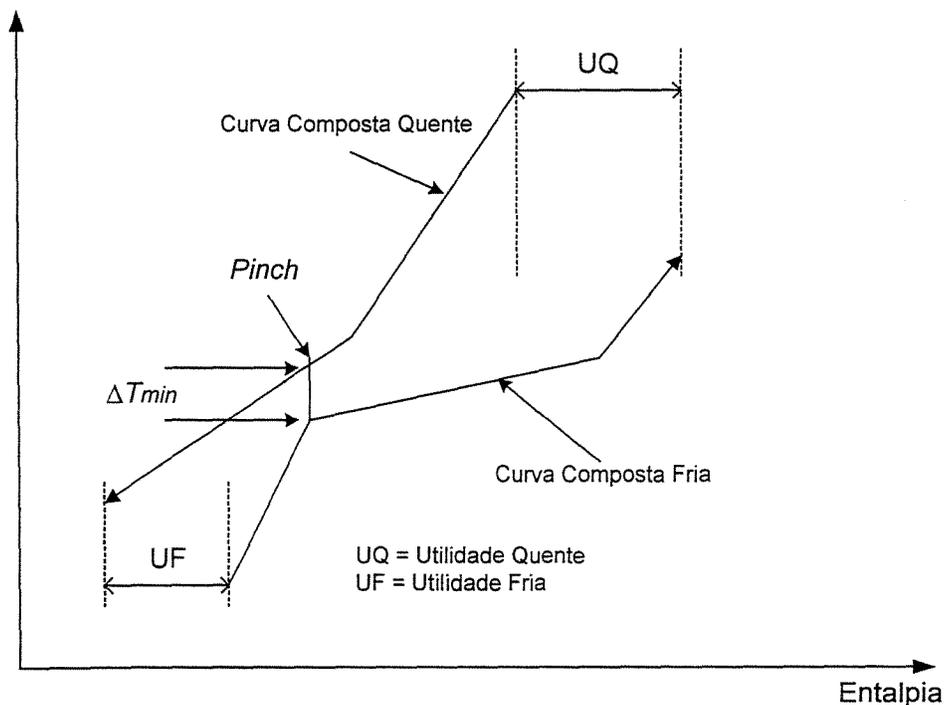


Figura 2.2 - Curva composta

Através do balanço de energia é possível verificar três fatos:

- Na região do *Pinch* só necessita-se fornecer utilidades quentes, ou seja, fornecer calor para as correntes frias;

- Na região abaixo do *Pinch* há a necessidade de retirar calor, ou seja, fornecer utilidades frias para as correntes quentes;
- Não há transferência de energia processo acima do *Pinch* para o processo abaixo do *Pinch*.

Qualquer violação em algum destes três fatos leva a um aumento no consumo de utilidades.

### 2.3.3 - Algoritmo Tabular.

Uma forma alternativa para a obtenção do ponto *Pinch* e as quantidades mínimas de utilidades quentes e frias necessárias para um  $\Delta T_{min}$  estabelecido, é a utilização do Algoritmo Tabular (Linnhoff e Flower, 1978), o qual é de fácil aplicação e está baseado na construção de uma tabela. Para a sua aplicação os seguintes passos devem ser seguidos:

- Distribuição das correntes do processo em intervalos de temperatura. Isto é feito utilizando-se duas escalas distintas, uma para as correntes quentes e outra para as correntes frias. Para determinar estas escalas será utilizado o valor  $\Delta T_{min}/2$ , sendo este valor subtraído das correntes quentes e acrescido para as correntes frias, portanto teremos a diferença mínima de temperatura ( $\Delta T_{min}$ ) entre as correntes quentes e as correntes frias o que nos garante a possibilidade de troca térmica entre as correntes;
- Com a nova escala é construída uma tabela, onde os valores para as temperaturas são escritos em ordem decrescente. Para cada intervalo de temperatura realiza-se um balanço térmico, ou seja, calcula-se o calor disponível ou requerido para o intervalo;
- Com o balanço térmico é possível observar regiões com energia disponível enquanto há outras requerendo energia. Então, para aproveitar a energia, é construída uma cascata fazendo com que o calor disponível em cada intervalo de temperatura seja transferido ao intervalo imediatamente inferior. A partir da cascata é possível encontrar os valores das utilidades (quente e fria) e o *Pinch*. A temperatura do *Pinch* será identificada no intervalo de temperatura onde não

houver calor sendo transferido. A esta temperatura é somado e subtraído o valor  $\Delta T_{min}/2$ , já que para a aplicação do algoritmo modificou-se os dados de temperaturas das correntes, encontrando-se assim as temperaturas quentes e frias do *Pinch*.

Para melhor compreensão do método, um exemplo com quatro correntes de processo será representado. A tabela 2.1 contém os dados necessários para a aplicação do método.

Tabela 2.1 – Dados de corrente de processo.

Corrente	$Mcp$ (kW/°C)	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saída}$ (°C)
1-Fria	2	20	135
2-Quente	3	170	60
3-Fria	4	80	140
4-Quente	1,5	150	30

Para este exemplo será estabelecido um  $\Delta T_{min} = 10^{\circ}\text{C}$ . Aplicando a metodologia descrita anteriormente e utilizando os dados da tabela 2.1 é possível construir a tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Aplicação do Algoritmo Tabular.

$T_{IN}$ (°C)	Correntes				Intervalo $IN$	$T_{IN}-T_{IN+1}$ (°C)	$\Sigma M_{cp,q}-\Sigma M_{cp,f}$ (kW/°C)	$\Delta H_{IN}$ (kW)
	3	1	4	2				
165								
145	↑				1	20	3	60
140		↑			2	5	0,5	2,5
85			↓		3	55	-1,5	-82,5
55				↓	4	30	2,5	75
25				↓	5	30	-0,5	-15

A primeira coluna contém os dados de temperaturas das correntes de processo convertidas para a nova escala e dispostas em ordem decrescente. A segunda coluna representa os intervalos de temperatura, nos quais as correntes estão disponíveis. Na terceira coluna tem-se a enumeração dos intervalos de temperatura, e as demais colunas constituem o balanço de energia. Como pode ser observado pela sexta coluna, tem-se intervalos onde energia está disponível, intervalos 1, 2 e 4, e intervalos que necessitam de energia, intervalos 3 e 5. Logo, para suprir as necessidades dos intervalos constrói-se uma cascata de energia (figura 2.3), ou seja, transfere-se energia de um nível de temperatura elevado para os demais intervalos mais frios.

Como pode ser observada pelo primeiro fluxo de energia da figura 2.3, a corrente de processo não apresenta energia suficiente para satisfazer suas necessidades térmicas, já que mesmo realizando a transferência de energia tem-se um intervalo onde o saldo de energia é negativo, ou seja, necessita de calor. Então, a única alternativa é utilizar utilidade quente. Esta situação determina o consumo mínimo de utilidade quente e um novo fluxo de energia é construído, mas agora com um consumo de 20 kW para a utilidade quente. Este segundo fluxo determina três informações importantes: o consumo mínimo de utilidade quente (início da cascata), o *Pinch* e o consumo mínimo de utilidade fria 60 kW (fim da cascata). O *Pinch* é determinado no intervalo de temperatura onde não há transferência de calor, ou seja, para o caso analisado o *Pinch* ocorre a 85°C. Como as temperaturas reais foram deslocadas do valor  $\Delta T_{min}/2$ , para as correntes quentes e frias, o valor da temperatura

no *Pinch* para as correntes quentes torna-se  $90^{\circ}\text{C}$  e para as frias  $80^{\circ}\text{C}$ , onde a diferença entre estas duas temperaturas corresponde exatamente ao valor do  $\Delta T_{min}$  estabelecido.

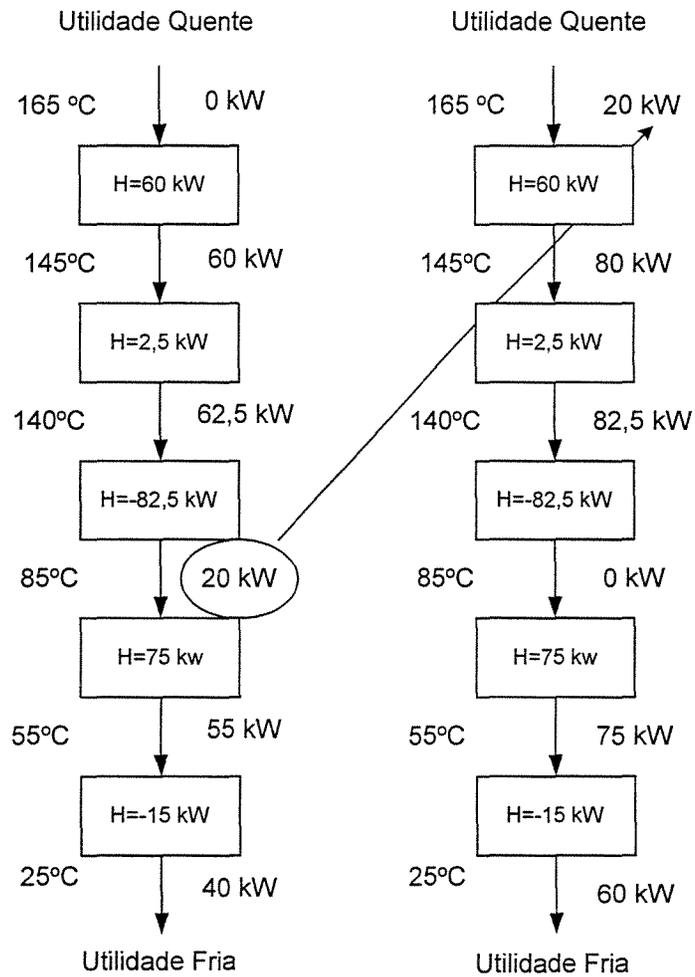


Figura 2.3 - Cascata ou Fluxo de Energia.

Os mesmos resultados encontrados acima com a construção do diagrama cascata (figura 2.3), pode ser encontrado construindo a curva composta (figura 2.4).

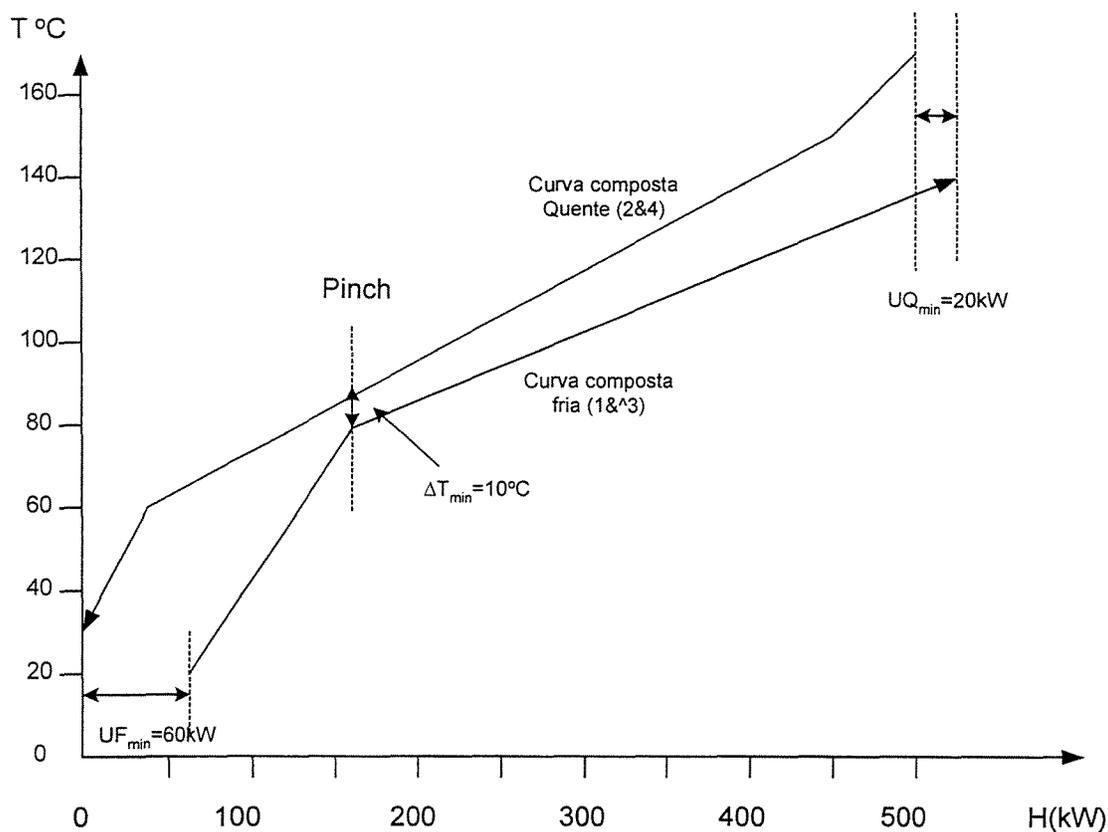


Figura 2.4 - Curva Composta

## 2.4 - Grande Curva Composta.

A inclusão de utilidades é feita analisando a sua posição no processo através da construção de um diagrama conhecido como Grande Curva Composta (GCC). Para se obter a grande curva composta basta apenas plotar os dados de temperatura (ordenada) e entalpia (abscissa) encontrados na cascata de energia com a aplicação do Algoritmo Tabular. Para o exemplo apresentado anteriormente, a Grande Curva Composta é construída com os dados da tabela 2.3 e representada pelo gráfico da figura 2.4.

Tabela 2.3 – Dados da GCC.

Temperatura(°C)	Entalpia (kW)
165	20
145	80
140	82,5
85	0
55	75
25	60

Este tipo de diagrama fornece uma informação muito importante: o nível de temperatura para as utilidades que pode ser utilizado para o processo analisado. Desta forma, o projetista evita desperdícios, deixando de utilizar utilidades com temperatura muito acima da necessária, e como consequência acaba diminuindo os custos do seu projeto. O diagrama também nos dá a localização do ponto *Pinch*, que foi comentado no item 3.1, o ponto *Pinch* divide a Grande Curva Composta em duas grandes regiões, uma acima e outra abaixo do *Pinch*, e entre essas regiões não ha troca de energia. Acima do *Pinch*, a Grande Curva Composta mostra a demanda de energia que deve ser adicionada ao processo através das utilidades quentes. Abaixo do *Pinch*, a Grande Curva Composta mostra a quantidade de energia que deve ser retirada do processo através das utilidades frias.

Para o exemplo analisado, as duas regiões hachuradas da figura 2.4 delimitam regiões sob integração energética, ou seja, está ocorrendo troca de energia entre as correntes de processo, enquanto as demais regiões são satisfeitas por utilidades. Na parte superior do diagrama tem-se o consumo de utilidade quente de 20 kW, e na parte inferior tem-se um consumo de 60 kW para utilidade fria.

Caso o projetista tenha dois níveis de vapor saturado disponíveis, um a 200°C e outro a 150°C, por meio da GCC ele teria a informação de que a utilidade na temperatura mais baixa poderia ser utilizada, visto que as correntes que não estão sob integração

energética estão disponíveis numa faixa de temperatura que poderia ser atendida por esta utilidade. O limite mínimo para a temperatura do vapor será a temperatura correspondente ao ponto P da figura 2.4. Pois as correntes não integradas estão situadas entre o ponto P e o ponto *Pinch* da figura 2.4. Já a utilidade fria necessária poderia ser água resfriada a temperatura ambiente, já que as correntes quentes, que não estão sob integração energética, estão disponíveis numa faixa de temperatura mais elevada. E a máxima temperatura da utilidade fria será a temperatura correspondente ao ponto Q da figura 2.4.

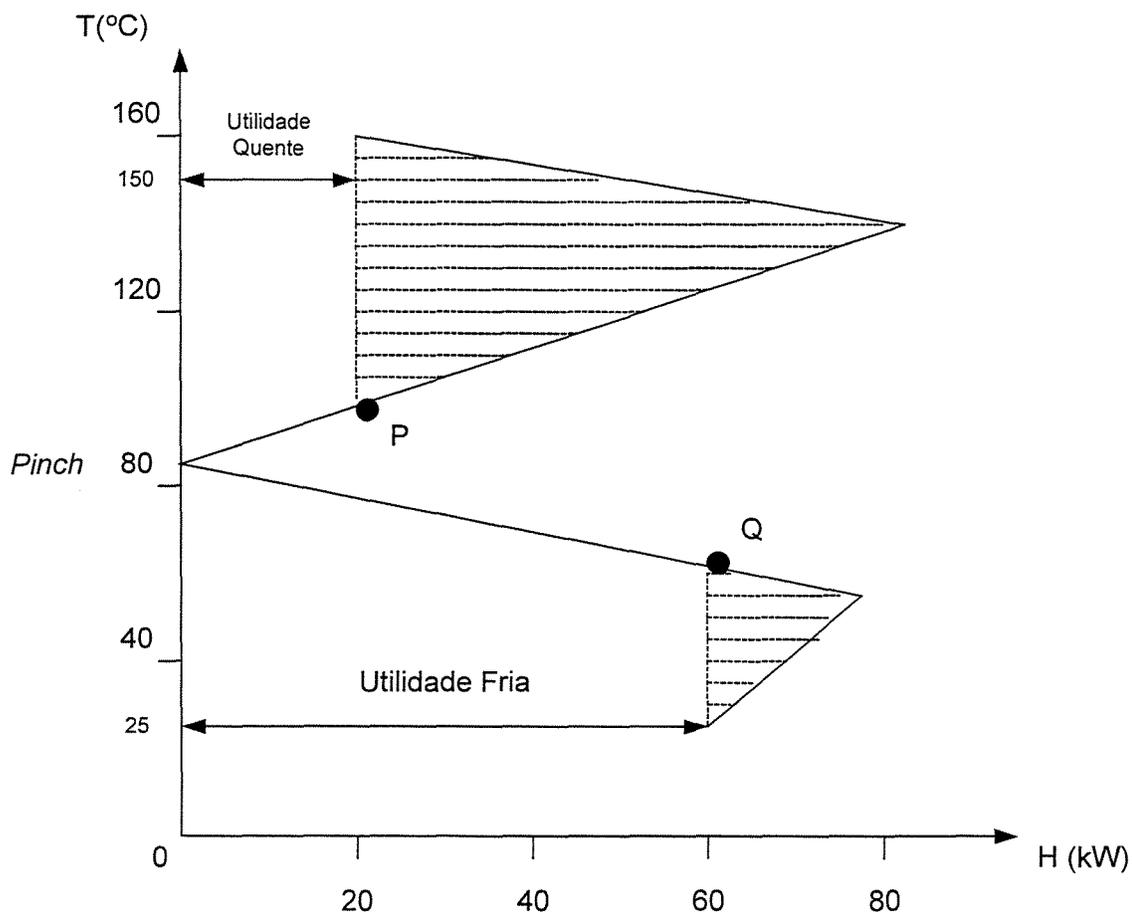


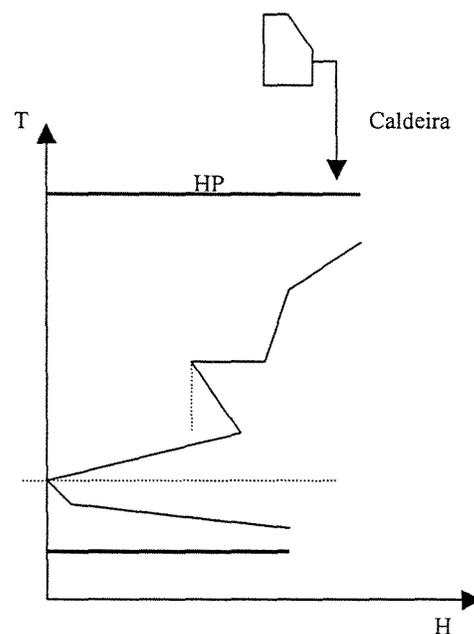
Figura 2.5 - Grande Curva composta

## 2.5 – Alocação de utilidades na Grande Curva Composta.

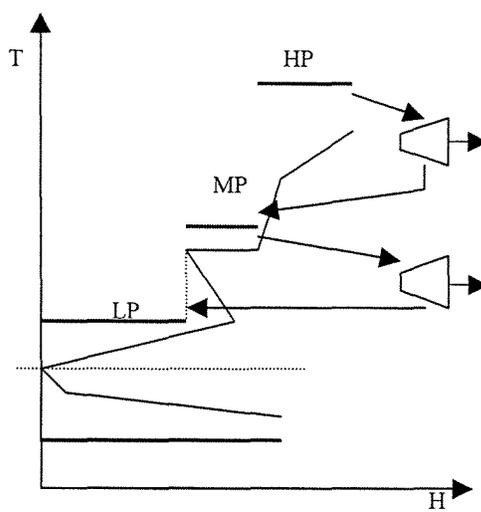
A Grande Curva Composta construída para a análise da *Problem Table*, e pode ser usada como ferramenta para os engenheiros especificar as utilidades do processo, minimizando o uso das utilidades de maior custo e maximizando o uso das utilidades mais baratas disponíveis no processo. A forma da Grande Curva Composta apresenta maneiras eficientes de alocar utilidades no processo, indicando qual o nível de temperatura e a carga térmica necessária de cada utilidade para satisfazer o processo. Entretanto muitas combinações são possíveis se o processo tem várias utilidades disponíveis.

Tendo disponíveis vários tipos de utilidades com vários níveis de temperaturas pode-se utilizar utilidades mais baratas, minimizando assim o custo do processo, entretanto, é preciso que o projetista faça um balanço entre o ganho de custo com o uso de várias utilidades e o acréscimo de capital devido à alocação de vários níveis de utilidades.

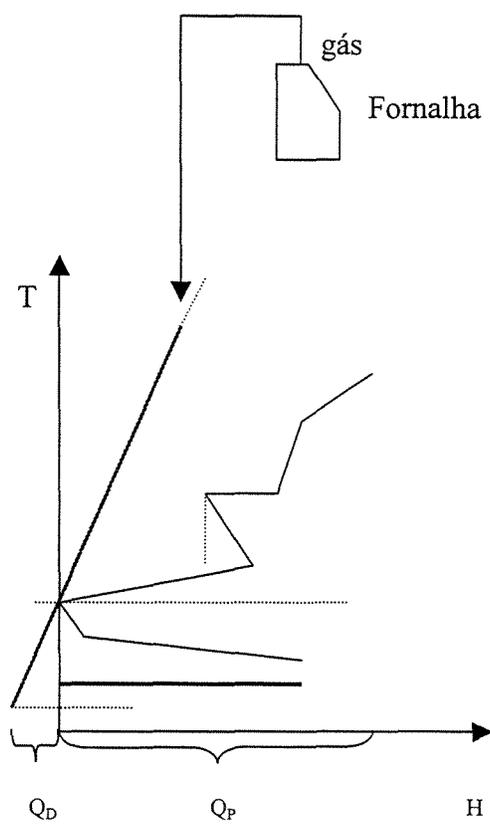
Utilizaremos um exemplo de um processo hipotético para representar as várias possibilidades de se alocar utilidades em um processo, quando se tem disponível vários tipos de utilidades, a vários níveis de temperatura, figura 2.6.



