

TESE

85

GENERALIZAÇÃO DOS DIAGRAMAS DE EXTRAÇÃO PARA  
TURBINAS INDUSTRIAIS A VAPOR DE EXTRAÇÃO

ANSELMO FIORANELI



Tese apresentada à Escola  
Federal de Engenharia de  
Itajubá para obtenção do  
Título de Mestre em Ciên-  
cias em Engenharia Mecâni-  
ca.

ITAJUBÁ - Minas Gerais  
Janeiro de 1975

Class. 621.165(043.2)

Cult. 517g

Tombo 85

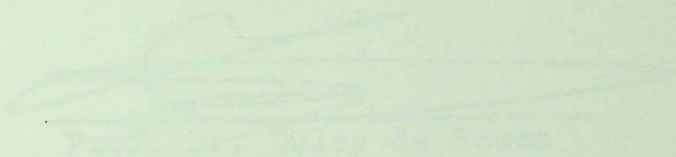
O que atenta para o ensino, acha o bem, e o -  
que confia no SENHOR,  
êsse é feliz.

Prov. 16 : 20

Presidente da Comissão Examinadora;


Esta obra foi julgada adequada para publicação de  
obra de caráter científico e aprovada em sua forma final  
pela Comissão Examinadora.

Assinatura:



Prof. Dr. Zulcy de Souza

Presidente da Comissão Examinadora



Prof. Dr. Zulcy de Souza

ORIENTADOR DA TESE

Prof. Dr. Zulcy de Souza

Parecer da Comissão Examinadora:

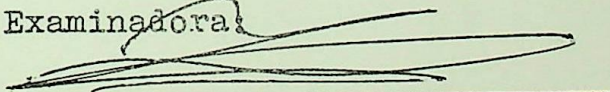
Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Ciências e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Comissão Examinadora.

Orientador:



Prof. Dr. Zulcy de Souza

Presidente da Comissão Examinadora:



Prof. Dr. Zulcy de Souza

AGRADECIMENTOS

com o auxílio de amigos e professores, nomeadamente José Cláudio, com o auxílio de colegas, com o qual tenho a maior estima e amizade. Ao curso de Engenharia, com o Prof. Mário de Sousa e Prof. Richard Serra; agradeço de uma maneira especial, este trabalho, a Prof. Maria, a Prof. Sílvia e a Prof. Conceição. Agradeço, ainda, a todos os meus amigos, pelo apoio e incentivo durante a elaboração dos originais.

Dedico  
à Flávia, minha esposa, e a  
Anete Augusta,  
nossa filha, e  
a meus pais.

## A G R A D E C I M E N T O

Sou devedor ao amigo e professor Vagner José Oliva, compa<sub>u</sub>nheiro de curso, sem o qual seria impossível a assistência às aulas em Itajubá. Também, aos Prof. Zulcy de Souza e Prof. Richard Bran; seguindo as suas pisadas, realizei este trabalho.

Agradeço, também, a Prof<sup>a</sup> Jandyra de Paula Gonçalves Guimarães, minha sogra, pelo seu paciente trabalho na correção dos originais.

## Í N D I C E

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 - COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA E CALOR PARA AQUECIMENTO	
2.1. Introdução	4
2.2. Rendimento de instalação a vapor de condensação moderna	4
2.3. Eficiência do processo de aquecimento	6
2.4. Combinação de potência e calor	7
2.5. Perdas na geração de potência	8
2.6. Instalação com geração de potência e calor para processo combinados	9
2.7. Tipos de turbinas industriais a vapor	10
CAPÍTULO 3 - COMPORTAMENTO DE TURBINAS INDUSTRIAIS A VAPOR DE EXTRAÇÃO	
3.1. Turbinas com uma extração	
3.1.1. Linha de Willans	14
3.1.2. Esquema geral	15
3.1.3. Hipóteses	15
3.1.4. Equação geral	17

3.1.5. Rendimento	19
3.1.6. Campo de funcionamento	19
3.1.7. Análise do campo de funcionamento	24
3.1.8. Aplicação	25
3.2. Turbinas com duas extrações	
3.2.1. Esquema simplificado	31
3.2.2. Equações gerais	32
3.2.3. Campo de funcionamento	33
3.2.4. Rendimento da instalação	38
3.2.5. Análise do campo de funcionamento	39
3.2.6. Aplicação	39
CAPÍTULO 4 - DIAGRAMAS DE EXTRAÇÃO PARA TURBINAS INDUSTRIAIS A VAPOR COM UM NÚMERO $n$ DE EXTRAÇÕES	
4.1. Turbinas com três extrações	46
4.2. Equações gerais	47
4.3. Turbina com quatro extrações	51
4.4. Turbina com $n$ extrações	57
4.5. Aplicação	61
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	69
BIBLIOGRAFIA	70
SIMBOLOGIA	72

## S U M Á R I O

Nas indústrias de processamento (açúcar, papel, têxtil, química, farmacêutica, alimentação etc.) a fonte básica de calor é o vapor d'água, que além de ser aplicado diretamente em muitos processos de fabricação, é um portador insuperável de calor que libera.

É conhecido o uso de turbinas a vapor acopladas a geradores elétricos, em geral superpostas ao processamento, representando um fator econômico dentro do contexto econômico global de uma fábrica.

Dentre as turbinas a vapor empregadas, estão as turbinas de extração e condensação.

Conhecendo-se os diagramas de extração de tais turbinas, pode-se preconizar o seu comportamento em cargas parciais e para várias massas de vapor de extração.

Os trabalhos que existem sobre o assunto vão até o diagrama para turbinas de duas extrações.

O presente trabalho consiste na generalização dos diagramas de extração para turbinas industriais a vapor para várias extrações.

As equações para o traçado do diagrama para uma extração são as deduzidas por Zulcy de Souza. A partir deste ponto, desenvolve-se o trabalho até chegar-se ao ponto em que se pode fazer a generalização das equações para um número qualquer de extrações.

## C A P Í T U L O 1

### I N T R O D U Ç Ã O

A turbina a vapor é uma máquina térmica onde a energia potencial do vapor se transforma em energia cinética, que, por sua vez, se transforma em energia mecânica de rotação no eixo da turbina. O eixo da turbina é acoplado a um mecanismo, diretamente ou por meio de um redutor. Dependendo do tipo de mecanismo, a turbina a vapor pode ser usada nos mais diversos campos da indústria, para geração de energia elétrica ou para transporte.

A transformação da energia potencial do vapor em energia mecânica de rotação no eixo se faz de diversos meios.

Genericamente, as turbinas a vapor são classificadas em três tipos: ação, reação e combinado ação-reação. Isto depende da forma na qual se dá a transformação da energia potencial do vapor em energia cinética.

A idéia de turbina a vapor data de tempos remotos. É um fato bem conhecido que, cerca de 120 aC, Hero, da Alexandria, fez o primeiro protótipo de que se tem notícia de uma turbina a vapor trabalhando segundo o princípio da reação. Muitos séculos depois, em 1629 dC, Giovanni Branca construiu uma turbina a vapor, trabalhando segundo o princí-

pio da ação.

Progresso substancial no desenvolvimento e construção de turbinas a vapor se deu no fim do século XIX. No ano de 1890, o engenheiro sueco Gustav de-Laval construiu uma turbina a vapor de um rotor, com capacidade de 5 hp.

Em turbinas destes tipos, a expansão do vapor de sua pressão inicial à pressão final se dá em um único bocal ou grupo de bocais, situados no estator da turbina e localizados em frente das palhetas do rotor. O decréscimo da pressão do vapor nos bocais é acompanhado pelo decréscimo de seu conteúdo térmico, que conduz a um aumento da velocidade do vapor saindo dos bocais. A energia de velocidade do jato de vapor exerce uma força de impulso nas palhetas e produz trabalho mecânico no eixo do rotor da turbina.

As turbinas nas quais o processo completo de expansão do vapor se faz somente em canais estacionários (bocais), e a energia de velocidade é transformada em trabalho mecânico nas palhetas da turbina, sem que nenhuma ou quase nenhuma expansão posterior se faz nelas, são conhecidas como turbinas de ação. A velocidade do vapor na saída dos bocais em tais turbinas atinge um valor de cerca de 1200 m/s ou mais.

Turbinas de ação pequenas, de um estágio, foram e estão sendo construídas com velocidades altas. A primeira turbina deste tipo, construída por de-Laval, operou a uma velocidade de 30 000 rpm, e a turbina era provida de um redutor de engrenagens para transmissão do momento ao mecanismo (por exemplo, um gerador elétrico etc.).

A potência de uma turbina de ação de estágio único, mesmo a velocidades circunferenciais atingindo um valor de 350 m/s, não excede 500 a 800 kW. Capacidade pequena, baixa eficiência e, na maioria dos casos, a necessidade de se utilizar um redutor de engrenagens, limita o uso de turbinas a vapor de um estágio.

Em 1884, o engenheiro inglês C.A. Parsons sugeriu, para fins industriais, uma turbina a vapor de múlti -

plos estágios, trabalhando segundo o princípio da reação. Estas turbinas possuem palhetas estacionárias localizadas no estator, e palhetas móveis, localizadas no rotor. Nas turbinas, trabalhando segundo o princípio da reação, a expansão do vapor ocorre não somente nas passagens pelas palhetas estacionárias, mas também nas passagens pelas palhetas móveis.

A velocidade do vapor em turbinas de reação - de múltiplos estágios ( exceto os últimos estágios de uma turbina de condensação) é relativamente baixa: cerca de 100 a 200 m/s.

## C A P Í T U L O 2

### COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA E CALOR PARA AQUECIMENTEN

TO

#### 2.1. INTRODUÇÃO

Todas as indústrias de processamento necessitam de potência e calor para aquecimento. Algumas necessitam de muita potência e relativamente pouco calor, enquanto que outras necessitam de pouca potência e muito calor para aquecimento. Outras, ainda, utilizam uma grande quantidade de ambos.

Uma instalação a vapor de condensação, por mais eficiente que seja, não consegue transformar muito mais do que um terço do calor liberado pelo combustível em energia elétrica. Mais da metade da energia térmica do vapor se perde no condensador. No entanto, mesmo uma pequena instalação a vapor converte três quartos da energia liberada pelo combustível em vapor, e todo esse vapor pode ser aproveitado para processo.

#### 2.2. RENDIMENTO DE INSTALAÇÃO A VAPOR DE CONDENSAÇÃO MODERNA

A figura 2.1 mostra a distribuição de energia numa instalação de potência a média pressão. Está sendo usa-

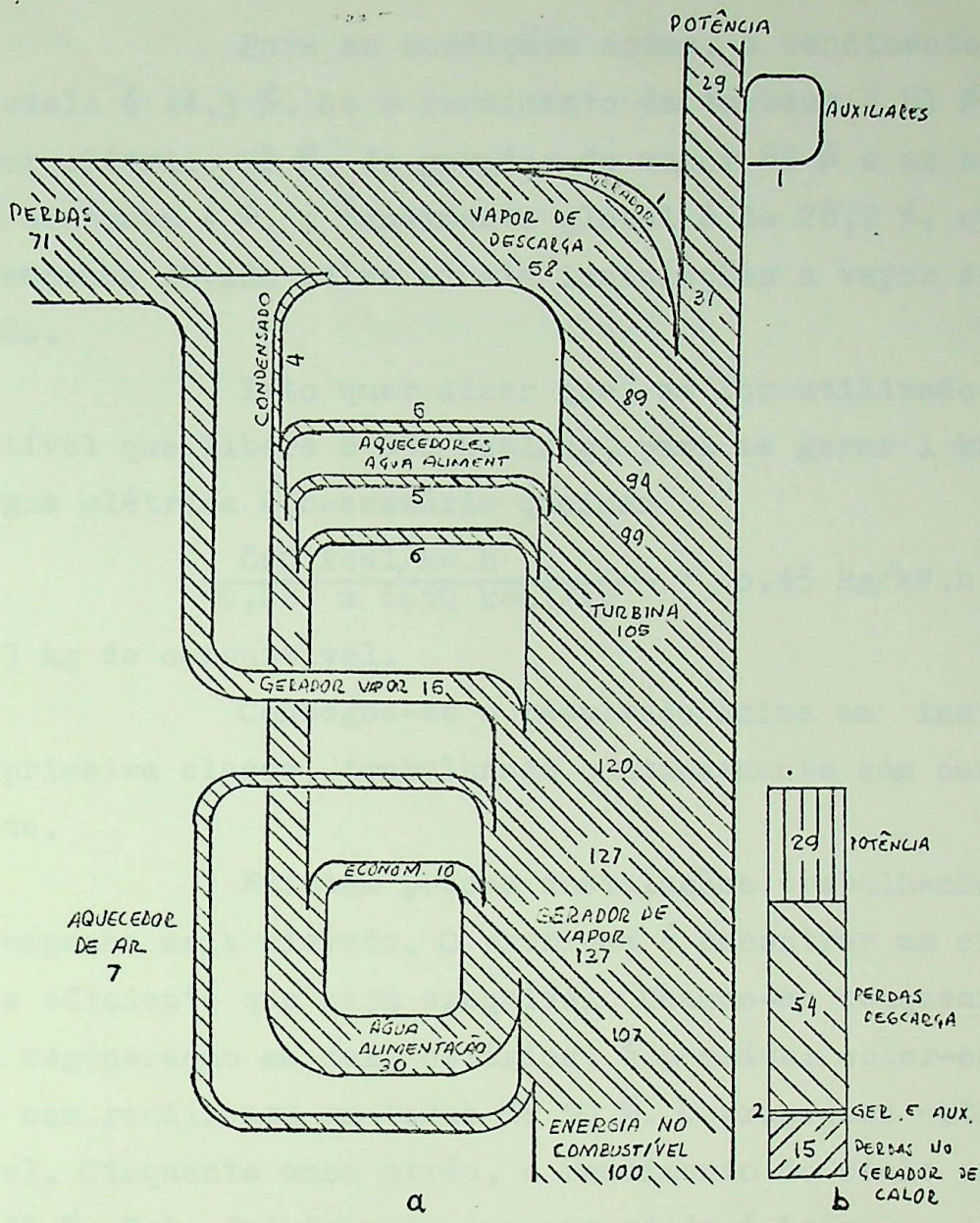


Figura 2.1 Distribuição de energia numa instalação a vapor de condensação a média pressão.

- a. Diagrama de Sankey
- b. Diagrama de bloco

do dois tipos de diagramas: o diagrama de Sankey a e o diagrama de bloco b. Da energia do combustível, apenas 29% se transforma em potência. O restante é perdido, principalmente, na descarga da turbina, para o que não há, normalmente, nenhuma aplicação econômica.

O diagrama de Sankey, figura 2.1, representa, aproximadamente, uma instalação a vapor de condensação, de ciclo regenerativo, com condições na admissão de 70 bar a 480 C e na descarga 38 mm de Hg abs.

Para as condições acima, o rendimento térmico do ciclo é 44,3 %. Se o rendimento da turbina é 81 %, do gerador elétrico 98 %, do gerador de vapor 85 % e os auxiliares consomem 4 %, o rendimento global é de 28,7 %, que é o desempenho obtido pelas atuais instalações a vapor de condensação.

Isto quer dizer que, se for utilizado um combustível que libere 6 650 kcal/kg, para se gerar 1 kWh de energia elétrica é necessário queimar

$$\frac{860 \text{ kcal/kw.h}}{0,287 \times 6650 \text{ kcal/kg}} = 0,45 \text{ kg/kw.h}$$

0,45 kg de combustível.

Consegue-se o resultado acima em instalações de primeira classe, trabalhando continuamente com carga constante.

Existem poucas instalações trabalhando com desempenho mais elevado. O problema é encontrar um ciclo mais eficiente que seja exequível. Usando-se reaquecimento e com regeneração em seis estágios, é possível obter-se um ciclo com rendimento em torno de 50 %. O progresso obtido é notável. Cinquenta anos atrás, o rendimento do ciclo era cerca de 15 %. Isto foi triplicado, mas ainda é baixo.

