TESE
613

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Escola Federal de Engenharia
Biblioteca
MAUÁ
Itajubá

ESTUDO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO

JOSE ANTONIO PERRELLA BALESTIERI

ORIENTADORES :

PROF. DR. LUIZ AUGUSTO HORTA NOGUEIRA

PROF. DR. AFONSO HENRIQUES MOREIRA SANTOS

ITAJUBÁ - MG

1990

CL. REG. 621.311.2:519.245(043.2)
CUTT. B184e
TOMBO 613

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

11.07.91		
27.1.92		
21/10/92		
03.03.93		
14.12.93		
25/10/94		
11/5/95		
31-10-95		
[illegible]		
12/12/96		
13/07/99		

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 118 de 21 / 05 / 90 , considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "ESTUDOS DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO"

apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica, na Área de Concentração de Conversão de Energia, satisfeitas as demais exigências regimentais, a José Antonio Perrella Balestieri .

Itajubá, 25 de maio de 1990

Prof. Isaías de Carvalho Macedo
UNICAMP - 1º Examinador

Prof. Afonso Henriques Moreira Santos
EFEI - 2º Examinador

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira
EFEI - Orientador - 3º Examinador

Ministério da Educação
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA COMISSÃO EXAMINADORA

Título da Dissertação "ESTUDOS DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO COM APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE MONTE CARLO"

Autor: JOSE ANTONIO PERRELLA BALESTIERI

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	
4º		

Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, aprovado com louvor distinção

Observações:

Itajubá, 25 de maio de 1990.

Prof. Isaías de Carvalho Macedo
UNICAMP - 1º Examinador

Prof. Afonso Henriques Moreira Santos
EFEI - 2º Examinador

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira
EFEI - Orientador - 3º Examinador

RESUMO

Neste trabalho, a cogeração é situada dentro do contexto energético mundial, revelando-se uma alternativa viável em face dos novos condicionantes técnicos da geração de energia.

Inicialmente são caracterizados os setores industriais segundo suas necessidades energéticas; índices são levantados para diferentes processos com base em estatísticas nacionais, posteriormente comparados com valores obtidos no exterior.

Numa etapa posterior, procura-se caracterizar os principais sistemas de cogeração atualmente disponíveis, avaliando-se faixas de aplicação para diferentes cenários de processo.

A partir destas informações, são desenvolvidas ferramentas matemáticas para análise de gerência de excedentes de vapor através de Métodos de Monte Carlo, utilizando-se Séries Temporais para geração de séries sintéticas e o processo de convolução para geração de curva de excedentes.

A metodologia empregada se mostra eficiente na avaliação do excedente disponível em sistemas que praticam cogeração, prestando-se especialmente às situações em que as curvas de carga não são disponíveis, conferindo uma maior confiabilidade aos resultados a partir de um maior número de simulações.

ABSTRACT

Cogeneration is stated a a powerful option to the new technical conditions that energy generation is submited to atend real environmental needs.

Firstly it is characterized the industrial sectors according to the energetical needs; some values are presented based on Brazil's data and compared to the California's one.

It's too characterized cogeneration systems usually used, the new technology, searching for the user's range to attend diferent process conditions.

Based in these previous research, it is presented a mathematical model to analise energetical surplus using randomic numbers, the Monte Carlo Method. Time-Series Analysis are used to generate sinthetic series in a probabilistic process, and the convolution method is used to generate the surplus curve.

This method seems to be efficient in the surplus evaluation to the systems that wants to practice cogeneration, specially when load curves are not known, giving greather reliability to the planner the more the number of simulations done.

AGRADECIMENTOS

Muitos são aqueles a quem devo fazer menção neste espaço, em sinal de reconhecimento por sua grata colaboração, especialmente

- à Ieda, minha mulher, incansável a meu lado nas maiores adversidades;

- à minha mãe, irmãos e sogros, pelo apoio incondicional às minhas decisões;

- aos meus orientadores, pela condução segura nos primeiros passos;

- ao Prof. Dr. Luis Koody Hotta, da UNICAMP, pelo auxílio nas Séries Temporais;

- ao Departamento de Energia da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, pelo apoio;

- aos companheiros

Carlos Barreira Martinez,

Cidélia Maria Barbosa Lima,

Dagoberto José Gianoti, e

Ricardo Alberto Noronha,

pelo trabalho frutuoso que juntos desenvolvemos.

DEDICATÓRIA

A meu pai,

que tanto me amou.

"TODO CONHECIMENTO HUMANO É
INCERTO, INEXATO E PARCIAL "

Bertrand Russel

. CONTEÚDO

Resumo i

Abstract ii

Agradecimento e Dedicatória iii

Pensamento iv

Conteúdo v

Relação de Figuras vii

Relação de Tabelas x

Notação xi

CAPITULO 1 A COGERAÇÃO NO CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL

1.1 Introdução 1

1.2 Panorama Energético Mundial 2

1.3 Demanda de Energia 4

1.4 Recursos Energéticos Disponíveis 7

1.5 A Cogeração como Fonte Alternativa de Energia 10

1.6 Escopo deste Trabalho 21

CAPITULO 2 CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

2.1 Introdução 23

2.2 Modelo para Caracterização dos Setores Industriais 24

2.3 Modelos que Utilizam a Parametrização 27

2.4 Levantamento das Potencialidades dos Setores Industriais 29

CAPÍTULO 3 PARAMETRIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO

3.1 Introdução 35

3.2 Parametrização dos Sistemas de Geração 36

3.3 Modelos que Utilizam a Parametrização 41

3.4 Critérios de Escolha do Ciclo 44

3.5 Um Método para Dimensionar o Sistema de Geração Adequado a cada Processo 53

CAPÍTULO 4 AVALIAÇÃO DOS EXCEDENTES DE ENERGIA

4.1 Introdução 56

4.2 Curvas de Carga para Processos Industriais 56

4.3 Avaliação de Excedentes 63

CAPÍTULO 5 ANÁLISE DE UMA SITUAÇÃO PRÁTICA

5.1 Introdução 77

5.2 Análise das Curvas de Demanda Energética para um certo Processo 78

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 86

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88

ANEXO 1 Valores de E,S e ALFA em diversos setores 93

ANEXO 2 Séries Temporais 112

ANEXO 3 Série de Gram-Charlier 118

RELAÇÃO DE FIGURAS

pag.

1.1 Projeções do consumo mundial de energia primária 6

1.2 Produção anual de energia desagregada, segundo Hubbert 9

1.3 Modos de cogeração: (a) 'topping'. (b)'bottoming' 12

1.4 Esquema dos principais ciclos de cogeração 14

1.5 Configuração da demanda isolada e interligada 18

1.6 Análise da previsão da demanda de um energético 19

1.7 Curvas de demanda de vapor para processo e geração eletromecânica ao longo do tempo, para usina de açúcar e álcool [30] 20

2.1 Esquema genérico de um processo industrial 24

2.2 Variação temporal do parâmetro ALFA (Brasil) 6 setores industriais 31

2.3 Variação temporal do parâmetro ALFA (Brasil) 4 setores industriais 32

3.1 Esquema genérico de um sistema de cogeração 37

3.2 Ciclos de Cogeração 40

3.3 Ciclo Combinado Vapor-Gás, segundo Vichnievsky 41

3.4 Valores típicos de BETA para seleção de setores industriais 42

3.5 Variação de GAMA para diversos sistemas de geração 43

3.6 Características energéticas da turbina GTL EM27 44

3.7 Campo de Operação de algumas turbinas a gás GEC 46

3.8 Campo de Operação de Ciclo Combinado GEC 46

3.9 Comparação do consumo específico para sistemas de geração em cenário de queima de combustíveis fósseis [6] 47

3.10 Comportamento da relação BETA contra pressão de vapor de processo para diferentes condições iniciais de vapor 49

3.11 Faixas de Condições iniciais do vapor para primeira avaliação na seleção do ciclo a vapor 49

3.12 Faixas de saída de potência e calor para diferentes sistemas de geração 51

3.13 Disposição das características do gerador face a situações variáveis de demanda de calor de processo e energia eletromecânica 65

4.1 Curvas de carga para processos de curto termo 58

4.2 Curvas de carga para processos de longo termo 58

4.3 Representação tridimensional das curvas de carga anuais, para certo processo [38] 59

4.4 Descompasso no atendimento da demanda, em função da sua variabilidade 60

4.5 Acumulador de vapor tipo Ruths 62

4.6 Curva de duração de carga 65

4.7 Ilustração esquemática do Método de Monte Carlo para sistemas de cogeração 69

4.8 Representação gráfica da convolução de duas curvas de demanda 74

5.1 Gráfico de vazão de vapor para uso térmico e eletromecânico contra tempo,em certo processo industrial 80

5.2 Curvas de Duração simuladas para demanda eletromecânica 83

5.3 Curvas de Duração simuladas para demanda térmica 84

5.4 Resultado da Convolução para o caso mais desfavorável 85

A2.1 Filtro Linear 110

RELAÇÃO DE TABELAS

pag.

1.1 Comparação entre algumas das projeções sobre consumo mundial de energia [14] (TeraWatt) 5

2.1 Faixas de utilização de temperaturas de processo 26

2.2 Valores obtidos para o parâmetro ALFA em diferentes setores industriais 31

2.3 Valores do parâmetro ALFA na Califórnia 33

2.4 Potencial de Cogeração no Brasil (MW) 34

3.1 Performance típica de sistemas de 'topping' 39

3.2 Características de alguns equipamentos GEC 45

3.3 Análise comparativa dos geradores 52

5.1 Valores de demanda térmica e eletromecânica 79

NOTAÇÃO

C, CALD ... CALDEIRA

CR ... CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

CC ... CICLO COMBINADO

CP ... COMPRESSOR

COND ... CONDENSADOR

COMB ... COMBUSTÍVEL

ECO ... ECONOMIZADOR

EE ... ENERGIA ELÉTRICA

TV ... TURBINA A VAPOR

TG ... TURBINA A GÁS

PROC ... PROCESSO

$\mathbb{P}$ ... PROBABILIDADE

$E[X]$ ... ESPERANÇA MATEMÁTICA

a_t ... RUÍDO BRANCO

Z_t ... OCORRÊNCIA DE UMA SÉRIE TEMPORAL

m, q ... VAZÃO MÁSSICA DE VAPOR

e ... ENERGIA ESPECÍFICA DISPONÍVEL

T ... TEMPERATURA ABSOLUTA

P ... PRESSÃO

CAPÍTULO 1: A COGERAÇÃO NO CONTEXTO ENERGÉTICO MUNDIAL

1.1 Introdução

Desde o pós-guerra, até a brusca elevação dos preços do petróleo em 1973, iniciando a denominada "crise energética", havia pouca preocupação por parte de governantes e empresários quanto às perspectivas de suprimento energético. A fartura de petróleo até então evidenciada não suscitava a necessidade de priorizar a economia de combustíveis bem como a procura de desenvolvimentos tecnológicos que levassem a melhores níveis de eficiência nos equipamentos de conversão energética, seja nas centrais termelétricas, seja nos processos industriais. Uma nova postura face a questão energética surge em princípios da década passada, decorrente das dificuldades que vários países atravessaram para assegurar o fornecimento de petróleo, majoritário entre as fontes primárias e com sua maioria de jazidas em países cartelizados. Assim, orientaram-se os recursos e esforços no sentido de diversificar a oferta de energia e racionalizar sua utilização, por razões econômicas e estratégicas. Além destes fatores, e em menor grau, também contribuiram para tais mudanças a questão ambiental e o provável avizinhamento da exaustão dos recursos energéticos fósseis, sobretudo os hidrocarbonetos. Este cenário, caracterizado pelos novos e maiores preços relativos dos

vetores energéticos, forma a atualidade energética.

É dentro deste contexto que a cogeração, por configurar uma forma racional de se utilizar os combustíveis, surge como alternativa viável para as indústrias que necessitam de calor para o processo que desenvolvem e energia eletromecânica, ou mesmo para o uso de calor residual de termelétricas para aquecimento ambiental ("district heating"), como é o caso dos Estados Unidos e Europa.

Este capítulo procura situar a cogeração dentro do panorama energético mundial, bem como discorrer sobre suas potencialidades de utilização no Brasil.

1.2 Panorama Energético Mundial

O século vinte vem testemunhando grandes mudanças em todos os aspectos da história da raça humana; e como se sabe que depois dos alimentos a energia é a segunda maior necessidade do ser humano, grande atenção vem sendo dada ao constante processo que a Humanidade vem sofrendo face as circunstâncias que culminaram com os problemas energéticos atuais.

Nos primeiros vinte e cinco anos deste século, o carvão foi a principal fonte energética dos países civilizados, e assim continuaria a ser se a descoberta de grandes quantidades de petróleo no sul da Rússia, no Oriente Médio e, posteriormente, nos Estados Unidos, não tivesse

despertado rapidamente o interesse na facilidade comparativa de sua extração, transporte e conversão para atender a uma grande quantidade de necessidades.

Uma série de fatos se combinaram de modo a tornar o petróleo e seus derivados a forma mais desejável e importante de energia face aos demais combustíveis : o fato de exigir uma quantidade mínima de mão-de-obra, o número infindável de aplicações, o fato de até então ser um produto barato e as constantes descobertas de novos depósitos.

O fato que preconizou a rápida difusão do petróleo como principal fonte de energia aconteceu antes da Primeira Guerra Mundial, quando a marinha inglesa se decidiu por converter sua esquadra de guerra, até então utilizando carvão, para óleo diesel, sendo rapidamente imitada pelas demais grandes potências de então. Esta medida resultou em uma série de fatores geopolíticos - o acesso ao petróleo impôs novos e importante compromissos às políticas externas e de defesa.

Antes da Segunda Guerra Mundial, verificou-se uma procura ao petróleo do Oriente Médio por parte da França, da Alemanha e dos Estados Unidos, nem tanto pela importância estratégica que o petróleo pudesse representar, e sim pelo desejo de obter uma vantagem estratégica em relação à Inglaterra, no caso dos dois primeiros, e por interesses comerciais, no caso dos Estados Unidos; foi somente com o interesse do Japão, que entretanto procurou seus suprimentos

no Sudeste Asiático, que se reconheceu a importância estratégica do suprimento de petróleo.

Depois da Segunda Guerra, em um primeiro período, o petróleo ampliou seu predomínio na oferta energética global, simultâneamente ao incremento das tensões políticas entre distintos blocos regionais. Nesta época, consolidou-se o cartel dos produtores até que em um segundo período, a manipulação política dos preços durante os anos setenta provocou e segue provocando uma intensa mudança dos padrões energéticos a nível de oferta e demanda, inclusive abrindo espaço para a energia nuclear e a biomassa. Neste sentido, o atual panorama energético apresenta sinais de profundas transformações.

1.3 Demanda de Energia

A produção de bens, os transportes, a agricultura, todas as atividades enfim, em maior ou menor proporção, consomem energia, mesmo porque o próprio desenvolvimento do homem está relacionado ao uso das fontes de energia de que dispõe na natureza. Ainda que exista a consciência da necessidade de um controle desta demanda, o que se verifica é que são crescentes os valores de consumo de energia a nível mundial, em função tanto do aumento da qualidade de vida em alguns países quanto do nível tecnológico por eles alcançado.

A Tabela 1.1 e Figura 1.1 apresentam projeções do

consumo de energia primária esperados no próximo século, de acordo com diversos pesquisadores e/ou grupos de pesquisa. A grande variação que se observa é devida ao desconhecimento do futuro desenvolvimento nos campos cultural, político, social e tecnológico ,que são fatores determinantes e não passíveis de serem expressos em formulações analíticas.

TABELA 1.1 - COMPARAÇÕES ENTRE ALGUMAS DAS PROJEÇÕES SOBRE CONSUMO MUNDIAL DE ENERGIA [14]
(TERAWATT)

	ALTA		BAIXA
ATUAL (1980)	----	10.3	----
IIASA	35.2	----	22.0
WEC	24.7	----	19.2
IEA / ORAU	26.6	----	18.8
MITEL	16.1	----	12.1
NORDHAUS & YOHE	----	24.5	----
COLOMBO & BERNARDINI	----	14.4	----
LOVINS et all	----	5.2	----
EUGEP	----	11.2	----

Na análise desses valores, é preciso levar em conta que,ao projetar-se a futura demanda de energia, existe sempre uma tendência ao superdimensionamento, uma vez que não são ponderadas as mudanças que se verificam nas economias industrializadas, que mais e mais se afastam do consumo e produção de materiais básicos com uso intensivo de energia,

bem como não se tem em conta a melhoria da eficiência energética que resulta dos constantes progressos da tecnologia. Por outro lado, o que aparece como projeção da demanda "baixa" revela uma forte componente de conservação de energia, expectativa nem sempre verificada.