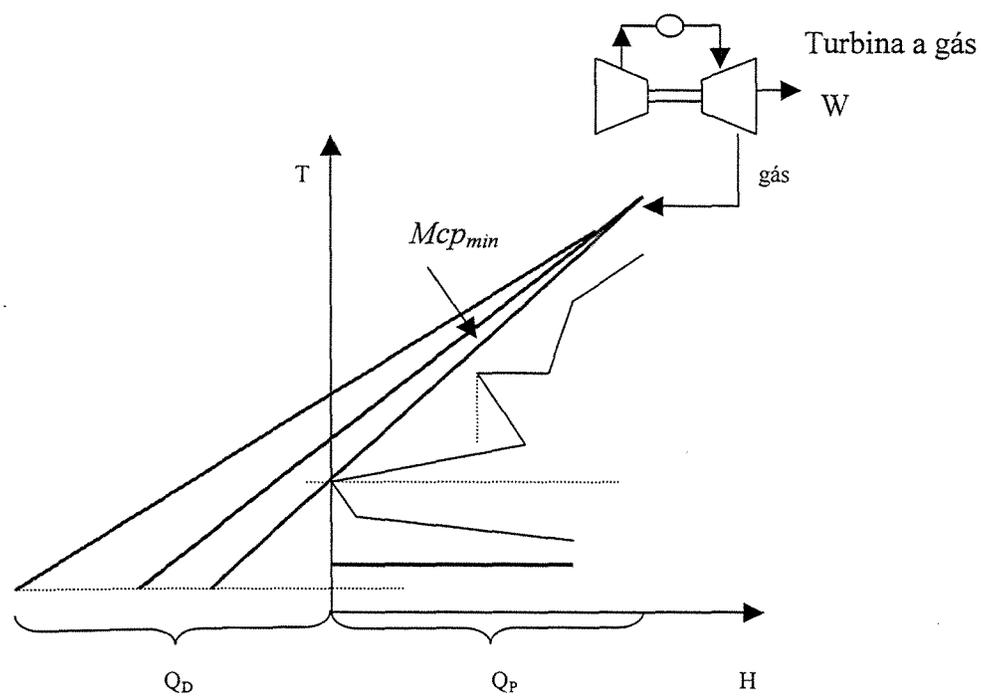
(a)



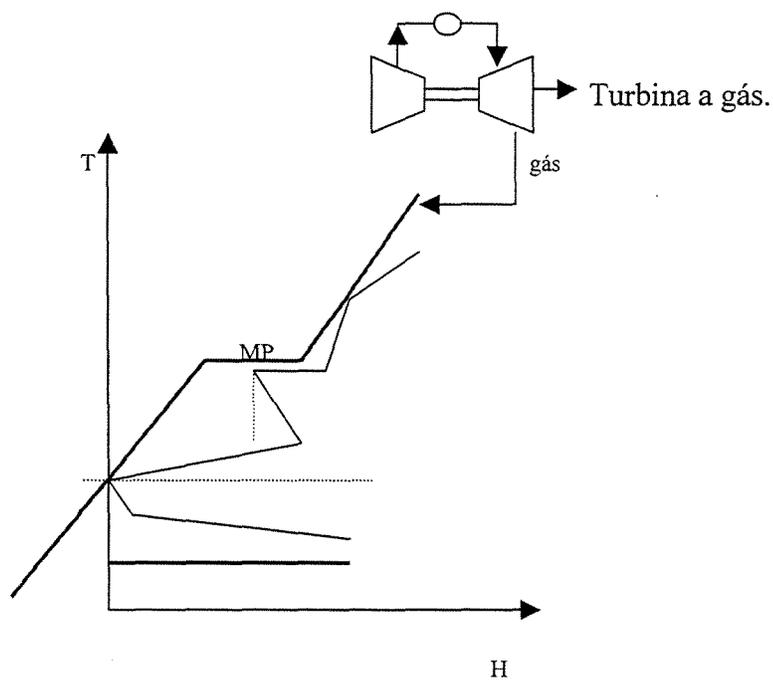
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 2.6 – Grande Curva Composta com vários tipos de Utilidades e a vários níveis de temperatura.

Com o conhecimento do nível de utilidades, é possível realizar a sua localização na curva composta. Se a utilidade quente utilizada for vapor de alta pressão (HP), média pressão (MP) ou baixa pressão (LP), estas utilidades serão representadas por linhas horizontais no diagrama da Grande Curva Composta, figuras 2.6a e 2.6b. Isto ocorre, pois neste caso ocorre apenas a troca de calor latente entre as correntes de utilidades e as correntes do processo. Como só há a troca de calor latente das correntes de vapor, a sua temperatura permanece praticamente constante no processo.

Podemos observar que estas utilidades podem ser obtidas de varias formas, podem ser obtidas diretamente das caldeiras (figura 2.6a), ou então a partir de turbinas a vapor que utilizam vapor a um nível mais alto de pressão e temperatura (figura 2.6b), produz trabalho e expande vapor á um nível mais baixo de pressão e temperatura.

No entanto se a utilidade quente utilizada for óleo quente ou gases de combustão, estas utilidades serão representadas por uma reta inclinada no diagrama da Grande Curva Composta (figura 2.6c e 2.6d). Neste caso há a troca de calor sensível entre as correntes de utilidade e as correntes de processo, então à medida que a corrente de utilidade vai cedendo calor para o processo ( $Q_P$ ) a sua temperatura irá diminuindo ao longo do processo, até chegar a uma temperatura onde não possa mais haver troca de calor dessa utilidade com o processo. Portanto esta utilidade será lançada para o meio ambiente levando uma certa quantidade de calor ( $Q_D$ ). Nesta caso quanto maior for a capacidade térmica da corrente de utilidade maior será o desperdício de energia. Estes tipos de utilidades podem ser obtidos diretamente de uma caldeira (figura 2.6c) que queima combustível e seus gases são usados diretamente como utilidade de aquecimento, ou então estes gases podem ser provenientes de uma turbina a gás (figura 2.6d), que gera trabalho e os gases de expansão da turbina é utilizado como utilidade de aquecimento no processo. Devido a seu comportamento este tipo de utilidade é pouco utilizado em integração energética, pois sua inclinação pode variar dando maior complexidade ao calculo de seu uso.

Ao variar a inclinação da utilidade varia-se a vazão mássica da corrente, portanto há um aumento ou diminuição nos gastos com combustível. À medida que a curva de utilidade se afasta da grande curva composta há um maior consumo de combustível para aumentar a vazão da corrente de utilidade, conseqüentemente um aumento no desperdício de energia desta utilidade. E esta inclinação vai depender da qualidade do combustível

utilizado e da conformação de Grande Curva Composta. Portanto para se utilizar este tipo de utilidade é necessário que se saiba qual a temperatura de saída dos gases do processo.

A temperatura de saída dos gases do processo representada na figura 2.6c e figura 2.6d, pode ser determinada por vários fatores, dentre os mais comuns estão:

- A presença de compostos nos gases de combustão, que á temperaturas mais baixas possam formar substâncias corrosivas com a água, podendo danificar os equipamentos (figura 2.7a).
- A temperatura do ponto “*Pinch*” (figura 2.7b).
- A presença dos chamados “*Pinchs*” de utilidades, que são formados pela Grande Curva Composta que diminuem a inclinação da reta da utilidade, aumentando, portanto o *mcp* da utilidade e conseqüentemente aumentando a temperatura de saída dos gases (figura 2.7c).

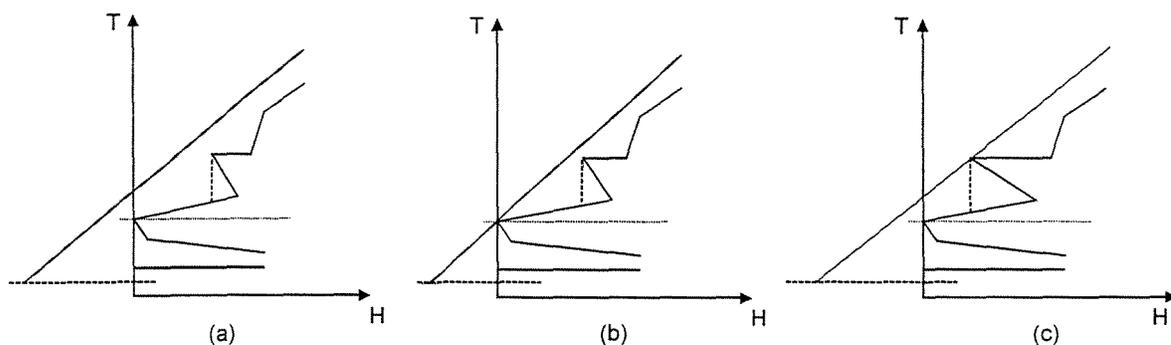


Figura 2.7 - Limitações da temperatura de saída dos gases do processo.

O calculo da temperatura e saída dos gases de combustão do processo, passa então a formar um problema de otimização, no qual se deve buscar minimização da temperatura de saída desta utilidade do processo. Maiores detalhes desta otimização e maneiras de se calcular o consumo desta utilidade em um processo serão mostrados no capítulo 3.

Para se obter um sistema de utilidades para um processo, na figura 2.6 tem-se a representação de algumas possibilidades que podem ser utilizadas. Na figura 2.6a, tem-se a utilização de apenas vapor de alta pressão (HP), o que certamente tem um custo bastante elevado, pois ha o uso de apenas um nível de vapor de alto custo. Na figura 2.6b tem-se a

utilização combinada de vapor de alta pressão (HP), vapor de média pressão (MP) e vapor de baixa pressão (LP), nesta combinação ha uma utilização de utilidades de custo mais baixo, o que certamente levará a um custo mais baixo do sistema. Na figura 2.6c temos a utilização de correntes de utilidades do tipo gás de combustão, proveniente de uma fornalha, o custo desta utilidade dependerá do valor do combustível utilizado. Na figura 2.6d temos a utilização de correntes de utilidades do tipo gás de combustão, proveniente de uma turbina a gás, neste caso a curva de representação da utilidade é inclinada, e essa inclinação dependerá da capacidade térmica da corrente de utilidade ( $mcp$ ), neste caso o custo do sistema não deve ser muito alto, e dependerá muito da inclinação da curva, ou seja, da capacidade térmica da corrente. Na figura 2.6d, temos a utilização combinada entre correntes de utilidade de gás de combustão e vapor de média pressão (MP), este tipo de combinação deverá ter um custo baixo, pois combina um vapor de baixo custo com um gás de combustão de baixa capacidade térmica.

No entanto qual das opções seria a mais interessante com base nos custos de cada sistema de utilidade?

Tradicionalmente para descobrir qual é o melhor sistema, projetam-se todas as possibilidades, calcula os seus custos e escolhe a mais barata.

Neste trabalho apresentaremos uma abordagem automática para a síntese de sistemas de utilidades quando se tem disponível várias utilidades. Maiores detalhes sobre esta abordagem serão apresentados no capítulo 3.

Podemos observar que podemos alocar sistemas de potencia na Grande Curva Composta, e isto é muito interessante, pois podemos obter sistemas mais eficientes no aproveitamento do calor disponível, portanto poderemos ter sistemas mais baratos. Note que na figura 2.6b temos a alocação de duas turbinas a vapor que podem gerar trabalho e expandir seus vapores a um nível mais baixo, este trabalho gerado pode ser adicionado nos custos do sistema como lucro obtido com a venda do trabalho, barateando assim os custos finais do sistema. O mesmo ocorre quando alocamos turbinas a vapor no sistema (figuras 2.6d e 2.6e).

No capítulo 4 apresentaremos uma abordagem para a síntese automática de sistemas de utilidades considerando se a alocação de maquinas térmicas e analisando os

custos adicionais dos equipamentos utilizados para a produção de trabalho e de utilidades e também os ganhos obtidos com esta alocação de equipamentos.

## Capítulo 3 - Cálculo do consumo de utilidades para um sistema com múltiplas utilidades.

### 3.1- Introdução

No capítulo anterior foi visto que a metodologia proposta por Linnhoff e Flower (1978). O Algoritmo Tabular, permite obter o consumo mínimo de utilidades para um conjunto de correntes de processo com o pré-estabelecimento de um  $\Delta T_{min}$ . Porém, a aplicação de tal método em processos químicos é bastante simples quando existem apenas utilidades onde a temperatura permanece constante durante o processo, que é o caso dos vapores de alta, média e baixa pressão, no entanto com a utilização de utilidades onde a temperatura varia no processo tornam o problema mais complexo. Estas utilidades são representadas pelos óleos quentes, gases de combustão de caldeiras e pelos gases de exaustão de turbinas a gás.

A complexidade na aplicação do Algoritmo Tabular provém do método de realizar balanços de energia por intervalo de temperatura com o sistema de utilidades, pois nos casos onde temos utilidades onde a temperatura não varia durante o processo, a utilidade troca energia em apenas um intervalo de temperatura, e a energia restante desta utilidade serão transferidas aos intervalos inferiores através dos calores residuais de cada intervalo.

No entanto, nos casos onde temos utilidades onde a temperatura decresce durante o processo, (óleo quente ou gás de combustão) a utilidade pode trocar energia em vários intervalos de temperatura, e à medida que o calor da utilidade vai sendo trocado com a corrente de processo a temperatura da utilidade irá diminuindo, até que a temperatura da utilidade esteja tão baixa que possa mais trocar de calor com o processo. A essa temperatura em que a utilidade não pode mais trocar calor com o processo, portanto não será mais utilizada no processo denominamos de temperatura de saída da utilidade do processo.

O Algoritmo Tabular se mostrou um excelente método para o cálculo do consumo de utilidades, pois é baseado em formulações termodinâmicas permitindo ao projetista a construção da Grande Curva Composta e uma fácil visualização do processo, porém não apresenta grande flexibilidade na presença de problemas de maior complexidade.

Então, para se determinar o consumo de utilidades e sobrepor as deficiências do Algoritmo Tabular, Papoulas e Grossmann (1983) propuseram um modelo matemático baseando-se no *Transshipment Model*, onde são levadas em conta todas as complicações nas realizações dos balanços de energia e contribuições matemáticas para resoluções dos modelos propostos. Maiores detalhes sobre o *Transshipment Model* e o modelo proposto por Papoulas e Grossmann serão apresentados neste capítulo.

### 3.2 - *Transshipment Model*

Um modelo que é largamente utilizado no campo da pesquisa operacional para resolver problemas de síntese de rede é o "*Transshipment Model*". Este modelo corresponde à variação do conhecido problema de transporte, o qual realiza a ótima alocação de recursos. Em particular, o modelo de transporte busca a rede ótima transportando uma mercadoria (por exemplo, produtos) de fontes (plantas) diretamente para o destinatário (mercado). O "*Transshipment Model*" também investiga a rede ótima para o embarque da mesma mercadoria, das fontes para locais intermediários (armazéns), e então para o seu destino.

Baseando-se nestas idéias, o "*Transshipment Model*" pode ser utilizado para descrever problemas com recuperação de energia devido a seguinte analogia: calor pode ser considerado como uma mercadoria que é embarcada das correntes quentes para as correntes frias através de intervalos de temperatura, que são utilizados respeitando restrições termodinâmicas na transferência de calor. Em particular, a segunda lei da termodinâmica requer que o fluxo de calor somente ocorra de uma temperatura mais elevada para a outra mais baixa, o que deve sempre ser respeitado. Isto pode ser feito dividindo toda a faixa de temperatura em que as correntes estão disponíveis em intervalos, de acordo com as regras propostas por Linnhoff e Flower (1978).

Estas divisões são necessárias, uma vez que garantem uma transferência de calor coerente em cada intervalo, estabelecida uma diferença de temperatura mínima ( $\Delta T_{min}$ ) entre as correntes quentes e frias.

Como observado pela figura 3.1, pode-se considerar que o fluxo de calor das correntes quentes para o correspondente intervalo de temperatura, é enviado para as corrente frias pertencentes ao mesmo intervalo e o fluxo excedente é conduzido ao próximo intervalo de temperatura (temperatura mais baixa). Conseqüentemente, as correntes e utilidades quentes são consideradas como fonte de energia, os intervalos de temperatura como "armazéns" intermediários e as correntes e utilidades frias como o destino para a energia.

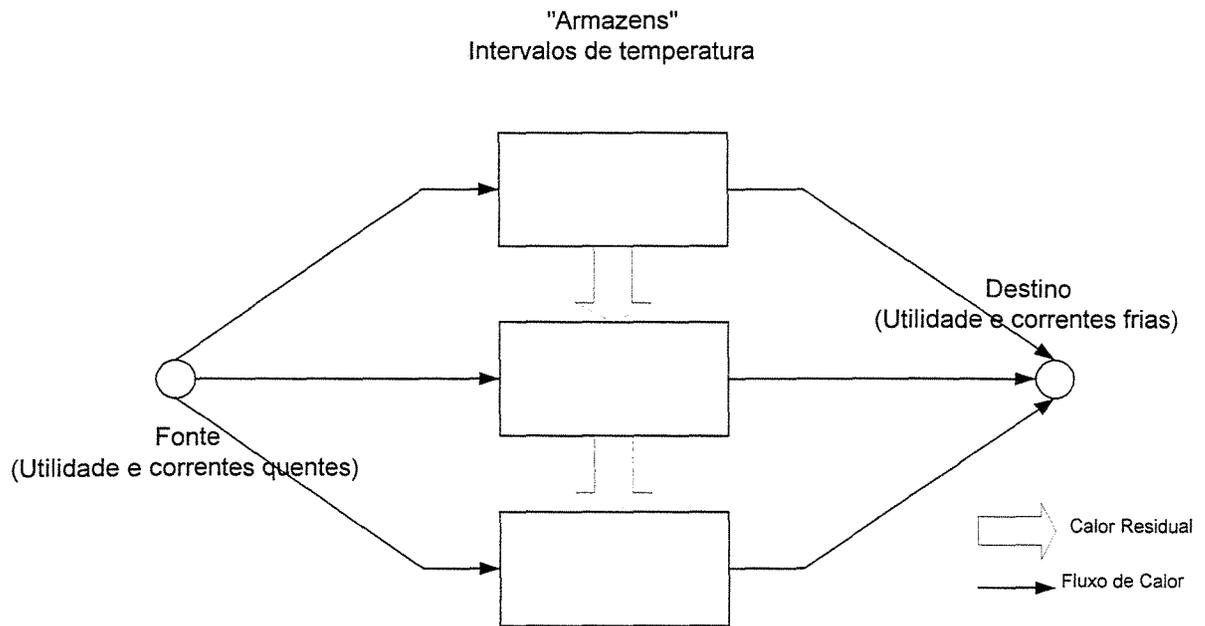


Figura 3.1 - *Transshipment Model*

O fluxo de calor para cada intervalo de temperatura pode ser dividido em 4 partes, como mostrado pela figura 3.2:

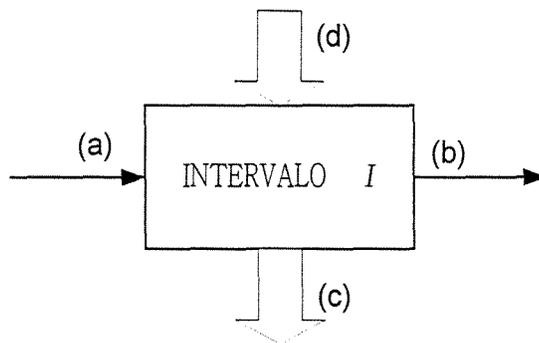


Figura 3.2- Modelo de fluxo de calor para cada intervalo de temperatura.

(a) Fluxo de calor proveniente das correntes e utilidades quentes cuja faixa de temperatura das correntes inclui o intervalo de temperatura.

(b) Fluxo de calor enviado às correntes e utilidades frias cuja faixa de temperatura inclui o intervalo de temperatura.

(c) Fluxo de calor saindo de um intervalo particular para o próximo intervalo com temperatura mais baixa. Este calor é o calor residual (excesso) que não pode ser utilizado no intervalo presente.

(d) Fluxo de calor chegando a um particular intervalo de temperatura que vem de intervalos anteriores e estão disponíveis a uma temperatura mais elevada. Este calor residual não pode ser utilizado em intervalos de temperatura mais elevada.

A figura 3.2 mostra que estes fluxos de energia são um caso especial do geral "*Transshipment Model*", uma vez que todo o fluxo de calor das correntes quentes para os intervalos de temperatura, e dos intervalos de temperatura para as correntes frias é normalmente fixo, e no caso do transporte de mercadorias, o transporte das mercadorias das fontes para os locais intermediários e dos locais intermediários para o seu destino são normalmente variáveis. Portanto, neste caso é considerado como variável somente o fluxo de calor residual de um intervalo de temperatura para o próximo intervalo (temperaturas mais baixas), e o consumo de utilidades quente e fria.

Este conjunto de variáveis acaba por formar um problema linear (LP) cujo objetivo é minimizar os custos do consumo de utilidades que está sujeito a balanços de energia por intervalo de temperatura. Detalhes do desenvolvimento matemático deste modelo serão abordados no próximo item.

### 3.3 - Formulação matemática para a obtenção do custo mínimo de utilidades pelo “*Transshipment Model*”.

O primeiro passo para a obtenção do consumo de utilidades é a divisão da faixa de temperatura de todas as correntes em intervalos de temperatura  $I$ . Para isso, um método de divisão apropriado pode ser utilizado (Linnhoff e Flower, 1978). Os intervalos são dispostos do nível mais alto ( $I=1$ ) para o nível mais baixo ( $I=I_{max}$ ) de temperatura, com cada intervalo  $I$  ( $I=1,2,3, \dots, I_{max}$ ) apresentando uma diferença de temperatura,  $\Delta T_I$ . Os seguintes conjuntos são definidos em ordem para identificar a localização de todas as correntes e utilidades relativas aos intervalos de temperaturas:

$$H_I = \{ i \mid \text{corrente quente } i \text{ está presente no intervalo } I \}$$

$$C_I = \{ j \mid \text{corrente fria } j \text{ está presente no intervalo } I \}$$

$$S_I = \{ m \mid \text{utilidade quente } m \text{ está presente no intervalo } I \}$$

$$W_I = \{ n \mid \text{utilidade fria } n \text{ está presente no intervalo } I \}$$

Seja  $Q_{i,I}^Q$  a carga térmica da corrente quente  $i$  entrando no intervalo  $I$ . Esta carga térmica é dada por:

$$Q_{i,I}^Q = M_i \cdot cp_{i,I} \cdot \Delta T_I^i \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta T_i^I$ : mudança de temperatura da corrente  $i$  no intervalo  $I$  de temperatura.