O rendimento de uma grande instalação de potência é cerca de 29 %. E diz-se que a instalação é muito eficiente. Como reconciliar 29 % com muito eficiente ? A verdade é que uma grande instalação eficiente opera segundo um processo fundamentalmente ineficiente, porque ainda não se foi capaz de idealizar um processo em que se possa utilizar a energia térmica da descarga à baixa temperatura.

### 2.3. EFICIÊNCIA DO PROCESSO DE AQUECIMENTO

Aquecimento por meio de vapor, se feito por um processo adequado, é muito eficiente. As únicas perdas são as perdas no gerador de vapor, radiação - distribuição, e um mínimo de vazamento. Não se está interessado, aqui, de que modo o vapor de processo é usado; mas somente com o abas

tecimento de vapor ao processo.

A instalação representada na figura 2.2. possui um grande gerador de vapor moderno com um rendimento de 83 %. Os auxiliares, sopradores, bomba de alimentação etc., são considerados como requerendo 1 % da energia do combustível, que é o de uma grande instalação de potência. Todo condensado retorna ao gerador de vapor após ser usado no processo. O rendimento global da energia térmica liberada no processo é de 82 %.

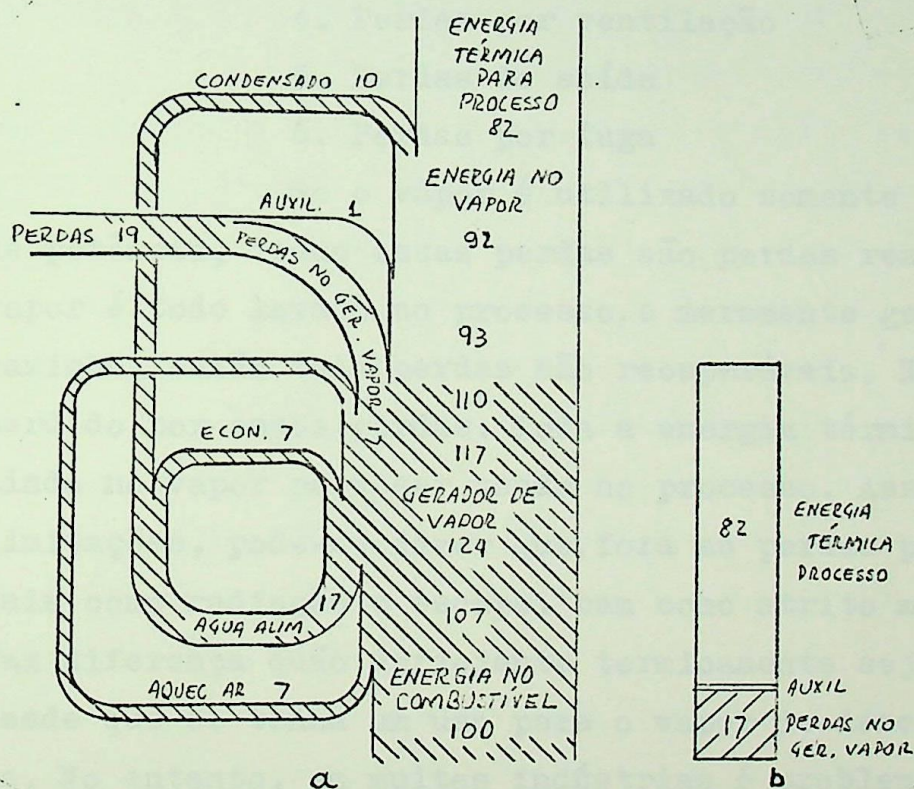


Figura 2.2. Distribuição de energia térmica numa instalação a vapor para processo.

#### 2.4. COMBINAÇÃO DE POTÊNCIA E CALOR

Se o vapor, ao dirigir-se ao processo, passar por uma máquina ou turbina, uma grande economia na geração de energia elétrica é obtida. A figura 2.1 mostra que três quartos das perdas em uma grande instalação de potência é a

energia térmica do vapor de descarga. Se tal descarga puder ser aproveitada em um processo não haverá perdas. Isto, no entanto, é verdade até certo ponto. O vapor poderia gerar mais potência para uma expansão maior.

## 2.5. PERDAS NA GERAÇÃO DE POTÊNCIA

As perdas em uma máquina ou turbina a vapor são constituídas do seguinte:

1. Perdas de transição
2. Perdas por umidade do vapor
3. Perdas por atrito lateral
4. Perdas por ventilação
5. Perdas de saída
6. Perdas por fuga

Se o vapor é utilizado somente para produção de potência, todas essas perdas são perdas reais. Mas se o vapor é todo levado ao processo, e meramente gera potência no caminho, então tais perdas são recuperáveis. Nenhum calor é perdido por essas perdas. Toda a energia térmica permanece ainda no vapor para ser usado no processo. Assim, com certas limitações, pode-se dizer que, fora as perdas para o exterior, tais como radiação e escape, bem como atrito mecânico, não faz diferença quão deficiente termicamente seja uma máquina, desde que se tenha um uso para o vapor de descarga da máquina. No entanto, em muitas indústrias é problemático gerar toda a potência necessária. Assim, quanto mais potência se puder extrair do vapor antes da descarga, tanto melhor.

O rendimento de um ciclo é mostrado por uma área de energia disponível no diagrama temperatura-entropia. A "deficiência" é a área do calor rejeitado à descarga. Em um ciclo onde a energia térmica é toda usada para processo, não há calor rejeitado. Então, o rendimento ideal é de 100%. Como já foi dito, admite-se que todo o vapor fornecido ao processo seja, por este, aproveitado integralmente.

## 2.6. INSTALAÇÃO COM GERAÇÃO DE POTÊNCIA E CALOR PARA PROCESSO COMBINADOS

Considere-se uma instalação com condições tais que libere 1 kW.h por 11,8 kg de vapor ( alta pressão no gerador de vapor, contra-pressão moderada ), e que o vapor na entrada da turbina contenha 723 kcal/kg.

Então, a fração da energia convertida em potência na turbina é

$$\frac{860 \text{ kcal/kW.h}}{723 \text{ kcal/kg} \times 11,8 \text{ kg/kw.h}} = 0,10$$

Pode-se dizer que 10 % da energia na entrada da turbina é convertida em potência na turbina.

Se 7 % dessa energia é perdida na turbina por radiação e atrito, e se o gerador elétrico tem rendimento 97 %, a potência gerada é de

$$10 \times 0,93 \times 0,97 = 9,0$$

Uma dessas unidades é usada pelos auxiliares, e assim a potência líquida é de 8 unidades.

Dessa forma, pode-se construir a figura 2.3. Ela mostra que se pode fornecer o mesmo calor para o processo como na figura 2.2 e converter 8 unidades de energia em unidades de potência pelo uso adicional de 11 unidades de energia do combustível.

O rendimento efetivo é

$$\frac{8 \times 100}{11} = 73 \%$$

Isto é  $73 / 29 = 2,5$  vezes melhor que uma grande instalação de condensação.

O rendimento térmico global é de

$$\frac{(82 - 8) \times 100}{111} = 81 \%$$



extraído vapor de processamento com pressão pré-fixado ( conforme necessidade: entre 2 e 10 bares ), e o restante é expandido até a pressão do condensador ( pressão entre - 0,05 e 0,10 bar )

Richard Bran dá as "seguintes razões que determinam a escolha da modalidade apropriada entre os dois tipos acima para uma indústria de processamento ( a ser projetada e construída ).

a) a turbina a vapor de contrapressão pura é escolhida se o processamento é prioritário, relativamente à produção de energia elétrica. Na sua aplicação mais frequente, aplica-se um tipo de regulagem, figura 2.4, em que um regulador de pressão mantém constante a pressão de vapor atrás da turbina, enquanto o regulador de velocidade desempenha a função de um " regulador-limite ". Resulta daí que a potência elétrica varia proporcionalmente ao consumo de vapor do processamento. Nisto reside a grande desvantagem da turbina a vapor de contrapressão. Deve-se, então, tentar equilibrar o mais possível esta demanda para a fábrica poder desfrutar as grandes vantagens desta turbina: dimensões pequenas e inexistência de um condensador. É evidente que existe sempre ligação com uma rede elétrica externa ( de confiabilidade em geral, ainda restrita ).

b) a turbina a vapor de extração e condensação aplica-se em indústrias nas quais a produção de energia elétrica é prioritária, ou pelo menos equivalente à demanda de vapor do processamento. A figura 2.5 mostra o esquema de regulagem de tal turbina. O regulador de velocidade regula a velocidade, atuando nas válvulas de alta pressão ( AP ) e baixa pressão ( BP ), no mesmo sentido e em cada regulagem - até um estado tal que a alteração da massa de vapor ( kg/h ) que atravessa ambas as válvulas esteja dentro de pequenas oscilações - invariáveis. Assim, a massa de vapor de processamento ( kg/h ) permanece praticamente constante. O regulador de pressão (do vapor de extração) regula a pressão de ex-

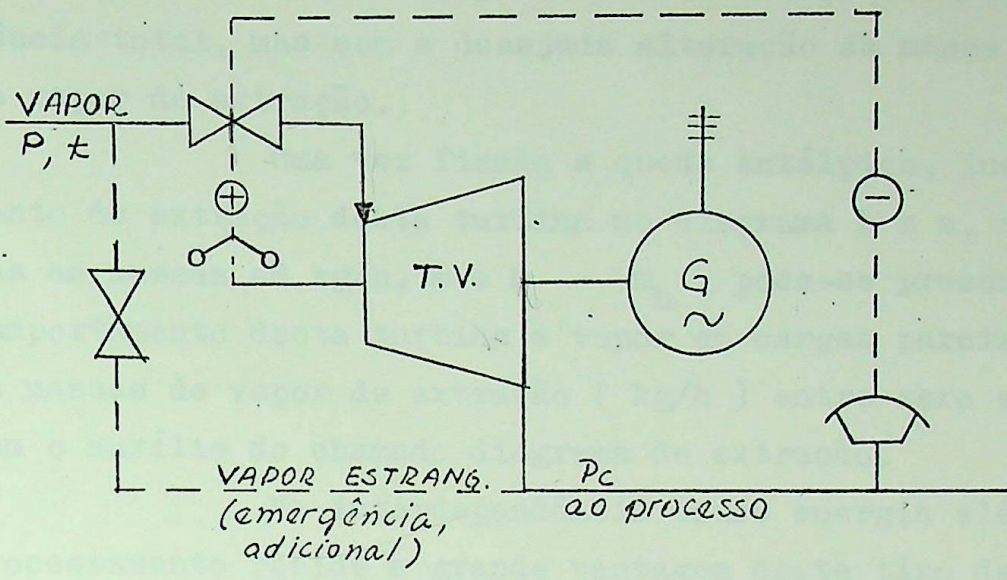


Figura 2.4. Instalação de uma turbina a vapor de contra-pressão pura

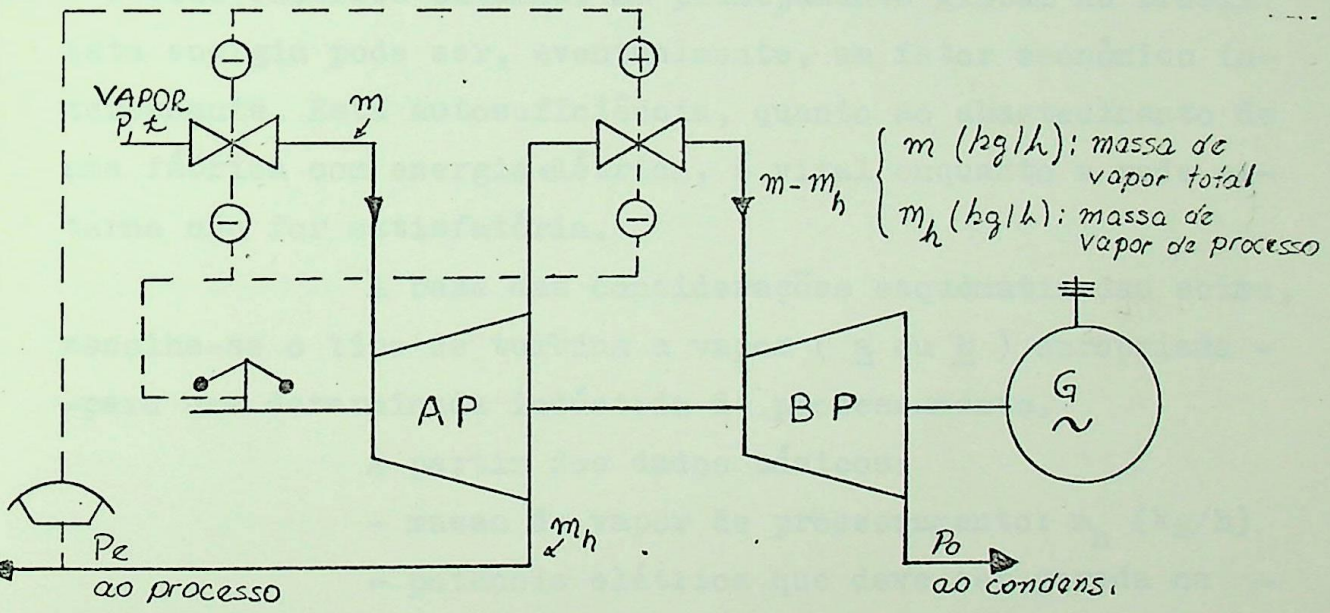


Figura 2.5. Instalação de uma turbina a vapor de extração e condensação

tração, influenciando nas válvulas de AP e BP em sentido oposto e - em cada ato de regulação até um estado tal que a alteração do produto massa de vapor ( kg/h ) vezes queda entálpica ( kJ/kg ) à frente da válvula BP seja igual, mas com sinal o posto, à alteração do respectivo produto atrás da válvula - BP.

Com isto, pretende -se manter constante a potência total, mas com a desejada alteração da massa (kg/h) - do vapor de extração.

Uma vez fixada a queda entálpica, inclusive o ponto de extração desta turbina no diagrama  $h \times s$ , e conhecidas as massas em kg/h,  $m$  e  $m - m_h$ , pode-se preconizar o comportamento desta turbina a vapor em cargas parciais e para massas de vapor de extração ( kg/h ) entre zero e  $m_h$  máx com o auxílio do chamado diagrama de extração.

Na interdependência entre energia elétrica e processamento reside a grande vantagem deste tipo de turbina a vapor que forma o núcleo de uma verdadeira usina térmica a vapor dentro da fábrica. Existe a possibilidade de se escolher para o grupo turbogerador uma potência tão grande que se possa vender energia elétrica - com tarifas compensadoras - à rede elétrica externa. Em planejamento global no Brasil esta energia pode ser, eventualmente, um fator econômico interessante. Esta autosuficiência, quanto ao abastecimento de uma fábrica com energia elétrica, é vital enquanto a rede externa não for satisfatória.

À base das considerações esquematizadas acima, escolhe-se o tipo de turbina a vapor ( a ou b ) apropriada - para uma determinada indústria de processamento.

A partir dos dados básicos:

- massa de vapor de processamento:  $m_h$  (kg/h)
- potência elétrica que deve ser gerada na própria fábrica:  $P_{el}$  (kW)

obtem-se uma característica:

$$k = m_h / P_{el} \quad ( \text{kg} / \text{kW} / \text{h} )$$

cujo valor numérico permite escolher, a grosso modo, o tipo de turbina a vapor apropriada para o caso:

$k > 10$  ( kg / kW / h ) indica turbina a vapor de contrapressão pura;

$k < 10$  ( kg / kW / h ) recomenda turbina a vapor de extração e condensação.

É evidente que a escolha definitiva somente poderá ser feita após um estudo técnico-econômico profundo.

## C A P Í T U L O 3

### COMPORTAMENTO DE TURBINAS INDUSTRIAIS A VAPOR DE EXTRAÇÃO

#### 3.1 TURBINAS COM UMA EXTRAÇÃO

##### 3.1.1. LINHA DE WILLANS

A figura 3.1 mostra o consumo de vapor de uma turbina a vapor trabalhando com condições iniciais e pressão final constantes. Dentro da região normal de carga, esta linha é uma reta e é conhecida como Linha de Willans, por ter sido descoberta por P.W. Willans, em 1888. Para a região de sobrecarga essa relação deixa de ser linear.