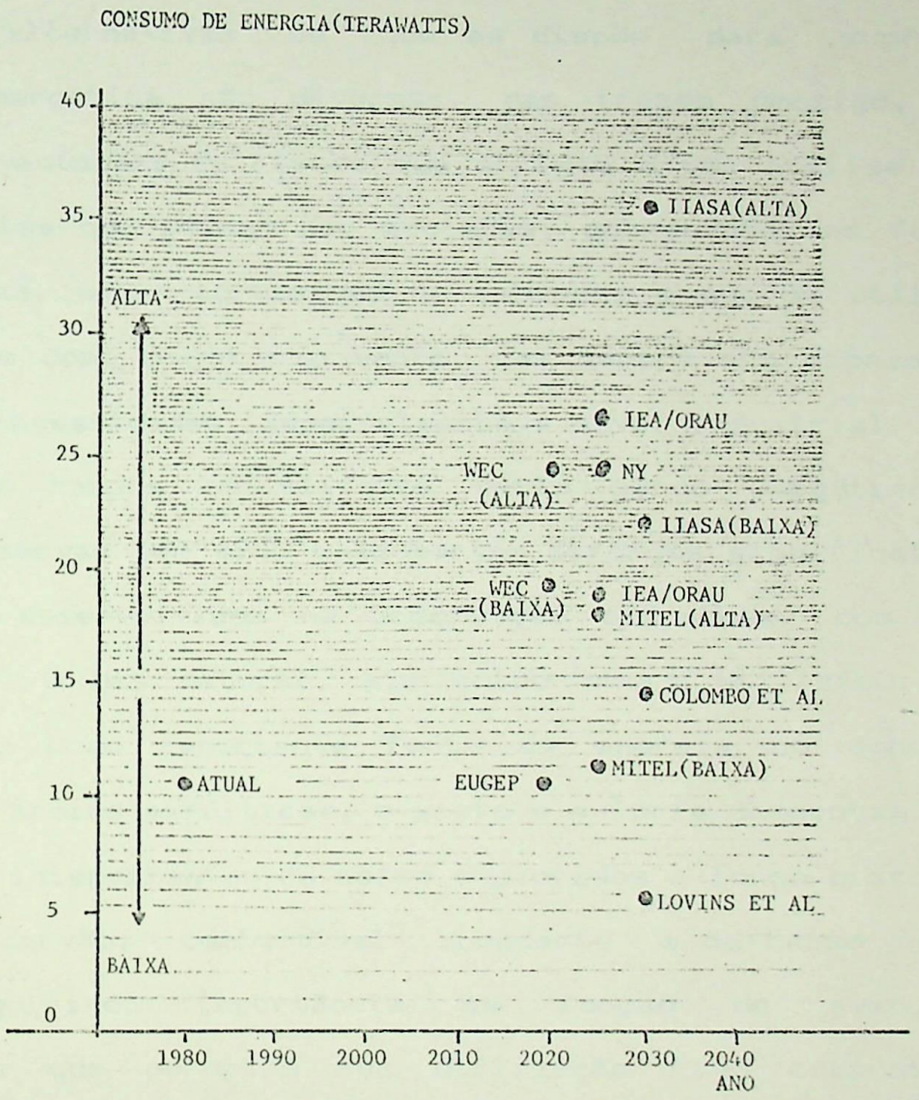


Figura 1.1 Projeções do consumo mundial de energia primária [14]

De toda maneira, baseando-se nos dados históricos, fica evidenciado que existe uma tendência crescente de consumo de energia, que deve ser atendida de forma racional.

1.4 Recursos Energéticos Disponíveis

As alternativas de que se dispõe para suprir a demanda energética são diversas, mas trazem consigo, por vezes, desvantagens ou riscos que obrigam a uma análise mais acurada antes que possam ser adotadas; entretanto, as fontes alternativas, menos agressivas ao ambiente e que se utilizam de recursos como o sol e o vento, nem sempre são capazes de suprir as necessidades, especialmente a nível industrial.

Novos campos petrolíferos estão sendo pesquisados e grandes reservas tem sido descobertas. Esforços significativos vem sendo desenvolvidos na prospecção off-shore, com bons resultados. O gás natural, até então pouco utilizado, vem despontando como importante fonte de energia no contexto global; as areias asfálticas, o xisto e a turfa despontam como potenciais interessantes de serem explorados a longo prazo.

O carvão, combustível abundante e de baixo custo, vem readquirindo importância em função de avançadas tecnologias que permitem sua utilização como combustível líquido, mas ainda esbarra nos altos custos desta transformação, sem contar os problemas ecológicos que as emissões provocam, como as chuvas ácidas e a forte

contribuição ao "efeito estufa" .

A energia nuclear, cercada de controvérsias, já tem uma posição de destaque no quadro mundial de suprimento energético. Os reatores super-regeneradores (fast-breeder reactors) dão hoje mostra de melhores possibilidades de aproveitamento dos combustíveis nucleares, pela multiplicação de reservas, na medida em que transformam os elementos férteis em físseis, produzindo combustível nuclear em quantidade superior ao que consomem. Mas, aliado à preocupação acerca dos riscos ecológicos desta forma de geração termoelétrica e suas consequências, sempre existe a possibilidade do uso da energia nuclear em atividades bélicas, visto que a quantidade de plutônio produzida é muito grande [14].

A energia hidráulica, base da geração elétrica do Brasil, apresenta como alternativa para aumento da oferta de energia elétrica a construção de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), uma vez que a maioria das grandes bacias hidráulicas já se encontram aproveitadas ou estão distantes dos centros de carga.

Apesar do grande número de pesquisas que vêm sendo realizadas acerca do aproveitamento da energia solar, problemas tecnológicos e econômicos estão impedindo que esta fonte de energia seja passível de aproveitamento em grande escala, no momento presente; as pesquisas se concentram na captação, estocagem e controle desta energia. Atualmente, sua melhor aplicação é no

aproveitamento doméstico como forma de substituição de fontes convencionais.

A energia eólica vem sendo estudada como solução para pequenas demandas, especialmente em regiões com ventos de alta velocidade, no bombeamento de água e produção de energia elétrica. O gráfico a seguir apresenta as curvas de Hubbert, citado por Santos [30], que procuram determinar a produção anual de energia, desagregado por fontes, até o ano 3000.

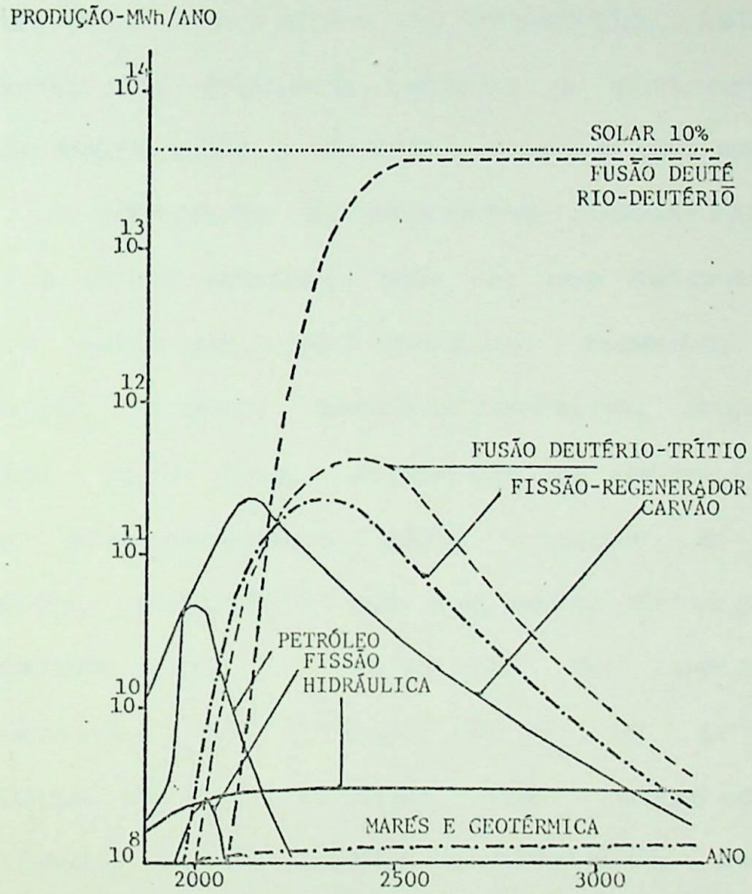


Figura 1.2 Produção mundial de energia desagregada, segundo Hubbert

1.5 A Cogeração como Fonte Alternativa de Energia

1.5.1 Introdução

Em uma grande variedade de indústrias, e mesmo o setor residencial e de serviços nos países ou regiões com invernos rigorosos, observa-se a necessidade não apenas de energia elétromecânica mas também de energia térmica para os mais diversificados processos: calefação, secagem, aquecimento, cozimento, evaporação. Tais necessidades, aliadas à melhor utilização da disponibilidade termodinâmica dos combustíveis, propiciaram o surgimento da cogeração, isto é, da geração simultânea das energias térmica e elétromecânica como uma forma de suprimento a um custo menor e com maior eficiência.

A cogeração em processos industriais não é prática recente a nível mundial, uma vez que setores produtivos como papel e celulose, petroquímica, cimento, e especialmente no Brasil, o setor sucro-alcooleiro, suprem as necesidade de vapor para seus processos ao mesmo tempo que produzem energia elétromecânica para consumo e eventual venda; entretanto, verifica-se que sua maior divulgação se encontra nos países com tradição de geração notadamente termoelétrica. Em 1900, 50 % da produção de energia nos Estados Unidos provinha da cogeração, sofrendo uma queda brutal em 70 anos, caindo para apenas 4 % em 1974, devido à expansão das redes elétricas de transmissão e distribuição, ao aumento da qualidade do

serviço público associado à maior confiabilidade, à redução dos custos reais da energia servida pelas concessionárias, mas principalmente pelas dificuldades surgidas nas restrições legais para aquisição de energia cogerada por parte das concessionárias. Tal tendência já foi,todavia, revertida em função da conjuntura energética (no caso dos Estados Unidos, orientada através do PURPA - Public Utility Regulatory Policy Act), e prevê-se que chegue a 15 % da capacidade instalada no ano 2000. O potencial brasileiro de cogeração tem sido determinado por diversos autores, obtendo-se resultados algo díspares, em função das condições, abrangência e cenários considerados, mas deve situar-se em valores proporcionalmente semelhantes aos dos Estados Unidos.

1.5.2 Aspectos básicos da cogeração

A cogeração como modo de geração simultânea de energia elétrica e vapor, em função das necessidades do processo em questão, poderá se apresentar como :

* 'TOPPING' : a energia térmica rejeitada no processo de produção de energia elétrica é aproveitada para calor de processo;

* 'BOTTOMING': o combustível é usado para gerar calor para processos a altas temperaturas, e os gases de exaustão (ainda energizados pela alta temperatura) são utilizados para gerar eletricidade.

Como se observa, os modos **"topping" e "bottoming"** diferem pelo fato de que cada um deles assume uma das formas de energia com a primeira a ser gerada, qual seja eletricidade no modo 'topping' e calor de processo no modo 'bottoming'. A figura 1.3 ilustra os modos de cogeração.

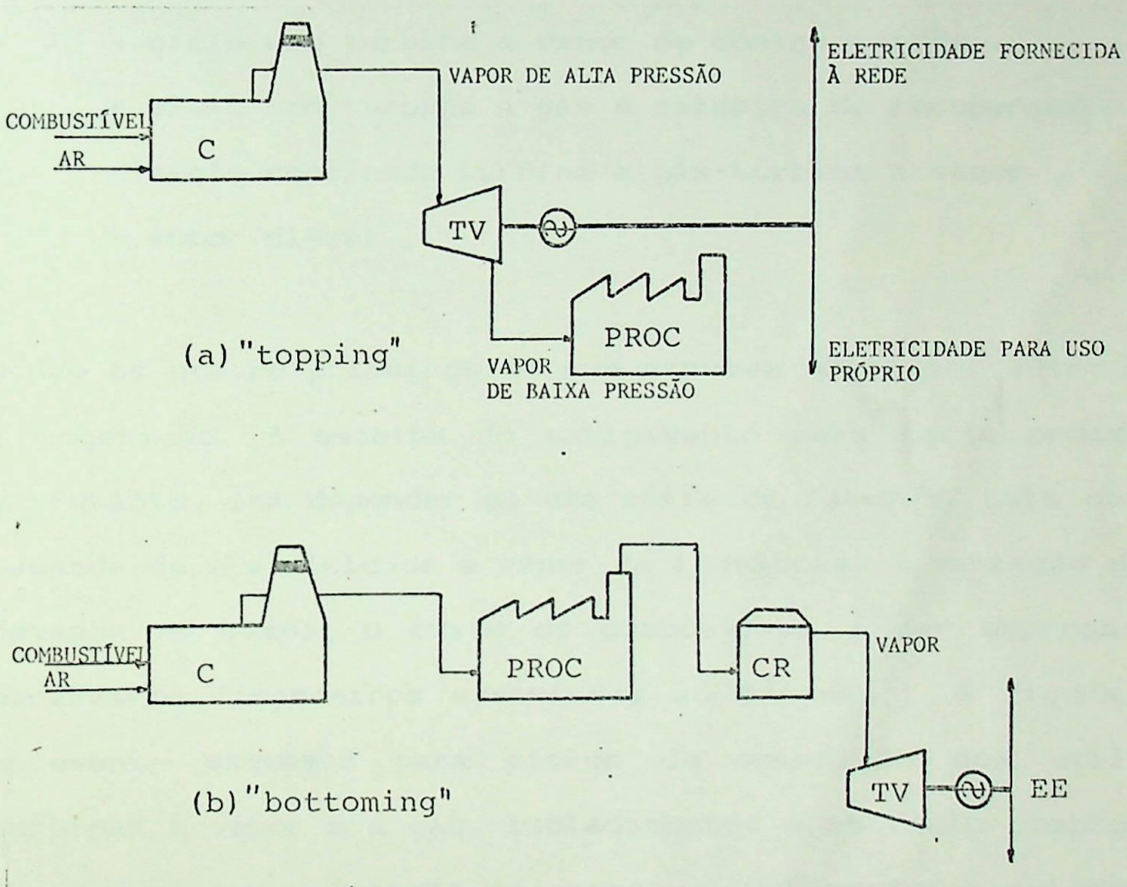


Figura 1.3 : Modos de cogeração : (a) 'topping' ; (b) 'bottoming'

O modo 'bottoming' é de menor campo de aplicação e raramente econômico, uma vez que a energia elétrica é gerada com baixa eficiência, em função do calor ser usualmente liberada a temperaturas baixas, sendo mais lógico usar tal calor para outro processo, desde que exista ou seja pertinente ao processo já existente .

Os ciclos térmicos que podem operar no modo topping são :

- ciclo com turbina a vapor de extração-condensação ,
- ciclo com turbina a vapor de contrapressão ,
- ciclo com turbina a gás e caldeira de recuperação ,
- ciclo combinado turbina a gás-turbina a vapor ,
- motor diesel ,

sendo os quatro primeiros os que assumem maior interesse para a cogeração. A escolha do equipamento para certo processo, entretanto, irá depender de uma série de fatores, tais como a demanda de eletricidade e vapor da indústria, a variação desta demanda no tempo, o custo do combustível a ser empregado e parâmetros financeiros associados ao projeto. A figura 1.4 apresenta esquemas para ciclos de cogeração que utilizam turbinas a vapor e a gás, isoladamente, e em ciclo combinado. Observe-se que a geração de energia eletromecânica no sistema de cogeração pode ser efetuada de forma independente ou interligada com a concessionária, sendo que neste último caso

as vantagens da cogeração se potencializam.

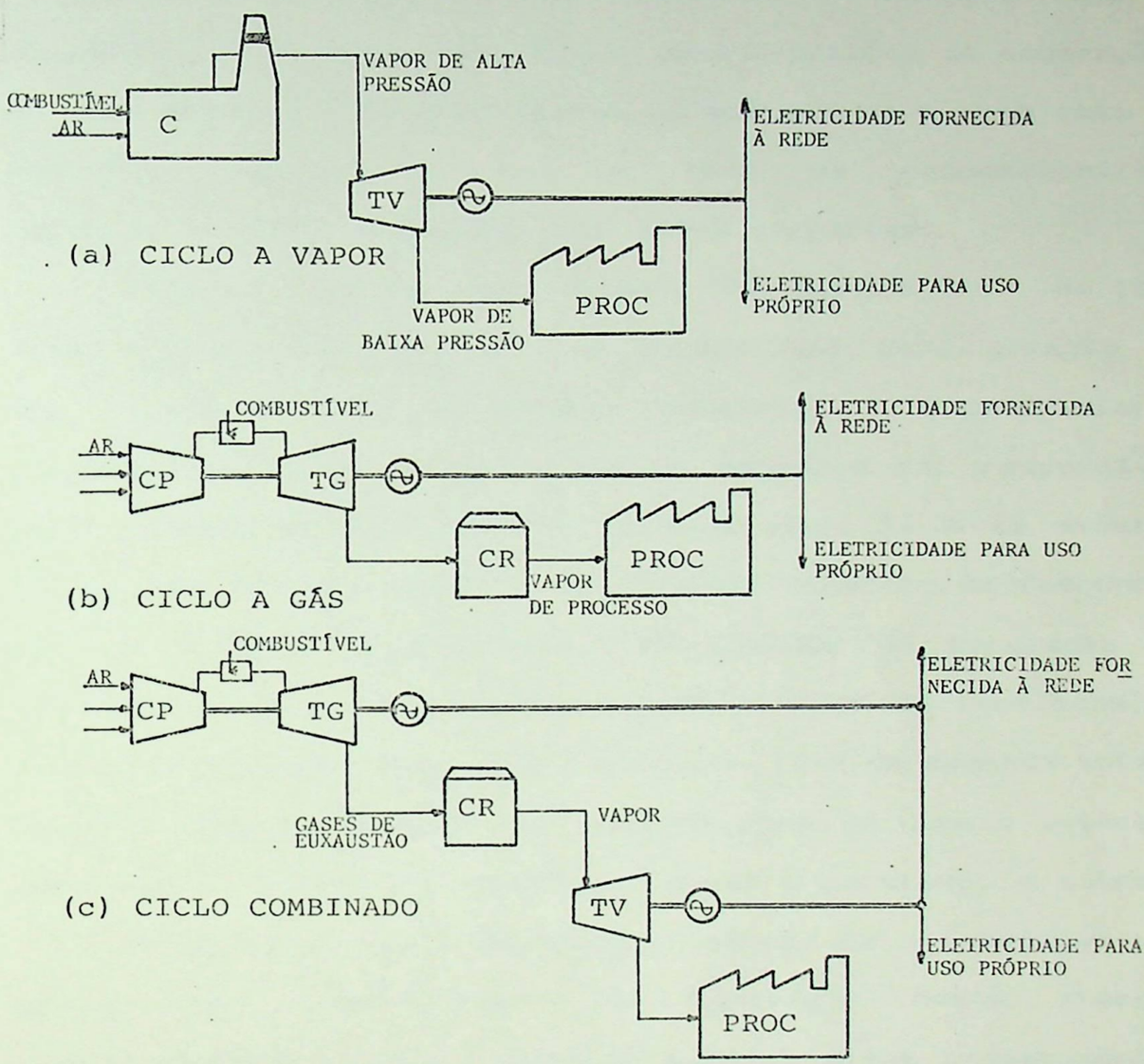


Figura 1.4 : Esquema dos principais ciclos de cogeração

1.5.3 A potencialidade da cogeração em alguns dos setores industriais

Existe um amplo mercado consumidor de energia que se apresenta potencialmente indicado para a prática da cogeração, em face de suas demandas típicas de energia, e que no caso de operarem interligadas com a rede da concessionária, garantiriam reais vantagens para ambas as partes.