$M_i$ : vazão da corrente quente  $i$ .

$(cp)_{i,I}$ : capacidade calorífica da corrente quente  $i$  no intervalo  $I$  de temperatura.

Similarmente, segue que a carga térmica  $Q_{j,I}^F$  para a corrente fria  $j$  do intervalo de temperatura é calculada como:

$$Q_{j,I}^F = M_j \cdot cp_{j,I} \cdot \Delta T_j^I \quad (3.2)$$

Todas as utilidades são alocadas em intervalos de temperatura apropriados dependendo de suas temperaturas de entrada e saída. Define-se como carga das utilidades, quentes a variável  $Q_m^{UQ}$  e carga térmica das utilidades frias  $Q_n^{UF}$ . A variável  $r_I$ , define o calor residual das correntes quentes saindo do intervalo  $I$  de temperatura. A figura 3.3 a seguir mostra o fluxo de energia entre estas variáveis para um intervalo de temperatura  $I$ .

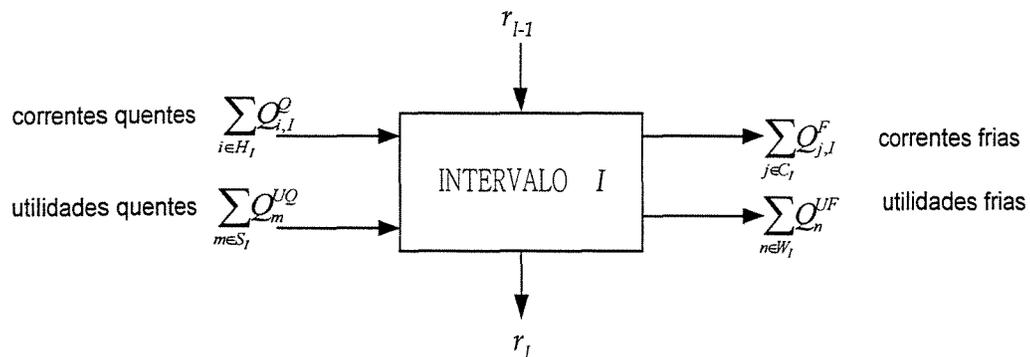


Figura 3.3- Fluxo de energia por intervalo de temperatura  $I$ .

Logo, o custo mínimo de utilidades para um dado conjunto de correntes de processo pode ser formulado como um problema linear, onde  $CUQ_m$ ,  $CUF_n$ , são os custos para as utilidades quente e fria, como a seguir:

$$\text{Minimizar } UT = \sum_{m \in S} CUQ_m \cdot Q_m^{UQ} + \sum_{n \in W} CUF_n \cdot Q_n^{UF} \quad (3.3)$$

Sujeito a:

$$r_I - r_{I-1} - \sum_{m \in S} Q_m^{UQ} + \sum_{n \in W} Q_n^{UF} = \sum_{i \in H_I} Q_{i,I}^Q - \sum_{j \in C_I} Q_{j,I}^F \quad I = 1, 2, 3, \dots, I_{\max} \quad (3.4)$$

$$Q_m^{UQ} \geq 0, \quad Q_n^{UF} \geq 0, \quad r_I \geq 0 \quad I = 1, 2, 3, \dots, I_{\max}-1 \quad (3.5)$$

$$r_0 = 0, \quad r_{I_{\max}} = 0 \quad (3.6)$$

No caso dos coeficientes de custos serem utilizados com o valor unitário para a formulação acima, obtém-se o consumo de utilidades mínimo diretamente da função objetivo.

Os valores ótimos dos fluxos de utilidades quente e fria, e o calor residual  $r_I$  de cada intervalo  $I$  podem ser determinados pela resolução do problema linear acima. A ocorrência de algum ponto *Pinch* acontece entre os intervalos de temperatura onde o fluxo de calor residual não existe, ou seja, assume o valor zero. Um fato importante sobre este modelo, trata-se dos resíduos  $r_I$ , não corresponderem a uma corrente particular, mas sim a um agregado de correntes quentes.

Para facilitar o entendimento do modelo apresentado para obter o consumo de utilidades, um exemplo numérico será apresentado. Considere os dados da tabela 3.1.

Nesta tabela temos duas correntes quentes e duas correntes frias, com seus dados de temperatura de entrada e saída e suas capacidades térmicas.

Tabela 3.1 - Dados de correntes de processo.

Correntes	$mcp$ ((MW/°C)	$T_{in}$ (°C)	$T_{out}$ (°C)
H <sub>1</sub>	1	400	120
H <sub>2</sub>	2	340	120
C <sub>1</sub>	1,5	160	400
C <sub>2</sub>	1,3	100	250

A mínima diferença de temperatura entre as correntes :  $\Delta T_{min} = 20$  °C.

A utilidade quente utilizada é vapor a 500 °C.

A utilidade fria utilizada é água a 20-30 °C.

Com os dados da tabela 3.1 é possível construir a tabela 3.2, que contem os dados das correntes de processo, com os calores trocados por cada corrente em cada intervalo de temperatura.

Tabela 3.2 - Intervalos de temperatura e calor contido.

Intervalos de temperatura (°C)	Energia contida nas correntes (MW)			
	H1	H2	C1	C2
420      400 int 1	30			
400      380 int 2	60	90		
340      320 int 3	160	320	240	117
180      160 int 4	60	120	78	
120      100				

O fluxo de energia contido na tabela 3.2 pode ser representado pelo fluxograma de energia na figura 3.1. Este fluxograma contém o calor das correntes quentes que entram em seus respectivos intervalos, e também o calor extraído de cada intervalo pelas correntes frias. As variáveis  $r_1, r_2, r_3$ , representam o calor residual, enquanto  $Q^{UQ}, Q^{UF}$  representam as cargas de aquecimento e resfriamento pelas utilidades.

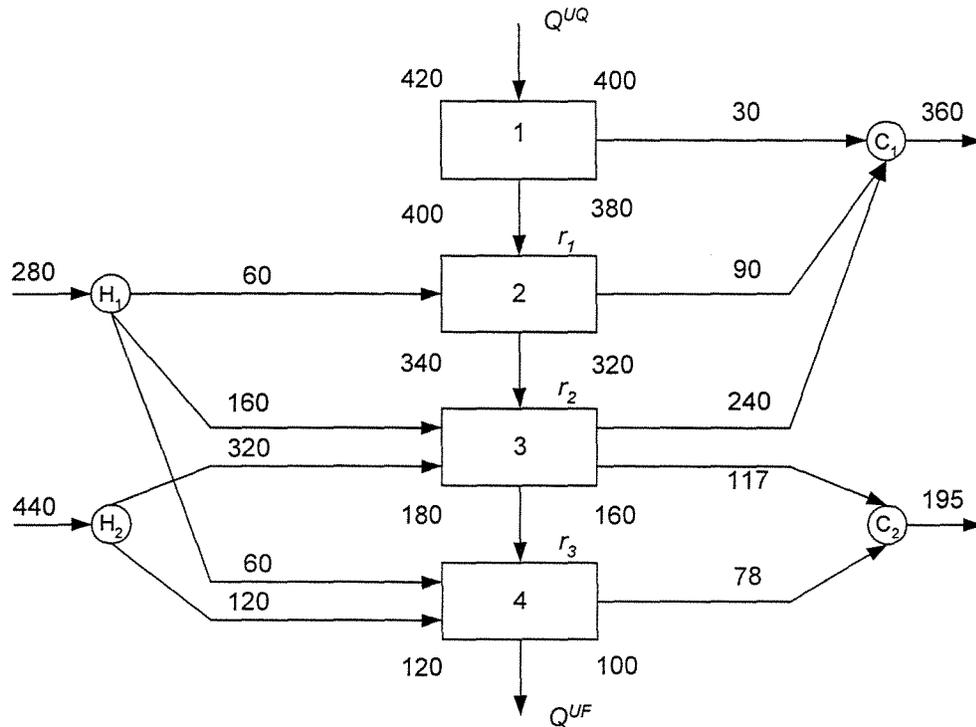


Figura 3.4- Fluxograma de energia para os dados da tabela 3.2.

Pela figura 3.4, pode-se observar que do lado esquerdo tem-se uma escala de temperatura para as correntes quentes e do lado direito uma escala para as correntes frias. As flechas saindo das correntes quentes (H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub>) indicam a que intervalo de temperatura elas estão presentes bem como as suas cargas térmicas disponíveis. De forma similar às flechas chegando as correntes frias (C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>) indicam a que intervalos de temperaturas elas estão presentes, bem como as suas cargas térmicas requeridas. As variáveis  $r$  indicam o calor excedente não consumido pelo intervalo de temperatura atual e que é enviado ao

próximo. As variáveis  $Q^{UQ}$  e  $Q^{UF}$  representam o consumo de utilidades quente e fria, respectivamente.

Realizando o balanço de energia em volta de cada intervalo de temperatura (equação 3.4), obtêm-se as seguintes equações:

$$\begin{array}{ll} \text{Intervalo 1} & r_1 + 30 = Q^{UQ} \\ \text{Intervalo 2} & r_2 + 90 = r_1 + 60 \\ \text{Intervalo 3} & r_3 + 375 = r_2 + 480 \\ \text{Intervalo 4} & Q^{UF} + 78 = r_3 + 180 \end{array}$$

Como pode ser observado pelas equações acima se tem um sistema com 4 equações e 5 incógnitas desconhecidas:  $r_1, r_2, r_3, Q^{UQ}, Q^{UF}$ . Tem-se então um grau de liberdade, o que indica a necessidade de otimização do problema. Considerando como função objetivo a minimização do custo do consumo de utilidades, para  $CUQ_m$  e  $CUF_n = 1$ , e introduzindo a restrição de que as variáveis não sejam negativas, tem-se a formulação do seguinte problema linear:

$$\begin{aligned} \min UT &= Q^{UQ} + Q^{UF} \\ \text{sujeito a: } r_1 - Q^{UQ} &= -30 \\ r_2 - r_1 &= -30 \\ r_3 - r_2 &= 123 \\ Q^{UF} - r_3 &= 102 \\ Q^{UQ}, Q^{UF}, r_1, r_2, r_3, UT &> 0 \end{aligned}$$

O sistema acima pode ser resolvido utilizando algum pacote matemático, sendo que para este trabalho foi usado o pacote GAMS\OSL (1982). Para o  $\Delta T_{min} = 20^\circ\text{C}$ , o consumo de utilidade quente requerido é de 60 MW e utilidade fria de 225 MW.

A figura 3.5 ilustra a solução do sistema. Observe que o ponto *Pinch* se localiza no intervalo de temperatura onde o resíduo é nulo.

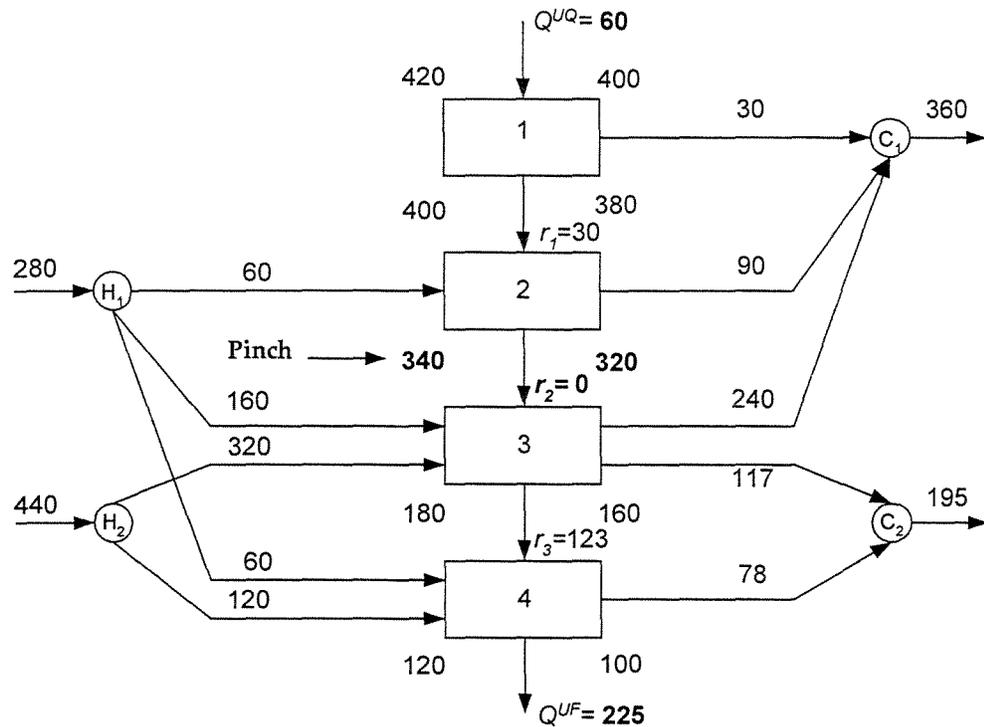


Figura 3.5- Solução do sistema analisado

Como pode ser observado o modelo descrito até aqui não identifica as trocas térmicas, apenas é computado como informação às quantidades de calores disponíveis e requeridas por intervalo de temperatura, procedimento similar ao Algoritmo Tabular.

O Algoritmo Tabular nos informa também as quantidades de utilidades quentes e frias necessária no processo, mas não informa qual é o sistema de utilidades é mais conveniente para se utilizar no processo.

### 3.4 – Comportamento das utilidades de temperatura variável no processo.

No capítulo anterior vimos como as utilidades podem ser alocadas em um processo, e como são suas representações dentro da Grande Curva Composta.

Vimos que se a utilidade quente utilizada for vapor de alta pressão, média pressão ou baixa pressão, estas utilidades serão representadas por linhas horizontais no diagrama da Grande Curva Composta, pois neste caso ocorre apenas a troca de calor latente entre as correntes de utilidades e as correntes do processo, permanecendo sua temperatura praticamente constante no processo. Neste caso toda a quantidade de calor doado ao processo entra em um intervalo de temperatura, e é transferido aos intervalos subseqüentes através dos calores residuais.

No entanto se a utilidade quente utilizada for óleo quente ou gases de combustão, estas utilidades serão representadas por uma reta inclinada no diagrama da Grande Curva Composta. Isto ocorre, pois neste caso há a troca de calor sensível entre as correntes de utilidade e as correntes de processo. Então à medida que a corrente de utilidade vai trocando calor com a corrente de processo a sua temperatura decresce de forma linear ao longo do processo, passando por vários intervalos de temperatura, até sair do processo a uma temperatura  $T^*$  (figura 3.6), após sair do processo os gases serão lançados para o meio ambiente, levando uma certa quantidade de calor não utilizada.

A quantidade de calor utilizada no processo, em cada intervalo é dada pelas variáveis  $Q^{G1}$  e  $Q^{G2}$ , e a quantidade de calor não utilizada no processo é dada pela variável  $Q^G_{desp}$ . Então a quantidade total de energia da utilidade é dada pela soma das quantidades de calor utilizadas no processo com a quantidade de calor lançada ao meio ambiente. Estas quantidades de calor podem ser calculadas através de semelhança de triângulos, onde na base dos triângulos temos o calor disponível pela utilidade no intervalo de temperatura, e a sua altura representa a variação de temperatura da utilidade no respectivo intervalo (equação 3.7). Isto é possível, pois ao se utilizar os gases no primeiro intervalo para aquecimento, ele continuará disponível no processo para ser utilizado nos intervalos subseqüentes.

Na figura 3.6 temos a representação do diagrama do fluxo de calor de um processo, apresentando o decréscimo de temperatura de uma utilidade de temperatura variável  $Q^G$ , e as quantidades de calor transferidas em cada intervalo de temperatura.

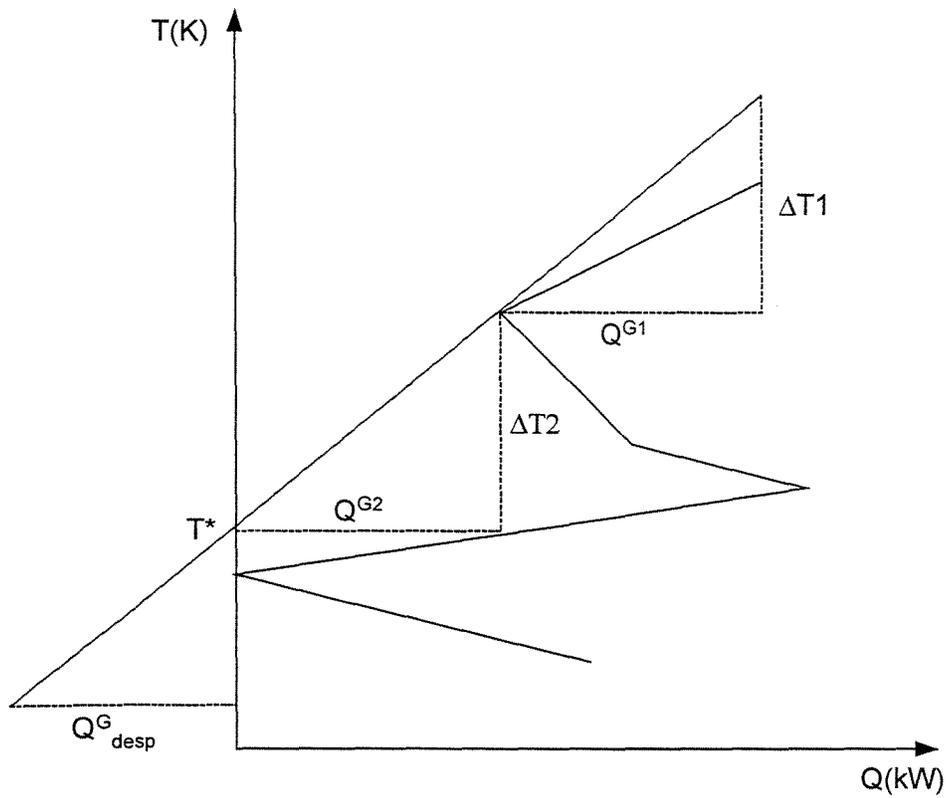


Figura 3.6: Diagrama do fluxo de calor do processo.

Na equação 3.7 temos o calculo da quantidade de calor que pode ser utilizado pelo processo, proveniente de uma utilidade de temperatura variável.

$$\frac{Q^{G1}}{(\Delta T1)} = \frac{Q^{G2}}{(\Delta T2)} \quad (3.7)$$

Então o processo de otimização devera calcular o consumo da utilidade \$Q^{G1}\$ e \$Q^{G2}\$ e minimizar a temperatura de saída dos gases \$T^\*\$, portanto se obtém a inclinação da reta (vazão).

### 3.5– Exemplo numérico para a obtenção do consumo de utilidades, com múltiplas utilidades.

Para facilitar a compreensão do método descrito anteriormente será apresentado um exemplo para o cálculo do consumo de utilidades, com a presença de vários tipos de utilidades. Para isto, considere o conjunto de dados das tabelas 3.3, 3.4 e 3.5.

Determinaremos o sistema de utilidades com menor custo possível para o processo utilizando vários níveis de utilidades e algumas máquinas térmicas.

No processo há um “déficit” de energia, e a energia gerada pelas turbinas a vapor e a gás será creditada a um custo equivalente.

Tabela 3.3: Dados da Grande Curva Composta de um processo químico.

<i>Intervalo de temperatura (°C)</i>	350	290	160	140	140	120	120	100	100	60
<i>Fluxo de calor (kW)</i>	4200	3800	4400	3200	2400	2800	0	400	3600	2800

Tabela 3.4: Sistema de utilidades disponível para o processo incluindo os seus custos.

<i>Caldeira</i>	$T_{\text{adiabática}} = 1500\text{ °C}$
<i>Vapor de alta pressão á 220 °C</i>	custo/energia = 1,5 x custo do combustível
<i>Água de resfriamento (25°C à 40 °C)</i>	custo/energia = 0,05 x custo do combustível
<i>Energia elétrica</i>	custo/energia = 3 x custo do combustível

Tabela 3.5: Algumas máquinas térmicas disponíveis.

<i>Turbina a gás</i>	$WTG = 0,24(Q_{\text{gás de entrada}})$	$T_{\text{saída do gás}} = 457\text{ °C}$
<i>Turbina a vapor</i>	$WTV = 0,15(Q_{\text{baixa pressão}})$	$T_{\text{baixa pressão}} = 145\text{ °C}$

A variação mínima de temperatura, ou mínima temperatura de aproximação entre as correntes é igual a 20 °C.

O combustível queimado para produzir gás, pode conter enxofre havendo a possibilidade de formação de ácidos, por esta razão a mínima temperatura de saída deste gás do processo, deve ser de aproximadamente 160 °C,

A temperatura ambiente é de 25 °C.

Neste processo a turbina a gás expande seus gases a 457 °C, que poderá ser utilizado para aquecer o processo. A turbina a vapor utiliza vapor de alta pressão e expande vapor de baixa pressão a 145 °C, que também poderá ser utilizado para aquecer o processo.

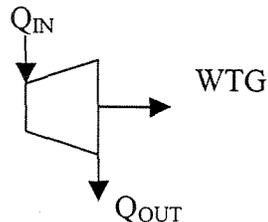
### 3.5.1-Tratamento de Dados

A turbina a gás produz trabalho na proporção de 24% do calor dos gases que entram na turbina. Mas como os gases expandidos serão utilizados para aquecer o processo, é necessário calcular a quantidade de calor presente nos gases de expansão em função do trabalho gerado.

Como o trabalho da turbina a gás é dado pela equação:

$$WTG = 0,24 Q_{IN}$$

Fazendo um balanço de energia na turbina temos:



$$Q_{IN} = WTG + Q_{OUT}$$

Substituindo esta equação na equação do trabalho da turbina a gás temos:

$$WTG = 0,24 (WTG + Q_{OUT})$$

Portanto,

$$WTG = 0,3157 Q_{OUT}$$

Os dados dispostos na tabela 3.3 representam o fluxo de calor da Grande Curva Composta para o processo químico que será estudado, mas não mostra a variação de calor entre as correntes quentes e frias em cada intervalo.