Essa figura também apresenta a curva de consumo específico de vapor que se obtém dividindo-se as ordenadas pelas abscissas.

A linha de Willans, sendo uma reta, pode ser escrita da forma

$$m = a + b.P$$

onde a e b são constantes. Para m em kg / h e P em kW, as dimensões das constantes são: a em kg / h e b em kg / h / kW.

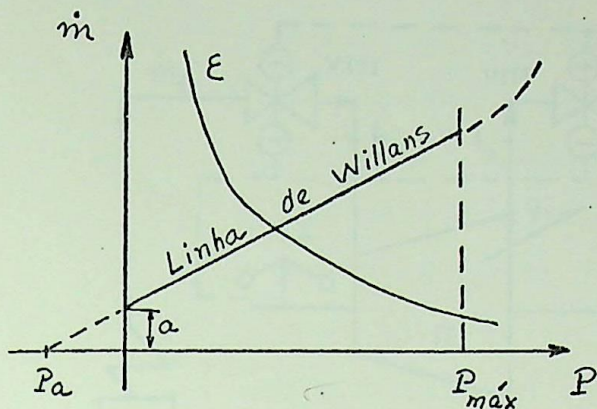


Figura 3.1. Linha de Willans e curva de consumo de vapor.

Para  $P = 0$  tem-se  $m_0 = a$ , que é o consumo de vapor devido ao atrito e para a turbina vencer a contra-pressão. A constante  $b$  é o acréscimo relativamente à potência unitária para a máquina ir, com rotação constante, da potência zero à potência máxima.

### 3.1.2. ESQUEMA GERAL

Na figura 3.2 está representado o esquema geral da instalação com uma extração de vapor para processo.

O esquema geral mostra uma das grandes vantagens do sistema de extração, que é a possibilidade de ser mantida constante a potência fornecida,  $P$ , sendo variável a massa de vapor,  $m_h$ , utilizada no processo, para uma mesma rotação do grupo. O estudo que será feito permitirá, entre outras coisas, ver a importância da fixação desta potência  $P$ .

### 3.1.3. HIPÓTESES

Para o presente estudo, serão feitas as seguintes hipóteses:

- rotação constante;
- características térmicas constantes na entrada e saída das partes de alta e baixa pressão, bem como na entrada do processo;

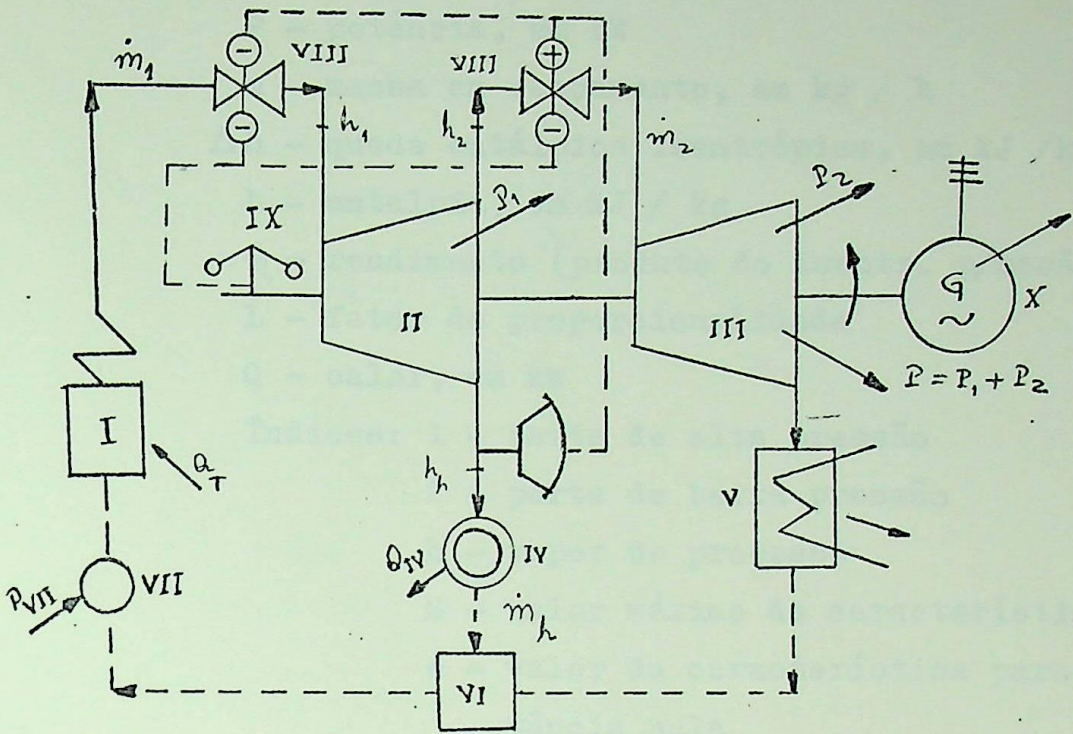


Figura 3.2. Esquema de uma instalação a vapor industrial com turbina a vapor de extração. I - caldeira com superaquecedor; II - turbina, parte de alta pressão; III - turbina, parte de baixa pressão; IV - vapor para processo; V - condensador; VI - misturador; VII - bomba; VIII e IX - reguladores de velocidade e de pressão; X - alternador.

- massas em escoamento,  $m$ , em  $\text{kg} / \text{h}$ , e potência,  $P$ , em  $\text{kW}$ , variáveis;
- a instalação não trabalha com sobrecarga; - logo, a linha de Willans,  $m = f(P)$ , é uma reta;
- será desprezada a entalpia da água de ali - mentação da caldeira.

As convenções usadas são as seguintes:

P - potência, em kW

m - massa em escoamento, em kg / h

$\Delta h$  - queda entálpica isentrópica, em kJ / kg

h - entalpia, em kJ / kg

$\eta$  - rendimento (produto do isentr. p/mecânico)

L - fator de proporcionalidade

Q - calor, em kW

Índices: 1 - parte de alta pressão

2 - parte de baixa pressão

h - vapor de processo

M - valor máximo da característica

o - valor da característica para Potência nula

i - instalação

t - total

#### 3.1.4. EQUAÇÃO GERAL

Parte-se da equação da linha de Willans:

$$m = a + b.P \quad (3.1)$$

Para a potência nula,  $P = 0$ , tem-se:

$$m = m_o = L.m_M$$

logo,

$$a = L.m_M$$

Para a potência máxima,  $P = P_M$ , tem-se

$$m = m_M = a + b.P_M$$

Logo,

$$b = \frac{m_M - a}{P_M}$$

$$= \frac{1 - L}{P_M} m_M$$

Levando-se os valores de a e b na equação -

(3.1), e tendo-se

$$3 \ 600 \ P_M = m_M \cdot \Delta h \cdot \eta$$

resulta

$$b = \frac{(1 - L) \times 3600}{\Delta h \cdot \eta}$$

e

$$m = L \cdot m_M + \frac{3600 \cdot (1-L)}{\Delta h \cdot \eta} \cdot P$$

A título de simplificação chame-se

$$\frac{\Delta h_i \cdot \eta_i}{3600 (1-L_i)} = A_i$$

Logo,

$$m = L \cdot m_M + \frac{1}{A} \cdot P \quad (3.2)$$

Aplicando-se a equação (3.2) às partes de alta e baixa pressão de uma turbina a vapor de uma extração, - resulta:

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} + \frac{1}{A_1} \cdot P_1$$

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} + \frac{1}{A_2} \cdot P_2$$

Tirando-se as potências  $P_1$  e  $P_2$  das equações acima, tem-se

$$P_1 = A_1 ( m_1 - L_1 \cdot m_{1M} )$$

$$P_2 = A_2 ( m_2 - L_2 \cdot m_{2M} )$$

Como, a potência total é

$$P = P_1 + P_2$$

e a vazão em massa que passa na parte de baixa pressão da - turbina é

$$m_2 = m_1 - m_h$$

vem:

$$P = P_1 + P_2 =$$

$$= A_1 ( m_1 - L_1 \cdot m_{1M} ) + A_2 ( m_1 - m_h - L_2 \cdot m_{2M} )$$

$$= m_1 \sum_i A_i - \sum_i L_i \cdot A_i \cdot m_{iM} - A_2 \cdot m_h$$

Tirando-se o valor de  $m_1$  da equação acima, tem-

-se:

$$(3.3) \quad m_1 = \frac{1}{\sum_i A_i} (P_1 + P_2) + \frac{A_2}{\sum_i A_i} m_h + \frac{\sum_i L_i \cdot A_i \cdot m_{iK}}{\sum_i A_i}$$

que é uma equação da forma

$$\begin{aligned} m_1 &= f(P, m_h) \\ &= A \cdot P + B \cdot m_h + C \end{aligned} \quad (3.4)$$

cujas unidades são:  $A$  ( kg / h / kW ),  $B$  ( l ) e  $C$  ( kg/h )

### 3.1.5. RENDIMENTO

Definindo-se o rendimento da instalação por

$$\begin{aligned} \eta_i &= \frac{P_t}{Q} \\ &= \frac{P + m_h \cdot h_h}{m_1 \cdot h_1} \\ &= \frac{P}{m_1 \cdot h_1} + \frac{m_h \cdot h_h}{m_1 \cdot h_1} \end{aligned}$$

Substituindo-se este rendimento na equação

( 3.4 ) resulta:

$$(3.5) \quad m_1 = \frac{B - h_h \cdot A}{B \cdot h_1 \cdot \eta_i - h_h} \cdot P - \frac{h_h \cdot C}{B \cdot h_1 \cdot \eta_i - h_h}$$

Esta equação representa um feixe de retas cujo ponto comum,  $i$ , no plano  $m_1$  x  $P$  possui as coordenadas

$$\begin{aligned} m_i &= 0 \\ P &= \frac{C}{B/h_h - A} \end{aligned}$$

### 3.1.6. CAMPO DE FUNCIONAMENTO

Utilizando-se as equações deduzidas, pode-se traçar o campo de funcionamento deste tipo de instalação.

A figura ( 3.3 ) representa o diagrama de extração para tal tipo de instalação, onde se tomou para ordenada a massa em escoamento,  $m_1$ , e para abscissa a potência total ,  $P = P_1 - P_2$  .

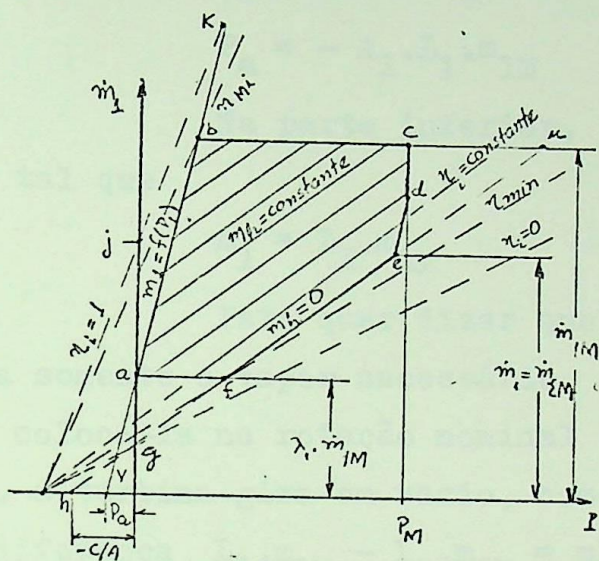


Figura 3.3. Campo de funcionamento de uma instalação a vapor - com turbina a vapor de extração.

A campo é formado por segmentos de retas que formam o polígono a, b, c, d, e, f, a.

À esquerda tem-se a reta a-b, onde  $m_1 = f(P_1)$ . Nesta reta  $P_2 = 0$ , isto é,  $m_{20} = L_2 \cdot m_{2M}$ . Isto quer dizer - que na parte de baixa pressão escoam somente o vapor necessário para colocá-la na rotação nominal e vencer as perdas. A equação desta reta é dada por:

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} + \frac{1}{A_1} \cdot P$$

$L_1$  e  $L_2$  podem variar entre 0,05 e 0,20.

Para  $P = 0$ , tem-se

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

$$m_h = L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}$$

que são as coordenadas do ponto a.

Na parte superior, tem-se a reta horizontal - b-c, onde

$$m_1 = m_{1M}$$

A intersecção do eixo das abscissas com a reta que passa por a e b determina o ponto v, que permite obter a potência de atrito,  $P = P_a$ , com  $m_1 = 0$  :

$$P_a = - A_1 \cdot L_1 \cdot m_{1M}$$

Na parte inferior, tem-se a reta horizontal a-f, tal que

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

Isto quer dizer que, na parte de alta pressão escoam somente o vapor necessário para colocá-la na rotação nominal e vencer as perdas. No ponto a, a turbina gira em vazio, com  $m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$  e  $m_2 = L_2 \cdot m_{2M}$ ; a diferença  $L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M} = m_h$  vai para o processo.

No ponto f,

$$m_h = 0,$$

isto é, não há vapor para o processo, tornando-se uma turbina de condensação pura.

Um dos limites à direita é a reta f - e, onde  $m_h = 0$ . Para tal valor, a equação ( 3.3 ) fica:

$$m_1 = m_2 = A \cdot P + C$$
$$= \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot ( P_1 + P_2 ) + \frac{\sum_1 L_i \cdot A_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

As coordenadas do ponto f são:

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

$$P = A_2 \cdot ( L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M} )$$

Sobre a reta f - e, todo vapor que passa pela parte de alta pressão da turbina, passa pela parte de baixa pressão. Isto porque,  $m_h = 0$ , isto é, a massa de vapor que escoa para o processo é nula. Aumentando-se a massa de vapor -  $m_1$ , que é admitido na turbina, chega-se a um valor tal que -  $m_1 = m_{2M}$ . Este estado é representado pelo ponto e.

Aumentando-se ainda mais a massa de vapor  $m_1$ , com  $m_1 > m_{2M}$ , a massa de vapor que escoar pela parte de baixa pressão continua constante e igual a  $m_{2M}$ . O excesso,  $m_1 - m_{2M}$ , vai para o processo. Tem-se, então, a reta e - d, onde:

$$m_2 = m_{2M}$$

$$m_h = m_1 - m_{2M}$$

Substituindo-se estes valores na equação (3.3) resulta:

$$m_1 = \frac{A}{1 - B} \cdot P + \frac{C - B \cdot m_{2M}}{1 - B}$$

Note-se que esta reta possui o mesmo coeficiente angular que a reta que passa por a - b, sendo, portanto, paralelas. Deste modo, o seu traçado é imediato, bastando traçar por e uma paralela ao segmento a - b.

A reta e - d intercepta a vertical de potência máxima  $P_M$  no ponto d, que, por sua vez, intercepta a horizontal  $m_{1M}$  no ponto c.

A tabela 3.1 apresenta os pontos do polígono a, b, c, d, e, f com suas respectivas coordenadas.

Tabela 3.1. Coordenadas dos pontos a, b, c, d, e, f

Ponto	P	$m_1$
-	kW	kg / h
a	0	$L_1 \cdot m_{1M}$
b	$A_1 \cdot m_{1M} \cdot (1 - L_1)$	$m_{1M}$
c	$P_M$	$m_{1M}$
d	$P_M$	$(A \cdot P_m + C - B \cdot m_{2M}) / (1 - B)$
e	$(m_{2M} - C) / A$	$m_{2M}$
f	$A_2 \cdot (L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M})$	$L_1 \cdot m_{1M}$

Como resumo, apresenta-se a seguir as equações que formam o polígono, com suas principais características:

reta a - b  $m_1 = L_1 \cdot m_{1M} + \frac{1}{A_1} \cdot P_1$

$$m_2 = m_{20} = L_2 \cdot m_{2M}$$

$$P_2 = 0$$

$$\text{No ponto } \underline{a}, m_h = L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}$$

reta b - c

$$m_1 = m_{1M}$$

$$\text{No ponto } \underline{b}, m_h = m_{hM} = m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}$$

reta c - d

$$m_1 = \frac{1}{\sum_1^2 A_i} \cdot P_M + \frac{A_2}{\sum_1^2 A_i} \cdot m_h + \frac{\sum_1^2 L_i \cdot A_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$P = P_M$$

reta d - e

$$m_1 = \frac{1}{1 - B} \cdot P + \frac{C - B \cdot m_{2M}}{1 - B}$$

$$m_2 = m_{2M}$$

reta e - f

$$m_1 = \frac{1}{\sum_1^2 A_i} \cdot P - \frac{\sum_1^2 L_i \cdot A_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$m_2 = m_1$$

$$m_h = 0$$

reta f - a

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

$$P_1 = 0$$

retas  $m_h = \text{constante}$

O segmento de reta e - f corresponde a  $m_h = 0$ . As retas paralelas a esse segmento são retas de vapor de processo constante, isto é,  $m_h = \text{constante}$ .

retas  $\eta_i = \text{constante}$

As retas com rendimento da instalação constante podem ser traçadas com o auxílio da equação ( 3.5 ), - tendo-se o ponto i, sobre o eixo das abscissas como ponto comum. Pode-se mostrar que a abscissa do ponto i é negativa.