Valores obtidos por Rousso [36] para o ano de 1978 citam as necessidades de óleo combustível para geração de vapor e eletricidade em setores industriais. Alguns valores ilustrativos: o setor de refino de petróleo foi responsável pelo consumo de 2.04 milhões de toneladas, 14 % da demanda industrial de óleo combustível; o setor siderúrgico respondeu por 10 % desta demanda com 1.57 milhões de toneladas; a indústria petroquímica consumiu 1.57 milhões de toneladas; a indústria cerâmica respondeu também com 10 % da demanda total; valores como esses podem ser obtidos para os demais setores, como têxtil, alimentos e bebidas, papel e celulose, e outros.

Do ponto de vista da concessionária, há o interesse não apenas pela possibilidade de aquisição desta energia elétrica autoproduzida , considerando os altos investimentos necessários para a ampliação do sistema elétrico e as dificuldades econômico-financeiras por que passa o setor, mas também pelos benefícios no tocante ao planejamento e operação de seus sistemas, uma vez que poderia gerenciar o

fluxo da energia negociada em função dos horários de fornecimento dos 'autoprodutores.

Em atitude pioneira no Brasil, a Companhia Paulista de Força e Luz - CPFL estabeleceu alguns contratos de compra ou troca de excedente de energia elétrica com empresas que estão cogerando na sua área de atuação, com grande densidade de autoprodutores dos setores sucro-alcooleiro e de processamento de laranja, que, como função dos seus processos típicos (tipo safra/entresafra), não apresentam uso regular de energia ao longo do ano, obrigando-a a manter disponível para atendimento de demanda suplementar, a parcela correspondente à geração dos autoprodutores durante o período de safra. Não obstante, se pratica a interligação com grandes autoprodutores siderúrgicos e petroquímicos há décadas, sem contudo se caracterizar a cogeração interligada.

No capítulo dois serão discutidos, com maiores detalhes, os setores industriais que apresentam melhores oportunidades para praticar a cogeração.

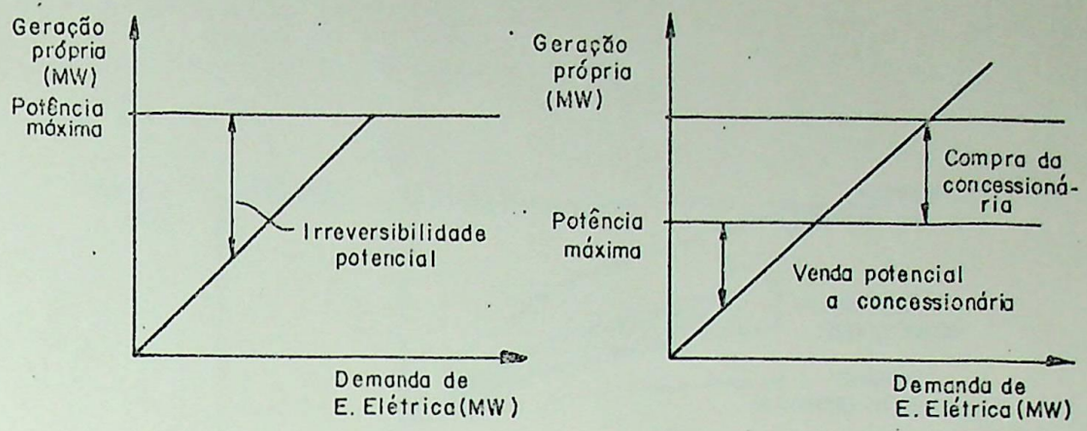
1.5.4 Possibilidade de uso dos excedentes

Quando operando em regime de cogeração, um processo que gere energia eletromecânica e térmica não terá, necessáriamente, que consumí-las em porções fixas e iguais ao longo do tempo. Na realidade, essa situação dificilmente

ocorre, visto que os processos são geralmente afetados por diferentes fatores operacionais.

Conforme se discutirá no capítulo quatro, de acordo com o processo haverão diferentes comportamentos na demanda pelas várias formas de energia. Considerando-se a figura 1.5, é possível perceber o quão desalinhadas podem se encontrar tais demandas. Uma vez que a geração de vapor se processa de uma maneira bem mais regular em torno de uma certa vazão, fica evidente que poderão existir situações de 'déficits' e de excedentes, o primeiro quando a demanda suplanta a geração, e o segundo, ao contrário, quando a geração se revela maior que as necessidades do processo.

Se esse processo operar isolado, haverá um sério problema de atendimento à demanda no período de 'déficit', que implicará na necessidade de maiores investimentos de modo a permitir uma operação confiável. Por outro lado, operando interligado com a concessionária, na situação de 'déficit' haverá uma injeção de insumos energéticos de ordem elétrica da concessionária para o processo, de tal modo que mantenha sua operação normalizada; havendo excedentes, estes poderão ser repassados à concessionária, permitindo a esta última atender a outros processos que estejam com 'déficit'. Com isso, reduzem-se as perdas, conforme ilustrado na figura 1.5 [31].



(A) Cogeração independente (B) Cogeração interligada

Figura 1.5 Configuração da demanda isolada e interligada

Como foi observado no ítem 1.3, análises de previsão geralmente são feitas a partir de valores históricos disponíveis, supondo que estas tendências continuarão sem sofrer mudanças radicais; tais análises, contudo, devem ser efetuadas considerando-se a possibilidade de alterações político-econômicas, que irão alterar a tendência, por vezes completamente; a Figura 1.6 ilustra a situação.

Curvas como a apresentada na figura 1.7, que retratam a condição do consumo de vapor para a geração de energia eletromecânica e para processo em intervalos reduzidos de tempo, revelam condições instantâneas para o período de tempo em que foram tomados os valores; todavia, conforme se discutirá com mais detalhes no capítulo quatro, nem sempre são disponíveis tais curvas na fase de concepção do projeto, fazendo-se necessário lançar mão de outros recursos. Um desses recursos é a curva de duração, que nesse ponto definir-se-á sumariamente como a curva acumulada da demanda, para cada

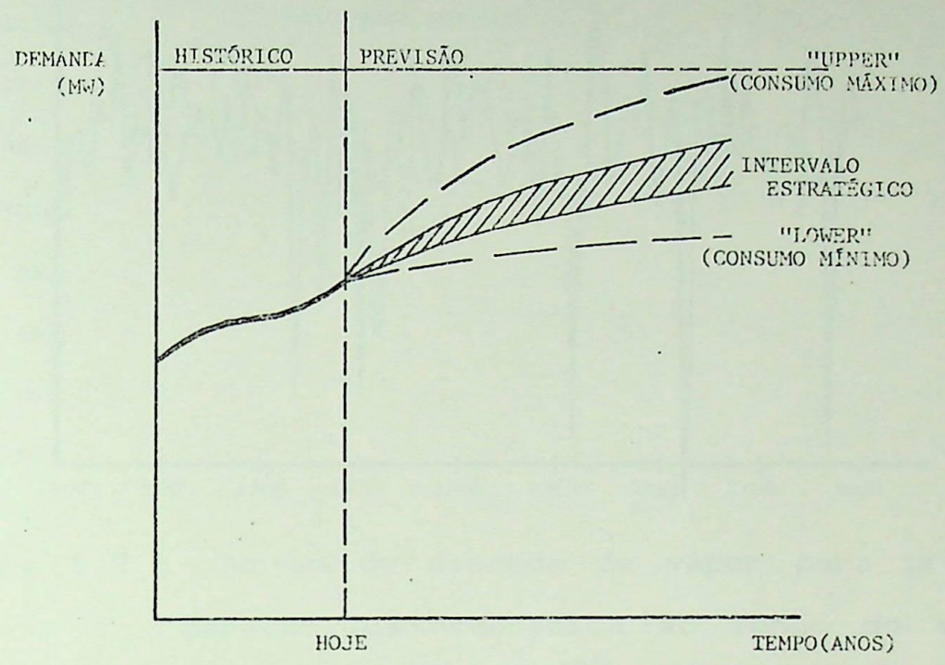


Figura 1.6 Análise de previsão da demanda de um energético

forma de energia, no mesmo período de tempo; esta técnica, se por um lado se revela um excelente ponto de partida, por outro lado encobre as oscilações ocorridas no tempo, cujo conhecimento é desejável para embasar a negociação com a concessionária. Além disso, as incertezas que afetam o sistema de cogeração se dão em dois níveis cronológicos: em uma escala instantânea, como um reflexo da aleatoriedade das demandas de vapor e potência e em uma escala maior, resultante da evolução, previsível ou não, do empreendimento.

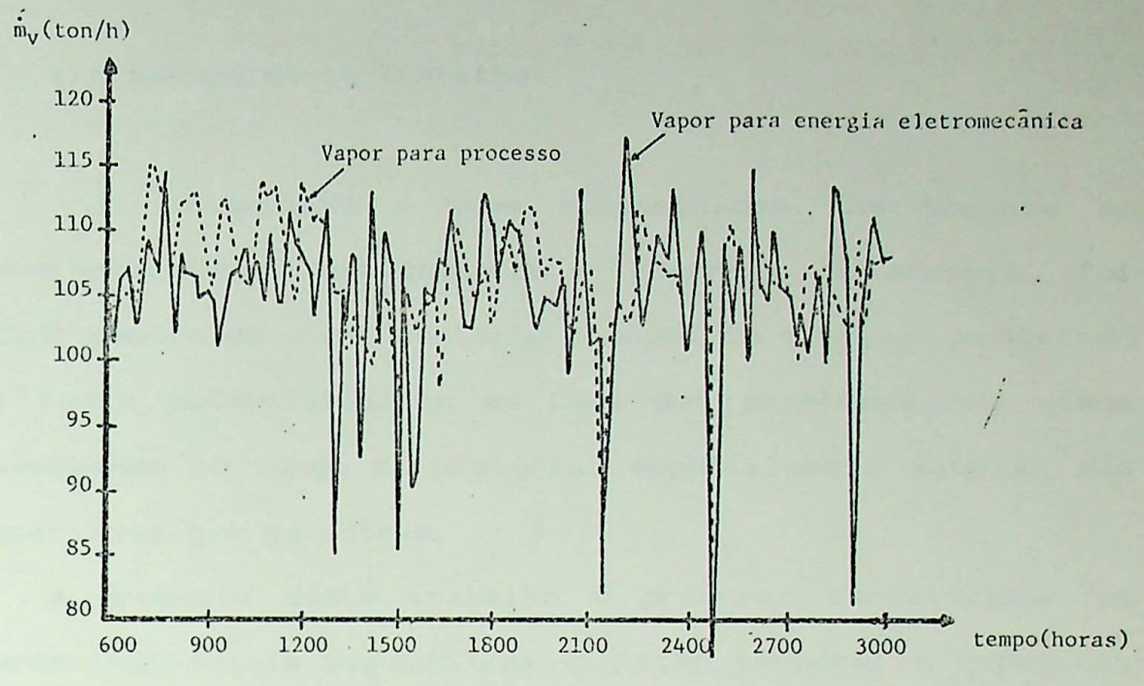


Figura 1.7 : Curvas de demanda de vapor para processo e geração eletromecânica ao longo do tempo, para usina de açúcar e álcool [30].

É preciso,portanto, que se disponha de uma metodologia que permita uma avaliação segura da conjuntura globalizada, isto é, dos parâmetros para avaliação do processo industrial e suas potencialidades, dos sistemas de cogeração disponíveis e suas faixas de aplicação, e ferramentas matemáticas que permitam, a partir destes valores, expressar resultados que auxiliem no dimensionamento do sistema de cogeração mais adequado (tipo e capacidade) para planejamento da negociação do excedente.

1.6 Escopo deste Trabalho

A cogeração e suas necessidades, no tocante ao dimensionamento de equipamentos e gerência da energia, foi situada dentro do atual contexto energético mundial, mostrando suas reais potencialidades em face dos problemas que vimos atravessando ao longo da História, especialmente ante as más perspectivas que se antevê.

A proposta deste trabalho é procurar caracterizar os setores industriais segundo uma variação temporal e espacial, comparando-os segundo suas necessidades energéticas; índices são levantados para diferentes processos, para o Brasil como um todo e para alguns Estados da Federação; tais valores são comparados com valores obtidos para os Estados Unidos da América.

Numa etapa posterior, procura-se caracterizar os principais sistemas de cogeração atualmente disponíveis, quais sejam os ciclos a vapor, a gás e combinado, na tentativa de avaliar-se suas faixas de aplicação para diferentes cenários de processo.

A partir destas informações, são desenvolvidas ferramentas matemáticas para análise de gerência de excedentes de vapor através de Métodos de Monte-Carlo. São apresentadas situações utilizando análise de Séries Temporais, a Série de Gram-Charlier e o processo de Convolução de curvas de duração para geração de curvas de excedentes.

Com base nestas informações, são tecidas conclusões e recomendações, bem como faz-se sugestões para estudos posteriores.

CAPÍTULO 2: CARACTERIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

2.1 Introdução

A caracterização dos setores industriais por meio de um parâmetro adimensional que relacione as quantidades demandadas de energia eletromecânica e térmica é de grande utilidade na determinação do potencial destes setores: a partir de valores que representem resultados característicos de um certo setor, variável numa certa faixa em função de diferenças tecnológicas, matérias-primas empregadas tanto na manufatura dos equipamentos de processo quanto na linha de produção, e fatores regionais, é possível não apenas avaliar-se a viabilidade na utilização de diferentes sistemas de cogeração para o caso de empresas que já possuam processos consolidados, como também projetar, a partir do conhecimento da tecnologia empregada, a provável demanda com a qual uma nova empresa irá operar, de modo a bem dimensionar o equipamento gerador.

Diversos modelos se utilizam deste parâmetro para estudos de viabilidade e projeto de sistemas de cogeração. Neste capítulo são apresentados a definição formal da taxa de demanda eletromecânica pela demanda térmica e uma coletânea de valores obtidos para diferentes processos, com variação

temporal e espacial, discutindo-se a necessidade de se dispor de um banco de dados confiável que contenha informações precisas sobre as necessidades energéticas dos diferentes setores.

2.2. Modelo para Caracterização dos Setores Industriais

Considerando-se que os setores em análise necessitam de vapor em algumas etapas do processo, em atividades de secagem, evaporação, cozimento e aquecimento, e de energia eletromecânica para transporte de materiais, bombeamento, acionamento de motores, compressores, bombas, correias e guindastes, entre outras atividades, pode-se configurar tais necessidades de uma forma genérica por meio de um parâmetro adimensional que os relacione. A Figura 2.1 ilustra esquematicamente um processo industrial, retratando os insumos energéticos necessários para obtenção do produto final.

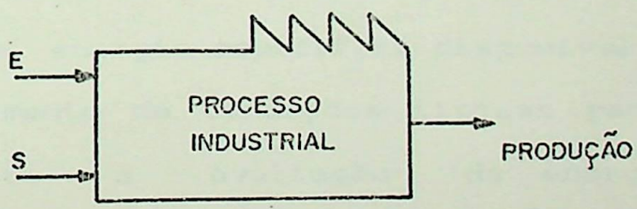


Figura 2.1 - Esquema genérico de um processo industrial

Sendo E o consumo demandado pelo processo de potência eletromecânica [kJ/h] e S o consumo demandado pelo processo de

potência térmica [kJ/h], a relação que se obtém do quociente entre tais variáveis é um valor adimensional, a qual se denomina parâmetro ALFA,

$$ALFA = E / S \qquad (2.1)$$

cujo valor é característico de cada processo e setor, variável dentro de certa faixa em função de diferenças tecnológicas e/ou fatores regionais, e muitas vezes variável na escala temporal.

Outra relação, de grande interesse para o cômputo do excedente de vapor disponível para geração de energia firme para venda às concessionárias, é a que expressa o fluxo mássico (m) de vapor em função da demanda de energia térmica disponível. Conhecida a condição do processo, isto é, a faixa de temperatura e pressão do vapor necessário, e o fluido térmico empregado, tal relação é dada por

$$m = S / e \quad [kg/h] \qquad (2.2)$$

onde e representa a energia específica disponível.

O estabelecimento de condições típicas para diferentes processos permite a avaliação da energia específica (usualmente aproximada ao valor da entalpia de condensação) e, por conseguinte, da vazão mássica não apenas para vapor d'água mas para qualquer fluido térmico industrial. Ademais, na situação em que se associa ao processo um sistema de cogeração, passível de operar em diferentes cenários

típicos para o setor, é possível simular as condições para gestão do excedente de vapor.

Com respeito às faixas usuais de temperatura do vapor utilizáveis nos processos em questão, a Engenharia de Processos os especifica em intervalos, onde as variações dentro destes limites pode representar a utilização de novas técnologias ou uma cérta variedade de produtos finais para cada processo. Estudos do perfil de utilização do calor de processo distribuido por faixas de temperaturas [44] permitem identificar os setores que atuam nas faixas de alta, média e baixa temperaturas, e assim organizá-los de tal modo que sejam supridos por adequados sistemas de geração térmica. Os valores apresentados a seguir [23] ilustram alguns setores/processos e respectivas faixas de utilização do vapor.