Para conseguir os valores da variação de calor ( $\Delta Q$ ) nos intervalos de temperatura devemos usar o procedimento inverso do Algoritmo da Tabela, ou seja, subtrair do calor de cada intervalo, o calor do intervalo anterior .

$$\Delta Q = \textit{intervalo}(i-1) - \textit{intervalo}(i)$$

Exemplo: intervalo 1.

$$\Delta Q = 3800 - 4200 = -400$$

Tabela 3.6: Variação de calor nos intervalos

<i>Intervalo</i>	<i>Temperatura</i>	<i>Fluxo de Calor</i>	$\Delta Q$
		4200 →	calor adicionado ao processo
1	350	3800	-400
2	290	4400	600
3	160	3200	-1200
4	140	2400	-800
5	140	2800	400
6	120	0	-2800
7	120	400	400
8	100	3600	3200
9	100	2800 ↘	-800
	60		calor retirado do processo

O fluxo de calor agora pode ser representado em um diagrama de blocos, que nos mostra a quantidade de calor que pode ser trocada em cada intervalo, entre o processo e o sistema de utilidades.

As variáveis  $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7$  e  $r_8$  representam o calor residual de cada intervalo de temperatura. O "déficit" de energia em cada intervalo será suprido pelas utilidades  $Q^{GTI}, Q^{GCI}, Q^{HP}, Q^{LP}$  e  $Q^{UF}$ , onde:

$Q^{GCI}$  representa os gases de combustão da caldeira em cada intervalo;

$Q^{GTI}$  representam os gases de exaustão da turbina a gás;

$Q^{HP}$  vapor de alta pressão;

$Q^{LP}$  vapor de baixa pressão;

$Q^{UF}$  representa a utilidade fria - água de resfriamento.

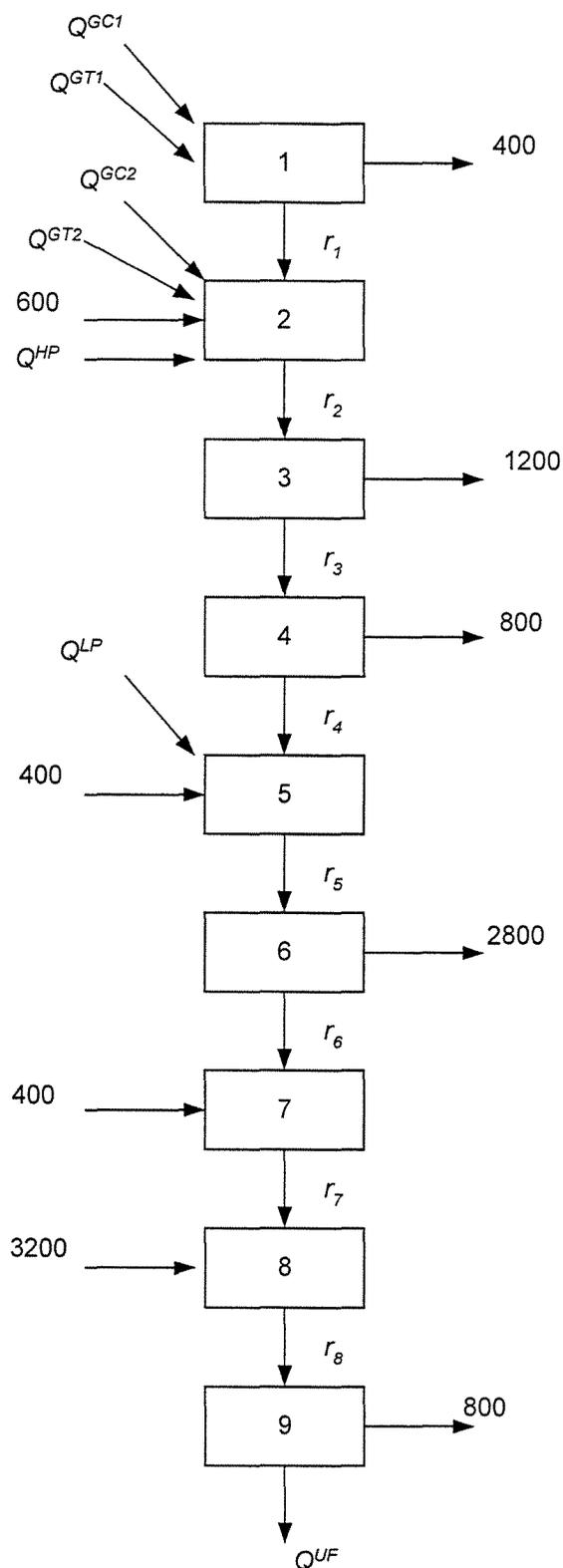


Figura 3.7: diagrama do fluxo de calor nos intervalos de temperatura.

### 3.5.2 – Modelagem.

A partir do diagrama de blocos podemos efetuar o balanço de energia em cada intervalo de temperatura, e introduzindo as equações do cálculo dos calores das correntes de utilidade  $Q^{GC}$  e  $Q^{GT}$ , e as equações dos trabalhos das turbinas considerando a função objetiva de minimização dos custos do sistema de utilidades e introduzindo o critério de não negatividade das variáveis temos as seguintes equações:

Balanço de energia em cada intervalo de temperatura.

$$\text{Intervalo 1: } Q^{GC1} + Q^{GT1} - r_1 = 1\ 000$$

$$\text{Intervalo 2: } Q^{GC2} + Q^{GT2} + Q^{HP} + r_1 - r_2 = -600$$

$$\text{Intervalo 3: } r_2 - r_3 = 1200$$

$$\text{Intervalo 4: } r_3 - r_4 = 800$$

$$\text{Intervalo 5: } Q^{LP} + r_4 - r_5 = -400$$

$$\text{Intervalo 6: } r_5 - r_6 = 2800$$

$$\text{Intervalo 7: } r_6 - r_7 = -400$$

$$\text{Intervalo 8: } r_7 - r_8 = -3200$$

$$\text{Intervalo 9: } r_8 - Q^{UF} = 800$$

Critério de não negatividade das variáveis.

$$r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, r_6, r_7, r_8, Q^{GC1}, Q^{GC2}, Q^{GT1}, Q^{GT2}, Q^{GC}_{desp}, Q^{GT}_{desp}, Q^{HP}, Q^{LP} \text{ e } Q^{UF} \geq 0$$

O calor disponível de  $Q^{GC}$  e  $Q^{GT}$  no intervalo 2, é calculado através de semelhança de triângulos. A temperatura inferior deste intervalo será igual à temperatura de saída das utilidades  $Q^{GC}$  ou  $Q^{GT}$  do processo, como esta temperatura é desconhecida e deve ser otimizada, ela será representada pela variável  $T^*$ .

Cálculo da quantidade de calor da utilidade  $Q^{GC}$  gasta no processo.

$$Q^{GC2} = Q^{GC1} \times (290 - T^*) / (1490 - 290)$$

$$Q^{GC}_{desp} = Q^{GC1} \times (T^* - T_{amb}) / (1490 - 290)$$

$$Q^{GC} = Q^{GC1} + Q^{GC2} + Q^{GC}_{desp}$$

Cálculo da quantidade de calor da utilidade  $Q^{GT}$  gasta no processo.

$$Q^{GT2} = Q^{GT1} \times (290 - T^*) / (447 - 290)$$

$$Q^{GT}_{desp} = Q^{GT1} \times (T^* - T_{amb}) / (447 - 290)$$

$$Q^{GT} = Q^{GT1} + Q^{GT2} + Q^{GT}_{desp}$$

Cálculo do trabalho gerado pela turbina a gás.

$$WTG = 0,315789 \times (Q^{GT})$$

Cálculo do trabalho gerado pela turbina a vapor.

$$WTV = 0,15 \times (Q^{LP})$$

Quantidade de vapor de alta pressão utilizada na turbina a vapor.

$$Q^{\text{HPTV}} = Q^{\text{LP}} + \text{WTV}$$

Função objetiva de minimização dos custos do sistema de utilidades.

$$Z = 1,0 Q^{\text{GC}} + 1,0 Q^{\text{GT}} + 1,5 Q^{\text{HP}} + 1,5 Q^{\text{HPTV}} + 0,05 Q^{\text{UF}} - 3,0 \text{WTG} - 3,0 \text{WTV}$$

### 3.5.3 – Resultados.

Aplicando o pacote matemático GAMS/OSL obtêm-se como resultado o custo e cargas térmicas ilustradas pela figura 3.8.

O melhor sistema encontrado para o processo foi:

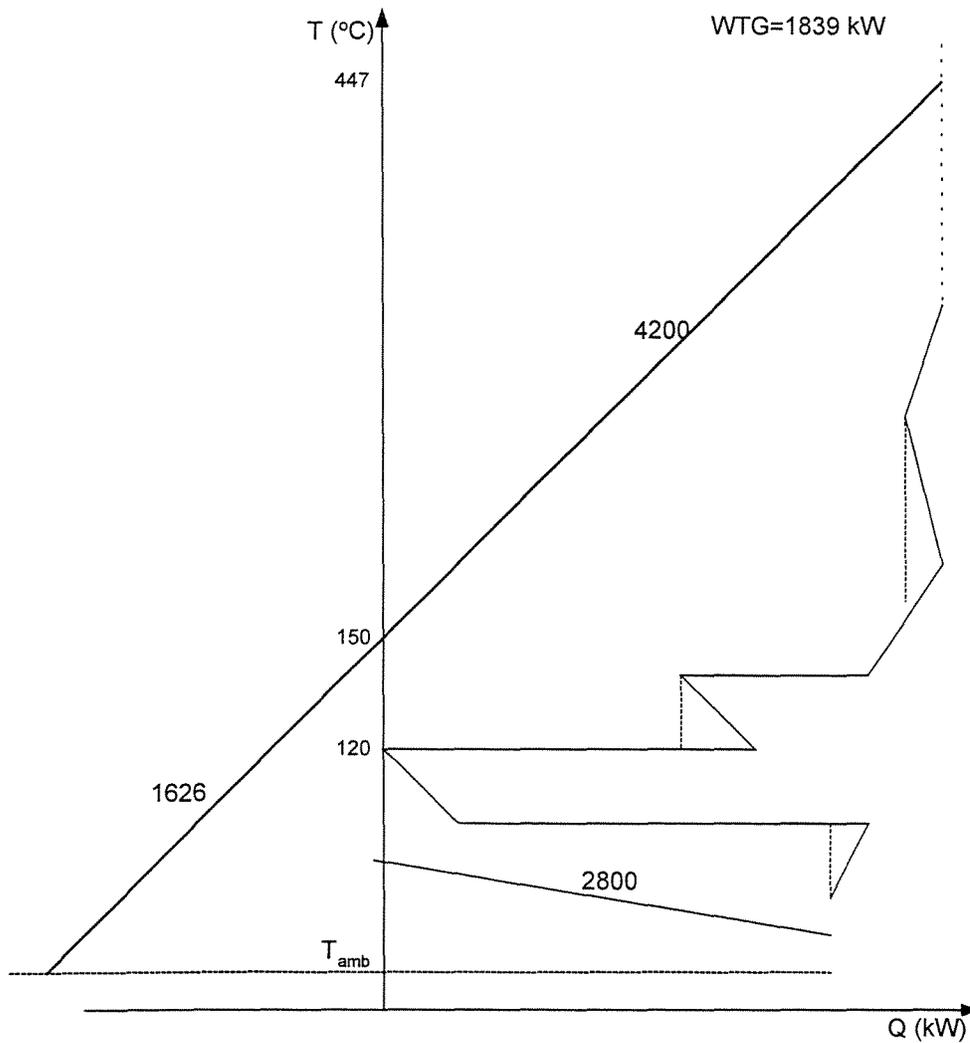


Figura 3.8: Perfil da Grande Curva Composta do processo, e sistema de utilidades encontrado.

$$\text{Custos: } Q^{\text{GT}} = 4200 + 1626 + 1839 = 7665$$

$$Q^{\text{UF}} = 2800 \times 0,05 = 140$$

$$\text{WTG} = 1839 \times (-3) = -5517$$

$$\text{C\$} = 2286,00$$

Neste caso tivemos o uso de apenas turbina a gás, gerando 1839 kW de energia e aquecendo o processo com os gases de exaustão.

Ao variarmos os custos das utilidades podemos encontrar novas soluções para o problema.

Tomemos agora o sistema de utilidades com os seguintes custos.

$Q^{GC}$	1
$Q^{HP}$	0,5
$Q^{UF}$	0,05
$W$	3

Neste caso há a diminuição do custo da utilidade vapor de alta pressão de 1,5 para 0,5, e espera-se com isso que o programa induza a uma maior utilização deste tipo de utilidade.

O novo sistema encontrado para o processo foi:

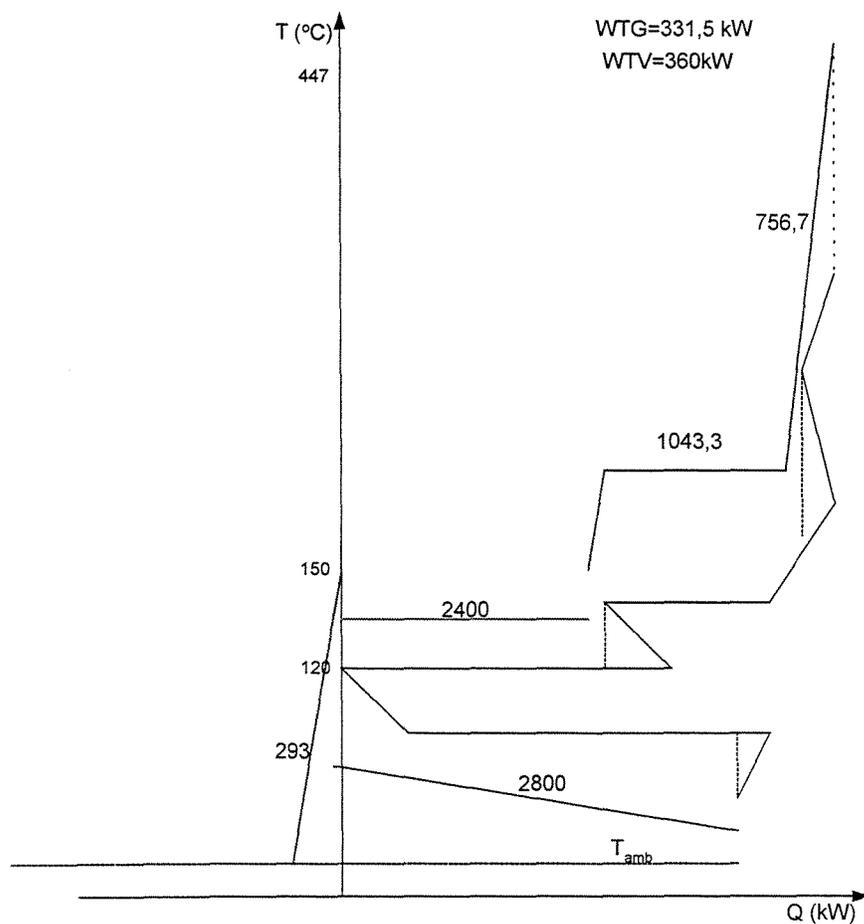


Figura 3.9: Perfil da Grande Curva Composta do processo, e sistema de utilidades encontrado, para os novos custos.

Custos:

$$Q^{GT} = 756,7 + 331,5 + 293 = 1381,2$$

$$Q^{HP} = 1043,3 + 2400 + 360 = 3803,3 \times 0,5 = 1901,65$$

$$Q^{UF} = 2800 \times 0,05 = 140$$

$$WTG = 331,5 \times (-3) = -994,5$$

$$WTV = 360 \times (-3) = -1080$$

$$C\$ = 1348,38$$

Neste caso tivemos o uso de uma turbina a gás, gerando 331,5 kW de energia e uma turbina a vapor gerando 360 kW de energia, o processo foi aquecido com 756,7 kW de calor provenientes dos gases de exaustão da turbina a gás, 1043,3 kW de vapor de alta pressão e 2400 kW de vapor de baixa pressão.

Tomemos agora o sistema de utilidades com os seguintes custos.

$Q^{GC}$	1
$Q^{HP}$	1,5
$Q^{UF}$	0,05
$W$	1

Neste caso há a diminuição do valor do trabalho gerado pelas turbinas a gás e a vapor de 3,0 para 1,0, e espera-se com isso que o programa induza a não produção de trabalho e conseqüentemente a não utilização de turbinas no processo.

O novo sistema encontrado para o processo foi:

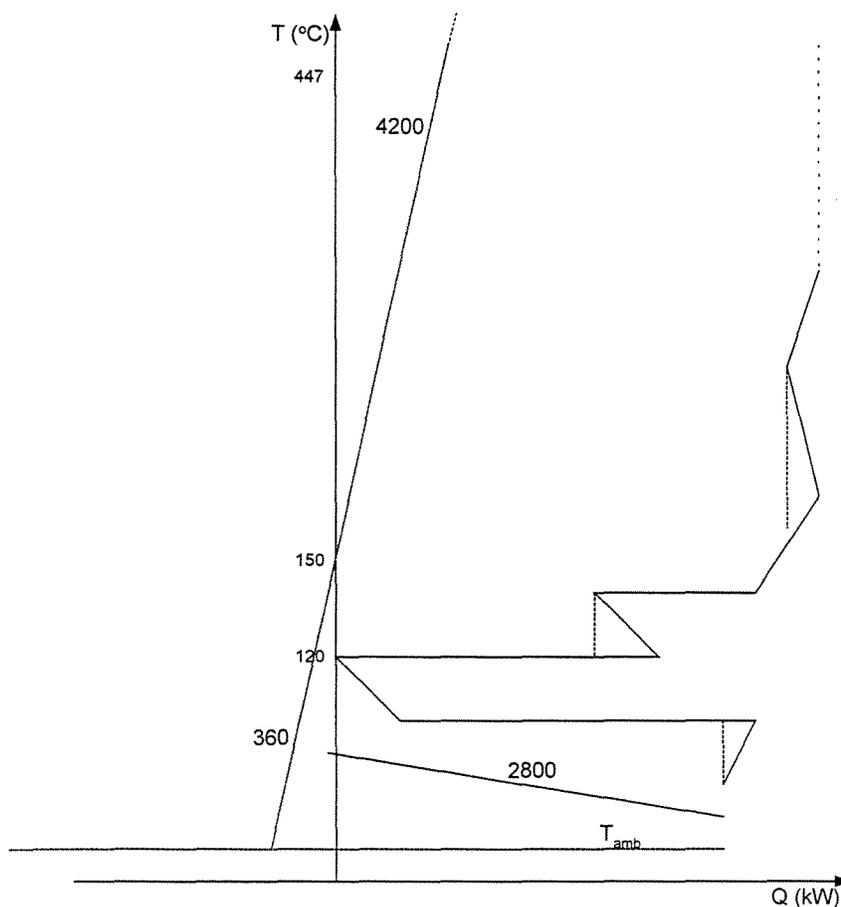


Figura 3.10: Perfil da "Grande Curva Composta" do processo, e sistema de utilidades encontrado, para os novos custos.

$$\text{Custos: } Q^{\text{GC}} = 4200$$

$$Q^{\text{GC}}_{\text{desp}} = 360$$

$$Q^{\text{UF}} = 1800 \times 0,05 = 140$$

$$\text{C\$} = 4700,00$$

Neste sistema foi utilizado somente gás de combustão da caldeira, o processo utilizou 4200 kW de energia para o aquecimento das correntes e 360 kW de energia foi lançado ao meio ambiente juntamente com os gases de combustão da caldeira.

Tomemos agora o sistema de utilidades com os seguintes custos.

$Q^{GC}$	1
$Q^{HP}$	0,5
$Q^{UF}$	0,05
$W$	0,5

Neste caso há a diminuição do custo da utilidade vapor de alta pressão de 1,5 para 0,5 e também a diminuição do valor do trabalho gerado pelas turbinas a gás e a vapor de 3,0 para 0,5. Neste caso espera-se que o programa induza a uma maior utilização do vapor de alta pressão e uma baixa produção de trabalho pelas turbinas.

O novo sistema encontrado para o processo foi:

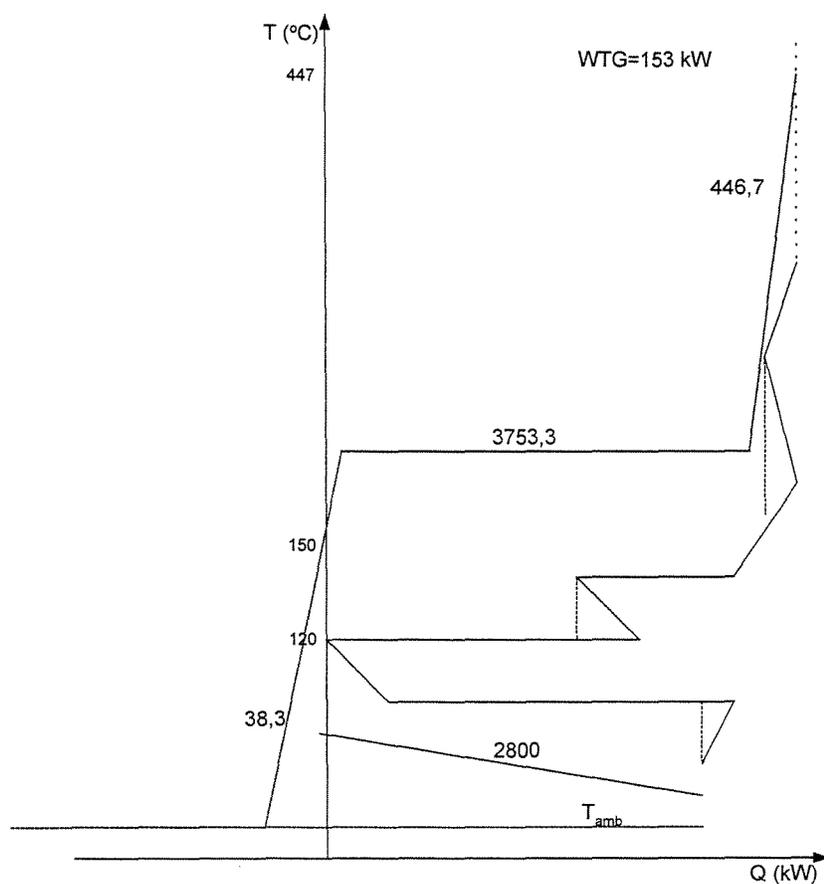


Figura 3.11: Perfil da "Grande Curva Composta" do processo, e sistema de utilidades encontrado, para os novos custos.

$$\text{Custos: } Q^{\text{GT}} = 446,7 + 38,3 + 153 = 638$$

$$Q^{\text{HP}} = 3753,3 \times 0,5 = 1876,66$$

$$Q^{\text{UF}} = 2800 \times 0,05 = 140$$

$$\text{WTG} = 153 \times (-3) = -459$$

$$\text{C\$} = 2195,66$$

Neste caso tivemos o uso de uma turbina a gás, gerando 153 kW de energia, o processo foi aquecido com 446,7 kW de calor provenientes dos gases de exaustão da turbina a gás e 3753,3 kW de vapor de alta pressão, e 38,3 kW de energia foram lançados ao meio ambiente juntamente com os gases de combustão da turbina a gás.