Fazendo-se  $P = 0$  e  $\eta_i = 0$  na equação ( 3.5 )

tem-se

$$m_1 = C > 0 \quad (\text{conclusão 1})$$

Da definição de rendimento da instalação, tem

-se

$$m_1 = \frac{1}{\eta_i \cdot h_1} \cdot P_1 + \frac{m_h \cdot h_h}{\eta_i \cdot h_1}$$

Como  $\eta_i \cdot h_1 > 0$ , o coeficiente angular dessas retas é positivo. (conclusão 2)

As conclusões 1 e 2 mostram que a abscissa de  $i$  é negativa.

Fazendo-se  $P = 0$  na equação ( 3.5 ) tem-se

$$m_1 = \frac{h_h}{h_h - B \cdot h_1 \cdot \eta_i} \cdot C$$

Para  $\eta_i = 0$ ,  $m_1 = C$

$$\text{Para } \eta_i = 1, m_1 = \frac{h_h}{h_h - B \cdot h_1} \cdot C$$

Como  $B > 0$ , tem-se

$$\frac{h_h}{h_h - B \cdot h_1} > 1, \text{ o que mostra que a reta } \eta_i = 1$$

intercepta o eixo das ordenadas em um ponto superior ao ponto de intersecção da reta  $\eta_i = 0$ . Em outras palavras, as retas de  $\eta_i$  constante crescem no sentido anti-horário em torno do ponto  $i$ .

### 3.1.7. ANÁLISE DO CAMPO DE FUNCIONAMENTO

O ponto de funcionamento da instalação deve estar o mais próximo possível de  $\eta_i = 1$ , e o mais distante de  $\eta_i = 0$ ; isto se dá para altos valores de  $m_h$ . Sob o ponto de vista energético, esse procedimento pode não ser o melhor, uma vez que a definição de rendimento da instalação relaciona energias sob a forma de calor e trabalho. Sob o aspecto de qualidade essa definição não é aceitável. Um estudo sob tal aspecto deve ser feito para que a escolha dos pontos de

funcionamento da instalação possa ser feito com maior critério.

### 3.1.8. APLICAÇÃO

Considere-se uma instalação a vapor industrial com turbina de uma extração, com os seguintes elementos:

Admissão:  $p_1 = 30$  bar

$t_1 = 425$  C

$m_{1M} = 15\ 000$  kg / h

Descarga:  $p_3 = 0,1$  bar

Características da parte de alta pressão:

$m_{1M} = 15\ 000$  kg / h

$\eta_1 = 0,60$

$L_1 = 0,15$

Características da parte de baixa pressão:

$m_{2M} = 10\ 000$  kg / h

$\eta_2 = 0,75$

$L_2 = 0,08$

Ponto de extração:

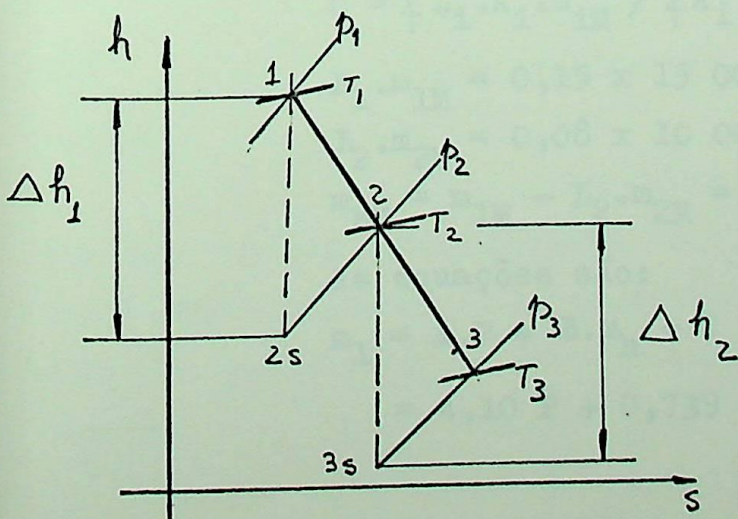
$p_2 = 9$  bar

Potência máxima na saída da turbina:

$P_M = 2\ 200$  kW

Rotação da turbina: constante

### SOLUÇÃO



Do diagrama de Mollier tira-se:

Para  $p_1 = 30$  bar e

$t_1 = 425$  C,  $h_1 = 3\ 285$  kJ / kg

Para  $p_2 = 9$  bar e

$s_{2s} = s_1$ ,  $h_{2s} = 2960$  kJ/kg

Então,

$$h_2 = h_1 - \eta_1 \cdot (h_1 - h_{2s}) = 3\,090 \text{ kJ / kg}$$

$$\Delta h_1 = h_1 - h_{2s} = 325 \text{ kJ / kg}$$

Para  $s_{3s} = s_2$  e  $p_{3s} = 0,1 \text{ bar}$

tem-se

$$h_{3s} = 2\,295 \text{ kJ / kg}$$

Então,

$$\Delta h_2 = h_2 - h_{3s} = 795 \text{ kJ / kg}$$

e

$$h_3 = h_2 - \eta_2 \cdot (h_2 - h_{3s}) = 3\,030 \text{ kJ / kg}$$

### Cálculo dos parâmetros

$$A_1 = \frac{\Delta h_1 \cdot \eta_1}{3600 (1 - L_1)} =$$

$$= \frac{325 \times 0,60}{3600 \times (1 - 0,15)} = 0,0637$$

$$A_2 = \frac{\Delta h_2 \cdot \eta_2}{3600 (1 - L_2)} =$$

$$= \frac{795 \times 0,75}{3600 \times (1 - 0,08)} = 0,180$$

$$\sum_1^2 A_i = A_1 + A_2 = 0,244$$

$$\sum_1^2 L_i \cdot A_i \cdot m_{iM} = L_1 \cdot A_1 \cdot m_{1M} + L_2 \cdot A_2 \cdot m_{2M} =$$

$$= 287$$

$$A = 1 / \sum_1^2 A_i = 4,10$$

$$B = A_2 / \sum_1^2 A_i = 0,739$$

$$C = \sum_1^2 L_i \cdot A_i \cdot m_{iM} / \sum_1^2 A_i = 1\,180$$

$$L_1 \cdot m_{1M} = 0,15 \times 15\,000 = 2\,250$$

$$L_2 \cdot m_{2M} = 0,08 \times 10\,000 = 800$$

$$m_{hM} = m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M} = 14\,200 \text{ kg / h}$$

As equações são:

$$m_1 = A \cdot P + B \cdot m_h + C$$

$$= 4,10 P + 0,739 m_h + 1\,180$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} + P_1 / A_1$$

$$= 2\,250 + 15,7 P_1$$

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} + P_2 / L_2$$

$$= 800 + 5,56 P_2$$

### Cálculo das abscissas dos pontos

Ponto a

$$P = 0$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 2\,250 \text{ kg/h}$$

Ponto b

$$P = A_1 \cdot m_{1M} \cdot (1 - L_1) = 812 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{1M} = 15\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto c

$$P = P_M = 2\,200 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{1M} = 15\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto d

$$P = P_M = 2\,200 \text{ kW}$$

$$m_1 = \frac{A}{1 - B} \cdot P_M + \frac{C - B \cdot m_{2M}}{1 - B} = 10\,770 \text{ kg/h}$$

Ponto e

$$P = \frac{m_{2M} - C}{A} = 2\,150 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{2M} = 10\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto f

$$P = A_2 \cdot (L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}) = 261 \text{ kW}$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 2\,250 \text{ kg/h}$$

A tabela abaixo fornece as coordenadas dos pontos ( ver tabela 3.2 ).

Como  $m_{hM} = 14\,200 \text{ kg/h}$ , seja calcular as retas com valores de  $m_h$  crescentes de  $3\,000 \text{ kg/h}$ . Como as retas de  $m_h = \text{constante}$  são paralelas à reta  $m_h = 0$ , basta calcular um ponto para se traçar essas retas. Com auxílio da equação

$$m_1 = 4,10 P + 0,739 m_h + 1178$$

tem-se a tabela 3.3.

Tabela 3.2. Coordenadas dos pontos

Pontos	P	$m_1$
	kW	kg / h
a	0	2 250
b	812	15 000
c	2 200	15 000
d	2 200	10 770
e	2 150	10 000
f	261	2 250

Tabela 3.3. Coordenadas dos pontos para traça  
do das retas  $m_h = \text{constante}$ 

$m_h$	P	$m_1$
kg / h	kW	kg / h
0	0	1 180
3 000	0	3 400
6 000	0	5 610
9 000	0	7 830
12 000	0	10 000
14 200	812	15 000

A potência de atrito é

$$P_a = - A_1 \cdot L_1 \cdot m_{1M} = - 143 \text{ kW}$$

Colocando-se os valores das tabelas 3.2 e 3.3 num diagrama  $m_1 \times P$ , tem-se o campo de funcionamento da instalação.

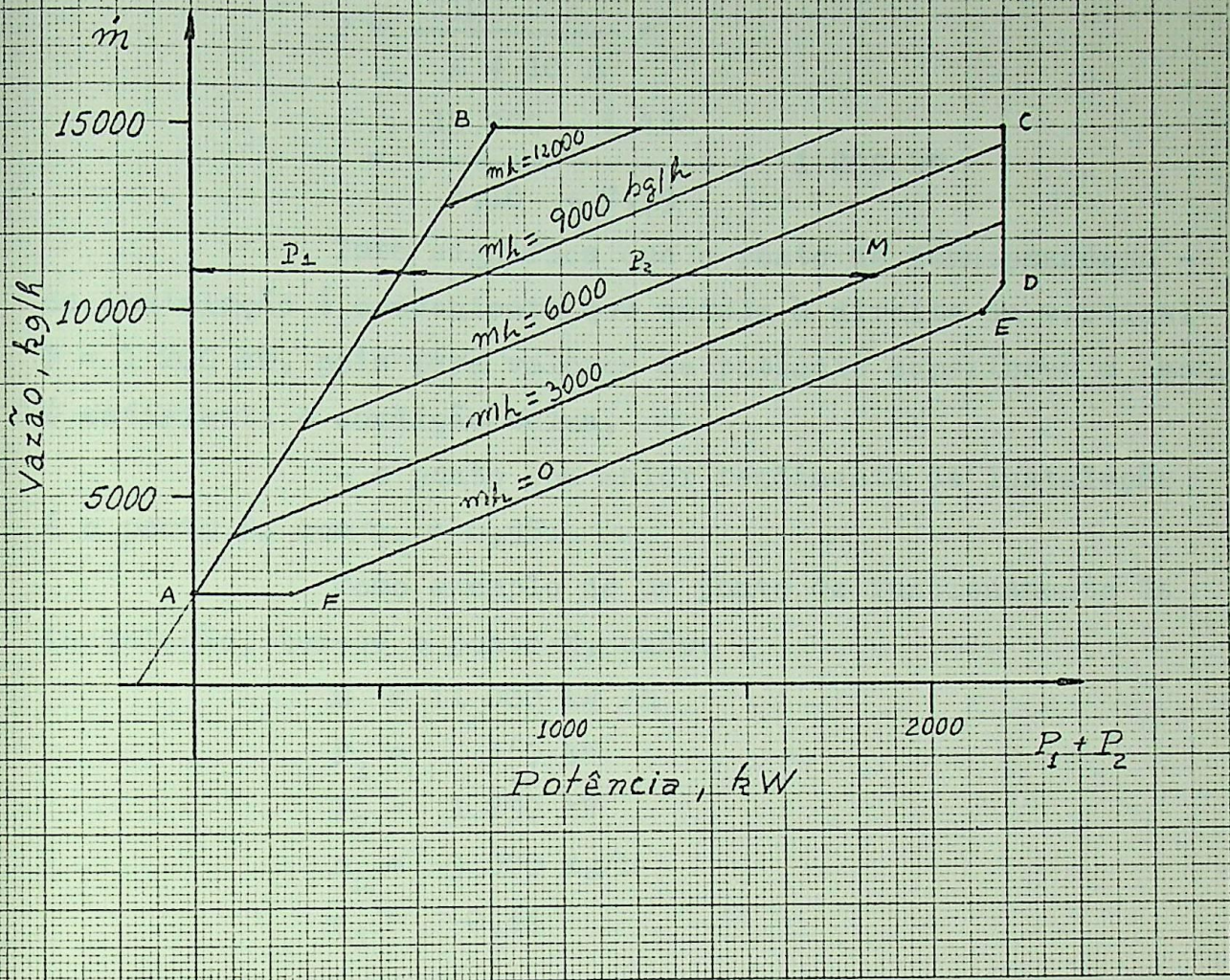


Figura 3.4. Campo de funcionamento da instalação do exemplo dado.

O campo de funcionamento da instalação mostra que:

- para um dado valor de potência constante, o campo de variação de  $m_h$  está limitado; quanto maior for  $P_M$ , tanto menor será o campo de variação de  $m_h$ ; no caso de  $P = P_M = 2\ 200\text{ kW}$ , o campo de variação é  $750 \leq m_h \leq 6\ 600\text{ kg/h}$ ;

- o maior campo de variação de  $m_h$  se dá na vertical que passa por B, onde  $P = 812\text{ kW}$ . O valor de  $m_h$  vai desde zero até  $14\ 200\text{ kg/h}$ , que é o seu máximo;

- segundo o critério a grosso modo indicado - pelo Prof. R. Bran,

$k = m_h / P_{el} < 10\text{ kg/kW/h}$  indica turbina a vapor de extração e condensação. Admitindo-se o rendimento do gerador  $\eta_g = 1$  e  $P_{el} = P$ , para  $m_1 = m_{1M}$  e  $m_h = 10 P$ ,

tem-se

$$P = \frac{m_{1M} - C}{A + 10 B} =$$
$$= \frac{15\ 000 - 1\ 180}{4,10 + 7,39} = 1\ 200 \text{ kW.}$$

Isto significa que o ponto de funcionamento - da instalação é conveniente que esteja à direita da vertical  $P = 1\ 200 \text{ kW}$ , pois para valores de potência superiores a esse, é satisfeita a condição acima.

- o ponto com maior rendimento da instalação é o ponto B, com  $\eta_i = 0,95$ .

Como exemplo de um ponto de funcionamento da instalação, tem-se o ponto M, onde:

$$m = 11\ 000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 = 560 \text{ kW}$$

$$P_2 = 1\ 290 \text{ kW}$$

$$m_h = 3\ 000 \text{ kg/h}$$

$$\eta_i = 0,44$$

## 3.2. TURBINAS COM DUAS EXTRAÇÕES

Dentro das hipóteses feitas no item 3.1.3, serão desenvolvidas as equações para o campo de funcionamento de uma instalação industrial com turbina a vapor de duas extrações. Será usada a mesma simbologia, exceto nos índices - que terão as modificações:

- 1 - parte de alta pressão
- 2 - parte de média pressão
- 3 - parte de baixa pressão

### 3.2.1. ESQUEMA SIMPLIFICADO

A figura 3.5 representa o esquema simplificado de tal tipo de instalação, onde aparece somente a turbina. Esta, por sua vez, está dividida em tres partes: parte de alta pressão, de média pressão e de baixa pressão.