TABELA 2.1 - FAIXAS DE UTILIZAÇÃO DE TEMPERATURAS DE PROCESSOS

Faixa de Temperatura [C]	Discriminação dos Processos
T < 60	-aquecimento de residências e escritórios;
60 < T < 200	-aquecimento,secagem,cocção em ind. alimentares, sanitárias, têxteis, etc;
200 < T < 600	-maior parte dos reatores químicos,desidratação e evaporação de água de produtos;
600 < T < 900	-reatores petroquímicos;
900 < T < 1200	-descarbonatação e pré-aquecimento de materiais, fornos de evapocraqueamento;
1200 < T < 1700	-cocção de produtos argilosos (refratários);
T > 1700	-tratamentos metalúrgicos,fusão de materiais.

2.3 Modelos que Utilizam a Parametrização

A necessidade da parametrização proposta se evidencia, em diferentes aspectos, pelo seu uso consolidado em estudos de viabilidade e projetos de sistemas térmicos para fins industriais.

Na pesquisa que realizaram para levantamento das necessidades energéticas das industrias têxteis italianas, Carnevale e de Lucia [8] utilizaram a relação ETR, que corresponde à razão entre a potência térmica média pela potência eletromecânica média, como parâmetro fundamental para análise dos processos industriais. Para esta relação, correspondente à forma inversa do parâmetro ALFA, são encontrados na Itália indústrias têxteis com valores ETR variando entre 2.5 e 15.0, dependendo do processo empregado, estando os valores mais baixos vinculados às empresas onde processos de acabamento ou o ciclo têxtil completo é realizado; altos valores de ETR são característicos das empresas que realizam apenas tingimento ou acabamento final nos tecidos.

Babus'Haq, Probert e O'Callaghan [5] se utilizam do parâmetro ALFA em algorítmo de simulação teórica em sistemas de cogeração de pequena escala para uso residencial, explorando diferentes cenários de acordo com a

carga térmica ambiente ao longo do dia, permitindo desse modo uma decisão otimizada acerca da conveniência ou não de se investir na instalação destes sistemas.

Dentre outros, Hu [17] cita um parâmetro análogo a ALFA como um dos valores iniciais para se efetuar a estimativa das necessidades energéticas e de área plana para a implantação de processos industriais dotados de sistemas de cogeração. Uma tabela, contendo a relação entre as demandas de pico eletromecânica e térmica, é apresentada por este autor, em associação com o número de unidades industriais que se apresentam dentro de cada faixa (valores de ALFA variando de 0.01 a 1.60 com intervalos iguais de 0.10), revelando distribuição log-normal ao longo de 16 categorias de processos; tais valores são empregados em simulações usando Métodos de Monte Carlo para aproximar, estocasticamente, as necessidades energéticas de pico esperadas.

Existem também diversos pacotes computacionais disponíveis para avaliação de sistemas de cogeração que se utilizam do parâmetro ALFA. O modelo computacional DEUS (Dual Energy Use Systems) [4] foi desenvolvido para simular, por comparação, plantas industriais com e sem sistemas de cogeração para valores especificados com respeito ao consumo de vapor para processo e para geração eletromecânica, bem como taxas de retorno para o investimento no sistema. Os valores do consumo de vapor para processo e geração eletromecânica podem ser fornecidos não apenas como índices médios unitários para

cada setor ou processo, mas em termos de perfil de variação do parâmetro no tempo.

2.4 Levantamento da Potencialidade dos Setores Industriais

A necessidade de se organizar um levantamento que apresente valores representativos e atuais para uma parametrização dos processos ou setores industriais encontra forte barreira não apenas na falta de estatísticas sérias, confiáveis e regulares, mas também, em certas ocasiões, na multiplicidade de informações, apresentadas por órgãos distintos, com grande disparidade. Persiste ainda, como agravante, o receio de muitas empresas em fornecer informações sobre sua situação, por julgar que possa haver quebra de sigilo industrial, ou ainda, temendo medidas de contenção no consumo de energéticos por parte dos órgãos competentes.

Em face da diversidade de fontes para o levantamento, foram utilizados os Balanços Energéticos Nacional [27] e dos Estados de São Paulo [2], Rio de Janeiro [24] e Minas Gerais [11] para se obter índices globais em dez setores industriais, a saber : Cimento, Ferro Gusa, Ferro Ligas, Outros Metais, Mineração e Pelotização, Papel e Celulose, Alimentos e Bebidas, Cerâmica, Têxtil e Química.

Os índices a seguir apresentados (vide Tabela 2.2) foram obtidos a partir de análise temporal e espacial, sendo que constam apenas os valores mínimo, médio e máximo verificados

por setor; a base temporal utilizada difere ligeiramente de um Estado para outro, em função da disponibilidade de informações existentes. Para efeito de rateio da parcela de utilização da energia contida nos combustíveis destinados a calor de processo e aquecimento direto, foram utilizados os índices fornecidos pela Comissão Nacional de Energia- Balanço de Energia Útil [10], que geraram constantes K_i específicas de cada setor, para serem multiplicadas pelo consumo de vapor para processo, S , de modo a compor o parâmetro ALFA:

$$K_i = \frac{E_{cp} + E_{ad}}{E_u} \qquad (2.3)$$

onde

E_{cp} - energia para calor de processo (vapor, fluido térmico, etc.)

E_{ad} - energia para aquecimento direto (fornos, secadores diretos, etc.)

E_u - energia útil total do setor.

Constam do Anexo 1 os valores coletados para a composição da Tabela 2.2, discriminando os valores de energia térmica e eletromecânica em sua variação temporal, cujo comportamento por setor pode ser visualizado nas Figuras 2.2 e 2.3 apresentadas a seguir.

TABELA 2.2 . VALORES OBTIDOS PARA O PARAMETRO ALFA EM DIFERENTES SETORES INDUSTRIAIS

LOCALIDADE		MINAS GERAIS			SÃO PAULO			RIO DE JANEIRO			BRASIL		
Setor Industrial	Eficiência (%)	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.	Mín.	Méd.	Máx.
Cimento	80,8	0,098	0,122	0,150	*	*	*	0,2898	0,2923	0,2957	0,084	0,105	0,137
Ferro Gusa	99,7	0,107	0,117	0,125	0,2731	0,4569	0,6817	0,3367	0,3464	0,3578	0,052	0,081	0,101
Ferro Liga	92,1	0,768	0,838	0,940	-	-	-	-	-	-	0,650	1,032	1,627
Outros Metais+	48,1	-	-	-	0,3650	0,6036	0,8501	0,4465	0,4577	0,4635	2,758	2,701	5,004
Mineração/Peletização	61,1	0,682	1,072	1,349	-	-	-	-	-	-	0,166	0,320	0,816
Papel Celulose	73,8	0,046	0,128	0,158	0,1869	0,3245	0,5674	0,4646	0,4732	0,4830	0,230	0,364	0,582
Cerâmica	77,1	0,027	0,036	0,041	0,1145	0,1455	0,1897	0,5210	0,6509	0,7435	0,045	0,113	0,271
Têxtil	65,3	0,594	0,743	0,897	0,2318	0,4119	0,6151	0,4042	0,4200	0,4313	0,436	0,696	1,306
Alimentos/Bebidas	98,6	0,063	0,092	0,136	0,2418	0,5288	0,8899	0,3293	0,3870	0,4231	0,033	0,070	0,140
Química	75,9	0,924	1,088	1,264	0,1932	0,2322	0,3019	0,3795	0,4161	0,4639	0,234	0,331	0,500

+ inclui Alumínio, Cobre,...
* 100% uso de eletricidade.

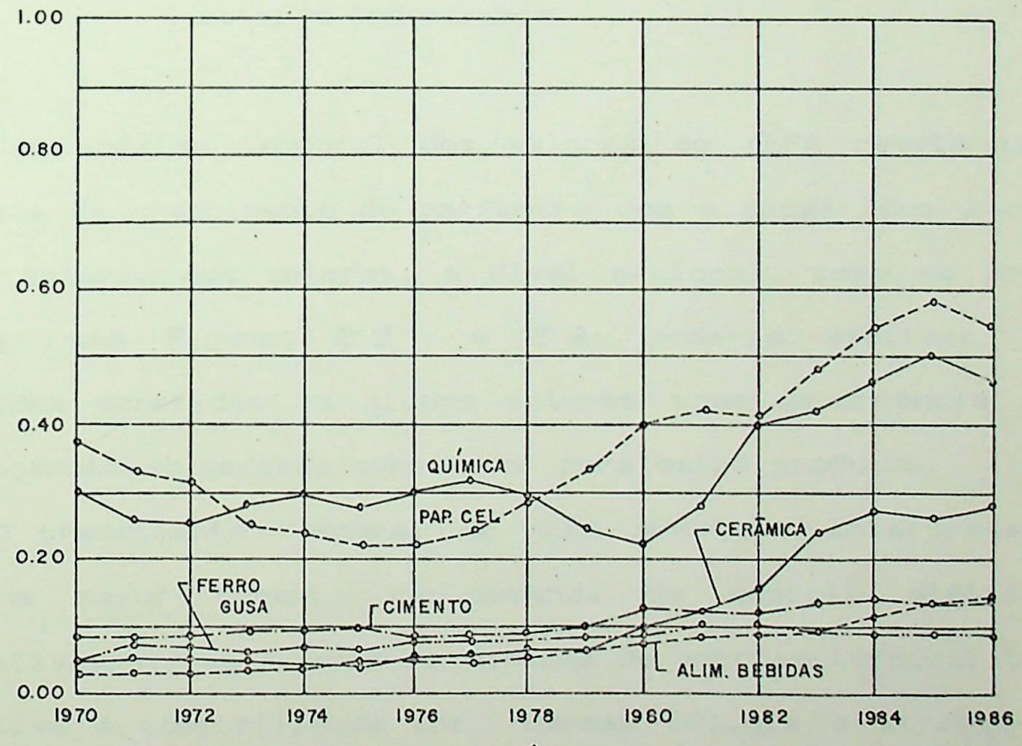


Figura 2.2 - Variação temporal do parâmetro ALFA (Brasil) 6 setores industriais

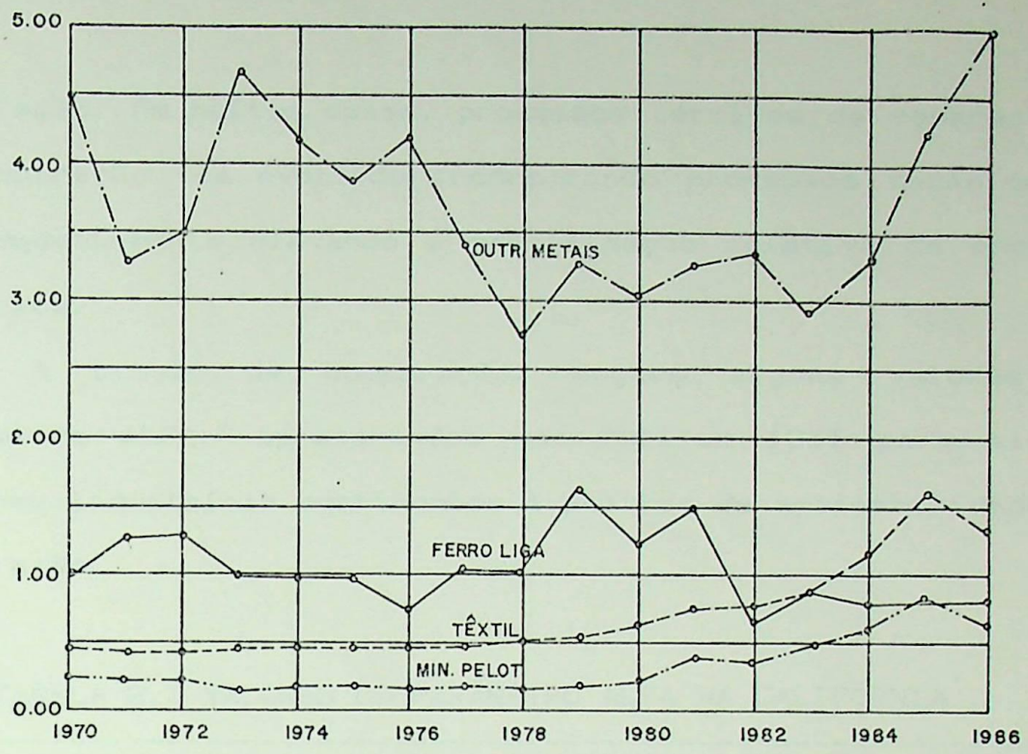


Figura 2.3 - Variação Temporal do Parâmetro ALFA (Brasil)
4 setores industriais

Uma análise temporal dos valores de ALFA revela uma tendência de crescimento do parâmetro com o passar dos anos, para a maioria dos setores, a nível nacional, como se pode observar nas Figuras 2.2 e 2.3; pode-se explicar as flutuações ocorridas em alguns setores como decorrência do comportamento do mercado consumidor para estes produtos.

O crescimento temporal de ALFA pode ser interpretado como um maior aumento na demanda de energia elétrica comparativamente ao aumento na demanda de energia térmica; tal afirmativa é compartilhada por Berman [6].que o atribui à necessidade de um aumento da proteção ao ambiente pelo uso de

cogeração. Em muitos casos, processos térmicos de separação e concentração tem evoluido incorporando processos mecânicos e consequentemente elevando a participação relativa da energia elétrica.

A título de comparação, seguem alguns valores do parâmetro ALFA apresentados por Pulliam [34] para alguns setores industriais pertinentes à análise de aplicabilidade da cogeração.

TABELA 2.3 VALORES DO PARÂMETRO ALFA NA CALIFÓRNIA

SETOR INDUSTRIAL	ALFA
ALIMENTOS	0.16
PAPEL	0.18
QUIMICA	0.22
TÊXTIL	0.28
METAIS PRIMÁRIOS	0.30
METAIS BENEFICIADOS	0.30
BORRACHAS/PLÁSTICOS	0.64
MAQUINÁRIOS	0.86
EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE	1.02
INSTRUMENTOS	1.19
ELETRO-ELETRÔNICA	1.26

Como complemento a estas informações, são apresentados a seguir índices levantados pelo Grupo de Trabalho sobre

Autoprodutores de Energia Elétrica [13], revelando os setores industriais que oferecem melhores e mais vantajosas oportunidades para a cogeração, em diferentes Estados brasileiros, a partir dos dados colhidos em diferentes empresas via questionário e entrevistas.

TABELA 2.4 POTENCIAL DE COGERAÇÃO DO BRASIL (MW)

SETORES	P= 60 kgf/cm^2 T= 480 C	P= 42 kgf/cm^2 T= 420 C	P= 21 kgf/cm^2 T= 280 C
Sucroalcooleiro	2855.10	2215.51	1089.20
Siderurg/Metal.	53.73	37.07	6.00
Químico/Petroq.	189.75	110.42	46.71
Alim./Bebidas	278.56	214.53	98.15
Papel Celulose	166.85	92.42	26.81
Têxtil	57.50	41.38	17.77

Com base nos valores então apresentados, é possível compor uma visão realísta acerca das necessidades de cada setor quanto à demanda de energia. No capítulo a seguir serão tecidas considerações acerca da capacidade de geração de alguns sistemas usualmente empregados.

CAPÍTULO 3 PARAMETRIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DE GERAÇÃO

3.1 Introdução

No capítulo anterior, foram levantadas as necessidades energéticas de diferentes processos industriais, referentes a calor de processo e energia eletromecânica; foram explorados, para o Brasil, temporal e espacialmente, índices anuais expressivos da relação demanda eletromecânica por demanda térmica.

Para que se possam associar aos processos equipamentos que atendam às necessidades anteriormente detectadas, faz-se necessário avaliar o comportamento de certos sistemas disponíveis no tocante à sua capacidade de atender às necessidades demandadas, sem esquecer, porém, que este não é mo único fator de peso para a tomada de decisão. A seleção dos equipamentos para geração combinada de calor e potência deve não apenas atender ao processo, mas deve ser técnica e economicamente viável para permitir a negociação do excedente de energia.

O estado da arte em cogeração apresenta três ciclos passíveis de utilização no momento, em unidades industriais, cada um dos quais se adequando mais que os outros às condições específicas de cada processo: o ciclo Rankine, com turbina a vapor de contrapressão ou de condensação/extração; o ciclo Brayton associado a caldeira de recuperação, e o ciclo

combinado 'turbina a gás-caldeira de recuperação-turbina a vapor', que desponta como uma opção interessante nas indústrias onde a demanda por energia eletromecânica é maior (altos valores de ALFA).

Este capítulo se propõe apresentar relações e critérios que sejam elementos para a correta especificação dos conjuntos geradores, adequados a diferentes características de processo dos principais setores de produção que apresentam maior potencial de cogeração.

3.2 Parametrização dos Sistemas de Cogeração

3.2.1 Introdução

Para seleção do ciclo de geração mais adequado a um certo processo industrial que vise a cogeração, alguns fatores relevantes devem ser verificados de imediato, a saber :

- verificar se existem incentivos na legislação[1] específica da área de energia e proteção ambiental;
- caracterizar a demanda por energia eletromecânica e energia térmica;
- avaliar as possíveis fontes energéticas disponíveis (combustíveis e interligação com a rede) e seus custos;
- avaliar as oportunidades para venda de excedentes de

---

1 - Desde dezembro/1988 vigora a Portaria MME 1474 que incentiva a cogeração industrial.

energia;

- quantificar a disponibilidade monetária para o empreendimento e definir critérios de retorno do capital empatado.

A seguir serão discutidos alguns dos parâmetros técnicos úteis para a decisão por uma certa configuração, em detrimento das demais, para aplicações específicas em diferentes processos.

3.2.2 Modelo para caracterização de sistemas de cogeração

Considerando-se que os sistemas de cogeração produzem diferentes taxas de potência e calor em função de características próprias de cada ciclo, e que em comum existe a necessidade de uso de combustível como fonte de energia, pode-se parametrizar tais configurações através de um modelo genérico que relacione os parâmetros de saída; a figura 3.1 ilustra esquematicamente um sistema de cogeração genérico, retratando os insumos e produtos finais obteníveis.