### 3.5.4 - Resumo dos resultados.

Para se testar a flexibilidade do modelo aplicado ao problema foram feitas algumas variações dos custos dos equipamentos a partir de seus custos iniciais.

Custos iniciais

$Q^{GC}$	1,0
$Q^{HP}$	1,5
$Q^{UF}$	0,05
$W$	3,0

Variaram-se os custos das seguintes utilidades:

Figura 3.8: custos iniciais.

Figura 3.9: redução do custo de  $Q^{HP}$  de 1,5 para 0,5.

Figura 3.10: redução do custo de  $W$  de 3,0 para 1,0.

Figura 3.11: redução do custo de  $Q^{HP}$  de 1,5 para 0,5 e redução do custo de  $W$  de 3,0 para 0,5.

Tabela 3.7: Resumo dos resultados.

<i>Utilidades</i>	<i>Figura 8</i>	<i>Figura 9</i>	<i>Figura 10</i>	<i>Figura 11</i>
$Q^{GC}$	4200	756,7	4200	446,7
$Q^{HP}$	-	1043,3	-	3753,3
$Q^{LP}$	-	2400	-	-
$Q^{UF}$	2800	2800	2800	2800
$WTG$	1839	331,5	-	153,0
$WTV$	-	360,0	-	-
$Q_{desp}$	1626	293,0	360	38,3
<b><i>Custo Total</i></b>	<b>2286,00</b>	<b>1384,38</b>	<b>4700,00</b>	<b>2195,66</b>

### 3.5.5 – Discussão dos resultados.

Foi realizado um estudo para a obtenção do mínimo custo do sistema de utilidades para um processo contendo múltiplas utilidades, procurando estudar principalmente as utilidades onde a temperatura da utilidade varia no processo.

Pôde-se constatar neste trabalho, que os custos das utilidades tem grande influência nos resultados finais do processo de otimização do sistema de utilidades. Pois ao variarmos os custos das utilidades, o processo utilizará novos sistemas de utilidades.

Uma constatação importante, observado neste problema, que é uma das restrições da metodologia aplicada, é o fato de que, quando os custos da energia produzidos pelas turbinas forem bastante elevados, em relação aos custos das outras utilidades, o sistema de utilidades pode começar a obter lucros, ou seja, custos negativos na função objetivo. Como o programa minimiza esta função, o programa induz o processo a queimar mais combustível do que o esperado, ou seja, produzir muita energia elétrica, para obter o menor valor possível da função objetivo, e assim obter o máximo lucro possível.

Para contornar este problema, o engenheiro (ou programador) deve saber qual é o calor mínimo requerido das utilidades para satisfazer o processo, e este valor deverá ser a máxima quantidade de calor utilizada pelo processo. Se o processo requer utilidades em que a temperatura varie, também será necessário que se restrinja à temperatura de saída desses gases do processo, de modo que esta temperatura deverá ser a mínima temperatura de saída deste processo.

## Capítulo 4 - Síntese de Sistemas de Utilidades

### 4.1 – Introdução.

Este capítulo é destinado ao estudo da síntese de processos, enfocando principalmente a síntese de sistemas de utilidades, destacando os ciclos de potência, em especial as turbinas a gás.

A turbina a gás terá um enfoque especial, pois ela possui um grande rendimento térmico e permite ao projetista a alocação de demandas de trabalho para o processo e seus gases de exaustão podem ser utilizados como fonte de utilidade de aquecimento para o processo.

As turbinas a gás também possuem a vantagem de produzir utilidades (gases de exaustão) nos mais variados níveis de temperatura, seus gases podem ser utilizados a temperaturas altíssimas e também em temperaturas intermediárias como utilidade, variando assim sua produção de trabalho.

Na primeira parte deste capítulo serão abordados alguns aspectos e generalidades das turbinas a gás, e como estas turbinas podem ser modeladas matematicamente, para a produção de energia, e o custo benéfico do uso de turbinas a gás em relação das turbinas a vapor. Pois para se ter vapores de alta pressão a temperaturas elevadas, são necessárias pressões muitas elevadas aumentando o custo dos equipamentos e do sistema de utilidade.

Posteriormente será apresentado um modelo para síntese automática de uma planta de utilidades, a partir de um processo hipotético.

Para se testar a eficiência do modelo, no capítulo 5 será apresentado um exemplo numérico para a obtenção de um sistema de utilidades, a partir de dados retirados da literatura.

## 4.2 - Turbinas a gás.

### 4.2.1 - Histórico e generalidades.

A história do desenvolvimento da turbina a gás é similar aos outros tipos de motores.

O princípio da ação e reação do jato (vapor ou gás) escoando através de um orifício, é conhecido a longo tempo. O que comumente denomina-se turbina a gás (figura 4.1), é uma combinação (construção compacta) composta de um compressor, uma câmara de combustão e a própria turbina, onde acontece a expansão dos gases; e por vezes, mais unidades agregam complexidade ao sistema, tais como resfriadores intermediários e trocadores de calor regenerativos.

Na câmara de combustão muitas vezes queimam-se combustíveis líquidos e o termo á “gás” refere-se aos gases quentes gerados, que escoam através das palhetas da turbina vindo a impulsiona-las e produzindo energia mecânica.

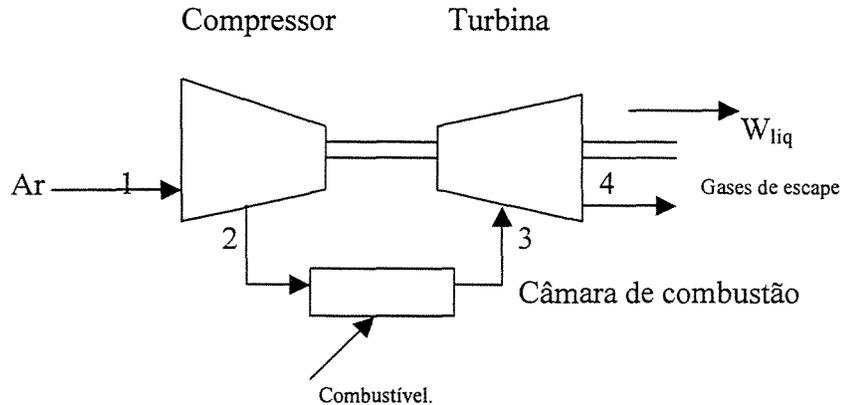


Figura 4.1: Esquema simplificado de uma turbina a gás.

Tal como em qualquer motor de combustão, a geração de potência depende de que os gases aquecidos gerem mais trabalho em sua expansão, do que exige a compressão de uma quantidade correspondente de ar de combustão.

Desde 1950 as turbinas a gás tem sido utilizadas em campos de prospecção de petróleo e gases remotos, plataformas marítimas de prospecção e estações de gás natural.

Nestes locais onde água fresca é freqüentemente escassa, e os combustíveis nobres com suprimento barato ou espaços disponíveis são limitados, fazem com que as turbinas a gás modulares sejam consideradas a melhor solução. Além do mais, apresentam a vantagem de possuir partidas extremamente rápidas para o potencial de geração, algumas vezes em torno de 10 minutos para coloca-las em regime de operação a plena carga.

As turbinas a gás podem ser classificadas em primeira aproximação, como máquinas de ciclo aberto ou fechado. A primeira figura, figura 4.1, objeto deste trabalho, é considerada uma turbina de ciclo aberto, que descarrega os gases expandidos na atmosfera ou eles são reaproveitados posteriormente em caldeiras recuperativas para a geração de vapor. Nesta turbina o ar entra no compressor, geralmente á temperatura ambiente, com a compressão há um aumento da temperatura do ar, depois o ar passa pelo combustor onde sua temperatura é elevada a seu nível mais alto, com a queima de combustíveis líquidos ou gás natural, a combustão gera gases quentes que são expandidos na turbina através de bocais, impulsionando as palhetas do rotor e produzindo-se assim energia mecânica.

No ciclo fechado (figura 4.2) os gases de escape passam por um trocador de calor aquecendo o ar comprimido pelo compressor, aumentando assim o rendimento da câmara de combustão.

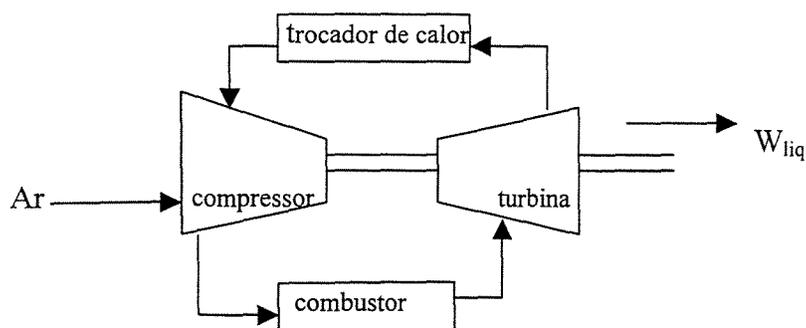


Figura 4.2: Esquema simplificado de uma turbina a gás que opera em circuito fechado.

### 4.2.2 - Ciclo Padrão de Ar Brayton (Ideal).

O ciclo padrão de ar Brayton é o ciclo ideal para turbinas a gás simples.

Ar é comprimido por um compressor, daí fluindo para uma câmara de combustão onde combustível é injetado no mesmo nível de pressão do ar. A combustão gera gases quentes que se expandirão através de bocais, impulsionando as palhetas do rotor e produzindo-se assim energia mecânica.

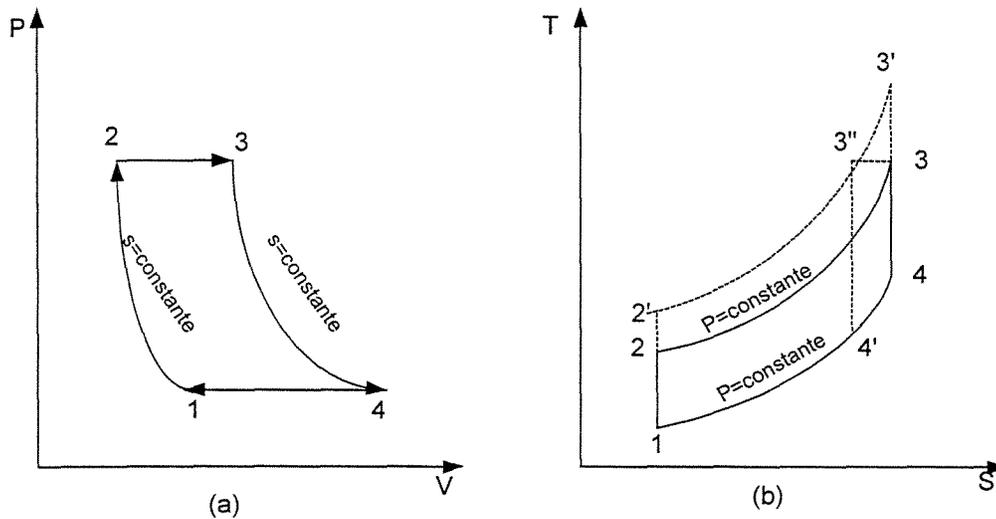


Figura 4.3- Ciclo padrão de ar Brayton - diagramas P-V (a) e T-S (b).

Os estados correspondentes aos estágios do ciclo esquematizado na figura 4.2 podem ser visualizados na figura 4.3, que corresponde a um ciclo Brayton, ideal.

Observa-se que  $P_2 = P_3$  e  $P_1 = P_4$

$$\text{então : } \frac{P_3}{P_4} \equiv \frac{P_2}{P_1} \quad (4.1)$$

Sendo um processo isoentrópico, é:

$$\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad \text{ou} \quad \left(\frac{P_3}{P_4}\right) = \left(\frac{T_3}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (4.2)$$

O rendimento do ciclo padrão a ar Brayton é uma função da relação de pressões entre a entrada e a saída do compressor definida como relação de pressões politrópica. Aumentando-se a temperatura, fica evidente que a pressão também deve aumentar (linhas tracejadas da figura 4.3b). O ciclo 1-2'-3"-4 tem um fornecimento de calor maior, tendo o mesmo fluxo de calor rejeitado do ciclo original, e apresentado portanto um rendimento térmico maior em razão da elevação da temperatura  $T_3$  para  $T_3'$ .

A temperatura  $T_3$  (saída da câmara de combustão) possui um valor máximo, limitado pela resistência metalúrgica dos materiais compostos das palhetas do rotor da turbina.

Porém, fixando-se a temperatura  $T_3$  e aumentando-se a relação de pressão ( $r_p = p_2/p_1$ ), o ciclo resultante é 1-2"-3"-4"-1. Este ciclo possui efetivamente um rendimento maior do que o ciclo original 1-2-3-4-1.

O compressor pode absorver de 40 a 80 por cento da potência desenvolvida pela turbina para a compressão de ar. As limitações das relações de pressão entre a entrada e saída do compressor são discutidas no item 4.2.3, com a introdução de complexidades no ciclo básico Brayton para elevar a potência específica (kJ/kg), com conseqüente redução da potência consumida pelo compressor.

#### 4.2.3 - Ciclos reais de turbinas a gás e tendências de desenvolvimento de novos ciclos.

As turbinas a gás reais diferem do ciclo ideal de Brayton, devido principalmente as irreversibilidades intrínsecas associadas ao processo de conversão de energia cinética e térmica em mecânica, através do escoamento do fluido de trabalho ao longo da turbina (perdas de carga) e ao processo de combustão. Graficamente, os deslocamentos dos pontos representativos da figura 3-b, 1-2-3-4, são mostrados a seguir.

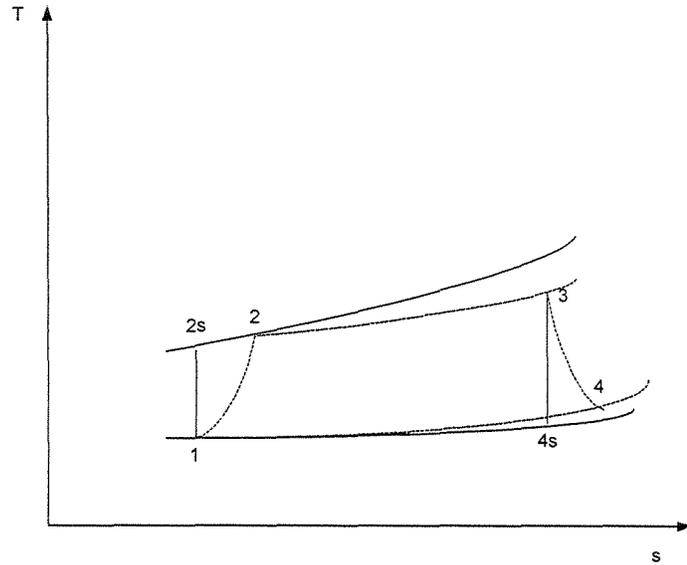


Figura 4.4 - Efeito das irreversibilidades sobre o aumento de entropia, no ciclo Brayton.

As eficiências de primeira lei do compressor e da turbina são definidas em relação aos processos isoentrópicos.

A possibilidade de elevação dessas eficiências com a elevação das temperaturas de entrada na turbina e as relações de compressão são o enfoque principal do desenvolvimento de novas tecnologias. Os efeitos da elevação da temperatura de entrada no primeiro rotor da turbina é apresentada pela expressão 4.3, definida como a relação do trabalho produzido líquido pela turbina ( $W_{liq} = W_{turb} - W_{comp}$ ) e o calor fornecido pela câmara de combustão.

$$\eta_{turb} = \frac{W_{liq}}{q_H} = \frac{cp(T_3 - T_4) - cp(T_2 - T_1)}{cp(T_3 - T_2)} \quad (4.3)$$

Onde os trabalhos desenvolvidos e consumidos por cada componente são dados por:

Para o compressor:

$$\text{Trabalho de compressão} = W_c = c_p (T_2 - T_1) \quad (4.4)$$

Para o combustor:

$$\text{Calor} = Q = c_p (T_3 - T_2) \quad (4.5)$$

Para a turbina:

$$\text{Trabalho da turbina} = W_t = c_p (T_3 - T_4) \quad (4.6)$$

O trabalho líquido produzido pela turbina é dado por:

$$W_{\text{liq}} = W_t - W_c \quad (4.7)$$

A queda de eficiência para uma turbina a gás está associada aos processos de compressão, de combustão e de expansão dos gases. Para o processo de compressão, o aquecimento devido ao atrito fluidodinâmico entre o ar e as palhetas do compressor constitui a maior fonte de geração de irreversibilidade, visto graficamente no deslocamento 2-2s da figura 4.4. Na câmara de combustão, a perda de eficiência, é causada pela degradação de energia associada às reações descontroladas no processo de combustão e pela diferença de temperatura entre os reagentes e produtos.

Na zona de expansão, a queda de eficiência também é associada ao processo de reaquecimento devido ao atrito fluidodinâmico entre os gases quentes e as palhetas (deslocamento entre os pontos 4-4s), além é claro, das perdas para o meio ambiente através dos gases de escape.

### 4.3 - Equacionamento matemático para síntese de uma planta de utilidades.

A intenção no presente momento não é detalhar o modelo, mas simplesmente esboçar a natureza do modelo.

Consideraremos um problema em que nós temos uma demanda de energia elétrica ou energia mecânica para diversas máquinas como compressores e bombas, e demandas de vapor a diversos níveis de pressão e temperatura, o problema será então encontrar o mínimo custo para a configuração de um sistema que possua caldeiras, turbinas a gás e vapor, motores elétricos e válvulas, que satisfaça estas demandas.

Dada às demandas de utilidades, é possível desenvolver uma superestrutura que contenha as unidades de processo que potencialmente possam satisfazer estas demandas. Por exemplo, demandas elétricas ou demandas mecânicas podem ser satisfeitas por turbinas a gás e turbinas a vapor de vários tipos. As demandas de vapor podem ser satisfeitas pelos vapores gerados nas caldeiras ou usando os vapores de exaustão das turbinas ou utilizando válvulas de expansão ou ainda utilizando gases de exaustão da turbina a gás para gerar vapor. As turbinas a vapor de alta pressão (HP), utilizam vapor de alta pressão e podem expandir seus vapores à média ou a baixa pressão, e a turbina a vapor de média pressão (MP), utiliza vapor de alta pressão e pode expandir seus vapores baixa pressão. Uma correspondente superestrutura pode ser mostrada na figura 4.5.

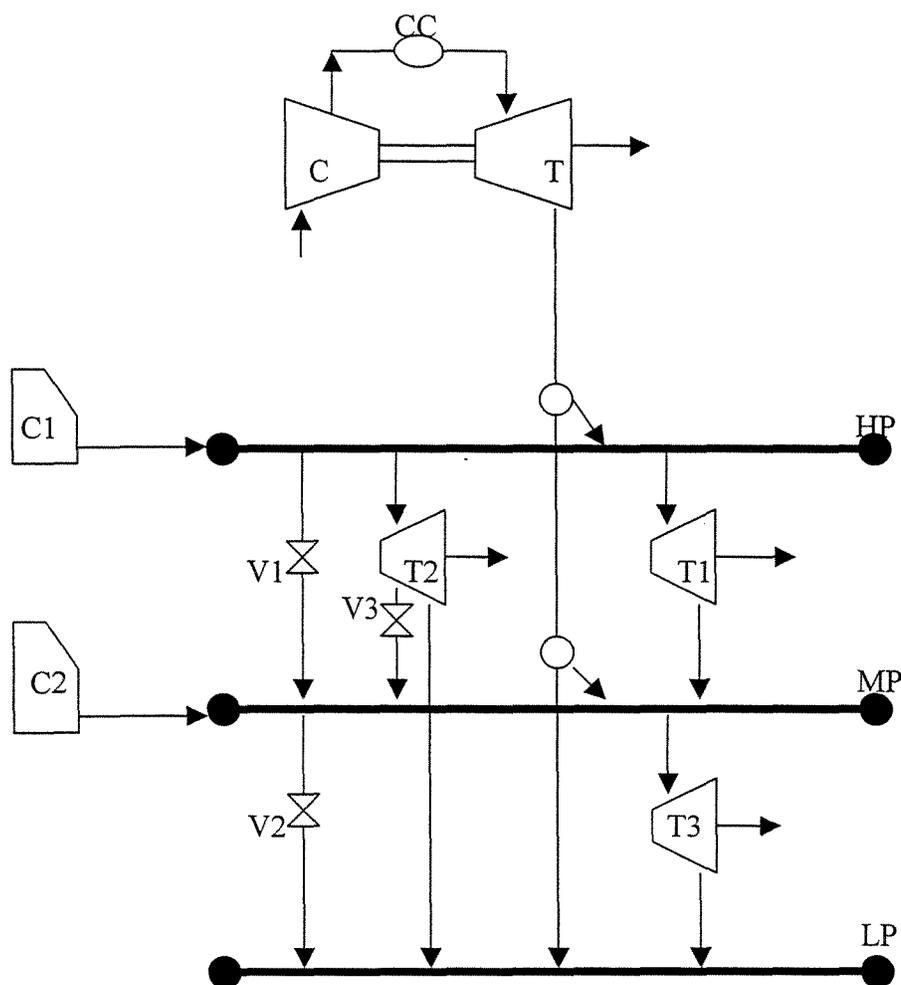


Figura 4.5: Superestrutura para a planta de utilidades.

Após o desenvolvimento da superestrutura (figura 4.5), o modelo terá a seguinte forma geral.

Custo mínimo = Investimento + Custo do Combustível.

Balances materiais e de energia

Restrições lógicas

O custo das caldeiras, por exemplo, (ex., caldeira1) pode ser representado por uma função linear de custo, em termos da quantidade de vapor produzida  $F_1$  e de seu custo fixo.

ou seja,

$$C_1 = \alpha_1 y_{B1} + \beta_1 F_1 \quad (4.8)$$

$$F_1 - U y_{B1} \leq 0 \quad (4.9)$$

Se  $F_1 = 0 \Rightarrow y_{B1} = 0 \Rightarrow$  equipamento 1  $\notin$

$F_1 > 0 \Rightarrow y_{B1} = 1 \Rightarrow$  equipamento 1  $\in$

onde;

$\alpha_1, \beta_1$  são os custos do equipamento e combustível.

$y_{B1}$  variável binária, indicam a existência ou não do equipamento.

$F_1$  consumo de combustível.

$U$  valor numérico bem grande.