Note-se que, neste caso, a extração se dá em dois pontos, com pressões fixas, porém diferentes entre si. O sistema de regulagem, que mantém constante as pressões nos pontos de extração, não está representado na figura 3.5. O aumento do número de extrações torna o sistema de regulagem mais complexo. A vazão de vapor extraída em cada ponto é dada por  $m_{h1}$  e  $m_{h2}$ .

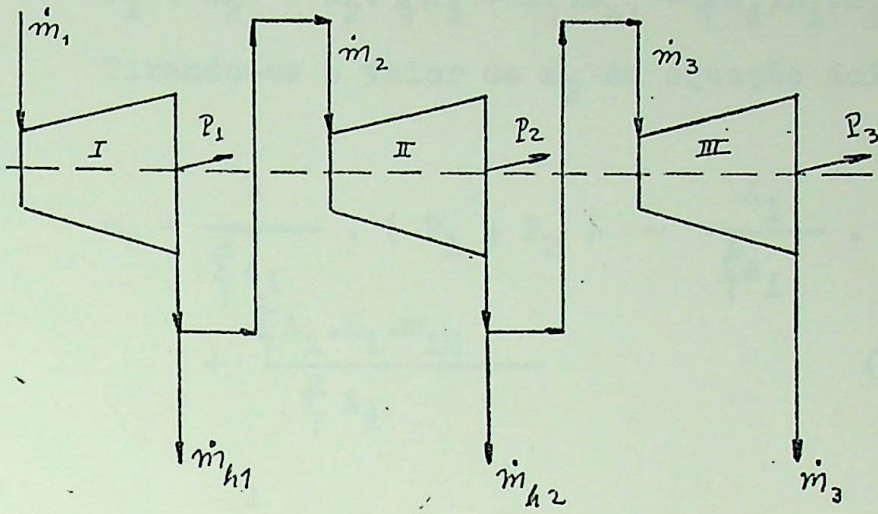


Figura 3.5. Esquema simplificado de uma turbina industrial a vapor com duas extrações. I - parte de alta pressão; II - parte de média pressão; III - parte de baixa pressão.

3.2.2. EQUAÇÕES GERAIS

Aplicando-se a equação ( 3.1 ) às partes 1, 2 e 3 da turbina tem-se

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} + \frac{1}{A_1} \cdot P_1$$

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} + \frac{1}{A_2} \cdot P_2$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} + \frac{1}{A_3} \cdot P_3$$

Tirando-se  $P_1$  e  $P_2$  das duas primeiras equações tem-se

$$P_1 = A_1 \cdot ( m_1 - L_1 \cdot m_{1M} )$$

$$P_2 = A_2 \cdot ( m_2 - L_2 \cdot m_{2M} )$$

Como

$$m_1 = m_{h1} + m_2$$

$$m_3 = m_2 - m_{h2}$$

somando  $P_1$  com  $P_2$  resulta:

$$P_1 + P_2 = m_2 \cdot \sum_1^z A_i - A_1 \cdot m_{h1} - \sum_1^z A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}$$

Tirando-se o valor de  $m_2$  da equação acima, resulta:

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1^z A_i} \cdot ( P_1 + P_2 ) - \frac{A_1}{\sum_1^z A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1^z A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^z A_i} \quad ( 3.6 )$$

e, também,

$$m_2 = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + m_{h2} + L_3 \cdot m_{3M} \quad ( 3.7 )$$

Com as equações ( 3.6 ) e ( 3.7 ), pode-se traçar o campo de funcionamento de uma instalação industrial com turbina a vapor de duas extrações. Dentre as muitas possibilidades, pode-se fazer a representação gráfica em dois diedros, conforme se vê no item seguinte.

### 3.2.3. CAMPO DE FUNCIONAMENTO

A representação gráfica do campo de funcionamento de uma instalação industrial com turbina a vapor de duas extrações pode ser feita em dois diedros, com o auxílio das equações ( 3.6 ) e ( 3.7 ). Para o eixo das ordenadas toma-se  $m_2$ . No primeiro diedro, representa-se o consumo de vapor  $m_2$  em função da soma de potências  $P_1$  e  $P_2$ , como abscissas, para diferentes valores de  $m_{h1}$ .

No segundo diedro, representa-se o consumo de vapor  $m_2$  em função de  $P_3$ , para diferentes valores de  $m_{h2}$ . A equação ( 3.6 ) é aplicável ao primeiro diedro, e a equação ( 3.7 ), ao segundo diedro.

A figura 3.6 mostra a representação gráfica do campo de funcionamento de tal tipo de instalação.

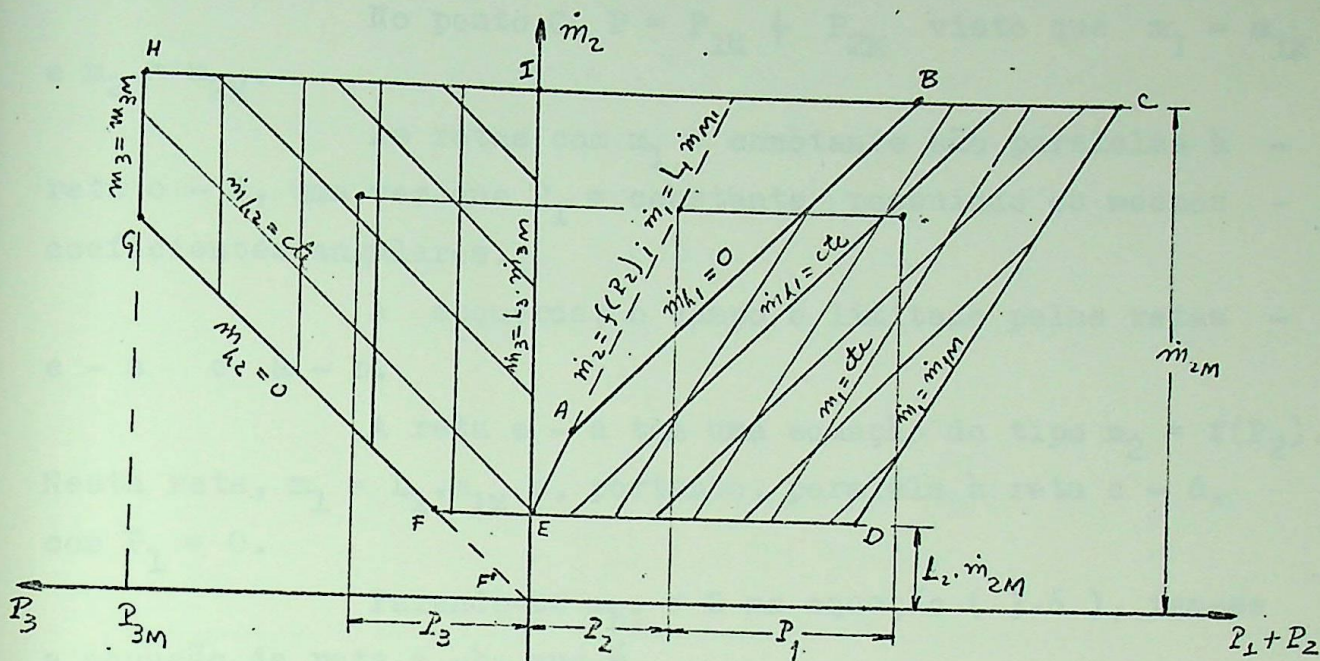


Figura 3.6. Campo de funcionamento de uma instalação a vapor com turbina a vapor de duas extrações.

No primeiro diedro o campo é formado por segmentos de retas que formam o polígono a, b, c, d, e.

O campo tem para limite superior a reta b - c, de vazão  $\dot{m}_2$  máxima, onde

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_{2M}$$

Para limite inferior, tem-se a reta de vazão

$\dot{m}_2$  mínima, reta d - e, com

$$\dot{m}_2 = L_2 \cdot \dot{m}_{2M}$$

À direita, o campo tem para limite a reta c-d, com  $\dot{m}_1 = \dot{m}_{1M}$ , uma vez que os maiores valores de  $P_1 + P_2$  só são atingidos para  $\dot{m}_{1M}$ . Com  $\dot{m}_1 = \dot{m}_{1M}$  a potência  $P_1$  é máxima, ou seja,  $P_1 = P_{1M}$ , e a ordenada  $\dot{m}_2$  é função apenas de  $P_2$  e  $\dot{m}_{h1}$ , uma vez que  $P_1$  é constante. A equação dessa reta é, portanto,

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot P_2 - \frac{A_1}{\sum_1 A_i} \cdot m_{hl} + \frac{P_{1M} + \sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

No ponto C,  $P = P_{1M} + P_{2M}$  visto que  $m_1 = m_{1M}$  e  $m_2 = m_{2M}$ .

As retas com  $m_1 =$  constante são paralelas à reta c - d, uma vez que  $P_1 =$  constante possuindo os mesmos coeficientes angulares.

À esquerda, o campo é limitado pelas retas e - a e a - b.

A reta e - a tem uma equação do tipo  $m_2 = f(P_2)$ . Nesta reta,  $m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$  e, portanto, paralela à reta c - d, com  $P_1 = 0$ .

Fazendo-se  $m_{hl} = 0$  na equação ( 3.6 ), tem-se a equação da reta a - b, que é

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot ( P_1 + P_2 ) + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

A intersecção das retas  $m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$  e  $m_{hl} = 0$  resulta o ponto A.

As retas  $m_{hl} =$  constante são paralelas à reta a - b. O máximo valor de  $m_{hl}$  se dá no ponto D, onde

$$m_{hl} = m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}$$

No segundo diedro, o campo é formado também - por segmentos de retas que formam o polígono e, f, g, h, i, e.

O campo tem os mesmos limites superior e inferior que o do primeiro diedro, ou seja,

$$m_2 = m_{2M} \text{ e}$$

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M}$$

Como limite à esquerda tem-se a vertical g - h, onde  $P_3 = P_{3M}$ . Neste caso,  $m_3 = m_{3M}$ . As retas com  $m_3 =$  constante são paralelas à reta g - h, isto é, são verticais. A reta com  $m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$  tem  $P_3 = 0$ , sendo, portanto, coincidente com o eixo das ordenadas.

Finalmente, o campo é fechado pela reta  $m_{h2} = 0$ .

Fazendo-se  $m_{h2} = 0$  na equação ( 3.7 ) tem-se

$$m_2 = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + L_3 \cdot m_{3M}$$

As retas de  $m_{h2} = \text{constante}$  são paralelas à -  
 reta a - b, por possuírem o mesmo coeficiente angular. O máxi-  
 mo valor de  $m_{h2}$  se obtém no ponto I, onde

$$m_{h2M} = m_{2M} - L_3 \cdot m_{3M}$$

A tabela abaixo dá as coordenadas dos pontos -  
 dos polígonos.

Tabela 3.4. Coordenadas dos pontos do polígono do 1º diedro.

Ponto	$P_1 + P_2$	$m_2$
	kW	kg/h
a	$A_2 \cdot (L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M})$	$L_1 \cdot m_{1M}$
b	$m_{2M} \cdot \sum_1^2 A_i - \sum_1^2 A_i \cdot L_1 \cdot m_{iM}$	$m_{2M}$
c	$P_{1M} + P_{2M}$	$m_{2M}$
d	$P_{1M}$	$L_2 \cdot m_{2M}$
e	0	$L_2 \cdot m_{2M}$

Tabela 3.5. Coordenadas dos pontos dos polígono do 2º diedro.

Ponto	$P_3$	$m_2$
	kW	kg/h
f	$A_3 \cdot (L_2 \cdot m_{2M} - L_3 \cdot m_{3M})$	$L_2 \cdot m_{2M}$
g	$P_{3M}$	$\frac{1}{A_3} \cdot P_{3M} + L_3 \cdot m_{3M}$
h	$P_{3M}$	$m_{2M}$
i	0	$m_{2M}$

sendo

$$P_{1M} = A_1 \cdot m_{1M} \cdot (1 - L_1)$$

$$P_{2M} = A_2 \cdot m_{2M} \cdot (1 - L_2)$$

$$P_{3M} = A_3 \cdot m_{3M} \cdot (1 - L_3)$$

Apresenta-se, a seguir, as equações das retas - que formam o polígono, com suas principais características:

reta a - b

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot (P_1 + P_2) + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

$$m_1 = m_2$$

$$m_{h1} = 0$$

reta b - c

$$m_2 = m_{2M}$$

$$m_1 = m_{2M} + m_{h1}$$

reta c - d

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot (P_{1M} + P_2) - \frac{A_1}{\sum_1 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

$$m_1 = m_{1M}$$

$$m_{h1} = m_{1M} - m_2$$

reta d - e

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M}$$

$$m_1 = L_2 \cdot m_{2M} + m_{h2}$$

reta e - a

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot P_2 - \frac{A_1}{\sum_1 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i}$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

$$m_{h1} = L_1 \cdot m_{1M} - m_2$$

reta e - f

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M}$$

reta f - g

$$m_2 = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + L_3 \cdot m_{3M}$$

reta g - h

$$P_3 = P_{3M}$$

$$m_3 = m_{3M}$$

reta h - i

$$m_2 = m_{2M}$$

### 3.2.4. RENDIMENTO DA INSTALAÇÃO

O rendimento da instalação é dada por

$$\begin{aligned} \eta_i &= P_t / Q = \\ &= \frac{P_1 + P_2 + P_3 + m_{h1} \cdot h_{h1} + m_{h2} \cdot h_{h2}}{m_1 \cdot h_1} = \\ &= \frac{\sum_1^2 P + \sum_1^2 m_{hi} \cdot h_{hi}}{m_1 \cdot h_1} \end{aligned}$$

Sendo

$$P_1 + P_2 = f_1 ( m_2, m_{h1} )$$

$$P_3 = f_2 ( m_2, m_{h2} )$$

e

$$m_1 = m_2 + m_{h1}$$

conclue-se que

$$\eta_i = f_3 ( m_2, m_{h1}, m_{h2} )$$

O rendimento da instalação deve ser calculado em cada ponto de operação da instalação visto que o rendimento é função de três variáveis independentes.

### 3.2.5. ANÁLISE DO CAMPO DE FUNCIONAMENTO

Tendo em vista que o rendimento da instalação é função de três variáveis, torna-se mais difícil, sob este aspecto, a locação do ponto de melhor rendimento. No entanto, a opção pode ser feita para maiores valores de  $m_{h1}$  e  $m_{h2}$ . Note-se, no entanto, que, para uma potência da instalação constante, aumentando-se  $m_{h1}$ , decresce  $m_{h2}$ , e vice-versa.