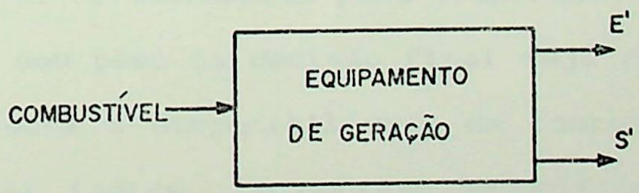


Figura 3.1 Esquema genérico de um sistema de cogeração

Sendo

E' ... energia eletromecânica produzida [kJ/h]

S' ... energia térmica produzida [kJ/h]

a relação que se obtém do quociente entre ambas energias é um valor adimensional, a qual se denomina, para futuras referências, parâmetro BETA :

$$BETA = E' / S' \qquad (3.1)$$

O valor de BETA depende do tipo de sistema de geração considerado e das condições de operação; assim seu valor deve ser determinado caso a caso. Valores médios indicativos podem ser levantados para fins de primeira avaliação, com base nos valores disponíveis acerca dos combustíveis, temperaturas e pressões de processo, e rendimento dos equipamentos atualmente utilizados.

O rendimento térmico do ciclo de geração assumiu-se como sendo o quociente entre todas as formas de energia efetivamente produzidas e consumidas no ciclo pelo calor gerado na queima do combustível. Esse índice se revela útil como ferramenta termodinâmica para comparação entre os ciclos, muito embora seu peso na decisão final seja reduzido, uma vez que não expressa a disponibilidade de combustível;associado, porém, a outro índice, o consumo específico de combustível passa a merecer maior atenção quando da avaliação dos sistemas.

O consumo específico de combustível é a relação entre a vazão mássica de combustível efetivamente enviada aos combustores pela potência líquida obtida no ciclo; conhecida a potência, é possível estimar-se o volume de combustível necessário para operação do sistema por certo período. Vale ressaltar que a disponibilidade de combustível e seu custo deverão ser ponderados com base nesse índice.

A relação vazão mássica de vapor/energia é a relação entre a razão em peso de vapor produzido no tempo pela energia efetivamente produzida pelo ciclo; esse parâmetro é importante na avaliação determinística da produção global de vapor nos geradores, de modo a atender certas curvas de demanda. A tabela 3.1, compilada e adaptada de Gorges [15], fornece valores médios para alguns desses índices.

TABELA 3.1 PERFORMANCE TÍPICA DE SISTEMAS 'TOPPING'

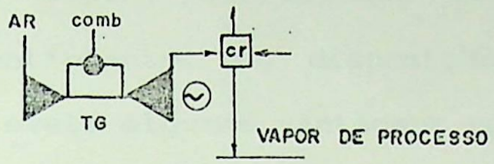
PARAMETRO	UNIDADE	T V	T G	C C
BETA	MW_e/MW_t	0.171	0.683	0.853
CONS. ESPECIFICO INCREMENTAL	kcal/kWh	1198	1031	1691
--COGERACAO				
CONSUM. COMBUST.	kcal/kcal	1.377	2.459	2.677
ENERGIA/COMBUST.	kcal/kcal	0.124	0.278	0.319
CALOR/COMBUSTIV.	kcal/kcal	0.726	0.400	0.374
UTILIZ. COMBUST.	%	84.0	68.6	69.3
--GERACAO SEPARADA				
CONSUM. COMBUST.	kcal/kcal	1.676	3.176	3.676
--CONSERVACAO COM COGERACAO				
CONSUM. COMBUST.	%	17.9	22.8	27.2

OBSERVACAO: REND. CALDEIRA=85%, EFICIENCIA DO TROCADOR DE CALOR=95%, CONSUMO ESPECIFICO DA PLANTA= 2520 kcal/ kWh

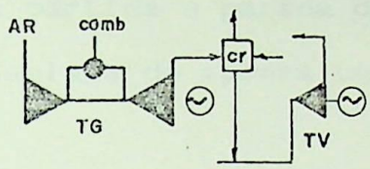
CICLOS: TV=RANKINE TG=BRAYTON CC=COMBINADO

3.2.3 Ciclos de cogeração

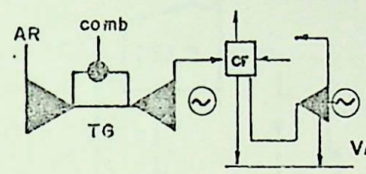
A seguir são apresentados diversos ciclos, dentre os mais difundidos na atualidade, segundo Poulallion [33].



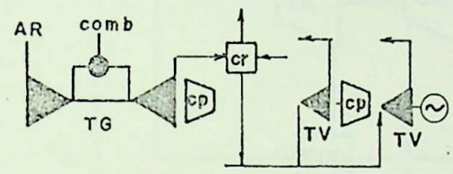
1- COGERAÇÃO (vapor do processo)



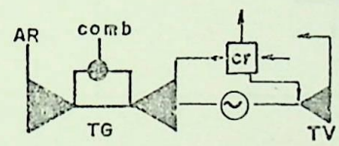
2- CICLO COMBINADO



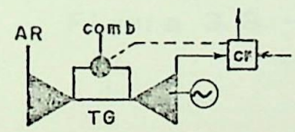
3- CICLO COMBINADO (vapor de processo)



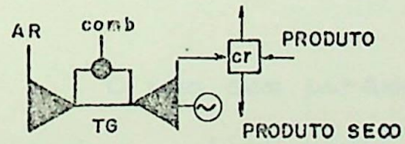
4- COGERAÇÃO (COMPRESSÃO E ELETRICIDADE)



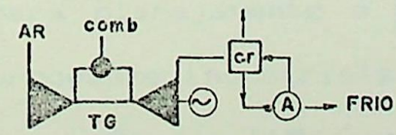
5- CICLO INTERLIGADO (GERADOR ÚNICO)



6- CICLO CHENG (INJEÇÃO DE VAPOR)



7- COGERAÇÃO (SECAGEM)



8- COGERAÇÃO (PRODUÇÃO DE FRIO - ABSORPÇÃO)

Figura 3.2 - Ciclos de Cogeração

Além desses, é interessante observar que o ciclo combinado como usualmente se conhece, com turbina a gás e a vapor, corresponde ao esquema 3 da figura anterior; entretanto, a disposição apresentada por Vichnievsky [47] revela algumas vantagens operacionais, especialmente no tocante à partida e parada do ciclo, permitindo além disso, a operação isolada de apenas um dos ciclos (no caso, do ciclo a vapor).

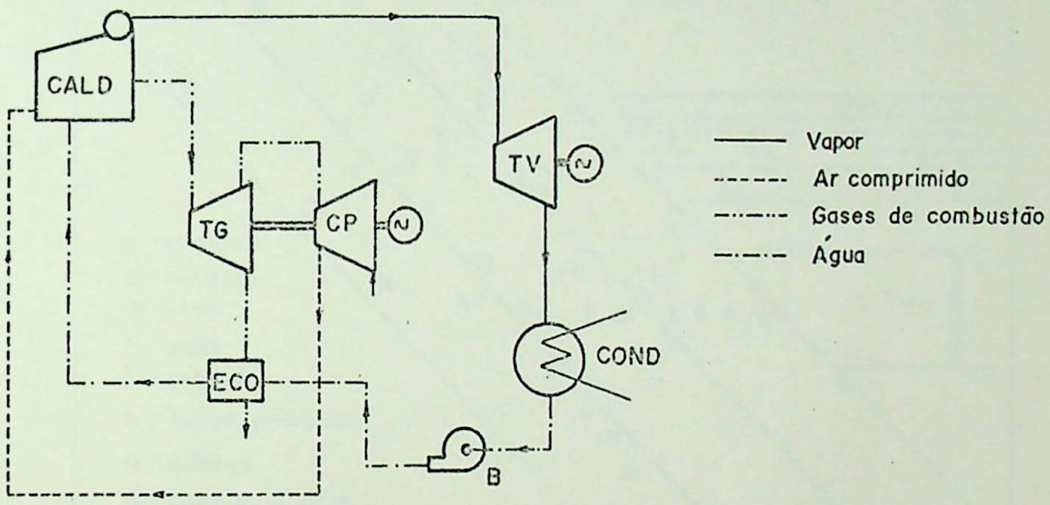


Figura 3.3 - Ciclo combinado vapor-gás segundo Vichnievsky

3.3. Modelos que Utilizam a Parametrização

O uso dos parâmetros de projeto descritos são comumente citados na literatura especializada como índice de referência para planejamento e projeto de integração desses sistemas a processos industriais.

Gorges [15] apresenta a relação entre o parâmetro BETA

com o consumo específico incremental como o índice adequado para a seleção do sistema de cogeração apropriado para cada situação. A figura 3.4, apresentada a seguir, contém demandas típicas do parâmetro BETA para uma seleção de setores industriais.

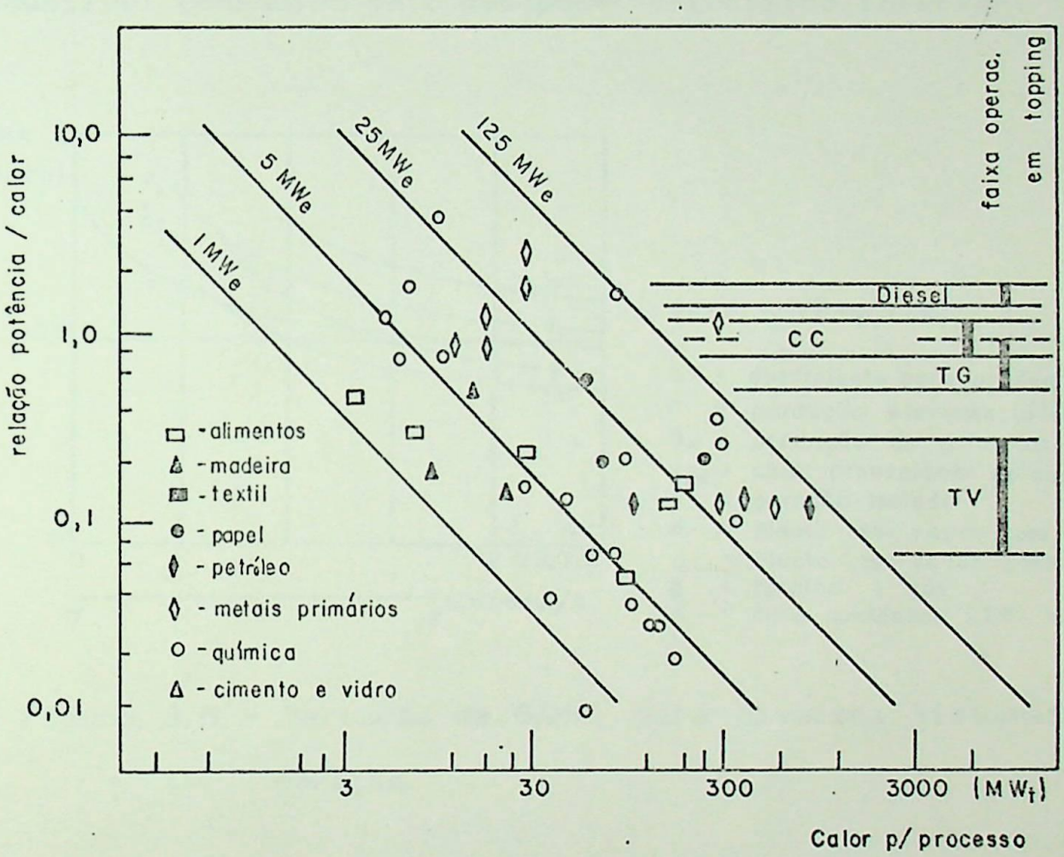


Figura 3.4 Valores típicos de BETA para seleção de setores industriais

Schwarzenbach [40] se utiliza do mesmo parâmetro para avaliar a quantidade demandada de energia térmica e eletromecânica em sistemas de cogeração. Uma vez estabelecidos o equipamento para geração, o combustível a ser utilizado e o parâmetro BETA associado para uma certa condição de operação,

obtém-se da figura 3.5 a variável GAMA, adimensional, compondo-se um sistema a duas equações e duas incógnitas, cuja solução resulta nos valores E' e S' procurados, uma vez que se define GAMA como o quociente entre a soma dos dois insumos, E' e S', pelo produto entre a vazão em massa do combustível consumido pelo seu poder calorífico inferior.

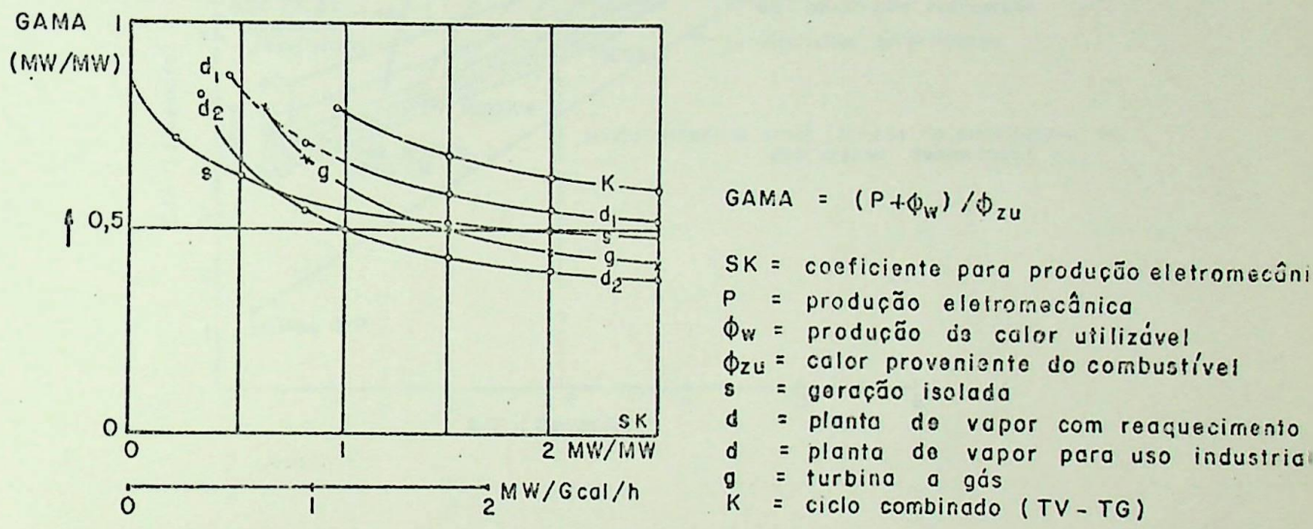
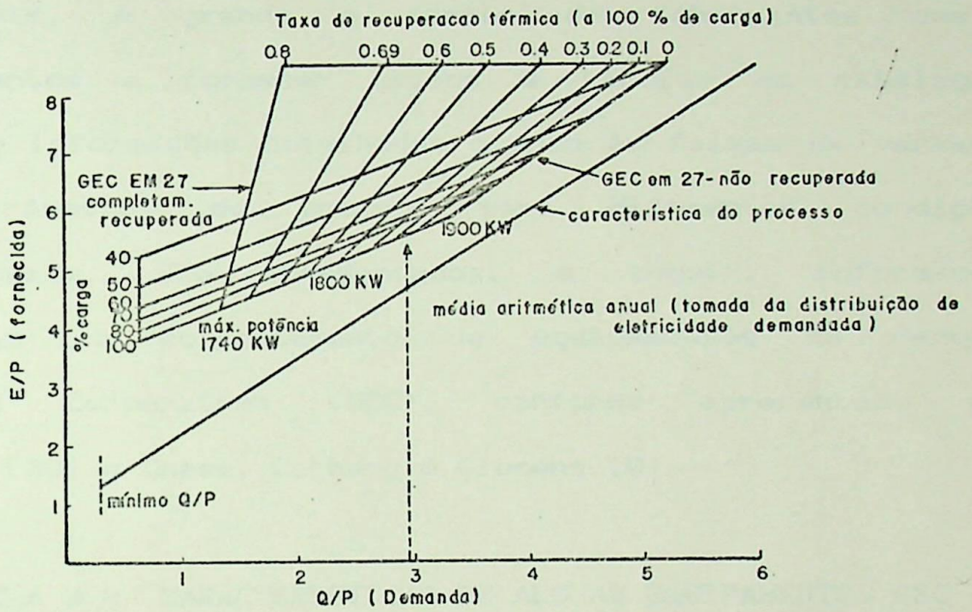


Figura 3.5 - Variação de GAMA para diversos sistemas de geração.

Lowder [25] estabelece uma metodologia de projeto em que, através das curvas características do processo e do equipamento, é possível ajustar-se a melhor máquina para cada caso. Apresenta-se, na sequência, as curvas do equipamento utilizado em seu trabalho (uma turbina GTL - EM 27, da G.E.C.) e do processo , sendo os índices apresentados na legenda. Conforme se apresentará em 3.5, a avaliação das

características do processo podem ser cruzadas com as características de determinados sistemas de geração, permitindo-se verificar as condições mais favoráveis para o atendimento das demandas do processo.



LEGENDA			
	PROCESSO	GERADOR	UNID.
P	Potência demandada	Potência fornecida	KW
Q	Calor demandada	Calor recuperável	KW
E	total de energia do combustível e concession	total de energia do fluxo do combustível	KW

Figura 3.6 - Características energéticas para GTL EM 27

3.4 Critérios para Escolha do Ciclo

Os parâmetros de projeto, apresentados aqui como elementos primordiais na análise de seleção do conjunto gerador mais apropriado para cada situação, são variáveis de

acordo com as características de fabricação.

Nos Estados Unidos e Europa, onde a cogeração se apresenta em estado mais avançado a nível tecnológico e operacional, em face mesmo de suas características climáticas favoráveis, é grande o número de fabricantes destes equipamentos a fornecer ábacos e tabelas em catálagos, contendo informações detalhadas quanto às faixas de variação dos parâmetros de projeto para diferentes condições operacionais. São apresentados, a seguir, informações relativas ao comportamento de equipamentos da General Electric Corporation (GEC), conforme apresentado por Kovacik [20] e Chase, Carberg & Clemens [9].