Note que, os coeficientes de custo fixo  $\alpha_1$  e  $\beta_1$  devem ser previamente determinados para que possamos relacionar o consumo de combustível ao custo da caldeira.

Observe que a existência da caldeira 1 está relacionada ao seu consumo de combustível, então se o consumo de combustível for igual a zero ( $F_1=0$ ) o seu coeficiente de existência também assume valor zero ( $y_{B1}=0$ ) e a caldeira então não será usada, mas se o consumo de combustível for maior que a zero ( $F_1 > 0$ ) o seu coeficiente de existência assumirá o valor 1 ( $y_{B1} = 1$ ) e então a caldeira será utilizada.

Os outros equipamentos também possuirão variáveis de existência semelhantes em sua modelagem para o cálculo de seu uso.

Supondo que temos duas demandas de energia em forma de trabalho mecânico ( $W1$  e  $W2$ ), e que apenas uma turbina pode satisfazer cada demanda de energia. Então será necessário limitarmos a produção de energia para cada turbina.

Nas equações a seguir utilizaremos algumas restrições lógicas que controlarão o uso das turbinas no processo. Estas equações irão controlar a máxima e a mínima capacidade de trabalho de cada turbina, e nos mostrará quais turbinas serão efetivamente necessárias, ou seja, qual turbina irá gerar o trabalho  $W1$  e qual turbina irá gerar o trabalho  $W2$  e conseqüentemente as duas outras turbinas não irão produzir trabalho.

Utilizaremos as variáveis  $y_{1a}$ ,  $y_{2a}$ ,  $y_{3a}$  e  $y_{4a}$  que são variáveis binárias, para cada turbina, que nos dão a condição de trabalho para que uma das turbinas gere o trabalho  $W1$ . Como teremos apenas uma turbina gerando o trabalho  $W1$ , então teremos a seguinte equação:

$$\sum y_{ia} = 1 \quad (4.10)$$

$$y_{1a} + y_{2a} + y_{3a} + y_{4a} = 1$$

ou seja,

$$y_{1a} \text{ ou } y_{2a} \text{ ou } y_{3a} \text{ ou } y_{4a} = 1$$

Então, apenas uma variável binária assumirá o valor 1. Neste caso apenas uma turbina assumirá a condição de trabalho  $W1$ .

De maneira análoga teremos as variáveis binárias  $y_{1b}$ ,  $y_{2b}$ ,  $y_{3b}$  e  $y_{4b}$ , que são as variáveis que nos darão a condição de trabalho para que apenas uma das turbinas assumira a

condição de trabalho  $W2$ . E também teremos as variáveis binárias  $y_{1c}$ ,  $y_{2c}$ ,  $y_{3c}$  e  $y_{4c}$ , que são as variáveis que nos darão a condição de trabalho para que as duas turbinas restantes assumam a condição de trabalho 0, ou seja, que estas duas outras turbinas não sejam utilizadas.

Nas equações a seguir temos as restrições que obrigam que uma turbina trabalhe com apenas uma das condições de trabalho, ou seja, a turbina 1 por exemplo, poderá assumir apenas uma condição de trabalho entre as três possíveis ( $W1, W2$  ou 0). Então:

$$\sum y_{ij} = 1 \quad (4.11)$$

$$y_{1a} + y_{1b} + y_{1c} = 1$$

ou seja,

$$y_{1a} \text{ ou } y_{1b} \text{ ou } y_{1c} = 1$$

Então, apenas uma variável binária assumirá o valor 1. Neste caso uma turbina assumirá uma das três condições de trabalho.

As equações a seguir nos trazem o balanço de energia (trabalho) em cada turbina.

$$y_{ia} * W1 + y_{ib} * W2 + y_{ic} * 0 = WT_i \quad (4.12)$$

ou seja,

$$y_{1a} * W1 + y_{1b} * W2 + y_{1c} * 0 = WT1$$

$$y_{2a} * W1 + y_{2b} * W2 + y_{2c} * 0 = WT2$$

$$y_{3a} * W1 + y_{3b} * W2 + y_{3c} * 0 = WT3$$

$$y_{4a} * W1 + y_{4b} * W2 + y_{4c} * 0 = WT4$$

Tomemos como exemplo a equação para o cálculo da turbina 1, neste caso temos:

$$y_{1a} * W1 \text{ ou } y_{1b} * W2 \text{ ou } y_{1c} * 0 = WT1$$

Ou seja, se  $WT2 = W1$  a variável binária  $y_{1a}$  deve assumir valor 1 e as variáveis binárias  $y_{1b}$  e  $y_{1c}$  assumirão valor 0. E assim a turbina 1 trabalhará apenas nessa condição de trabalho, gerando  $W1$  de energia mecânica.

A equação 4.13 nos traz o trabalho total requerido pelo problema, considerando as variáveis binárias. Ou seja, a soma dos trabalhos individuais de cada turbina deve ser igual ao trabalho total requerido pelo processo.

$$\Sigma(y_{ij} * Wi) = \Sigma Wi \quad (4.13)$$

ou seja,

$$\begin{aligned} & y_{1a} * W1 + y_{1b} * W2 + y_{1c} * 0 + \\ & y_{2a} * W1 + y_{2b} * W2 + y_{2c} * 0 + \\ & y_{3a} * W1 + y_{3b} * W2 + y_{3c} * 0 + \\ & y_{4a} * W1 + y_{4b} * W2 + y_{4c} * 0 = W1 + W2 \end{aligned}$$

#### 4.3.1 - Balanços de energia para as turbinas.

Na equação 4.14 temos o cálculo do trabalho produzido pela turbina de alta pressão, que expande vapor de alta para média pressão.

$$WT1 = F_1 * \eta_1 (H_{HP} - H_{MP}) \quad (4.14)$$

Na equação 4.15 temos o cálculo do trabalho produzido pela turbina de alta pressão, que expande vapor de alta para baixa pressão, nesta turbina pode ser extraído vapor de média pressão.

$$WT2 = F_{2S} * \eta_2 ((H_{HP} - H_{MP}) + (H_{MP} - H_{LP})) + (F_2 - F_{2S}) * \eta_2 * (H_{HP} - H_{MP}) \quad (4.15)$$

Na equação 4.16 temos o cálculo do trabalho produzido pela turbina de média pressão, que expande vapor de média para baixa pressão.

$$WT3 = F_3 * \eta_3 * (H_{MP} - H_{LP}) \quad (4.16)$$

Na equação 4.17 temos o cálculo do trabalho produzido pela turbina a gás

$$WTG = \eta * M * ((c_{p_{gás}} * (T_3 - T_4)) - (c_{p_{ar}} * (T_2 - T_{amb}))) \quad (4.17)$$

Para o cálculo do trabalho produzido pela turbina a gás, é necessário calcular as temperaturas de entrada e saída do compressor, e as temperaturas de entrada e saída da turbina.

Na figura 4.6 temos o esquema de uma turbina a gás simples.

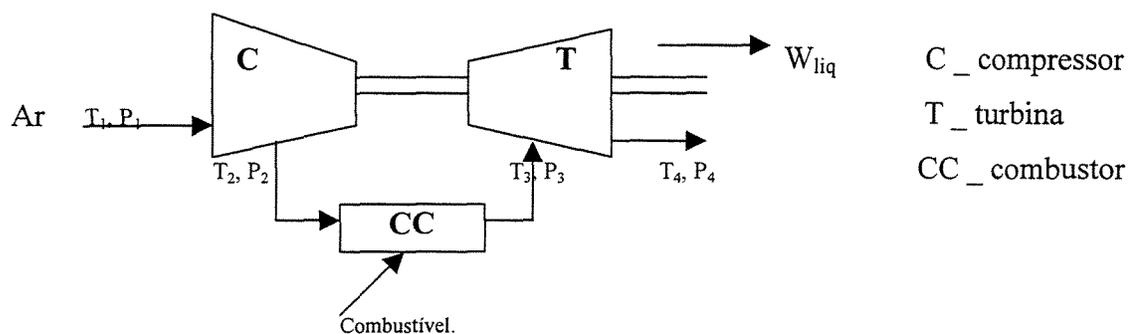


Figura 4.6: Turbina a gás, com suas temperaturas e pressões.

O cálculo das temperaturas intermediárias da turbina a gás é dado pelas equações abaixo.

O ar entra no compressor á temperatura ambiente;  $T_1 = T_{amb}$ .

Com a compressão, há um aquecimento do ar, que passará á uma temperatura  $T_2$ .

$$T_{2s} = T_{amb} \times rP^{\frac{k_{ar}-1}{k_{ar}}} \quad (4.18)$$

$$T_2 = T_{amb} + (T_{2s} - T_{amb})/\eta_c \quad (4.19)$$

A pressão dos gases após a combustão  $P_3$ , considerando a perda de carga no combustor ( $\Delta P_c$ ), é dado pela seguinte equação:

$$P_3 = (rP * P_{amb}) - \Delta P_c \quad (4.20)$$

A pressão na saída da turbina a gás é dada por  $P_4$ . Se a turbina a gás expandir seus gases a pressão ambiente, então:

$$P_4 = P_{amb} + \Delta P_e \quad (4.21)$$

Note que neste caso estamos "baixando" a pressão dos gases até a pressão ambiente, o que nos dá a máxima retirada de energia dos gases. Se quisermos obter gases a temperaturas mais altas, devemos elevar a pressão de saída dos gases ( $P_4$ ), o que diminuirá a razão de descompressão na turbina a gás ( $P_3/P_4$ ), e conseqüentemente diminuirá a eficiência da turbina. Mas se elevarmos muito a pressão de saída da turbina à temperatura dos gases pode ser tão alta de modo que a turbina não tenha uma diferença de temperatura, entre a entrada e saída da turbina, suficiente para gerar trabalho. E como conseqüência a turbina não terá condições de operação.

A temperatura dos gases na saída da turbina é dada pelas seguintes equações:

$$T_{4s} = \left( \frac{T_3}{\frac{P_3}{P_4}} \right)^{\frac{k_{gas}-1}{k_{gas}}} \quad (4.22)$$

$$T_4 = T_3 - (T_3 - T_{4s}) * \eta_t \quad (4.23)$$

O balanço de energia para o trabalho total requerido pelo problema é dado pela equação 4.24.

$$WT1 + WT2 + WT3 + WTG = W1 + W2 \quad (4.24)$$

Ou seja, a soma dos trabalhos individuais de cada turbina deve ser igual ao trabalho total requerido pelo processo.

### 3.3.2 - Cálculo das quantidades de vapor que podem ser produzidos a partir dos gases de exaustão da turbina a gás.

Ao sair da turbina a gás os gases de combustão podem conter energia suficiente para se produzir vapor, nos vários níveis de energia.

Na figura 4.7 temos a representação do diagrama do fluxo de calor em um processo, apresentando o decréscimo de temperatura de um gás, e as quantidades de calor transferidas em cada intervalo de temperatura, nos diversos níveis de vapor do processo.

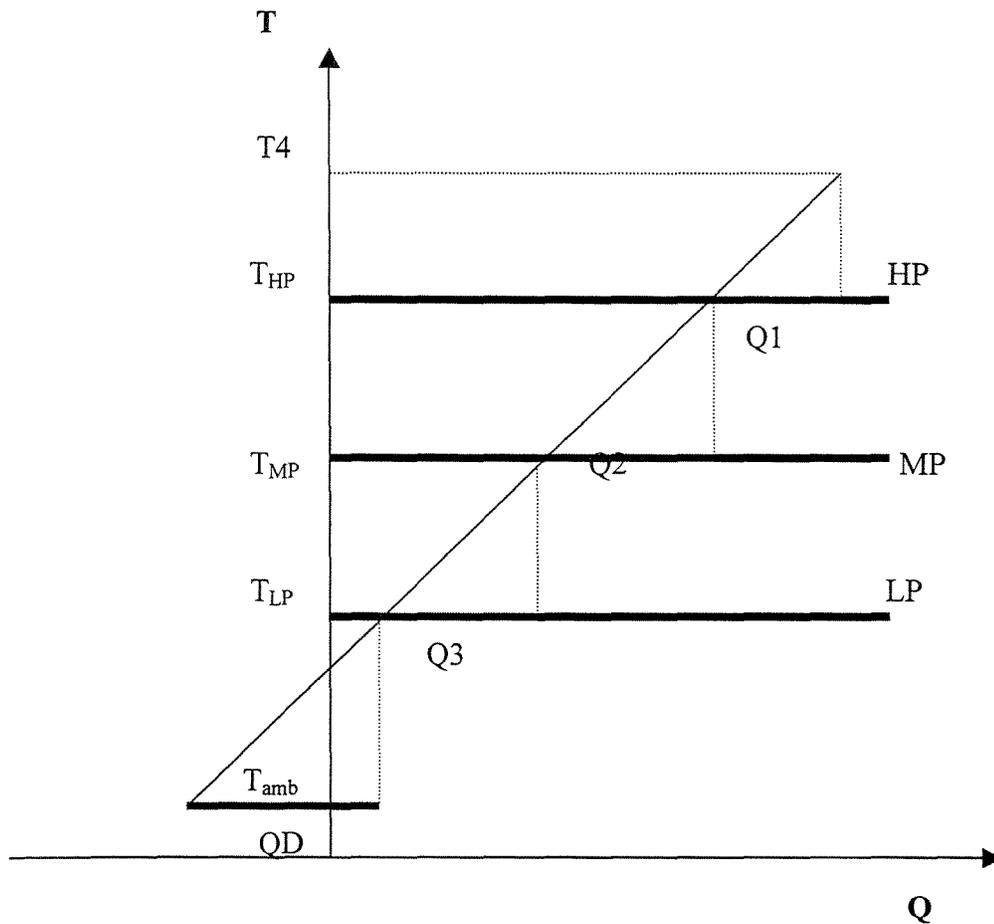


Figura 4.7: Diagrama do fluxo de calor em um processo, apresentando o decréscimo de temperatura de um gás.

O calor total que ainda resta nos gases, após a passagem dos gases pela turbina a gás, e resfriado até a temperatura ambiente, é dado pela equação 4.25.

$$QT = cp_{gás} * M * (T_4 - T_{amb}) \quad (4.25)$$

A equação 4.26 nos mostra o calor lançado para o meio ambiente.

$$QD = cp_{gás} * M * (T_{LP} - T_{amb}) \quad (4.26)$$

As quantidades máximas de calor que podem ser utilizadas para se produzir vapor de alta, média e baixa pressão, respectivamente, são calculadas pelas equações 4.27, 4.28 e 4.29. Obedecendo a restrição de que a temperatura de saída do gás deve ser maior que a temperatura dos respectivos vapores, por isso deve-se adotar um  $\Delta T_{min}$  de 10 °C. Estas equações serão válidas se a temperatura de saída dos gases for maior que a temperatura do vapor em sua linha de processo.

$$Q1_{max} = M * cp_{gás} * (T_4 - T_{HP}) \quad \text{se } T_4 > T_{HP} \quad (4.27)$$

$$Q2_{max} = M * cp_{gás} * (T_4 - T_{MP}) \quad \text{se } T_4 > T_{MP} \quad (4.28)$$

$$Q3_{max} = M * cp_{gás} * (T_4 - T_{LP}) \quad \text{se } T_4 > T_{LP} \quad (4.29)$$

As equações 4.30, 4.31 e 4.32 nos dão as quantidades mínimas de calor, que podem ser utilizadas para se produzir vapor de alta, média e baixa pressão, respectivamente, se a temperatura de saída dos gases forem menores que a temperatura dos respectivos vapores.

$$Q1_{min} = 0 \quad \text{se } T_4 < T_{HP} \quad (4.30)$$

$$Q2_{min} = 0 \quad \text{se } T_4 < T_{MP} \quad (4.31)$$

$$Q3_{min} = 0 \quad \text{se } T_4 < T_{LP} \quad (4.32)$$

As equações 4.33, 4.34 e 4.35 limitam as quantidades de calor que podem ser utilizadas para a produção de vapor em cada nível de temperatura. Ou seja, a quantidade de calor utilizada dos gases de combustão, deve ser um valor entre o seu valor máximo e o seu valor mínimo.

$$Q1_{max} \leq Q1 \leq Q1_{min} \quad (4.33)$$

$$Q2_{max} \leq Q2 \leq Q2_{min} \quad (4.34)$$

$$Q3_{max} \leq Q3 \leq Q3_{min} \quad (4.35)$$

As quantidades de calor utilizadas para a produção de vapor em cada nível, somadas com o calor lançado para o ambiente, devem ser igual ao calor total dos gases de exaustão da turbina a gás, que é dado pela equação 4.36.

$$Q1 + Q2 + Q3 + QD = QT \quad (4.36)$$

As quantidades de vapor, produzidas em cada nível de temperatura, são dadas pelas equações 4.37, 4.38 e 4.39. Para o cálculo da quantidade de vapor produzido em cada nível, supõe-se que o calor total existente nos gases no seu nível de temperatura seja totalmente transferido para o líquido transformando-o em vapor.

$$MV_{hp} = Q1 / (H_{HP} - H_L) \quad (4.37)$$

$$MV_{mp} = Q2 / (H_{MP} - H_L) \quad (4.38)$$

$$MV_{lp} = Q3 / (H_{LP} - H_L) \quad (4.39)$$

### 4.3.3 - Balanços de massa nas linhas de vapor.

Nas equações 4.40, 4.41 e 4.42 temos as equações de balanço de massa nas linhas de vapor de alta pressão, média pressão e baixa pressão. Nestas equações a quantidade de massa que entra é igual a que sai. Com essas equações calcula-se as quantidades de vapor produzidas pelas caldeiras ( $VPC1$  e  $VPC2$ ), e também nos dá as demandas de energia pedidas pelo problema. As demandas de vapor de média e baixa pressão são dadas pelas variáveis  $VMP$  e  $VLP$  respectivamente. A figura 4.8 mostra a superestrutura com seus fluxos de massa e energia.

$$VPC1 + MV_{hp} = F_1 + F_2 + V1 \quad (4.40)$$

$$VPC2 + V1 + V3 + F_1 + MV_{mp} = VMP + F_3 + V2 \quad (4.41)$$

$$MV_{lp} + F_3 + V2 + F_{2S} = VLP \quad (4.42)$$

Na equação 4.43 temos o balanço de massa na turbina de alta pressão onde pode ser extraído vapor de média pressão.

$$F_2 = F_{2S} + V3 \quad (4.43)$$

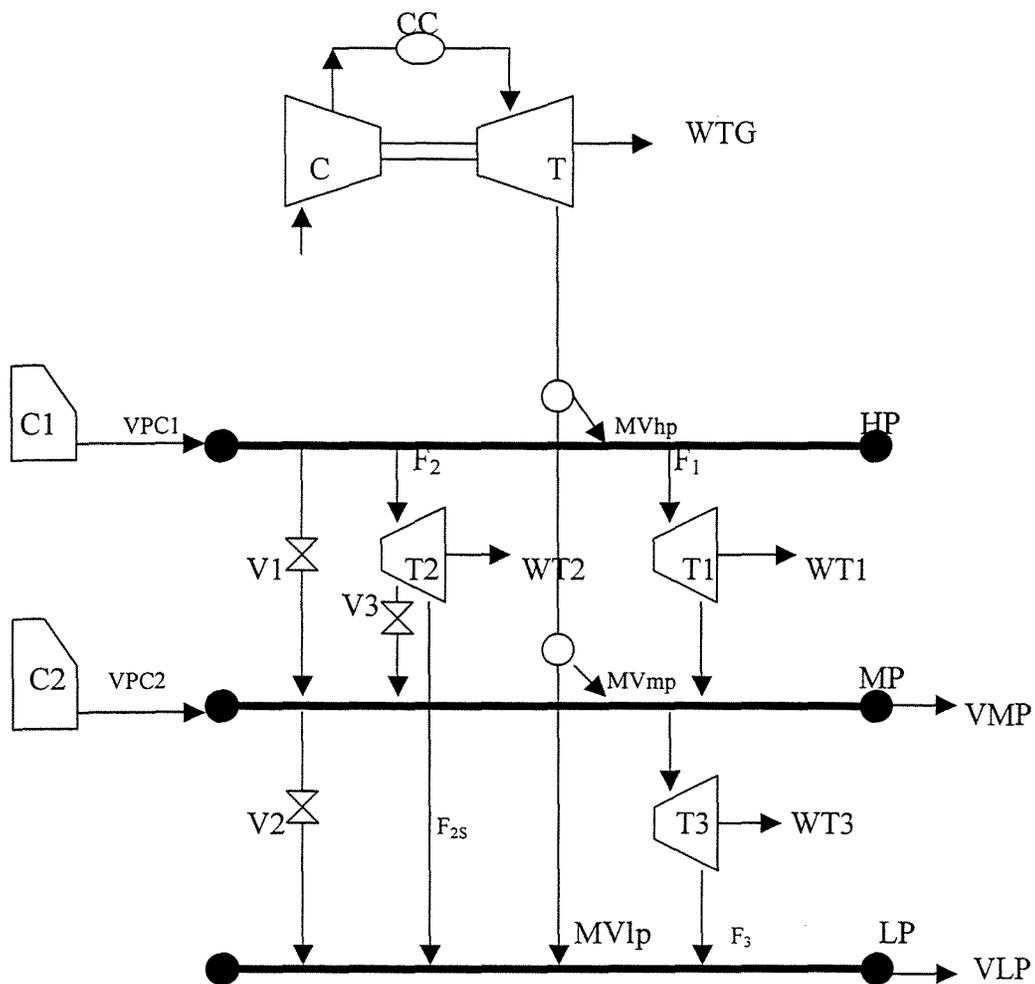


Figura 4.8: Superestrutura para a planta de utilidades, com as variáveis de processo.

## Capítulo 5 – Estudo de Caso.

### 5.1 - Exemplo numérico para a obtenção de um sistema de utilidades.

Para melhor ilustrar a estratégia de otimização consideraremos um problema retirado da literatura, Biegler, Grossmann, Westerberg (1997), para representar as demandas de energia e de utilidades requeridas por um processo, os custos dos equipamentos e as propriedades termodinâmicas das utilidades.

No problema original retirado da literatura não se tem a presença de turbinas a gás. Os dados da turbina a gás foram retirados da literatura, Eastop & Croft (1990), e incorporados ao problema, para deixá-lo mais completo.

Nesta estratégia além de sintetizar o sistema de utilidades de menor custo, pode ser alocado demandas de energia e utilidades no processo.

Para isso vamos minimizar o custo anual do sistema de utilidades, utilizando os equipamentos de menor custo.

A planta requer as seguintes demandas de energia e utilidades.

- a). Trabalho 1 = 7500 kW
- b). Trabalho 2 = 4500 kW
- c). Vapor de média pressão = 25,0 ton/hr (mínimo)
- d). Vapor de baixa pressão = 85,0 ton/hr (mínimo).