### 3.2.6. APLICAÇÃO

Considere-se uma instalação a vapor industrial com turbina de duas extrações, com os seguintes elementos:

Parte de alta pressão 1 :

$$p_1 = 30 \text{ bar}$$

$$t_1 = 425 \text{ C}$$

$$\eta_1 = 0,60$$

$$m_{1M} = 15 \text{ 000 kg / h}$$

$$L_1 = 0,15$$

Parte de média pressão 2 :

$$p_2 = 9 \text{ bar}$$

$$\eta_2 = 0,70$$

$$m_{2M} = 13 \text{ 000 kg / h}$$

$$L_2 = 0,12$$

Parte de baixa pressão 3 :

$$p_3 = 2,5 \text{ bar}$$

$$\eta_3 = 0,80$$

$$m_{3M} = 10 \text{ 000 kg / h}$$

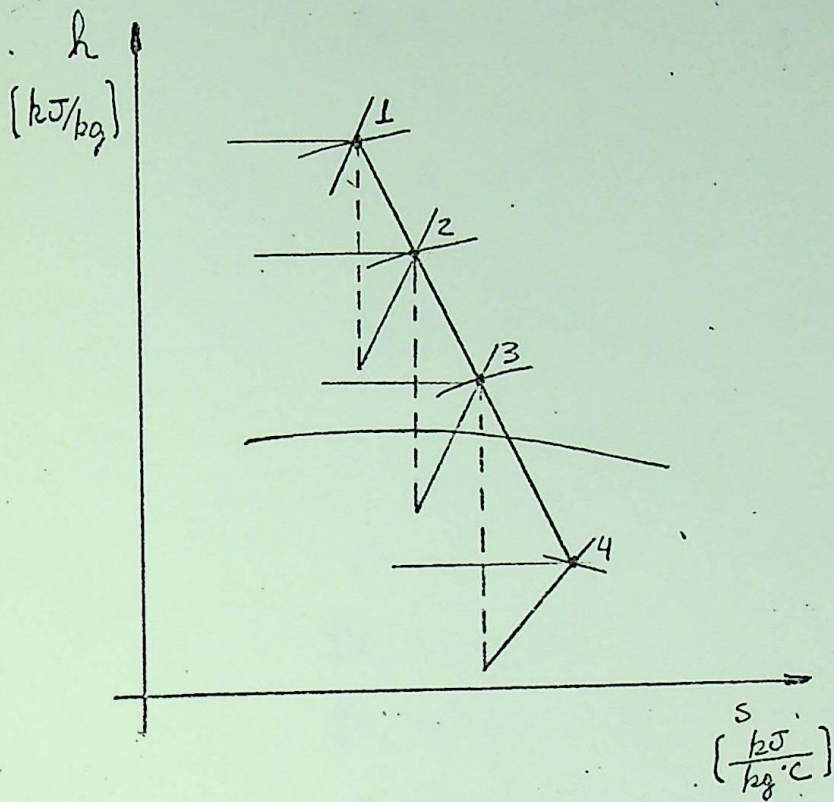
$$L_3 = 0,08$$

Descarga

$$p_4 = 0,1 \text{ bar}$$

rotação: constante

Solução



Do diagrama de Mollier tira-se:

para  $p_1 = 30$  bar e  $t_1 = 425$  C,  $h_1 = 3\ 285$  kJ/kg

para  $p_2 = 9$  bar e  $s_2 = s_1$ ,  $h_{2s} = 2\ 960$  kJ/kg

então,

$$h_2 = h_1 - \eta_1 \cdot (h_1 - h_{2s}) = 3\ 090 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_1 = h_1 - h_{2s} = 325 \text{ kJ/kg}$$

para  $p_3 = 2,5$  bar e  $s_{3s} = s_2$ ,  $h_{3s} = 2\ 790$  kJ/kg

então,

$$h_3 = h_2 - \eta_2 \cdot (h_2 - h_{3s}) = 2\ 880 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_2 = h_2 - h_{3s} = 300 \text{ kJ/kg}$$

para  $p_4 = 0,1$  bar e  $s_{4s} = s_3$ ,  $h_{4s} = 2\ 360$  kJ/kg

$$h_3 - h_{4s} = 520 \text{ kJ/kg}$$

$$h_4 = h_3 - \eta_3 \cdot (h_3 - h_{4s}) = 2\ 460 \text{ kJ/kg}$$

Cálculo de todos os parâmetros

$$A_1 = \frac{\Delta h_1 \cdot \eta_1}{3600(1 - L_1)} = \frac{325 \times 0,60}{3600(1 - 0,15)} = 0,0637$$

$$A_2 = \frac{\Delta h_2 \cdot \eta_2}{3600 (1 - L_2)} =$$

$$= \frac{300 \times 0,70}{3600 (1 - 0,12)} = 0,0663$$

$$A_3 = \frac{\Delta h_3 \cdot \eta_3}{3600 (1 - L_3)} =$$

$$= \frac{520 \times 0,80}{3600 (1 - 0,08)} = 0,126$$

$$\sum_1^2 A_i = 0,130$$

$$\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 247$$

A equação que comanda o campo de funcionamento no primeiro diedro é

$$m_2 = 7,70 (P_1 + P_2) - 0,490 m_{h1} + 1900$$

e para o segundo diedro é

$$m_2 = 7,96 P_3 + m_{h2} + 800$$

### Cálculo das coordenadas e demais características dos pontos

ponto a

$$m_2 = L_1 \cdot m_{1M} = 2\,250 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = 45,7 \text{ kW}$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 2\,250 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 0$$

ponto b

$$m_2 = m_{2M} = 13\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = m_{2M} \cdot \sum_1^2 A_i - \sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 1\,440 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{2M} = 13\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 0$$

ponto c

$$m_2 = m_{2M} = 13\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = P_{1M} + P_{2M} = 1\,570 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{1M} = 15\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 2\,000 \text{ kg/h}$$

ponto d

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 1\,560 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = 813 \text{ kW}$$

$$P_2 = 0$$

$$m_1 = m_{1M} = 15\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 13\,400 \text{ kg/h}$$

ponto e

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 1\,560 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = 0$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 2\,250 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 690 \text{ kg/h}$$

ponto f

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 1\,560 \text{ kg/h}$$

$$P_3 = A_3 (L_2 \cdot m_{2M} - L_3 \cdot m_{3M}) = 95,5 \text{ kW}$$

$$m_{h2} = 0$$

ponto g

$$m_2 = m_{3M} = 10\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_3 = P_{3M} = 1\,160 \text{ kW}$$

$$m_3 = m_{3M} = 10\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h2} = 0$$

ponto h

$$m_3 = m_{3M} = 10\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_2 = m_{2M} = 13\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_3 = P_{3M} = 1\,160 \text{ kW}$$

$$m_{h2} = 3\,000 \text{ kg/h}$$

ponto i

$$m_2 = m_{2M} = 13\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} = 800 \text{ kg/h}$$

$$P_3 = 0$$

$$m_{h2} = 12\,200 \text{ kg/h}$$

A tabela abaixo fornece as coordenadas dos pontos.

Tabela 3.6. Coordenadas dos pontos

Ponto	$P_1 + P_2$	$P_3$	$m_2$
	kW	kW	kg/h
a	45,7	-	2 250
b	1 440	-	13 000
c	1 570	-	13 000
d	813	-	1 560
e	0	-	1 560
f	-	95,5	1 560
g	-	1 160	10 000
h	-	1 160	13 000
i	-	0	13 000

Levando-se esses valores num diagrama  $m_2$  x  $P_1 + P_2$  x  $P_3$ , tem-se a figura abaixo. As retas  $m_{h1} = \text{const}$  - tante foram traçadas com intervalo de 3 000 kg/h e as retas-  
 $m_{h2} = \text{constante}$ , com intervalo de 2 000 kg/h.

Analisando-se o campo de funcionamento da instalação pode-se concluir que:

- a maior variação de  $m_{h1}$  se dá na vertical - que passa por D;
- no segundo diedro não existe uma vertical que contenha os valores máximo e mínimo de  $m_{h2}$ . A vertical que passa por F tem o mínimo e o eixo das ordenadas o máximo valor de  $m_{h2}$ .
- para um dado valor de potência total, existe uma infinidade de combinações de  $m_{h1}$  e  $m_{h2}$  que satisfaz o estado de funcionamento para um valor de potência da instalação constante.

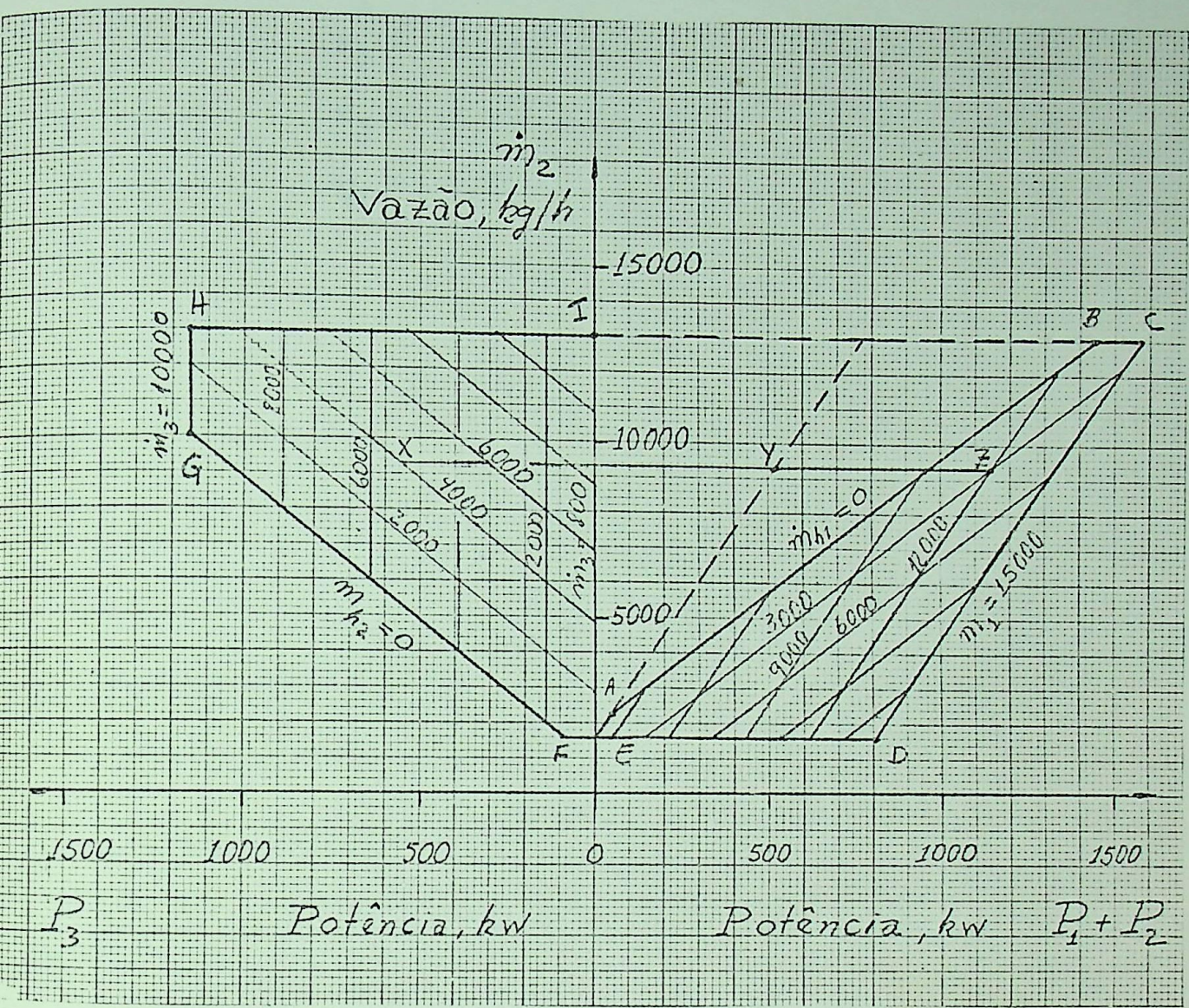


Figura 3.7. Campo de funcionamento da instalação do exemplo dado.

- o valor máximo de  $m_{h1}$  se dá no ponto d que está na horizontal  $m_2 = L_2 \cdot m_{2M}$  e o máximo valor de  $m_{h2}$  se dá no ponto I sobre a vertical  $m_2 = m_{2M}$ .

Os pontos X e Y são a representação de um estado de funcionamento da instalação. Para este estado tem-se:

- $P_1 = 520 \text{ kW}$
- $P_2 = 630 \text{ kW}$
- $P_3 = 560 \text{ kW}$
- $m_{h1} = 3 \text{ 000 kg/h}$
- $m_{h2} = 4 \text{ 000 kg/h}$

$$m_1 = 12\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_2 = 9\ 270\ \text{kg/h}$$

$$m_3 = 5\ 300\ \text{kg/h}$$

$$\eta_i = 0,68$$

## C A P Í T U L O 4

### DIAGRAMAS DE EXTRAÇÃO PARA TURBINAS INDUSTRIAIS A VÁPOR COM UM NÚMERO $n$ DE EXTRAÇÕES

Continuando com as hipóteses feitas no capítulo anterior, desenvolver-se-á, neste, uma generalização para a construção de diagramas de extração para turbinas industriais a vapor com  $n$  extrações.

#### 4.1. TURBINAS COM TRÊS EXTRAÇÕES

Considere-se o caso de uma turbina industrial com três extrações, divide-se a turbina em quatro secções e chame-se  $m_1$  a vazão horária em massa de vapor que entra na turbina, ou seja, que atravessa a primeira secção;  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  a vazão horária em massa que atravessa, respectivamente, a segunda, terceira e quarta secções;  $m_{h1}$ ,  $m_{h2}$  e  $m_{h3}$  a vazão horária em massa de vapor extraído, respectivamente, após a primeira, segunda e terceira secções;  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  as potências das primeira, segunda, terceira e quarta secções, respectivamente.

O esquema abaixo representa, simplificada, tal tipo de turbina. Como já se disse, para o caso de turbina com duas extrações, esse esquema não apresenta o sistema de regulação, e tal representação é feita apenas para tornar este estudo mais claro.

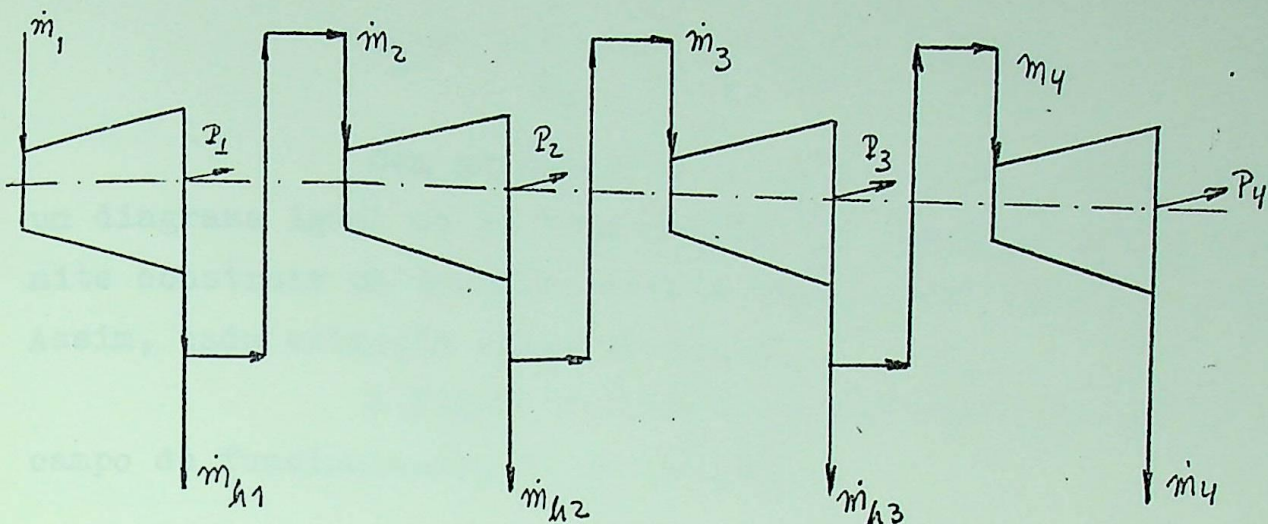


Figura 4.1. Esquema simplificado de uma turbina industrial a vapor com três extrações.

#### 4.2. EQUAÇÕES GERAIS

O diagrama da instalação para três extrações é constituído dos dois diedros para duas extrações e mais um diedro para a terceira.

Para o caso de duas extrações, as equações são:

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1 A_i} \cdot (P_1 + P_2) - \frac{A_1}{\sum_1 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1 A_i} \quad (4.1)$$

$$m_2 = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + m_{h2} + L_3 \cdot m_{3M} \quad (4.2)$$

Para a terceira extração, acrescenta-se a equação

$$m_4 = \frac{1}{A_4} \cdot P_4 + L_4 \cdot m_{4M}$$



As equações das retas para o terceiro diedro são:

reta k - l

$$m_3 = m_{3M}$$

reta l - n

$$m_4 = m_{4M}$$

$$P_4 = P_{4M} = A_4 \cdot m_{4M} \cdot (1 - L_4)$$

reta n - q

$$m_3 = P_4 / A_4 + L_4 \cdot m_{4M}$$

$$m_{h3} = 0$$

reta q - j

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$$

As coordenadas dos pontos para o terceiro diedro são:

ponto k

$$m_3 = m_{3M}$$

$$P_4 = 0$$

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M}$$

$$m_{h3} = m_{h3M} = m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M}$$

ponto l

$$m_3 = m_{3M}$$

$$P_4 = P_{4M}$$

$$m_4 = m_{4M}$$

$$m_{h2} = m_{3M} - m_{4M}$$

ponto n

$$m_3 = P_{4M} / A_4 + L_4 \cdot m_{4M}$$

$$P_4 = P_{4M}$$

$$m_4 = m_{4M}$$

$$m_{h3} = 0$$

ponto q

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$$

$$P_4 = A_4 \cdot (L_3 \cdot m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M})$$

$$m_4 = m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$$

$$m_{h3} = 0$$

ponto j

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$$

$$P_4 = 0$$

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M}$$

$$m_{h3} = L_3 \cdot m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M}$$

Tem-se na tabela abaixo as coordenadas desses pontos.