TABELA 3.2 CARACTERÍSTICAS DE ALGUNS EQUIPAMENTOS GEC

STEAM GENERATION AND FUEL CHARGEABLE TO POWER WITH GAS TURBINES AND EXHAUST HEAT BOILERS

Generator Drives - Natural Gas Fuel

Gas Turbine Type	MS5001(P)		MS6001(B)		MS7001(E)		MS9001(E)***		LM2500		LM5000	
Gas Turbine Model	PG5361(P)		PG6531(B)		PG7111(E)		PG9151		LM2500PE		LM5000PA	
Gas Turbine Rating ISO (KW)	25200		37400		80000		112000		21100		31820	
Site Performance @ 80 °F Sea Level (Unfired/Supp Fired/ Fully Fired)*												
Gas Turbines												
KW	22510/22340/22080		33960/33770/33400		73460/73130/72640		102430/101910/101140		19510/19370/19160		27490/27040/26750	
Shaft Speed (rpm)	5100		5100		3600		3000		3600		3600	
Fuel* - Million Btu/h	321.8		421.8		890.3		1237.7		208.7		298.0	
Exhaust												
- Flow - lb/h	926400		1045600		2203000		3073400		503900		887600	
- Temp - °F	937/939/943		1025/1027/1031		1008/1010/1013		998/1000/1004		977/980/984		818/820/823	
Gas Turbine HRSG Fuel - Million Btu/h	0/138.3/848.9		0/127.8/898.2		0/280.9/1890.7		0/401.6/2642.2		0/69.3/427.3		0/165.5/824.0	
Steam Conditions	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh	HRSG Steam K lb/h	FCP** Gas Turb Btu/kWh
Unfired Boilers												
160 psig - 371 °F	144.8	8540	191.2	5680	393.0	5700	539.0	5770	85.1	5460	108.2	6150
420 psig - 655 °F	117.2	7160	158.4	6030	323.5	6080	442.5	6160	69.7	5860	83.4	6730
630 psig - 755 °F	107.8	7480	147.0	6220	301.0	6290	411.0	6360	64.5	5950	74.1	7040
895 psig - 830 °F	100.0	7790	139.8	6400	283.5	6470	387.0	6560	60.5	6160	—	—
895 psig - 830 °F/	100.0/	6320	139.8/	5560	283.5/	5560	387.0/	5650	60.5/	5330	—	—
160 psig - 371 °F	27.7		24.0		55.8		80.3		13.5			
1315 psig - 905 °F/	—	—	131.8/	5550	266.5/	5550	362.5/	5650	—	—	—	—
160 psig - 371 °F			30.3		69.3		100.2					
1525 psig - 955 °F/	—	—	129.8/	5560	256.0/	5540	—	—	—	—	—	—
160 psig - 371 °F			33.3		78.5		—	—				
Supplementary Fired												
420 psig - 655 °F	237.0	6070	268.0	5410	565.0	5440	784.0	5490	129.4	5200	229.0	5600
630 psig - 755 °F	226.0	6170	256.0	5480	539.0	5500	753.0	5570	123.8	5260	217.5	5680
895 psig - 830 °F	218.0	6260	247.5	5550	522.0	5570	728.0	5640	119.8	5320	210.5	5750
1315 psig - 905 °F	212.5	6370	240.0	5630	506.0	5650	707.0	5710	116.2	5390	204.5	5840
1525 psig - 955 °F	207.0	6470	234.0	5710	494.0	5720	689.0	5790	113.2	5470	199.2	5920
Fully Fired												
630 psig - 755 °F	755.0	4330	830.0	4160	1739.0	4220	2422.0	4290	393.5	4210	709.0	4290
895 psig - 830 °F	736.0	4330	804.0	4160	1694.0	4220	2359.0	4290	383.5	4210	691.0	4290
1315 psig - 905 °F	719.0	4330	793.0	4160	1656.0	4220	2307.0	4290	372.0	4210	674.0	4290
1525 psig - 955 °F	706.0	4330	776.0	4160	1626.0	4220	2265.0	4290	365.0	4210	662.0	4290

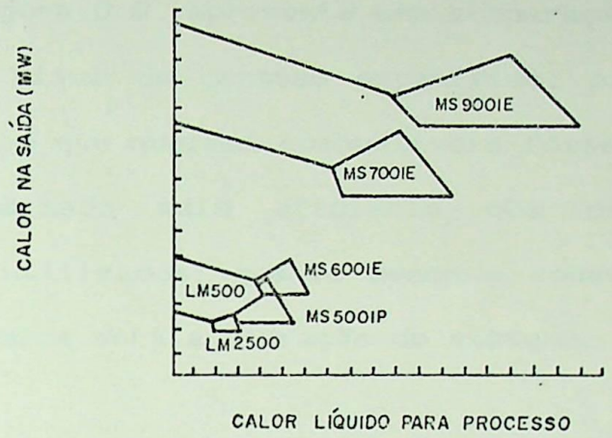


Figura 3.7 Campo de Operação de algumas turbinas a gás GEC

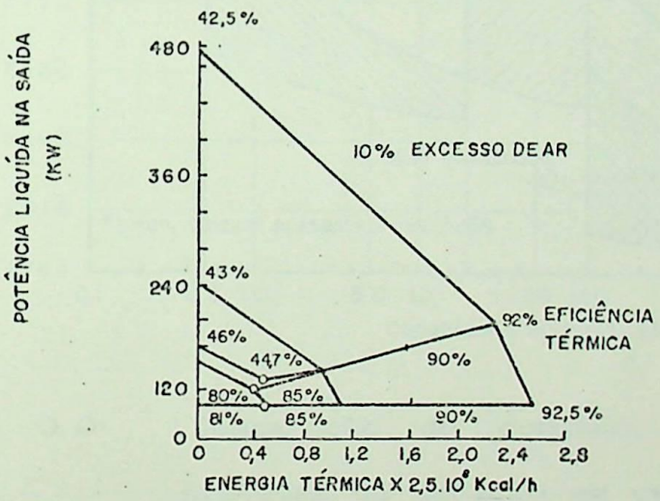


Figura 3.8 Campo de Operação de Ciclo Combinado GEC

Serão discutidos, a seguir, alguns dos aspectos mais relevantes e de caráter geral com respeito ao comportamento dos parâmetros de projeto desses sistemas com vistas à cogeração, conforme informações pertinentes a diferentes

publicações.

A figura 3.9 apresenta uma comparação entre sistemas de geração a nível de consumo específico, para um cenário dos equipamentos que queimam combustíveis fósseis, revelando ser o ciclo combinado mais eficiente que os demais sistemas comumente utilizados; quanto menor o consumo específico, tão mais econômica será a operação do sistema.

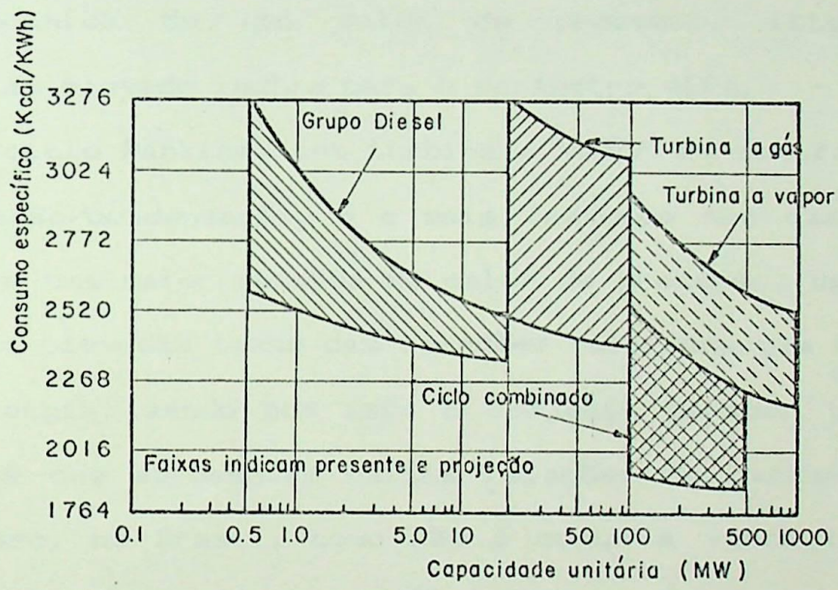


Figura 3.9 Comparação do consumo específico para sistemas de geração em cenário de queima de combustíveis fósseis [6]

O ciclo Brayton, com turbina a gás e caldeira de recuperação para aproveitamento dos gases de escape, apresenta-se desfavorável, comparativamente aos demais ciclos, por contar com alto consumo de combustível e baixo rendimento

individual. Sua indicação é para indústrias que já possuem turbinas a gás e que necessitam de volume de vapor não alcançável pelos demais ciclos.

O ciclo combinado turbina a gás - caldeira de recuperação - turbina a vapor apresenta os menores índices de consumo específico, conforme figura 3.11, porém suas relações calor/energia e vazão de vapor/energia não são elevadas, sendo por isto indicado para indústrias que requerem mais energia eletromecânica do que calor de processo, isto é, que apresentam elevado índice para o parâmetro ALFA.

O ciclo Rankine, com turbina a vapor de contrapressão e de extração/condensação, é o mais indicado nos casos em que prevalece uma maior demanda de calor de processo, uma vez que apresenta elevadas taxas das relações calor/energia e vazão de vapor/energia, sendo por isso o conjunto gerador típico dos processos que apresentam baixas relações do parâmetro ALFA. Além disso, no Brasil, como não é comum a venda de energia térmica (venda de vapor), o sistema deve atender prioritáriamente o processo, conforme apresentado por Nogueira e Santos [31].

Nesse ciclo, as condições iniciais de pressão e temperatura do vapor de processo influenciam a operação econômica do sistema de geração, podendo as mais altas condições serem justificáveis, conforme Kovacik [20]. A figura 3.10 apresenta o comportamento da relação BETA contra a pressão do vapor de processo para diferentes condições

iniciais do vapor; a figura 3.11 apresenta as faixas de condições iniciais do vapor normalmente selecionadas para turbinas a vapor em geração industrial.

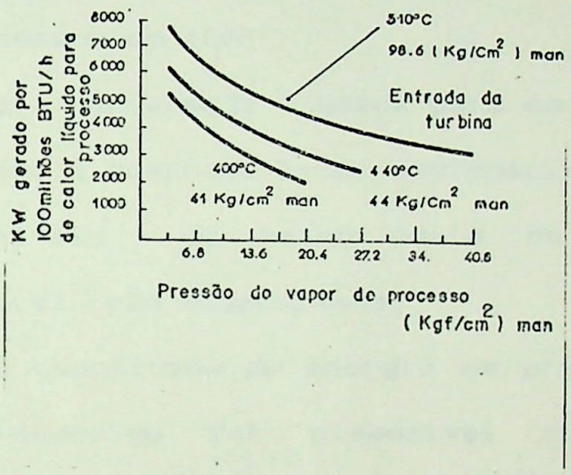


Figura 3.10 Comportamento da relação BETA contra pressão de vapor de processo para diferentes condições iniciais do vapor

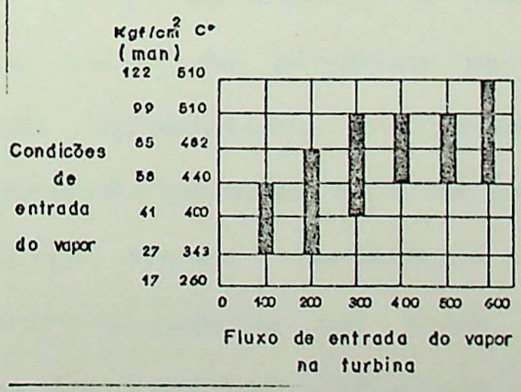


Figura 3.11 Faixas de condições iniciais do vapor para primeira avaliação na seleção do ciclo a vapor

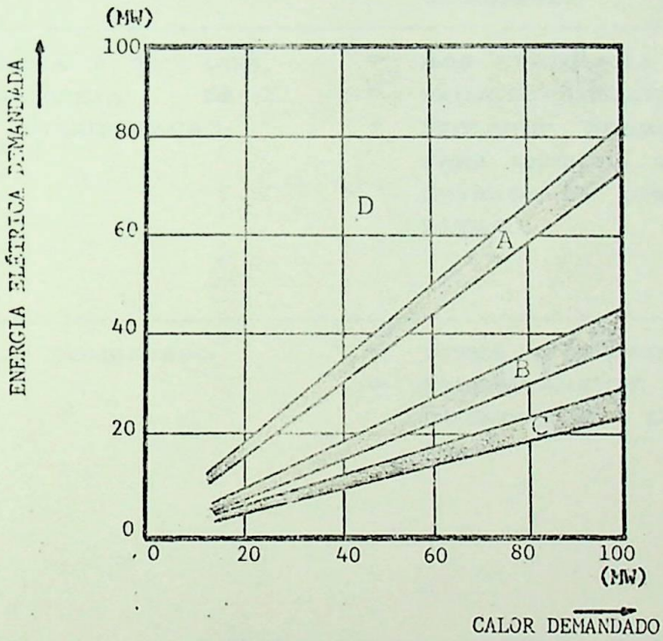
É importante estender um pouco mais a discussão em torno desse ciclo, que apresenta duas configurações distintas, quais sejam o ciclo de contrapressão e o de condensação/extração, podendo este último ser com extração controlada ou não.

O ciclo de condensação/ extração é especialmente interessante , por suas vantagens econômicas, quando associado a processos em que:

- a potência condensada é usada para controlar a demanda por potência comprada à concessionária;
- combustíveis de baixo custo ou resíduos do(s) processo(s) são disponíveis;
- adequada quantidade de energia de processo fracamente energo-intensivo for disponível para um sistema "bottoming";e
- a condensação permite continuidade de serviço em operações críticas onde a falha da concessionária pode causar prejuízos ao processo.

A figura 3.12 apresenta a faixa de potência eletromecânica e calor de processo para os três ciclos discutidos, sendo apresentados individualmente os ciclos Rankine de condensação/extração e o de contrapressão [18]. Segundo este gráfico, apenas a turbina de condensação/extração é capaz de cobrir a demanda por calor de processo e de potência eletromecânica em todos os casos. O ciclo combinado pode estender consideravelmente a sua faixa se for equipado

com turbina de condensação/extração; nos casos em que a demanda por potência for pequena se comparada com a demanda de calor de processo, a turbina de contrapressão é mais recomendável. Por outro lado, quando a taxa calor/energia é alta, o ciclo combinado se revela a melhor opção. Para qualquer dos sistemas de geração, a pressão de processo deve se situar entre 50 e 4000 kPa para se apresentarem economicamente viáveis.



A...Ciclo Combinado
B...Turbina a Gás com Cald. Recup.
C...Turbina a Vapor Contrapressão
D...Turbina a Vapor Extr./Condens.

Figura 3.12 Faixas de saída de potência e calor para diferentes sistemas de geração

A tabela 3.3 compila as vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas de cogeração, comparativamente, conforme Kehlhofer [18].

TABELA 3.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS GERADORES

SISTEMA	VANTAGENS	DESVANTAGENS
TURBINA A VAPOR DE CONTRAPRESSAO	* ALTA EFICIÊNCIA * PROJETO SIMPLES * ACEITA COMBUSTIVEIS DE BAIXA QUALIDADE	* BAIXA FLEXIBILIDADE NO PROJETO E OPERAÇÃO
TURBINA A VAPOR DE CONDENSACAO/EXTRACAO	* ALTA FLEXIBILIDADE EM PROJETO E OPERAÇÃO * ACEITA COMBUSTÍVEIS DE BAIXA QUALIDADE	* ALTOS CUSTOS * BAIXA EFICIÊNCIA * GRANDE DEMANDA POR ÁGUA DE RESFRIAMENTO
TURBINA A GAS COM CALDEIRA DE RECUPERACAO	* BOA EFICIÊNCIA * PROJETO SIMPLES * PEQUENO PRAZO PARA ENTREGA E ENTRADA EM OPERACAO	* MODERADA EFICIENCIA EM CARGA PARCIAL * ATUACAO LIMITADA COM COMBUSTIVEIS DE BAIXA QUALIDADE
CICLO COMBINADO	* ÓTIMA EFICIÊNCIA * RELATIVAMENTE PEQUENO CUSTO CAPITAL	* EFICIÊNCIA MÉDIA A MODERADA EM CARGA PARCIAL * ATUAÇÃO LIMITADA COM COMBUSTÍVEIS DE BAIXA QUALIDADE

Com base nas considerações anteriores, é possível ponderar-se as vantagens e desvantagens no uso de cada ciclo, e recomendar-se para cada caso a alternativa mais apropriada.

3.5 Um Método para Dimensionar o Sistema de Geração adequado a cada Processo

Lowder [25] apresenta uma metodologia de dimensionamento de centrais de cogeração para atendimento às demandas de processo. Para isso, faz-se necessário compor certas curvas relativas ao processo e ao gerador que se pretende instalar. Com base nas características do processo, é possível ter-se uma primeira indicação acerca do ciclo que deverá ser utilizado, tendo por base os parâmetros de projeto discutidos anteriormente.

De acordo com esta metodologia, é preciso dispor-se de curvas que relacionem as seguintes variáveis:

E [kW] ...taxa de consumo total de energia para qualquer gerador da central de utilidades;

P [kW] ...potência eletromecânica demandada e consumida; e

Q [kW] ...taxa de calor demandada e disponível .