#### *Propriedades das utilidades:*

Vapor de alta pressão 4,83 MPa, 758 K, 3390 kJ/kg;

Vapor de média pressão 2,07 MPa, 523 K 2900 kJ/kg;

Vapor de baixa pressão 0,34 MPa, 412 K, 2732 kJ/kg;

Líquido saturado 0,6 MPa, 373K, 152 kJ/kg.

**Dados termodinâmicos:**

$$\Delta H(\text{alta para média}) = 71,0 \text{ kWhr/ton.}$$

$$\Delta H(\text{média para baixa}) = 112,0 \text{ kWhr/ton.}$$

Podem ser utilizadas caldeiras de alta e média pressão e válvulas de expansão.

**Turbinas:**

Turbinas a vapor:

Turbina de média pressão expande o vapor de média para baixa pressão;

Turbinas de alta pressão pode ser expandida para baixa ou para média pressão, e também pode haver uma extração de vapor a média pressão.

Eficiência das turbinas a vapor = 65%.

Turbina a gás:

Expande gases de combustão;

A temperatura dos gases que entram na turbina a gás = 1150 K;

A turbina a gás comprime ar a condições ambiente, a uma razão de compressão, 10; Eficiência do compressor isentrópico, 0,8; eficiência da turbina isentrópica, 0,85; queda de pressão na combustão, 0,2 bar; queda de pressão na entrada da caldeira, 0,1 bar; para o ar,  $cp_{ar} = 1,005 \text{ kJ/kg K}$  e  $k_{ar} = 1,4$ ; para os gases na turbina,  $cp_{gás} = 1,15 \text{ kJ/kg K}$  e  $k_{gás} = 1,333$ .

Os gases que saem da turbina a gás, podem ser utilizados para produzir vapores de alta, média ou baixa pressão.

Eficiência da turbina a gás = 85%.

Temperatura ambiente = 300 K.

As demandas de trabalho podem ser satisfeitas por qualquer uma das turbinas citadas a cima, mas apenas uma turbina pode satisfazer cada demanda de trabalho.

***Dados de custos:***

	Fixo	variável
Caldeira HP	90000 \$/yr	9600 \$hr/yr ton vapor
Caldeira MP	40000 \$/yr	8500 \$hr/yr ton vapor
Turbina HP	45000\$/yr	25 \$/kWyr
Turbina MP	25000 \$/yr	14,5 \$/kWyr
Turbina a gás	65000 \$/yr	25 \$/kWyr

Se for extraído vapor da turbina de alta pressão, um custo fixo adicional de 20.000\$/yr é requerido.

**5.2 – Modelo MIP para síntese de sistemas de utilidades.**

A seguir apresentaremos um conjunto de equações que trás o modelo para síntese de sistemas de utilidades proposta para o problema acima.

Equações para o cálculo do trabalho para as turbinas a vapor e a gás.

$$WT1 = EFF*(DHHM*FHP1)$$

$$WT2 = EFF*(((DHHM+DHML)*FSHP2) + (DHHM*(FHP2-FSHP2)))$$

$$WT3 = EFF*(DHML*FMP)$$

$$WTG1 = EFFG * M * ((cpg * (T3-T4)) - (cpa*(T2-Tamb)))$$

Equações que calculam o calor total, o calor lançado ao ambiente e o calor máximo e mínimo presentes nos gases de exaustão da turbina a gás.

$$QT = cpg * M * (T4 - Tamb)$$

$$QD = cpg * M * (T1p - Tamb)$$

$$\begin{aligned} Q_{1\max} &= M \cdot c_{pg} \cdot (T_4 - T_{hp}) && \text{se } T_4 \geq T_{hp} \\ Q_{2\max} &= M \cdot c_{pg} \cdot (T_4 - T_{mp}) && \text{se } T_4 \geq T_{mp} \\ Q_{3\max} &= M \cdot c_{pg} \cdot (T_4 - T_{lp}) && \text{se } T_4 \geq T_{lp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{1\min} &= 0 && \text{se } T_4 \leq T_{hp} \\ Q_{2\min} &= 0 && \text{se } T_4 \leq T_{mp} \\ Q_{3\min} &= 0 && \text{se } T_4 \leq T_{lp} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &\leq Q_{1\max} \\ Q_2 &\leq Q_{2\max} \\ Q_3 &\leq Q_{3\max} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1 &\geq Q_{1\min} \\ Q_2 &\geq Q_{2\min} \\ Q_3 &\geq Q_{3\min} \end{aligned}$$

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_D = Q_T$$

Equações para o cálculo da quantidade de vapor de alta, média e baixa pressão produzidos a partir do calor proveniente dos gases de exaustão.

$$\begin{aligned} MV_{hp} &= Q_1 / (H_{hp} - H_l) && \text{se } T_4 \geq T_{hp} \\ MV_{mp} &= Q_2 / (H_{mp} - H_l) && \text{se } T_4 \geq T_{mp} \\ MV_{lp} &= Q_3 / (H_{lp} - H_l) && \text{se } T_4 \geq T_{lp} \end{aligned}$$

Balanços de massa para as correntes de vapor de alta média e baixa pressão e na turbina que expande vapor de baixa e média pressão.

$$\begin{aligned} V_{PC1} + MV_{hp} &= F_{HP1} + F_{HP2} + V_1 \\ V_{PC2} + V_1 + V_3 + F_{HP1} + MV_{mp} &= V_{MP} + F_{MP} + V_2 \\ V_{LP} + MV_{lp} &= F_{MP} + V_2 + F_{SHP2} \\ F_{HP2} &= F_{SHP2} + V_3 \end{aligned}$$

Equações para o calculo dos custos dos equipamentos.

$$CC1 = 90000*B1 + 9600*(VPC1)$$

$$CC2 = 40000*B2 + 8500*(VPC2)$$

$$CT1 = 45000*Y1 + 25*WT1$$

$$CT2 = 65000*Y2 + 25*WT2$$

$$CT3 = 25000*Y3 + 14.5*WT3$$

$$CT4 = 65000*Y4 + 25*WTG1$$

Equações para o calculo da utilização dos equipamentos no processo.

$$VPC1 - 100000*B1 \leq 0$$

$$VPC2 - 100000*B2 \leq 0$$

$$FHP1 - 100000*Y1 \leq 0$$

$$FHP2 - 100000*Y2 \leq 0$$

$$FMP - 100000*Y3 \leq 0$$

$$WTG1 - 100000*Y4 \leq 0$$

$$Y1a*4500 + Y1b*7500 + Y1c*0 + Y2a*4500 + Y2b*7500 + Y2c*0 + \\ Y3a*4500 + Y3b*7500 + Y3c*0 + Y4a*4500 + Y4b*7500 + Y4c*0 = 12000$$

$$Y1a + Y2a + Y3a + Y4a = 1$$

$$Y1b + Y2b + Y3b + Y4b = 1$$

$$Y1c + Y2c + Y3c + Y4c = 2$$

$$Y1a + Y1b + Y1c = 1$$

$$Y2a + Y2b + Y2c = 1$$

$$Y3a + Y3b + Y3c = 1$$

$$Y4a + Y4b + Y4c = 1$$

$$Y1a*4500 + Y1b*7500 + Y1c*0 = WT2$$

$$Y2a*4500 + Y2b*7500 + Y2c*0 = WT1$$

$$Y3a*4500 + Y3b*7500 + Y3c*0 = WT3$$

$$Y4a*4500 + Y4b*7500 + Y4c*0 = WTG1$$

Trabalho total produzido pelas turbinas.

$$WT1 + WT2 + WT3 + WTG1 = 12000$$

Função objetivo.

$$Z = CC1 + CC2 + CT1 + CT2 + CT3 + CT4$$

### 5.3 - Resultados.

Aplicando o pacote matemático GAMS/OSL obtêm-se como resultado os custos e as condições de trabalho ilustrados pela figura 5.1.

A estrutura encontrada para os dados de custo do problema citado acima foi:

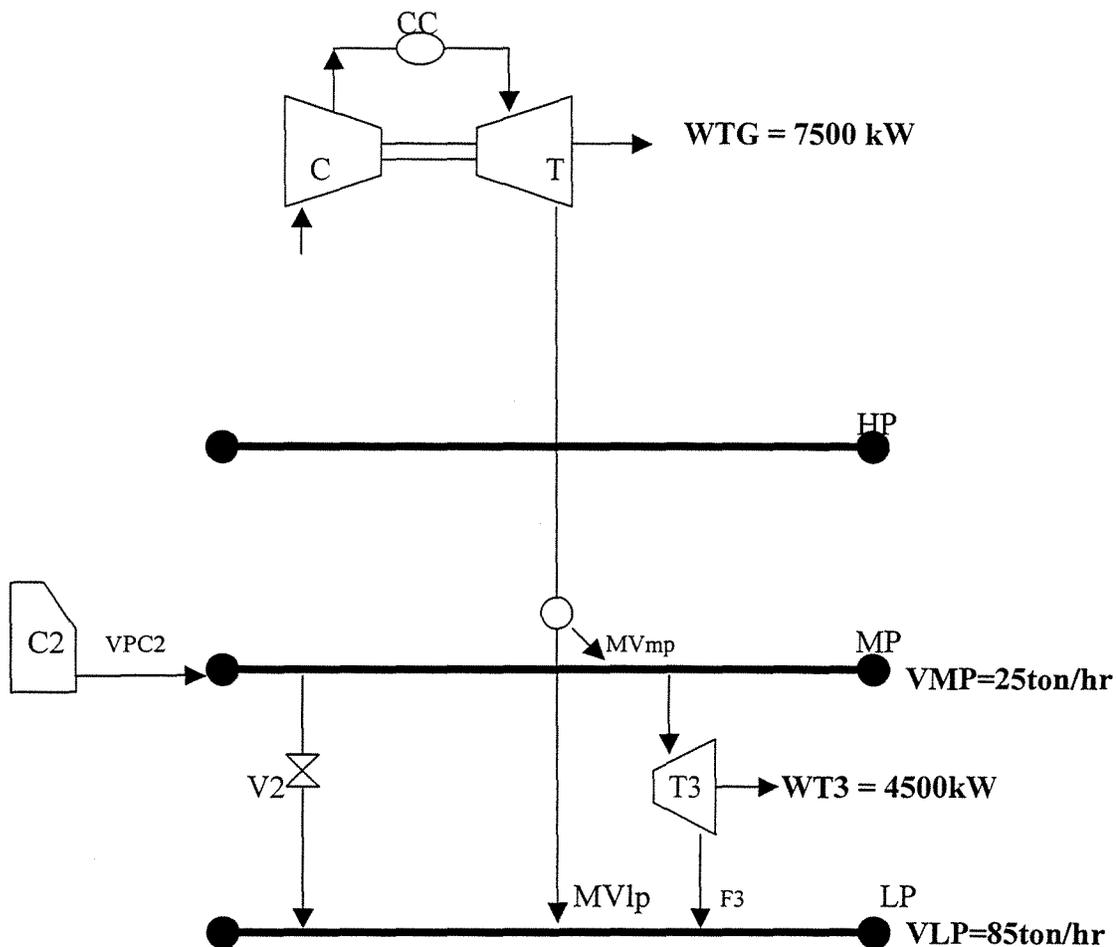


Figura 5.1: Estrutura encontrada para os dados do problema.

Temperatura de saída dos gases = 738 K.

Trabalho da turbina 1 = 0,0

Trabalho da turbina 2 = 0,0

Trabalho da turbina 3 = 4500 kW

Trabalho da turbina a gás = 7500 kW

Vapor produzido pela caldeira 1 = 0,0

Vapor produzido pela caldeira 2 = 107,4 ton/hr

MVhp = 0,0 ton/hr

MVmp = 6,18 ton/hr

MVlp = 3,55 ton/hr

Tabela 5.1: Custos dos equipamentos

<i>Equipamentos</i>	<i>Custos fixo</i>	<i>Custos variáveis</i>
Turbina 1	-	-
Turbina 2	-	-
Turbina 3	25.000,00	65.250,00
Turbina a gás	65.000,00	187.500,00
Caldeira 1	-	-
Caldeira 2	40.000,00	912.720,00
<b>Total</b>	<b>130.000,00</b>	<b>1.165.470,00</b>

Custo dos equipamentos utilizados = \$ **1.295.470,00**

Nesta estrutura foi utilizada uma caldeira que produz 107,4 ton/hr de vapor de média pressão, uma turbina de média pressão que produz 4500 kW de trabalho e uma turbina a gás que produz 7500 kW de trabalho.

E também foram satisfeitas as exigências de vapor de média pressão, 25,0 ton/hr e do vapor de baixa pressão, 85 ton/hr.

Iremos agora variar as condições do processo para analisar as mudanças que possam ocorrer na estrutura e nos custos da superestrutura.

Aumentaremos a pressão de saída da turbina a gás  $P_4 = 1,5$  bar. E manteremos os custos dos equipamentos.

A estrutura encontrada foi:

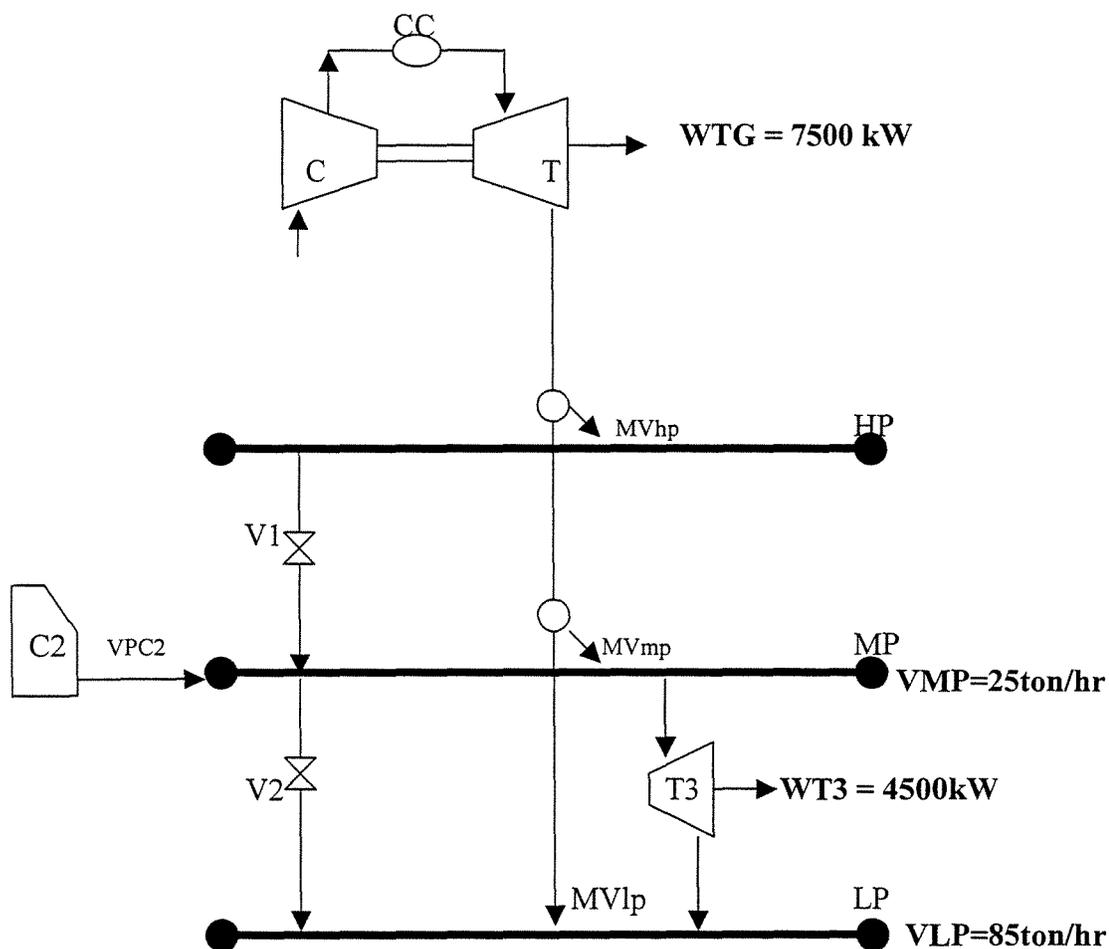


Figura 5.2: Estrutura encontrada para os dados do problema, com  $P_4 = 1,5$  bar.

Temperatura de saída dos gases = 793 K.

Trabalho da turbina 1 = 0,0

Trabalho da turbina 2 = 0,0

Trabalho da turbina 3 = 4500 kW

Trabalho da turbina a gás = 7500 kW

Vapor produzido pela caldeira 1 = 0,0

Vapor produzido pela caldeira 2 = 98,2 ton/hr

MVhp = 1,33 ton/hr

MVmp = 16,16 ton/hr

MVlp = 5,66 ton/hr

Tabela 5.2: Custos dos equipamentos

<i>Equipamentos</i>	<i>Custos fixo</i>	<i>Custos variáveis</i>
Turbina 1	-	-
Turbina 2	-	-
Turbina 3	25.000,00	65.250,00
Turbina a gás	65.000,00	187.500,00
Caldeira 1 (HP)	-	-
Caldeira 2 (MP)	40.000,00	834.700,00
<b><i>Total</i></b>	<b>130.000,00</b>	<b>1.084.450,00</b>

Custo dos equipamentos utilizados = \$ 1.217.450,00

Nesta estrutura foi utilizada uma caldeira que produz 107,4 ton/hr de vapor de média pressão, uma turbina de média pressão que produz 4500 kW de trabalho e uma turbina a gás que produz 7500 kW de trabalho.

E também foram satisfeitas as exigências de vapor de média pressão, 25 ton/hr e do vapor de baixa pressão, 85 ton/hr.

É importante observar que apesar de utilizarmos os mesmos equipamentos, houve uma redução nos custos variáveis de operação dos mesmos, pois ao aumentarmos a pressão de saída dos gases da turbina a gás, a sua temperatura também aumentou, como se esperava, aumentando assim a produção de vapor a partir dos gases de exaustão da turbina á gás, e conseqüentemente houve uma redução na produção de vapor pela caldeira 2, diminuindo o seu custo de operação.

Iremos agora variar novamente condições do processo

Aumentaremos a pressão de saída da turbina a gás  $P_4 = 2,0 \text{ bar}$ . E manteremos os custos dos equipamentos.

A estrutura encontrada foi:

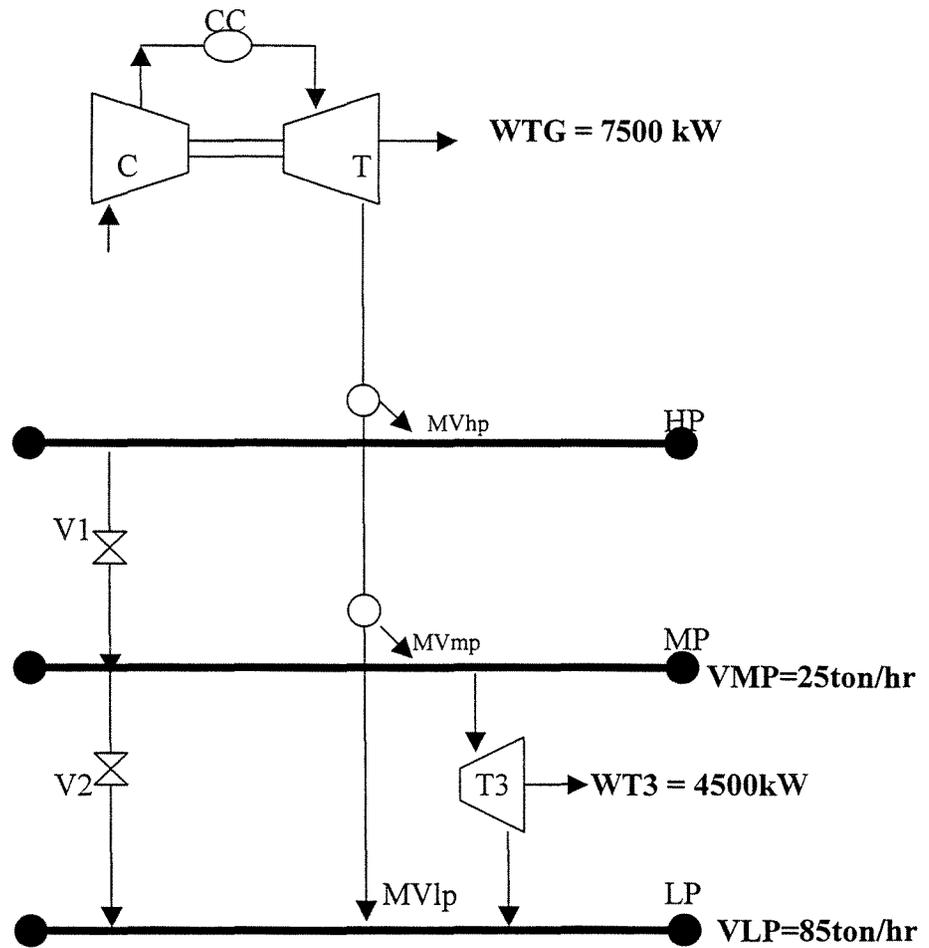


Figura 5.3: Estrutura encontrada para os dados do problema, com  $P_4 = 2,0 \text{ bar}$ .

Temperatura de saída dos gases = 836 K.

Trabalho da turbina 1 = 0,0

Trabalho da turbina 2 = 0,0

Trabalho da turbina 3 = 4500 kW

Trabalho da turbina a gás = 7500 kW

Vapor produzido pela caldeira 1 = 0,0

Vapor produzido pela caldeira 2 = 0,0

MVhp = 22,22 ton/hr

MVmp = 116,06 ton/hr

MVlp = 17,26 ton/hr

Tabela 5.3: Custos dos equipamentos

<i>Equipamentos</i>	<i>Custos fixo</i>	<i>Custos variáveis</i>
Turbina 1	-	-
Turbina 2	-	-
Turbina 3	25.000,00	65.250,00
Turbina a gás	65.000,00	187.500,00
Caldeira 1 (HP)	-	-
Caldeira 2 (MP)	-	-
<b>Total</b>	<b>90.000,00</b>	<b>252.750,00</b>

Custo dos equipamentos utilizados = \$ 342.750,00

Nesta estrutura foram satisfeitas as exigências de vapor de média pressão, 25 ton/hr e do vapor de baixa pressão, 85 ton/hr e foi utilizada uma turbina de média pressão que produz 4500 kW de trabalho e uma turbina a gás que produz 7500 kW de trabalho, e não houve a utilização de caldeira.