Tabela 4.1. Coordenadas dos pontos do polígono terceiro diedro.

Ponto	$m_3$ kg/h	$P_4$ kW
j	$L_3 \cdot m_{3M}$	0
k	$m_{3M}$	0
l	$m_{3M}$	$P_{4M}$
n	$P_{4M} / A_4 + L_4 \cdot m_{4M}$	$P_{4M}$
q	$L_3 \cdot m_{3M}$	$A_4 (L_3 \cdot m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M})$

## 4.3. TURBINA COM QUATRO EXTRAÇÕES

Considere-se, agora, o caso de uma turbina industrial com quatro extrações.

Para as primeira e segunda extrações, considere-se as equações ( 4.1 ) e ( 4.2 ) e a representação gráfica como se fosse apenas duas extrações.

Para as outras duas extrações segue, abaixo, a dedução das equações.

Como

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} + P_3 / A_3$$

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M} + P_4 / A_4$$

resulta

$$P_3 = A_3 \cdot ( m_3 - L_3 \cdot m_{3M} )$$

$$P_4 = A_4 \cdot ( m_4 - L_4 \cdot m_{4M} )$$

Somando-se  $P_3$  com  $P_4$  vem

$$P_3 + P_4 = A_3 \cdot ( m_3 - L_3 \cdot m_{3M} ) + A_4 \cdot ( m_4 - L_4 \cdot m_{4M} )$$

Como

$$m_3 = m_4 + m_{h3}$$

vem

$$P_3 + P_4 = (A_3 + A_4) \cdot m_4 + A_3 \cdot m_{h3} - \sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}$$

donde

$$m_4 = \frac{1}{\sum_3^4 A_i} \cdot ( P_3 + P_4 ) - \frac{A_3}{\sum_3^4 A_i} \cdot m_{h3} + \frac{\sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_3^4 A_i} \quad ( 4.4 )$$

Sendo

$$m_5 = L_5 \cdot m_{5M} + P_5 / A_5$$

e

$$m_5 = m_4 - m_{h4}$$

resulta



Em resumo, as equações das retas e suas principais características são:

Primeiro e segundo diedros:

$$\frac{\text{reta } a_1 - b_1}{m_2} = \frac{\sum_1^2 P_i}{\sum_1^2 A_i} + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$m_1 = m_2$$

$$m_{h1} = 0$$

$$\frac{\text{reta } b_1 - c_1}{m_2} = m_{2M}$$

$$\frac{\text{reta } c_1 - d_1}{m_2} = \frac{1}{\sum_1^2 A_i} \cdot (P_{1M} + P_2) - \frac{\sum_1^2 A_1}{\sum_1^2 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$m_1 = m_{1M}$$

$$\frac{\text{reta } d_1 - e_1}{m_2} = L_2 \cdot m_{2M}$$

$$\frac{\text{reta } e_1 - a_1}{m_2} = \frac{1}{\sum_1^2 A_i} \cdot P_2 - \frac{A_1}{\sum_1^2 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M}$$

$$\frac{\text{reta } e_1 - f_1}{m_2} = L_2 \cdot m_{2M}$$

$$\frac{\text{reta } f_1 - g_1}{m_2} = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + L_3 \cdot m_{3M}$$

$$m_{h2} = 0$$

$$\frac{\text{reta } g_1 - h_1}{m_3} = m_{3M}$$

$$P_3 = P_{3M} = A_3 \cdot m_{3M} \cdot (1 - L_3)$$

$$\underline{\text{reta } h_1 - i_1} \quad m_2 = m_{2M}$$

As coordenadas dos pontos para os primeiros -  
dois diedros são:

Tabela 4.2. Coordenadas dos pontos para o primeiro e o segundo diedros.

Ponto	$m_2$	$P_1 + P_2$	$P_3$
	kg/h	kW	kW
$a_1$	$L_1 \cdot m_{1M}$	$A_2 \cdot (L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M})$	-
$b_1$	$m_{2M}$	$m_{2M} \cdot \sum_i A_i - \sum_i A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}$	-
$c_1$	$m_{2M}$	$P_{1M} + P_{2M}$	-
$d_1$	$L_2 \cdot m_{2M}$	$P_{1M}$	-
$e_1$	$L_2 \cdot m_{2M}$	0	-
$f_1$	$L_2 \cdot m_{2M}$	-	$A_3 \cdot (L_2 \cdot m_{2M} - L_3 \cdot m_{3M})$
$g_1$	$m_{3M}$	-	$P_{3M}$
$h_1$	$m_{2M}$	-	$P_{3M}$
$i_1$	$m_{2M}$	-	0

Terceiro e quarto diedros:

$$\underline{\text{reta } a_2 - b_2} \quad m_4 = \frac{\sum_3^4 P_i}{\sum_3^4 A_i} + \frac{\sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_3^4 A_i}$$

$$m_3 = m_4$$

$$m_{h3} = 0$$

$$\underline{\text{reta } b_2 - c_2} \quad m_4 = m_{4M}$$

reta c<sub>2</sub> - d<sub>2</sub>

$$m_4 = \frac{1}{\sum_3 A_i} \cdot (P_{3M} + P_4) - \frac{A_3}{\sum_3 A_i} \cdot m_{h3} + \frac{\sum_3 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_3 A_i}$$

$$m_3 = m_{3M}$$

reta d<sub>2</sub> - e<sub>2</sub>

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M}$$

reta e<sub>2</sub> - a<sub>2</sub>

$$m_4 = \frac{1}{\sum_3 A_i} \cdot P_4 - \frac{A_3}{\sum_3 A_i} \cdot m_{h3} + \frac{\sum_3 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_3 A_i}$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M}$$

reta e<sub>2</sub> - f<sub>2</sub>

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M}$$

reta f<sub>2</sub> - g<sub>2</sub>

$$m_4 = \frac{1}{A_5} \cdot P_5 + L_5 \cdot m_{5M}$$

$$m_{h4} = 0$$

reta g<sub>2</sub> - h<sub>2</sub>

$$m_5 = m_{5M}$$

$$P_5 = P_{5M} = A_5 \cdot m_{5M} \cdot (1 - L_5)$$

reta h<sub>2</sub> - i<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{4M}$$

As coordenadas dos pontos para os dois segundos diedros são:

Tabela 4.3. Coordenadas dos pontos para o terceiro e o quarto diedros.

Ponto	$m_4$	$P_3 + P_4$	$P_5$
	kg/h	kW	kW
$a_2$	$L_3 \cdot m_{3M}$	$A_4 \cdot (L_3 \cdot m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M})$	-
$b_2$	$m_{4M}$	$m_{4M} \cdot \frac{4}{3} \sum A_i - \sum A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}$	-
$c_2$	$m_{4M}$	$P_{3M} + P_{4M}$	-
$d_2$	$L_4 \cdot m_{4M}$	$P_{3M}$	-
$e_2$	$L_4 \cdot m_{4M}$	0	-
$f_2$	$L_4 \cdot m_{4M}$	-	$L_5 \cdot (L_4 \cdot m_{4M} - L_5 \cdot m_{5M})$
$g_2$	$m_{5M}$	-	$P_{5M}$
$h_2$	$m_{4M}$	-	$P_{5M}$
$i_2$	$m_{4M}$	-	0

## 4.4. TURBINA COM n EXTRAÇÕES

Considere-se, então, uma turbina industrial a vapor com  $n$  extrações.

Observando-se as equações (4.1), (4.2), (4.4) e (4.5), nota-se que elas são do tipo

$$m_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^k A_i} \cdot (P_{k-1} + P_k) - \frac{A_{k-1}}{\sum_{i=1}^k A_i} \cdot m_{h_{k-1}} + \frac{\sum_{i=1}^k A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_{i=1}^k A_i} \quad (4.5)$$

e

$$m_k = \frac{1}{A_{k+1}} \cdot P_{k+1} + m_{h_k} + L_{k+1} \cdot m_{k+1M} \quad (4.6)$$

Para uma turbina industrial a vapor com um número  $n$  par de extrações, ter-se-ão  $n$  equações, bastando fazer nas equações (4.5) e (4.6)  $k = 2, 4, \dots, n-2$ , construindo-se - para cada par de equações um diagrama de dois diedros, cuja ordenada seja  $m_k$  e abscissas  $P_{k-1} + P_k$  e  $P_{k+1}$ .

Para uma turbina industrial a vapor com um número  $n$  ímpar de extrações, ter-se-ão, também,  $n$  equações, fazendo  $k = 2, 4, \dots, n-3$ . A última equação será do tipo:

$$m_{k-1} = \frac{1}{A_k} \cdot P_k + m_{h_{k-1}} + L_k \cdot m_{kM} \quad (4.7)$$

Cada par de equações dará, também, um diagrama - com dois diedros à semelhança do que se disse para um número - par de extrações, e esta última equação (4.7) dará um diedro de ordenada  $m_{k-1}$  e abscissa  $P_k$ .

As equações das retas para um par de diedros que represente as extrações  $k$  e  $k-1$ , com  $k$  par, são dadas por:

$$\text{reta } a_{k-1} - b_{k-1} \quad m_k = \frac{\sum_{i=1}^k P_i}{\sum_{i=1}^k A_i} + \frac{\sum_{i=1}^k A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_{i=1}^k A_i}$$

$$m_{k-1} = m_k$$

$$m_{h_{k-1}} = 0$$

$$\underline{\text{reta } b_{k-1} - c_{k-1}} \quad m_k = m_{kM}$$

$$\underline{\text{reta } c_{k-1} - d_{k-1}}$$

$$m_k = \frac{1}{A_i} \cdot (P_{k-1M} - P_k) - \frac{A_{k-1}}{A_i} \cdot m_{h_{k-1}} - \frac{A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{A_i}$$

$$m_{k-1} = m_{k-1M}$$

$$\underline{\text{reta } d_{k-1} - e_{k-1}} \quad m_k = L_k \cdot m_{kM}$$

$$\underline{\text{reta } e_{k-1} - a_{k-1}}$$

$$m_k = \frac{1}{A_i} \cdot P_k - \frac{A_{k-1}}{A_i} \cdot m_{h_{k-1}} - \frac{A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{A_i}$$

$$m_{k-1} = L_{k-1} \cdot m_{k-1M}$$

$$\underline{\text{reta } e_{k-1} - f_{k-1}} \quad m_k = L_k \cdot m_{kM}$$

$$\underline{\text{reta } f_{k-1} - g_{k-1}} \quad m_k = \frac{1}{A_{k-1}} \cdot P_{k-1} - L_{k-1} \cdot m_{k-1M}$$

$$m_{h_k} = 0$$

$$\underline{\text{reta } g_{k-1} - h_{k-1}} \quad m_{k-1} = m_{k-1M}$$

$$P_{k-1} = P_{k-1M} = A_{k-1} \cdot m_{k-1M} \cdot (1 - L_{k-1})$$

$$\underline{\text{reta } h_{k-1} - i_{k-1}} \quad m_k = m_{kM}$$

As coordenadas dos pontos para cada par de -  
diedro são:

Tabela 4.4. Coordenadas dos pontos para um par de diedros.

Ponto	$m_k$	$P_{k-1} + P_k$
-	kg/h	kW
$a_{k-1}$	$L_{k-1} \cdot m_{k-1M}$	$A_k \cdot (L_{k-1} \cdot m_{k-1M} - L_k \cdot m_{kM})$
$b_{k-1}$	$m_{kM}$	$m_{kM} \cdot \sum_{i=1}^k A_i - \sum_{i=1}^k A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}$
$c_{k-1}$	$m_{kM}$	$P_{k-1M} + P_{kM}$
$d_{k-1}$	$L_k \cdot m_{kM}$	$P_{k-1M}$
$e_{k-1}$	$L_k \cdot m_{kM}$	0
Ponto	$m_k$	$P_{k+1}$
$e_{k-1}$	$L_k \cdot m_{kM}$	0
$f_{k-1}$	$L_k \cdot m_{kM}$	$A_{k+1} \cdot (L_k \cdot m_{kM} - L_{k+1} \cdot m_{k+1M})$
$g_{k-1}$	$m_{k+1M}$	$P_{k+1M}$
$h_{k-1}$	$m_{kM}$	$P_{k+1M}$
$i_{k-1}$	$m_{kM}$	0

sendo

$$P_{kM} = m_{kM} \cdot A_k \cdot (1 - L_k)$$

Se o número de extrações for ímpar, a última extração  $k$  dará um polígono formado por segmentos de retas cujas equações são:

reta  $k - 1$        $m_k = m_{kM}$

reta l - n

$$m_{k+1} = m_{k+1M}$$

$$P_{k+1} = P_{k+1M}$$

reta n - q

$$m_{h_k} = 0$$

$$m_k = \frac{1}{A_{k+1}} \cdot P_{k+1} + L_{k+1} \cdot m_{k+1M}$$

reta q - j

$$m_k = L_k \cdot m_{kM}$$

As coordenadas dos pontos desse diedro são:

Tabela 4.5. Coordenadas dos pontos do último diedro, para o caso de número de extrações ímpar e maior que 1.