Para o processo, é considerada a relação

$$E = P + Q * \eta^{-1} \qquad (4.1)$$

onde η é a eficiência da caldeira, que se revela um equação do primeiro grau quando dividida membro a membro por P :

$$(E/P) = 1 + (Q/P) * \eta^{-1}. \qquad (4.2)$$

Pelo lado do gerador, assume-se que

$$E = m * PC \qquad (4.3)$$

onde m é a vazão de combustível e PC o poder calorífico do combustível, e as curvas são variáveis em função do gerador considerado. Assim, a primeira curva relaciona a demanda Q/P com a quantidade E/P disponível, para o gerador e processo.

A segunda curva apresenta características de geração dos equipamentos : carga contra Q/P disponível; a terceira curva apresenta o espectro de demanda por energia eletromecânica contra Q/P demandada. A figura 3.13 exemplifica o comentado.

No exemplo então apresentado, para certa condição de operação do processo, sejam os pontos de demanda A e B; verifica-se para ambos um consumo agregado anual de 400 MWh no espectro de energia eletromecânica, correspondente a taxas de calor (ALFA) respectivamente de 0.6 e 5. Se, nessa ocasião, turbinas a gás estão operando de tal modo a gerar 3.5 MW, a curva característica do equipamento revelará que, para certo Q/P disponível, a relação E/P será igual a 6. Então, para a condição A, em que E/P vale 2, a distância (a) representa a perda de calor não aproveitado e a medida (b), tomada entre o ponto de operação e a condição B representa a quantidade de calor adicional necessário.

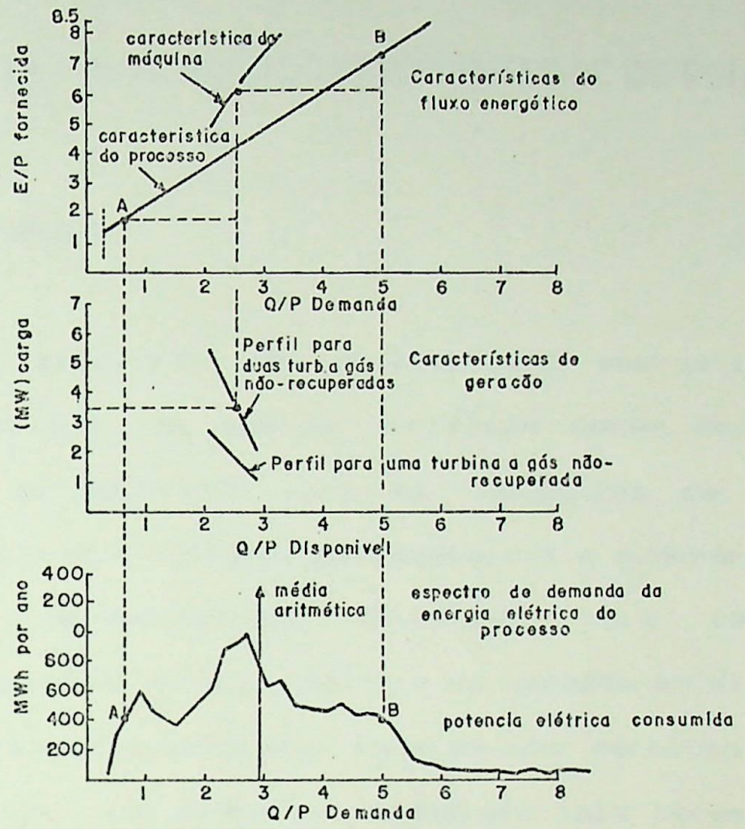


Figura 3.13 Disposição das características do gerador face a situações variáveis de demanda de calor de processo e energia eletromecânica

CAPÍTULO 4 - AVALIAÇÃO DOS EXCEDENTES DE ENERGIA

4.1 Introdução

Uma vez analisadas as necessidades energéticas dos setores industriais, em que se verificam serem maiores as oportunidades de cogeração para as indústrias de papel e celulose, alimentos e bebidas, petroquímicas e siderúrgicas, e verificada a potencialidade oferecida pela tecnologia atualmente disponível em equipamentos de geração em diferentes cenários, é preciso estabelecer modelos que permitam avaliar não apenas o modo como podem ser atendidas tais necessidades, mas também quantificar o excedente disponível para geração sob contrato de venda à concessionária.

Serão introduzidas as ferramentas necessárias para a modelagem e, estabelecido o problema, serão discutidas as técnicas propostas para quantificação do excedente comercializável, numa abordagem comparativa, bem como critérios para a estabilização da carga.

4.2 Curvas de Carga para Processos Industriais

4.2.1 O problema da variabilidade de carga

Grande parte dos complexos industriais necessitam, em sua operação, de quantidade de vapor variável ao

longo do tempo, em função de seu uso descontínuo face à diversidade de processos. A autoprodução de formas de energia, tais como energia eletromecânica e vapor para processo, nos mais diversos usos industriais, se torna uma necessidade imperiosa para bem garantir a continuidade do processo produtivo, uma vez que certas áreas são consideradas prioritárias no atendimento da demanda, em função dos níveis de confiabilidade exigidos para operação.

Em geral, as curvas de demanda de vapor se apresentam extremamente variáveis, registrando em certos instantes estabilização em torno de certos patamares, para logo a seguir apresentar-se em picos de duração relativamente curtos se comparado com o total da curva. Vale dizer que cada setor ou processo industrial apresenta um comportamento médio singular que o distingue dos demais, e que tal comportamento se deve às necessidades específicas de vapor que o mesmo apresenta. Assim é que pode-se distinguir aqueles processos que apresentam variações sensíveis em período de minutos, então chamados de processos de curto termo, e aqueles cujas variações são sensíveis em período de horas, quando então são referendados como processos de longo termo. As figuras 4.1 e 4.2 apresentam exemplos de comportamento, respectivamente, de processos de curto e longo termos [26].

Em todos os exemplos apresentados, existe sempre uma razão técnica relativa ao processo que explica o porque de tais variaçõs ocorrerem em certos períodos específicos de tempo. Assim é que , para exemplificar, pode-se afirmar

com certeza que os picos A e B apresentados na curva 4.1.a, relativa à indústria de exploração de carvão, se deve à

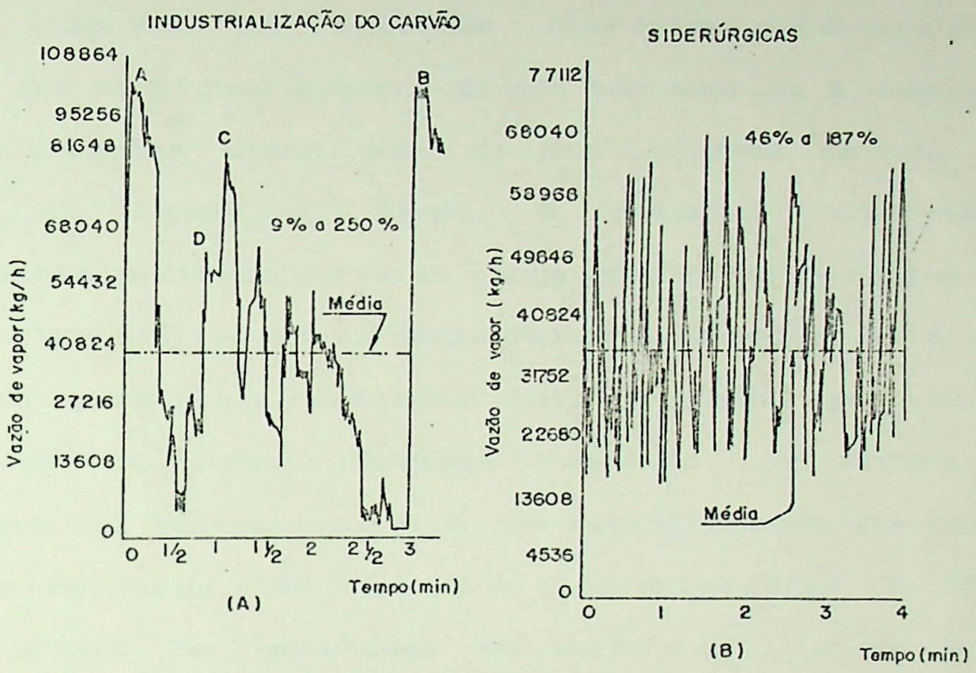


Figura 4.1 Curvas de carga para processos de curto termo

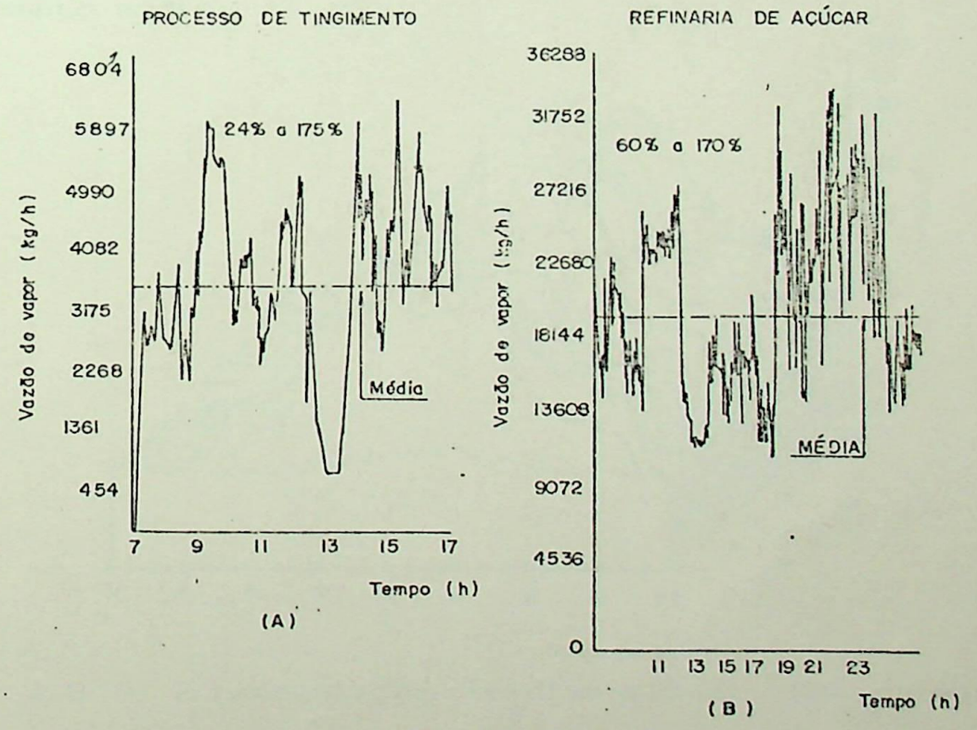


Figura 4.2 Curvas de carga para processos de longo termo

entrada em operação de três sopradores, simultâneamente; é preciso, portanto, prever-se que tais fatos inerentes ao processo irão ocorrer em certos intervalos determinados de tempo, e que de alguma maneira deverá ser suprida a demanda. É oportuno comentar ainda que, da continuidade de um certo processo ao longo do tempo, é possível obter-se um comportamento médio da curva de carga que melhor o representa, fazendo notar que tal curva média mascara quaisquer alterações aleatórias porventura sofridas pelo processo por ocasião de avarias ou outro problema fortúito. A figura 4.3 exemplifica tal afirmativa, pois que representando uma coleção de curvas de carga, obtidas para diferentes dias do mês em certo processo, e recortadas em cartolina, apresenta uma topografia irregular de vales e picos que tende a um comportamento médio.

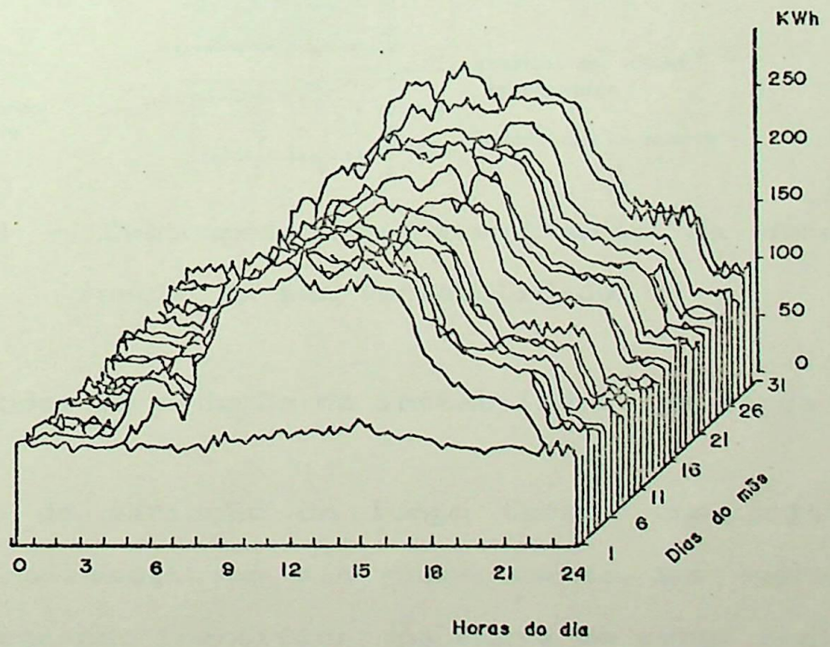


Figura 4.3 - Representação tridimensional das curvas de carga anuais, para certo processo [38]

Uma vez que a caldeira apresenta um tempo de resposta inferior à demanda, será necessário dispor-se de outros recursos que permitam contornar o problema, seja pela redução dos picos ou pelo uso de sistemas auxiliares que garantam o suprimento de vapor na taxa demandada. A figura 4.4, adaptada de [26], apresenta em linha cheia a demanda de vapor, em linha tracejada a taxa de produção de vapor pela caldeira, enquanto a linha indicada por C representa a pressão do vapor, caracterizando o descompasso no atendimento à demanda anteriormente mencionada.

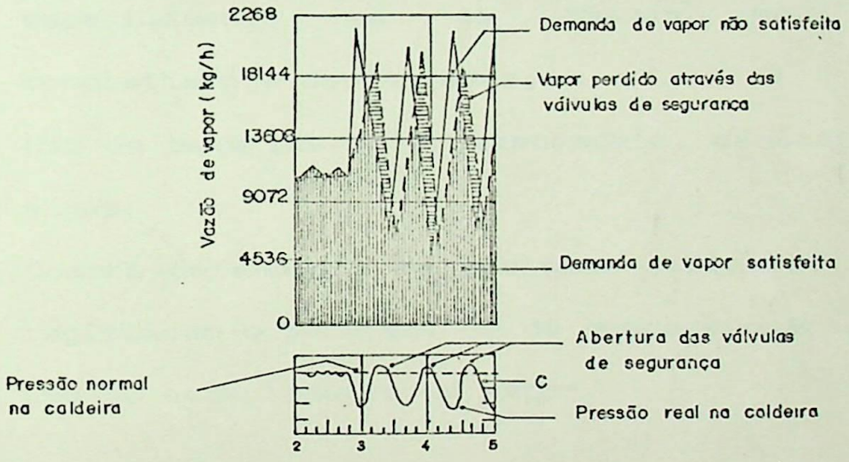


Figura 4.4 - Descompasso no atendimento da demanda em função de sua variabilidade

4.2.2 Modos de redução da instabilidade da carga

No caso de variação de longo termo, uma prática que resulta em bons resultados é o planejamento das operações do processo, procurando identificar na curva de carga contínua os fatores decorrentes da entrada de equipamentos no processo,

recarga de matéria-prima ou certas operações com alto consumo de energia, de modo a otimizar a sequência de produção.

Processos de curto termo apresentam maiores dificuldades para aplicação de tais medidas estratégicas de planejamento da produção, e para contornar tal situação, deve-se lançar mão de outros recursos, de acordo com a disponibilidade, entre os que seguem:

a) Uso de centrais de geração com eficiências mais baixas e/ou obseletas nos instantes de ponta, especialmente se as mesmas se encontrarem completamente depreciadas;
b) Uso de baterias de armazenamento, centrais Diesel ou a gás;
c) Compra de energia de sistemas vizinhos, desde que a legislação o permita, ou de concessionárias;
d) Uso de acumuladores de vapor.

Dos recursos apresentados, alguns não oferecem possibilidade real de utilização em unidades industriais, por não preencherem condições técnico-econômicos favoráveis. Os acumuladores de vapor Ruths oferecem um meio efetivo de regularizar a demanda de vapor, e encontram boa penetração na indústria, uma vez que são comuns processos que demandem vapor a pressões bem abaixo daquela produzida na caldeira; tal vapor de baixa pressão pode ser enviado a turbinas de baixa pressão para atender aos picos, além de permitir uniformidade na taxa

de produção na caldeira, minimizando flutuações de pressão. A figura 4.5 esquematiza o modo operacional de um acumulador de vapor Ruths [26].

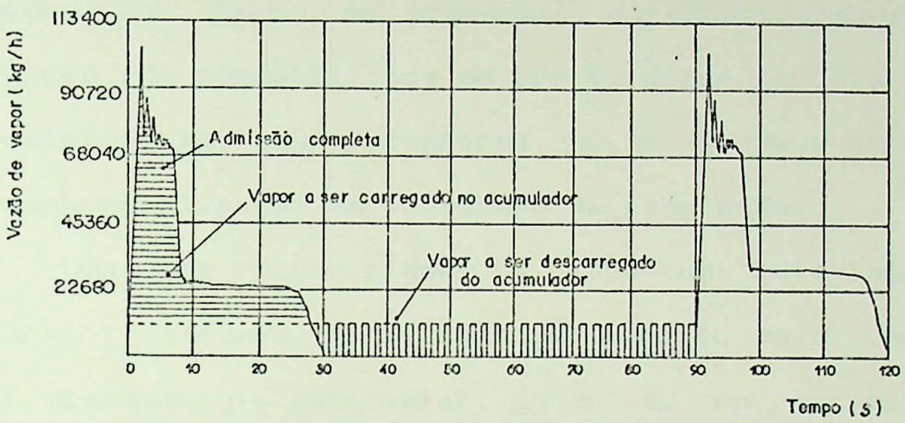


Figura 4.5 - Acumulador de vapor tipo Ruths

Uma outra alternativa, ainda em fase experimental, procura utilizar geradores de vapor a partir de hidrogênio e oxigênio como alternativa para satisfazer a demanda de pico quando da geração de energia elétrica [22]; neste processo, H_2 e O_2 são convertidos, em proporções estequiométricas, em vapor, a temperatura sendo reduzida até a condição do ponto de injeção na água de alimentação da caldeira. O vapor adicional gerado é injetado nas turbinas de pressão intermediária, que aumenta a saída da turbina a vapor em questão de segundos.