Ao aumentarmos a pressão de saída dos gases da turbina a gás, a sua temperatura também aumentou, aumentando assim a produção de vapor a partir dos gases de exaustão da turbina a gás, e conseqüentemente não foi necessário à utilização das caldeiras, sendo que as demandas de vapor foram satisfeitas pelos vapores produzidos a partir dos gases quentes da turbina a gás.

Devido a não utilização das caldeiras, houve uma queda brusca nos custos fixo e variáveis da planta, pois os custos de produção de vapor a partir dos gases de exaustão não estão sendo contabilizados.

Iremos agora variar novamente condições do processo

Aumentaremos a pressão de saída da turbina a gás  $P_4 = 2,5$  bar. E manteremos os custos dos equipamentos.

A estrutura encontrada foi a seguinte:

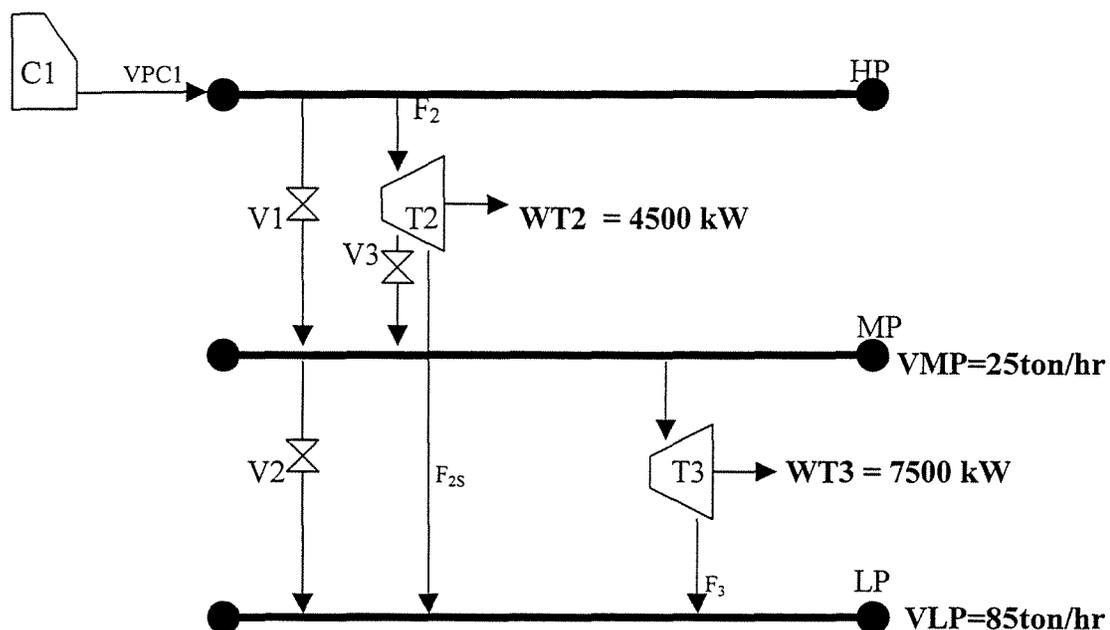


Figura 5.4: Estrutura encontrada para os dados do problema, com  $P_4 = 2,5$  bar.

Temperatura de saída dos gases = 872 K.

Trabalho da turbina 1 = 0,0

Trabalho da turbina 2 = 4500 kW

Trabalho da turbina 3 = 7500 kW

Trabalho da turbina a gás = 0,0

Vapor produzido pela caldeira 1 = 128 ton/hr

Vapor produzido pela caldeira 2 = 0,0

$$MV_{hp} = 0,0$$

$$MV_{mp} = 0,0$$

$$MV_{lp} = 0,0$$

Tabela 5.4: Custos dos equipamentos

<i>Equipamentos</i>	<i>Custos fixo</i>	<i>Custos variáveis</i>
Turbina 1	-	-
Turbina 2	65.000,00	112.500,00
Turbina 3	25.000,00	108.750,00
Turbina a gás	-	-
Caldeira 1 (HP)	90.000,00	1.228.800,00
Caldeira 2 (MP)	-	-
<b>Total</b>	<b>180.000,00</b>	<b>1.450.000,00</b>

Custo dos equipamentos utilizados = \$ **1.630.000,00**

Nesta estrutura foram satisfeitas as exigências de vapor de média pressão, 25 ton/hr e do vapor de baixa pressão, 85 ton/hr e foi utilizadas uma turbina de média pressão que produz 7500 kW de trabalho, e uma turbina de alta pressão que expande vapor de média pressão que produz 4500 kW de trabalho, também se utilizou uma caldeira de alta pressão que produz 128 ton/hr de vapor de alta pressão.

Devido ao aumento de equipamentos houve um aumento nos custos fixos e também dos custos variáveis, o que tornou esta estrutura a mais cara entre as encontradas.

Neste caso não houve a utilização da turbina a gás, pois a temperatura de saída de seus gases seria tão elevada, a ponto de não haver diferença de temperatura suficiente entre a entrada e saída da turbina, para se gerar trabalho líquido.

Iremos agora variar novamente condições do processo

Aumentaremos a pressão de saída da turbina a gás  $P_4 = 3,0$  bar. E manteremos os custos dos equipamentos.

A estrutura encontrada foi a seguinte:

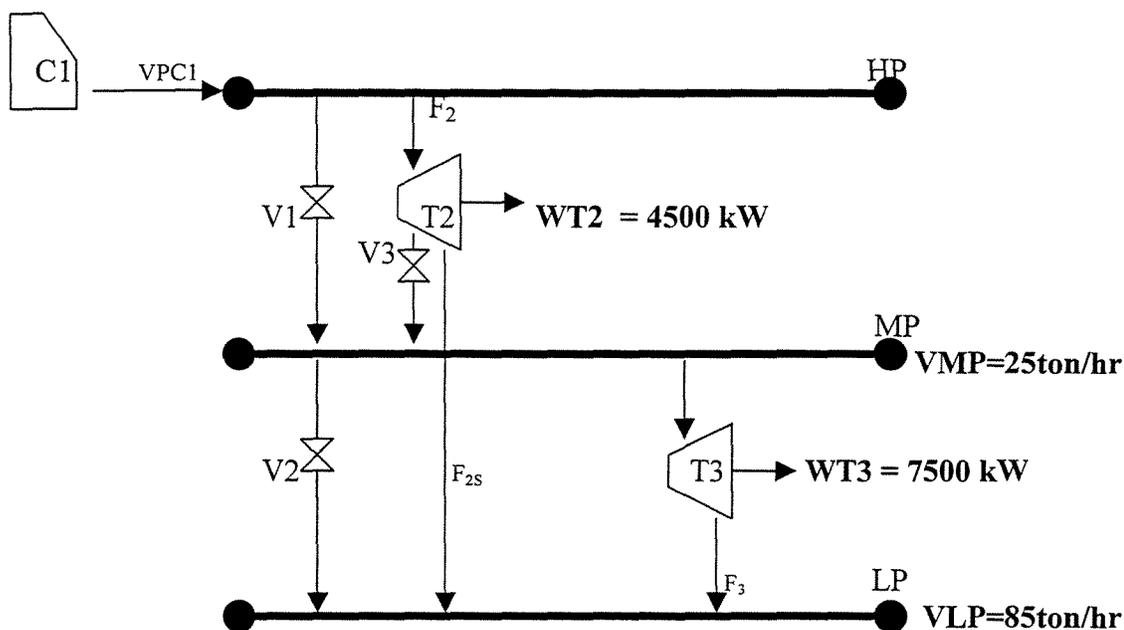


Figura 5.5: Estrutura encontrada para os dados do problema, com  $P_4 = 3,0$  bar.

Temperatura de saída dos gases = 904 K.

Trabalho da turbina 1 = 0,0

Trabalho da turbina 2 = 4500 kW

Trabalho da turbina 3 = 7500 kW

Trabalho da turbina a gás = 0,0

Vapor produzido pela caldeira 1 = 128 ton/hr

Vapor produzido pela caldeira 2 = 0,0

MVhp = 0,0

$$MV_{mp} = 0,0$$

$$MV_{lp} = 0,0$$

Tabela 5.5: Custos dos equipamentos

<i>Equipamentos</i>	<i>Custos fixo</i>	<i>Custos variáveis</i>
Turbina 1	-	-
Turbina 2	65.000,00	112.500,00
Turbina 3	25.000,00	108.750,00
Turbina a gás	-	-
Caldeira 1 (HP)	90.000,00	1.228.800,00
Caldeira 2 (MP)	-	-
<b><i>Total</i></b>	<b>180.000,00</b>	<b>1.450.000,00</b>

Custo dos equipamentos utilizados = \$ 1.630.000,00

A estrutura encontrada foi à mesma que a anterior com um alto custo da superestrutura, inviabilizando assim a implantação desta estrutura.

Foi feito mais um teste aumentando a pressão de saída da turbina a gás para 4,0 bar e a estrutura encontrada foi à mesma que a anterior.

#### 5.4 – Discussão dos resultados.

Foi mostrada com um exemplo numérico a síntese de um sistema de utilidades de um processo, utilizando-se programação linear.

Analisando-se o resultado pôde-se observar que a estrutura do sistema de utilidades encontrada depende dos custos dos equipamentos e também dos custos de operação destes equipamentos, e das eficiências dos equipamentos utilizados e principalmente das condições de operação dos equipamentos. Pois ao variarmos os custos, o que não é muito comum, ou as condições de operação dos equipamentos, poderemos encontrar novas estruturas.

Ao analisarmos os resultados dos testes feitos acima (tabela 5.6 e 5.7), podemos chegar a algumas conclusões.

Tabela 5.6: Resultados dos testes.

<b>P<sub>4</sub> (bar)</b>	<b>1,0</b>	<b>1,5</b>	<b>2,0</b>	<b>2,5</b>	<b>3,0</b>	<b>4,0</b>
<b>T4</b>	738	793	836	872	904	956
<b>WT1</b>	0	0	0	0	0	0
<b>WT1</b>	0	0	0	4500	4500	4500
<b>WT3</b>	4500	4500	4500	7500	7500	7500
<b>WTG</b>	7500	7500	7500	0	0	0
<b>VPC1</b>	0	0	0	128	128	128
<b>VPC2</b>	107	98,2	0	0	0	0
<b>MVhp</b>	0	1,33	22,22	0	0	0
<b>MVmp</b>	6,18	16,16	116,06	0	0	0
<b>MVlp</b>	3,55	5,66	17,26	0	0	0
<b>CS</b>	<b>1.295.470</b>	<b>1.217.450</b>	<b>342.750</b>	<b>1.630.000</b>	<b>1.630.000</b>	<b>1.630.000</b>

Tabela 5.7: Custos dos equipamentos.

<i>Equipamentos/ P<sub>4</sub></i>	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0
Turbina 1	0	0	0	0	0	0
Turbina 2	0	0	0	177.500,00	177.500,00	177.500,00
Turbina 3	90.250,00	90.250,00	90.250,00	0	0	0
Turbina a gás	252.500,00	252.500,00	252.500,00	0	0	0
Caldeira 1 (HP)	0	0	0	1.318.800,00	1.318.800,00	1.318.800,00
Caldeira 2 (MP)	952.720,00	874.700,00	0	0	0	0
<b>Total</b>	<b>1.295.470,00</b>	<b>1.217.450,00</b>	<b>342.750,00</b>	<b>1.630.000,00</b>	<b>1.630.000,00</b>	<b>1.630.000,00</b>

Podemos observar que ao aumentarmos a pressão de saída dos gases da turbina a gás, a sua temperatura também aumentou, havendo uma mudança significativa nos custos e na estrutura da planta, sendo que a estrutura mais viável é a que possui a pressão de saída por volta de  $P_4 = 2,0$  bar, que possui menor custo geral, devido a não utilização de caldeiras. Na modelagem a inclusão dos custos de produção dos vapores a partir dos gases de exaustão da turbina a gás pode levar a estruturas diferentes.

Por volta de 2,0 bar há um grande decréscimo no custo global da planta, pois nesta faixa utiliza-se apenas uma turbina a gás e uma turbina a vapor que gera calor suficiente pra suprir as demandas de vapor do processo, não sendo necessário à utilização de caldeiras.

Como os custos das turbinas estão relacionados ao trabalho produzido por elas, um aumentando-se um pouco a pressão saída dos gases de exaustão da turbina a gás, não haverá um aumento nos custos das turbinas. O aumento ou diminuição do custo da planta só ocorre quando há a troca de equipamentos ou quando uma caldeira produz diferentes cargas de vapor.

Embora a análise tenha se restringido ao conjunto de dados contido no exemplo, o programa pode ser utilizado para diferentes casos, podendo ser alocadas durante a síntese do processo diferentes demandas de trabalho e utilidades, e também vários outros equipamentos.

## Capítulo 6 – Conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Na década de 80, um grande avanço na área de síntese de processo, em particular na parte de recuperação de energia, ocorreu com o estabelecimento da tecnologia *Pinch*, proposta por Linnhoff e colaboradores (1982). Esta tecnologia permite a obtenção do consumo mínimo de utilidades, estimativa de área de troca térmica para trocadores de calor e síntese de redes de trocadores baseando-se em princípios termodinâmicos, como abordado no capítulo 2. Esta tecnologia possui uma importância muito grande, pois permite ao projetista ter uma visão geral do processo de recuperação de energia e possibilita também a obtenção de uma estimativa prévia dos custos do processo.

Entretanto, a maioria dos trabalhos desenvolvidos na área de integração energética trabalha com apenas um tipo de utilidade ou apenas com utilidades do tipo vapor de alta, média e baixa pressão, pois este tipo de utilidade possui um comportamento mais simples no processo. Porém outros tipos de utilidades costumam ser utilizadas em plantas químicas com grande frequência, em especial utilidades tipo gases de combustão que podem ser utilizadas diretamente como utilidades de aquecimento ou ainda gerar trabalho em uma turbina a gás antes do aquecimento. Este tipo de utilidade apresenta uma complexidade maior ao sistema devido ao seu comportamento no processo, como foi abordado nos capítulos 2 e 3.

Assim, este trabalho se direcionou em buscar uma metodologia que permitisse obter estimativas de custo para síntese de sistemas de utilidades levando-se em consideração a opção de se ter múltiplas utilidades para a escolha automática do melhor sistema de utilidades. Para isto realizou-se um estudo sobre os comportamentos dos vários tipos de utilidades analisando o seu comportamento no processo e a partir de dados do processo foi possível calcular o consumo mínimo de utilidades e a partir dos seus custos realizar também estimativas de custos para sistemas com múltiplas utilidades, obtendo assim o melhor sistema de utilidades para o processo, ou seja, o conjunto de utilidades mais baratas que satisfaça o processo.

Neste trabalho também foi feito um estudo sobre síntese de processos, enfocando principalmente a síntese de sistemas de utilidades, destacando os ciclos de potência, em especial as turbinas a gás.

A turbina a gás teve um enfoque especial, pois além de possuírem um grande rendimento térmico e permitir ao projetista a alocação de demandas de trabalho para o processo, seus fluidos de trabalho são os gases de combustão, que na exaustão podem ser utilizados como fonte de utilidade de aquecimento para o processo nos mais variados níveis de temperatura.

Ao serem realizados os cálculos do consumo de utilidades com múltiplas utilidades foi observado que as utilidades tipo gases de combustão e óleos quentes, possuem um comportamento diferenciado no processo, pois estas utilidades transferem calor sensível variando assim sua temperatura ao passo que vão sendo resfriadas e, portanto cedem calor em vários níveis de temperatura.

É importante ressaltar que os métodos apresentados não tem o objetivo de fornecer um projeto final, e sim, formas de avaliar a sua viabilidade para que então, cálculos mais detalhados possam ser executados. Dentro desta proposta pode-se afirmar que, apesar das considerações feitas para a realização de cada modelo matemático, conseguiu-se atingir os objetivos a seguir:

Dentro dos objetivos que foram propostos para o capítulo 3, que é uma abordagem automática para a síntese de sistemas de utilidades quando se têm disponíveis várias utilidades, chegamos as seguintes conclusões.

Pôde-se constatar que os custos das utilidades têm grande influência nos resultados finais do processo de otimização do sistema de utilidades. Pois ao variarmos os custos das utilidades, o processo utilizará novos sistemas de utilidades. Mas convém ressaltar novamente que a variação dos custos das utilidades não é muito freqüente, e está diretamente ligado ao tipo do combustível empregado para a obtenção da utilidade.

Uma constatação importante, observado neste problema, que é uma das restrições da metodologia aplicada, é o fato de que, quando o preço da energia produzida pelas turbinas for muito elevado, em relação aos custos das outras utilidades, o sistema de utilidades pode começar a obter lucros, ou seja, custos negativos na função objetiva. Como o programa minimiza esta função, o programa induzirá o processo a queimar mais combustível do que o esperado, ou seja, produzir muita energia elétrica, para obter o menor valor possível da função objetivo, e assim obter o máximo lucro possível. Para contornar

este problema, o engenheiro (ou programador) deverá saber qual é o consumo mínimo requerido das utilidades para satisfazer o processo, e este valor deverá ser a máxima quantidade de calor utilizada pelo processo. O programador pode também adicionar uma restrição no programa, limitando o uso de utilidades ou o consumo de combustível no processo.

Se o processo requer utilidades em que a temperatura varie, também será necessário que se restrinja à temperatura de saída desses gases do processo, pois esta temperatura deve ser alta o suficiente para que os gases de combustão não formem substâncias corrosivas com água, em forma de vapor, formada durante o processo de combustão, e assim não danifique e nem diminua a vida útil do equipamento de troca térmica empregado no processo.

Dentro dos objetivos que foram propostos para o capítulo 4, que é abordagem para a síntese automática de sistemas de utilidades considerando se a alocação de máquinas térmicas analisando os custos adicionais dos equipamentos utilizados para a produção de trabalho e de utilidades e também os ganhos obtidos com esta alocação de equipamentos, chegamos as seguintes conclusões.

Pôde-se observar que a estrutura do sistema de utilidades depende dos custos dos equipamentos e também dos custos de operação destes equipamentos, e das eficiências dos equipamentos utilizados e principalmente das condições de operação dos equipamentos. Pois ao variarmos os custos, o que não é muito comum, ou as condições de operação dos equipamentos, poderemos encontrar novas estruturas.

Podemos observar no capítulo 5, que com a variação da pressão de saída dos gases da turbina a gás, há uma variação da temperatura dos gases, havendo uma mudança significativa nos custos e na estrutura da planta, devido à modificação dos custos de produção das utilidades e inclusão ou não de novos equipamentos. Isto se deve, pois com o aumento da temperatura dos gases de exaustão da turbina a gás, estes gases podem ser utilizados como utilidade de aquecimento, ou gerando vapores a diferentes pressões, suprindo assim as demandas de utilidades do processo, não necessitando assim, a presença de outros tipos de utilidades para gerar trabalho e satisfazer o processo, e conseqüentemente não há a necessidade de inclusão dos custos de outros equipamentos.

Embora a análise tenha se restringido ao conjunto de dados contido no exemplo, o programa pode ser utilizado para diferentes casos, podendo ser alocadas durante a síntese do processo diferentes demandas de trabalho e utilidades, e novos equipamentos.

Uma proposta para trabalho futuro seria associar o cálculo do consumo mínimo de utilidades quando se tem disponível múltiplas utilidades com a alocação de máquinas térmicas para a produção de energia mecânica, e também adicionar ao modelo a estimativas de custo com a alocação de trocadores de calor.

## Referências Bibliográficas

- BIEGLER L.T., GROSSMANN I.E., WESTERBERG A. W. *Systematic methods of chemical process design*, New Jersey: Prentice Hall, 1 997.
- BROOKE A., KENDRICK D., MEERAUS A. *GAMS: A User's guide, release 2.25*, Boyd & Fraser Publishing Company, 1992.
- B. KALITVENTZEFF, “mixed integer Non-Linear Programming and its Application to the Management of Utility Networks”, *Eng. Opt.*, vol. 18, pp.183-207, 1991.
- COLMENARES, T.R. and W.D. SEIDER “Heat and Power Integration of Chemical Processes,” *AIChEJ* vol..33, n°.6, 1987.
- COHEN, ROGERS, SARAVANAMUTTOO, “Gas turbine Theory”, Prentice Hall, 4<sup>a</sup> edition –1996.
- EASTOP & McCONKEY, “Applied Thermodynamics for Engineering Technologists”, 5<sup>a</sup> edition – 1993.
- EASTOP T. D. & CROFT D. R., “Energy Efficiency for Engineering Technologists”, 5<sup>a</sup> edition – 1990.
- GUARINELO JUNIOR, F.F., “Avaliação Termoeconômica de um Sistema de Cogeração para um Pólo Industrial,” Campinas: Unicamp, 1997.

- LINNHOFF B., AND FLOWER J. R. Synthesis of heat exchanger networks, Part 1, Systematic generation of energy optimal networks, A.I.Ch.E. J, v. 24, p. 633., 1978.
- LINNHOFF B.,TOWNSEND D.W.,BOLAND D.,HEWITT G.F.,THOMAS B.E.A.,GUY A R. AND MARSLAND R.H. *A user guide on process integration for the efficient use of energy* , Rugby: IChemE - Warwick Printing Company Ltd, 1982.
- LINNHOFF B., AND HINDMARSH E. The pinch design method for heat exchanger networks, Chemical Engineering Science, v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.
- NIKOLAOS V.S. and I.E. GROSSMANN, “Transshipment LP Model for Minimizing the Utility Cost in a Exchanger Network”. Department of Chemical Engineering, Carnegie Mellon, University Pittsburgh, 1992.
- PAPOULIAS, S.A., GROSSMANN I. E. “A Structural Optimization Approach in Process Synthesis-I Utility Systems”, Computers and Chemical Engineering, 7, 695 (1983a).
- \_\_\_ “A Structural Optimization Approach in Process Synthesis-II heat recovery networks, Computers and Chemical Engineering,” 7, 707 (1983b).
- \_\_\_ “A Structural Optimization Approach in Process Synthesis-III Total Processing Systems, Computers and Chemical Engineering,” 7, 723, (1983c).
- PETROULAS,T., and G.V.RECLAITS, “Computer-Aided Synthesis and Design of Plant Utility Systems,” AIChEJ.,30, 69 (1984)
- SANTOS, LUCIANA CRISTINA, “Síntese de Sistemas de Recuperação de Energia para Trocadores do Tipo Casco e Tubos com Restrições de Troca Térmica”, Campinas: Unicamp , 2000.

SMITH R. *Chemical process design*, New York: McGraw-Hill, 1995.

SHENOY U. V. *Heat exchanger network synthesis: process optimization by energy and resource analysis*, Houston: Gulf Publishing Company, 1995.