Ponto	$m_h$	$P_{k+1}$
-	kg/h	kW
j	$L_k \cdot m_{kM}$	0
k	$m_{kM}$	0
l	$m_{kM}$	$P_{k+1M}$
n	$m_{k+1M}$	$P_{k+1M}$
q	$L_k \cdot m_{kM}$	$A_{k+1} \cdot (L_k \cdot m_{kM} - L_{k+1} \cdot m_{k+1M})$

Para n extrações, o rendimento da instalação é dada por

$$\eta_i = \frac{\sum_1^{n+1} P_i + \sum_1^n m_{hi} \cdot h_{hi}}{m_1 \cdot h_1}$$

## 4.5. APLICAÇÃO

Considere-se uma instalação a vapor com turbina industrial de quatro extrações, com os seguintes elementos:

Admissão:  $p_1 = 90 \text{ bar}$

$$t_1 = 500 \text{ C}$$

$$L_1 = 0,20$$

$$m_{1M} = 150\,000 \text{ kg/h}$$

Extração 1:  $p_2 = 25 \text{ bar}$

$$t_2 = 354 \text{ C}$$

$$L_2 = 0,15$$

$$m_{2M} = 130\,000 \text{ kg/h}$$

Extração 2:  $p_3 = 11,5 \text{ bar}$

$$t_3 = 275 \text{ C}$$

$$L_3 = 0,12$$

$$m_{3M} = 100\,000 \text{ kg/h}$$

Extração 3:  $p_4 = 4,5 \text{ bar}$

$$t_4 = 187 \text{ C}$$

$$L_4 = 0,10$$

$$m_{4M} = 70\,000 \text{ kg/h}$$

Extração 4:  $p_5 = 1,45 \text{ bar}$

$$x = 1,1 \%$$

$$L_5 = 0,08$$

$$m_{5M} = 50\,000 \text{ kg/h}$$

Condensação:  $p_6 = 0,1 \text{ bar}$

Cálculos

Do diagrama de Mollier tira-se:

$$\sum_1^2 A_i = A_1 + A_2 = 0,133$$

$$\sum_3^4 A_i = A_3 + A_4 = 0,102$$

$$\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 3\ 500$$

$$\sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 971$$

$$L_1 \cdot m_{1M} = 30\ 000$$

$$L_2 \cdot m_{2M} = 19\ 500$$

$$L_3 \cdot m_{3M} = 12\ 000$$

$$L_4 \cdot m_{4M} = 7\ 000$$

$$L_5 \cdot m_{5M} = 4\ 000$$

As equações que comandam os diedros são:

1º diedro:

$$m_2 = \frac{1}{\sum_1^2 A_i} \cdot (P_1 + P_2) - \frac{A_1}{\sum_1^2 A_i} \cdot m_{h1} + \frac{\sum_1^2 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_1^2 A_i}$$

$$m_2 = 7,54 (P_1 + P_2) - 0,654 m_{h1} + 26\ 400$$

2º diedro:

$$m_2 = \frac{1}{A_3} \cdot P_3 + m_{h2} + L_3 \cdot m_{3M}$$

$$m_2 = 19,2 P_3 + m_{h2} + 12\ 000$$

3º diedro:

$$m_4 = \frac{1}{\sum_3^4 A_i} \cdot (P_3 + P_4) - \frac{A_3}{\sum_3^4 A_i} \cdot m_{h3} + \frac{\sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM}}{\sum_3^4 A_i}$$

$$m_4 = 9,85 (P_3 + P_4) - 0,513 m_{h3} + 9\ 570$$

4º diedro:

$$m_4 = \frac{1}{A_5} \cdot P_5 + m_{h4} + L_5 \cdot m_{5M}$$

$$m_4 = 9,06 P_5 + m_{h4} + 4\ 000$$

As coordenadas dos pontos e demais características são:

Ponto a<sub>1</sub>

$$m_2 = L_1 \cdot m_{1M} = 30\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = A_2 \cdot (L_1 \cdot m_{1M} - L_2 \cdot m_{2M}) = 481 \text{ kW}$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 30\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 0$$

Ponto b<sub>1</sub>

$$m_2 = m_{2M} = 130\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = m_{2M} \cdot \sum_1 A_i - \sum_1 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 13\,700 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{2M} = 130\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = 0$$

Ponto c<sub>1</sub>

$$m_2 = m_{2M} = 130\,000 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = P_{1M} + P_{2M} = 15\,500 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{1M} = 150\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto d<sub>1</sub>

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 19\,500 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = P_{1M} = 10\,400 \text{ kW}$$

$$m_1 = m_{1M} = 150\,000 \text{ kg/h}$$

$$m_{h1} = m_{h1M} = 130\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto e<sub>1</sub>

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 19\,500 \text{ kg/h}$$

$$P_1 + P_2 = 0$$

$$m_1 = L_1 \cdot m_{1M} = 30\,000 \text{ kg/h}$$

Ponto f<sub>1</sub>

$$m_2 = L_2 \cdot m_{2M} = 19\,500 \text{ kg/h}$$

$$P_3 = A_3 \cdot (L_2 \cdot m_{2M} - L_3 \cdot m_{3M}) = 391 \text{ kW}$$

$$m_{h2} = 0$$

Ponto g<sub>1</sub>

$$m_2 = m_{3M} = 100\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 = P_{3M} = 4\ 590\ \text{kW}$$

$$m_3 = m_{3M} = 100\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h2} = 0$$

Ponto h<sub>1</sub>

$$m_2 = m_{2M} = 130\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 = P_{3M} = 4\ 590\ \text{kW}$$

$$m_3 = m_{3M} = 100\ 000\ \text{kW}$$

Ponto i<sub>1</sub>

$$m_2 = m_{2M} = 130\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 = 0$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} = 12\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h2} = m_{h2M} = 118\ 000\ \text{kg/h}$$

Tabela 4.6. Coordenadas dos pontos para o primeiro e o segundo diedros.

Ponto	$m_2$	$P_1 + P_2$	$P_3$
—	kg/h	kW	kW
a <sub>1</sub>	30 000	481	—
b <sub>1</sub>	130 000	13 700	—
c <sub>1</sub>	130 000	15 500	—
d <sub>1</sub>	19 500	10 400	—
e <sub>1</sub>	19 500	0	0
f <sub>1</sub>	19 500	—	391
g <sub>1</sub>	100 000	—	4 590
h <sub>1</sub>	130 000	—	4 590
i <sub>1</sub>	130 000	—	0

Ponto a<sub>2</sub>

$$m_4 = L_3 \cdot m_{3M} = 12\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 + P_4 = A_4 \cdot (L_3 \cdot m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M}) = 247\ \text{kW}$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} = 12\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h3} = 0$$

Ponto b<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{4M} = 70\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 + P_4 = m_{4M} \cdot \sum_3^4 A_i - \sum_3^4 A_i \cdot L_i \cdot m_{iM} = 6\ 130\ \text{kW}$$

$$P_4 = P_{4M} = 3\ 110\ \text{kW}$$

$$m_3 = m_{4M} = 70\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h3} = 0$$

Ponto c<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{4M} = 70\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 + P_4 = P_{3M} + P_{4M} = 7\ 700\ \text{kW}$$

$$m_3 = m_{3M} = 100\ 000\ \text{kg/h}$$

Ponto d<sub>2</sub>

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M} = 7\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 + P_4 = P_{3M} = 4\ 590\ \text{kW}$$

$$m_3 = m_{3M} = 100\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h3} = m_{h3M} = m_{3M} - L_4 \cdot m_{4M} = 93\ 000$$

Ponto e<sub>2</sub>

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M} = 7\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_3 + P_4 = 0$$

$$m_3 = L_3 \cdot m_{3M} = 12\ 000\ \text{kg/h}$$

Ponto f<sub>2</sub>

$$m_4 = L_4 \cdot m_{4M} = 7\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_5 = A_5 \cdot (L_4 \cdot m_{4M} - L_5 \cdot m_{5M}) = 331\ \text{kW}$$

Ponto g<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{5M} = 50\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_5 = P_{5M} = 5\ 080\ \text{kW}$$

$$m_5 = m_{5M} = 50\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h4} = 0$$

Ponto h<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{4M} = 70\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_5 = P_{5M} = 5\ 080\ \text{kW}$$

$$m_5 = m_{5M} = 50\ 000\ \text{kg/h}$$

Ponto i<sub>2</sub>

$$m_4 = m_{4M} = 70\ 000\ \text{kg/h}$$

$$P_5 = 0$$

$$m_5 = L_5 \cdot m_{5M} = 4\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h4} = m_{h4M} = 66\ 000\ \text{kg/h}$$

Tabela 4.7. Coordenadas dos pontos para o terceiro e o quarto diedros.

Ponto	$m_4$	$P_3 + P_4$	$P_5$
	kg/h	kW	kW
a <sub>2</sub>	12 000	247	-
b <sub>2</sub>	70 000	6 130	-
c <sub>2</sub>	70 000	7 700	-
d <sub>2</sub>	7 000	4 590	-
e <sub>2</sub>	7 000	0	0
f <sub>2</sub>	7 000	-	331
g <sub>2</sub>	50 000	-	5 080
h <sub>2</sub>	70 000	-	5 080
i <sub>2</sub>	70 000	-	0

O campo de funcionamento da instalação está representado na figura abaixo.

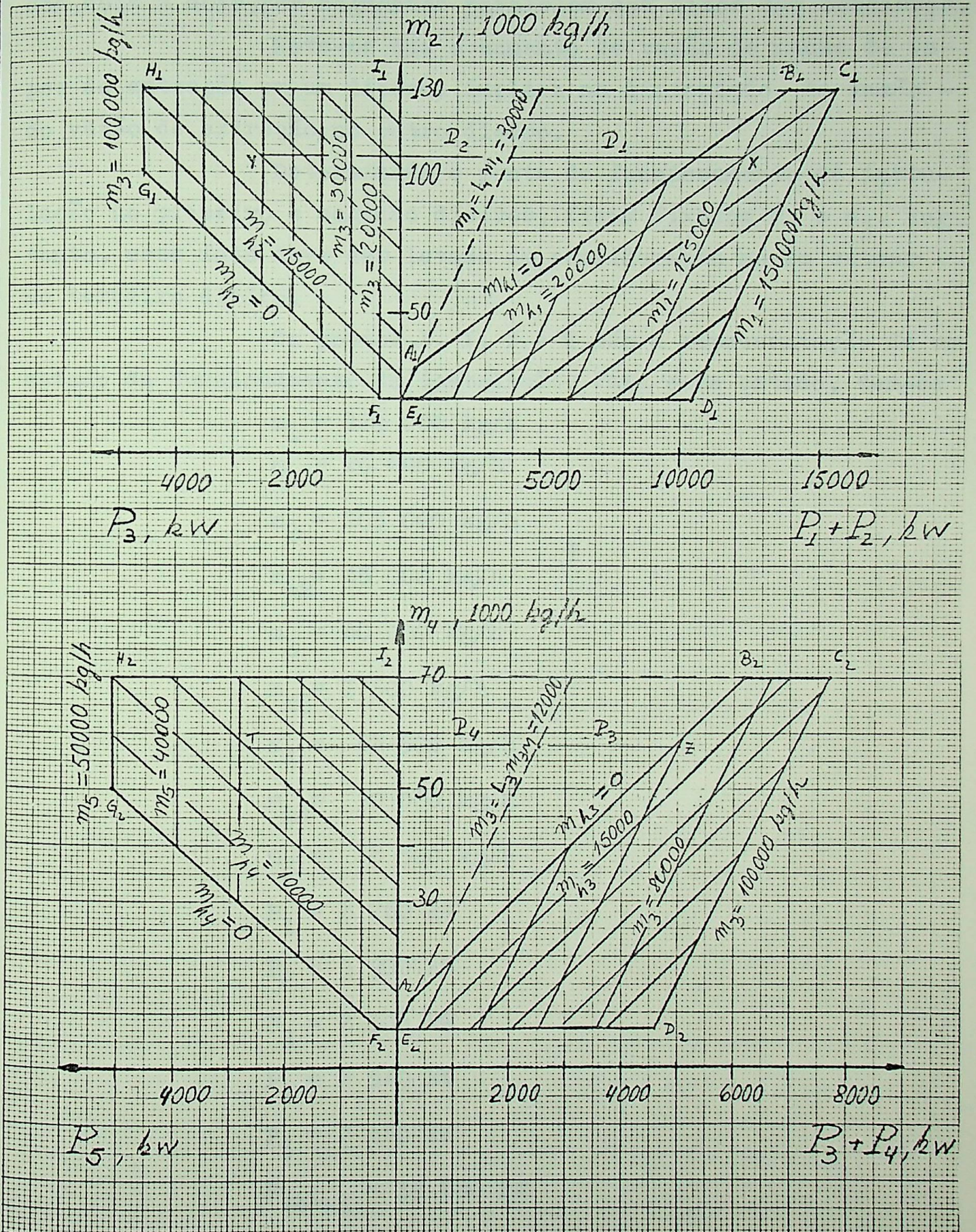


Figura 4.4. Campo de funcionamento da instalação do exemplo dado.

No exemplo dado, de uma instalação com turbina de quatro extrações, o estado de funcionamento da instalação é definido por quatro pontos, um em cada diedro. Os pontos são unidos, dois a dois, por segmentos paralelos aos eixos das abscissas.

Note-se que o aumento de vazão de massa de vapor de extração em um diedro, implica na diminuição da vazão de extração no outro diedro.

Determinado o ponto de funcionamento da instalação no primeiro e segundo diedros, ficam fixados  $P_3$  e  $m_3$ . Portanto, esse fato deve ser levado em consideração ao se entrar no terceiro diedro.

Os pontos X, Y, Z e T são a representação de um estado de funcionamento da instalação. Para este estado, tem-se

$$m_1 = 125\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h1} = 20\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_2 = 105\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h2} = 45\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_3 = 60\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_{h3} = 1\ 500\ \text{kg/h}$$

$$m_4 = 58\ 500\ \text{kg/h}$$

$$m_{h4} = 30\ 000\ \text{kg/h}$$

$$m_5 = 28\ 500\ \text{kg/h}$$

$$P_1 = 8\ 260\ \text{kW}$$

$$P_2 = 3\ 900\ \text{kW}$$

$$P_3 = 2\ 500\ \text{kW}$$

$$P_4 = 2\ 540\ \text{kW}$$

$$P_5 = 2\ 680\ \text{kW}$$

$$P_{\text{total}} = 19\ 880\ \text{kW}$$

$$\eta_i = \frac{19\ 880 + 78\ 150}{117\ 400} = 0,835 = 83,5\ \%$$

## C A P Í T U L O 5

### C O N C L U S ã O

Apresentou-se no capítulo anterior a generalização a que se propôs fazer dos diagramas de extração para turbinas industriais a vapor de várias extrações.

Conhecidas as condições na admissão, nos pontos de extrações e na descarga, pode-se calcular rapidamente os pontos do campo de funcionamento da instalação e traçá-lo.

Os diagramas de extração permitem uma visualização dos diversos estados em que podem funcionar a instalação.

Fica a sugestão, àqueles que por ela se interessarem, para um estudo sobre o rendimento desse tipo de instalação, e ver quais condições que devem ser satisfeitas para se optar por tal tipo de instalação, levando-se em conta as atuais condições brasileiras. Um outro trabalho interessante é sobre o sistema de regulagens, que nesses tipos de turbinas é bastante complexo. Há um artigo de R.Uram, publicado na revista Power, sobre a utilização de computador no sistema de regulagem de uma turbina.

## B I B L I O G R A F I A

1. BRAN, R. Importância das Turbinas Industriais a Vapor e sua Aplicação no Brasil. São José dos Campos, Ita Engenharia, - Vol. 3, nº 6, 1972.
2. BRAN, R. Introdução ao Cálculo Termodinâmico das Turbinas a Vapor. Itajubá, EFEI, 1970.
3. BRAN, R. Turbomáquinas. São José dos Campos, ITA, 1972.
4. BRAN, R. e SOUZA, Z. Máquinas Térmicas de Fluxo. Itajubá, EFEI, 1973.
5. CHURCH, E.F. Turbinas de Vapor. Buenos Aires, Libreria Y - Editorial Alsina, 1955.
6. DUBBEL, H. Manual Del Constructor de Máquinas. Barcelona, - Editorial Labor S.A., 1969.
7. EGGENBERGER, M.A. e IPSEN, P.G. The Control System of a - 225 000 kW Double-Automatic Extraction Steam Turbine and Related Reducing Stations. ASME, Journal of Engineering for - Power, April, 1959.

8. ELLIOTT Multivalve Turbines. Bulletin H-37. USA, Carrier - Corporation, 1973.
9. FAIRES, V.M. Termodinâmica. Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico S.A., 1966.
10. LYLE, O. The Efficient Use of Steam. London, Her Majesty's Stationery Office, 1968.
11. MARQUES, I.N. Termodinâmica Técnica. Rio de Janeiro, Editora Científica, 1969.
12. MARQUES, I.N. Turbinas a Vapor. Rio de Janeiro, Editora Científica, 1956.
13. REVISTAS ASME - Journal of Engineering for Power.
14. REVISTAS MECHANICAL ENGINEERING
15. REVISTAS CHEMICAL ENGINEERING
16. REVISTAS POWER
17. SHLYAKHIN, P. Steam Turbines. Moscow, Foreign Languages - Publishing House.
18. SOUZA, Z. de Comportamento das Turbinas a Vapor Industriais de Extração. São José dos Campos, Ita Engenharia, Vol.3, nº 8, 1972.
19. SOUZA, Z. de Consequências Energéticas do II Princípio da Termodinâmica. Itajubá, EFEI, 1969.
20. SOUZA, Z. de Instalações de Potência a Vapor. Itajubá, - EFEI, 1969.
21. STEAM TURBINES. A Special Report, Power, June, 1962.

## S I M B O L O G I A

- P - potência, em kW  
m - massa em escoamento, em kg/h  
 $\Delta h$  - queda entálpica isentrópica, em kJ/kg  
 $\eta$  - rendimento  
L - fator de proporcionalidade  
Q - calor, em kW

- Índices: 1 - parte de alta pressão  
2, 3, 4, ... - outras partes da turbina  
h - vapor de processo  
M - valor máximo da característica  
o - valor da característica para potência nula  
i - instalação  
t - total