4.3 Avaliação de Excedentes

Conforme comentado em 1.5.4, os excedentes energéticos surgem na condição em que a geração dos insumos suplanta o consumo por parte do processo, caracterizando-se então a situação com possibilidade de oferta dessa parcela excedente à concessionária, onde, conforme já se afirmou anteriormente, são potencializadas as vantagens da cogeração.

Uma vez discorridos os aspectos relevantes para a escolha criteriosa do sistema de geração mais adequado para cada processo em particular, isto é, uma vez estabelecidos processo e sistema de geração , é necessário quantificar os excedentes que estarão disponíveis para negociação com a concessionária e, caso a legislação o permita com outras indústrias.

Com o intúito de se proceder tal avaliação, serão apresentados a seguir elementos necessários na análise, bem como as bases da metodologia que se deseja empregar.

4.3.1 Curvas de duração de carga

A informação básica necessária para a operação e o planejamento de uma central de geração é a curva de duração de carga, usualmente representada por potência ou vazão mássica na ordenada e tempo na abscissa, podendo ser a abscissa adimensionalizada com relação ao tempo total, representando

desse modo a probabilidade de ocorrência da variável na ordenada.

A curva de duração de carga é obtida a partir das curvas de carga do sistema em análise, totalizando-se a quantidade total de tempo durante o qual diferentes níveis de potência ou vazão mássica são demandados; a base temporal é assumida de acordo com os dados disponíveis e com o fim a que se destinam.

Sua principal forma de apresentação é como curva de duração de carga mensal e anual, onde representam a média das curvas de carga sobre o período considerado. A curva mensal é indicada para se estabelecer taxas diversas de interesse para a geração, e a curva anual se aplica na avaliação do fator de carga anual.

As curvas de duração anuais, úteis sobretudo em estudos financeiros, são obtidas a partir dos mesmos dados das curvas de carga diárias para o período de um ano (correspondente a 8760 horas), variando a ordenada desde a mínima até a máxima demanda registrada . A abscissa, que pode se apresentar variando de 0 a 8760 horas na curva anual, também pode assumir a configuração adimensional, variando de 0 a 100 % do total de horas no período considerado, forma esta muito conveniente para interpretação de eventos estocásticos envolvidos na geração. Assim é que, pela análise da curva de duração apresentada na figura 4.6, o ponto A pode ser interpretado como se 30 toneladas/hora fossem necessários durante todo o tempo, o ponto B como se 120 toneladas/hora

fossem necessários durante 60 % do tempo, e no ponto C como se durante 5 % do tempo se utilizasse, na planta de geração, o equivalente a 240 toneladas de vapor por hora. Matemáticamente, poder-se-ia expressar:

$$P(m < 30) = 1.00$$

$$P(m <= 120) = 0.40 \quad \text{ou} \quad P(m >= 120) = 0.60$$

$$m(P = 0.05) = 240 \text{ ton/h}$$

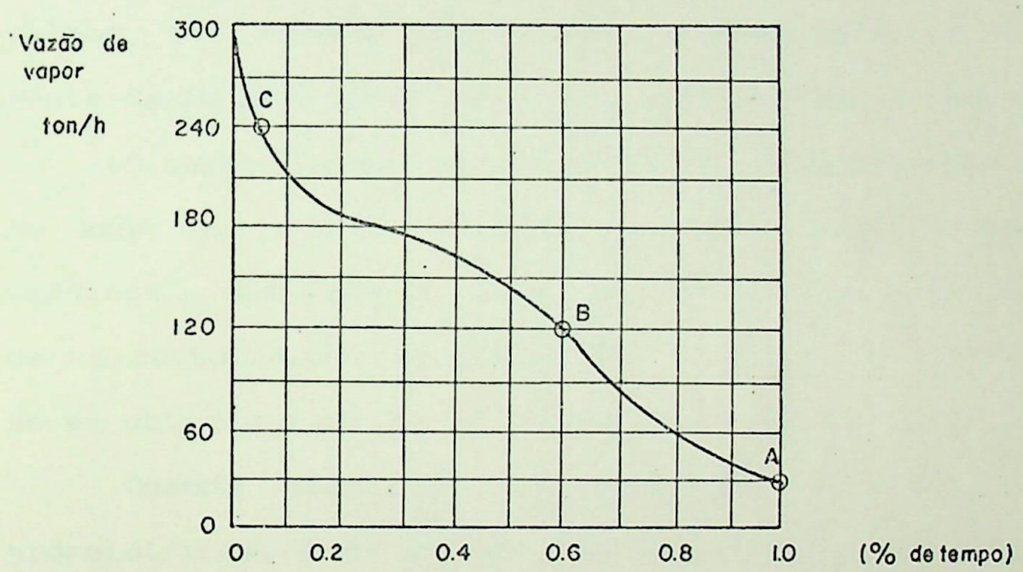


Figura 4.6 - Curva de duração de carga

4.4.2 O Método de Monte-Carlo

O uso de modelos matemáticos para planejamento e projeto de centrais hídricas já é consagrado no mundo todo. Os modelos determinísticos e os estocásticos se aplicam, diferenciadamente, a certos problemas específicos , e sua

sistematização para esses casos se encontra estabelecida. Tucci [45] apresenta diversos modelos determinísticos destinados a tais aplicações; Kelman [19] retrata os modelos estocásticos utilizáveis no gerenciamento de recursos hídricos.

Nessa classe de problemas estocásticos, em que se consideram as incertezas inerentes ao problema físico em estudo, é preciso de início avaliar o tipo de distribuição que melhor se ajusta aos dados disponíveis; a simulação Monte-Carlo prescinde, portanto, dessa primeira avaliação.

O termo Monte-Carlo deve provir da associação aos jogos de azar que tornaram famosa a cidade homônima pelos seus cassinos[1]. Basicamente, o método consiste em sortear, através de um certo número de simulações, os resultados prováveis de serem obtidos a partir de uma massa de dados conhecida.

Quando utilizado na modelagem de aproveitamentos hidrelétricos, é de grande importância a unidade de tempo em que se trabalha; assim é que, para operação de sistemas de recursos hídricos são utilizadas séries com intervalo de regularização mensal, enquanto para estudos relacionados com controle de cheias utiliza-se a discretização diária. Em centrais que utilizem sistemas de cogeração, as técnicas de Simulação Monte-Carlo se revelam uma ferramenta extremamente

---

1. Segundo Saliby [37], outros seriam os motivos deste nome; por ter sido proposto em 1943, por von Neumann, há suposições de que o termo envolvia algum código , pois que o método estava sendo usado na formulação para a bomba atômica.

útil tanto no planejamento, e portanto diretamente no projeto, quanto na operação dos mesmos. Tais sistemas, que dispõem de vazões de demanda de vapor empregado parte na geração de energia eletromecânica e parte como calor de processo, esbarram em dificuldades de estabelecer os limites confiáveis de geração para venda de excedentes de vapor às concessionárias : com o auxílio da Simulação Monte-Carlo é possível prever tais valores.

O conhecimento de séries históricas de centrais já em operação, com vazões diárias conhecidas, permite que se projete, com a devida proporção de escala, o comportamento de novos sistemas, conforme cita Kelman [19] para o caso de análise multivariada; Aguiar *et alli* [3] apresenta formulação baseada em bibliotecas de Matrizes de Transição Márkovianas (MTM), que utilizam como entrada apenas o valor médio da demanda, permitindo gerar sequências estatisticamente indistinguíveis das reais, mesmo para locais onde tais sequências não podem ser medidas (tal é o caso das centrais ainda por serem projetadas).

4.3.3 Bases da simulação usando Monte-Carlo

A simulação Monte-Carlo permite que, a partir do conhecimento de séries históricas, seja avaliado o excedente de vapor disponível para negociação com as

concessionárias, auxiliando no planejamento da operação e fornecendo elementos para o projeto da central de geração. As séries históricas podem ser encaradas como uma das possíveis realizações de um processo estocástico, sorteado segundo um conjunto de leis probabilísticas; isso garante que, com a mesma probabilidade, uma outra sequência, com iguais média e variância, poderia ter-se realizado naquele instante.

A figura 4.7, adaptado de [19], ilustra esquematicamente a técnica de simulação Monte-Carlo. A partir das séries históricas disponíveis para um sistema de cogeração, com dados de vazão de vapor para processo e para geração de energia eletromecânica, e fazendo uso de modelos estocásticos adequados, podem ser geradas diversas sequências, todas distintas entre sí, num processo que corresponde aos múltiplos resultados possíveis de acontecer. Por meio de uma simulação de experimento fatorial, isto é, realizando uma combinação de cada valor obtido para a série sintética SP_i (referente à geração de vapor) com todas as séries sintéticas SG_i (referentes à geração eletromecânica), é possível estimar-se a quantidade de energia excedente disponível.

No caso específico da análise dos sistemas de cogeração, interessa ao planejador e ao projetista levantar informações acerca da demanda total de vapor, considerando-se a geração e o uso em processo, e seu comportamento ao longo do

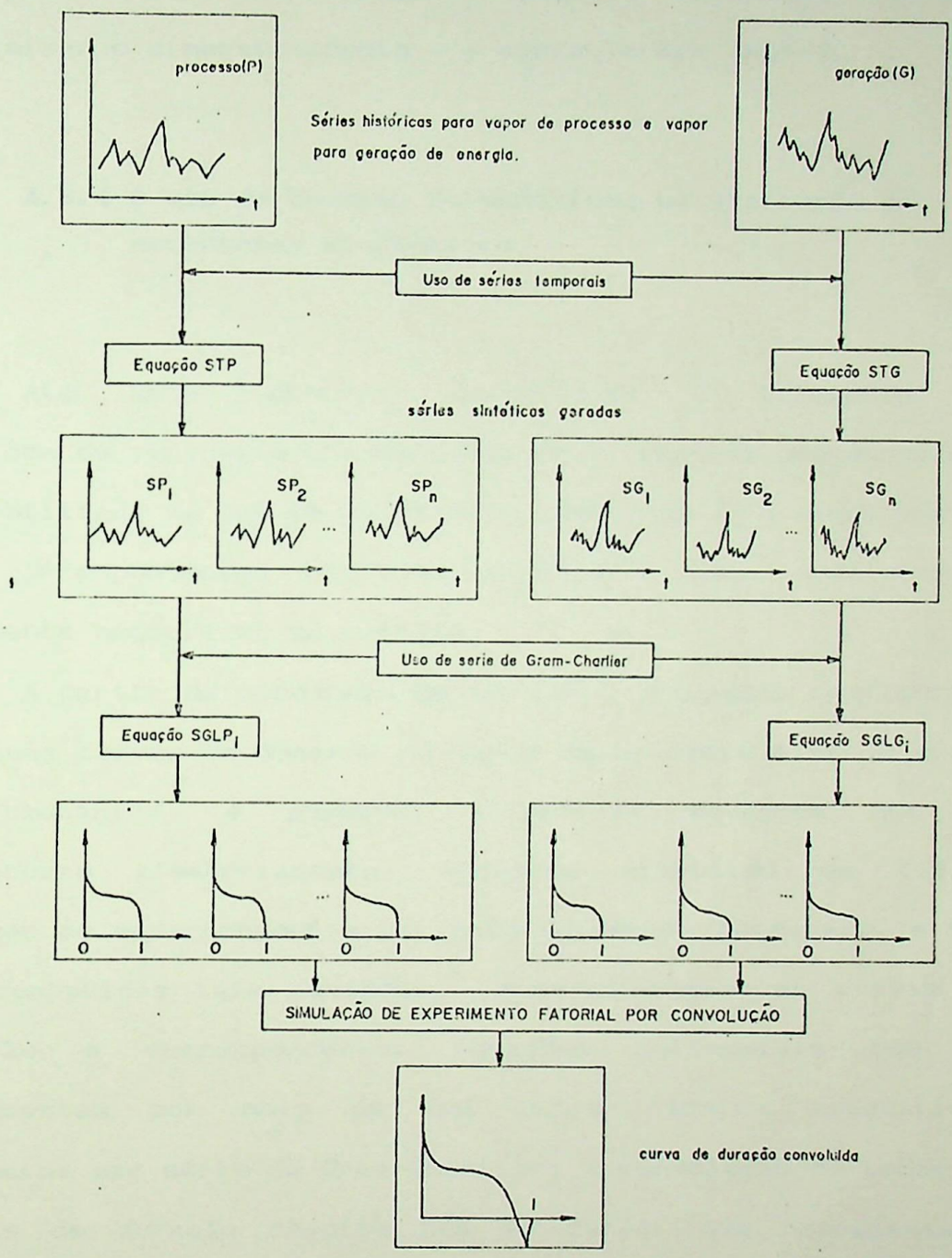


Figura 4.7 Ilustração esquemática do Método de Monte Carlo para sistemas de cogeração

tempo para diferentes processos e setores industriais, de modo a otimizar o dimensionamento e a operação dos mesmos.

4.3.4 O uso de Modelos Estocásticas na avaliação de excedentes energéticos

Até este momento, discutiu-se a filosofia do problema de variabilidade da carga em diferentes processos e a possibilidade de uso de técnicas matemáticas para simulação de suas correspondentes curvas de carga com vistas a avaliar-se o excedente negociável de energia.

A partir da tendência de um certo processo, configurado por suas curvas de demanda de vapor de processo e por energia eletromecânica, é possível inferir-se equações que as reproduzam aleatóriamente, conforme discutido em 4.3.3, através de equacionamento por meio de séries temporais, e uma vez conhecidas tais equações, pode-se compor as curvas de duração e correspondentes equações polinomiais que as representam por meio de uma outra técnica matemática, conhecida por série de Gram-Charlier; a convolução de todas as curvas de duração resulta uma só curva, que representa o excedente de vapor disponível para aquele processo, nà condição apresentada.

4.3.4 a- Séries Temporais

Os modelos estocásticos paramétricos, discutidos por Box e Jenkins [7], tem sido empregados com sucesso em diversos conjuntos de valores, apresentando excelente correlação entre os dados experimentais e os ajustados por esta técnica. Piggot [32] se utiliza de tal modelagem para desenvolver previsões de curto prazo para o sistema da British Gas Corporation, assim como Ackerman [1] para controle de unidades de geração elétrica. Existem trabalhos que também se utilizam desta técnica para previsões de demanda diária de água (Sterling e Bargiela [41]), mas a grande penetração desta técnica se encontra entre as pesquisas envolvendo séries de radiações solares (Graham, Hollands & Unny [16], Aguiar, Collares-Pereira & Conde [3], Krenzinger & Macagnan [21]).

A estratégia formulada para a construção destes modelos, que podem se apresentar compostos (auto-regressivos e de média móvel) ou isoladamente, incorporando ou não componentes sazonais, segue a seguinte ordenação:

- *especificação*, em que uma classe geral de modelos é considerada para análise;
- *identificação* de um modelo, desenvolvido com base na análise das autocorrelações e auto-correlações parciais;

- *estimação* dos parâmetros do modelo identificado;

- *verificação* do modelo ajustado, através de uma análise de resíduos, para que se possa afirmar se o modelo identificado é o mais adequado para os fins em questão.

No caso de não se verificar sua adequação, os passos são repetidos. É usual a identificação prévia considerando-se diferentes modelos, compostos ou isoladamente, de acordo com os resultados obtidos na identificação, e a escolha se procede após a observação daquele que melhor se ajusta ao problema. A fase crítica desta modelagem se encontra exatamente na fase de identificação, uma vez que diferentes pessoas podem identificar diferentes modelos para uma mesma série temporal.

4.3.4 b - Série de Gram-Charlier

O uso da Série de Gram-Charlier oferece uma grande flexibilidade para simulações probabilísticas. A aplicação desta ferramenta matemática é de uso corrente no planejamento de expansão de sistemas elétricos, havendo sido citada por Stremel [42], Stremel & Rau [43] e Rau, Toy & Schenk [35], quando então se prestava tal modelagem à avaliação de

custos da geração e de confiabilidade do sistema.

São apresentadas, no Anexo 3, as equações que permitem o cômputo da Série de Gram-Charlier, bem como a sequência de cálculos que devem preceder o equacionamento, para avaliação das constantes da série.

4.3.4 c- Convolução

Esta técnica, que corresponde à simulação de experimento fatorial anteriormente citada, prescinde, contudo,da curva de carga horária para calcular o excedente ou déficit de potência em valores instantâneos. Conhecida tal curva horária, constroem-se curvas de duração para vazão de vapor destinada a processo e geração de energia. eletromecânica, e pela aplicação desta técnica é possível obter-se a curva de duração do excedente.

Conforme observado por Nogueira e Santos [30], na falta de curvas de carga horárias é possível a aplicação do modelo estimando-se curvas de duração de demanda para energia eletromecânica e vapor de processo, usando para isso desde curvas simplificadas, como a aproximação linear, quanto uma aproximação por patamares ou por uma função polinomial.

A idéia de convoluir curvas de duração se baseia no conceito de curva de duração equivalente (ELDC), introduzido por Baleriaux *et alli*, conforme citado por Vardi

e Avi-Itzhak [46]; o processo de convolução pode ser entendido como a superposição de várias componentes de demanda, levando-se em conta as frequências de ocorrência das mesmas. A figura 4.8 ilustra graficamente a convolução de duas curvas de demanda, em que a componente aleatória de demanda está superposta à curva de duração, e a linha obtida no plano p_c-p_c define todas as combinações que satistarão a uma certo nível p_c de demanda combinada.

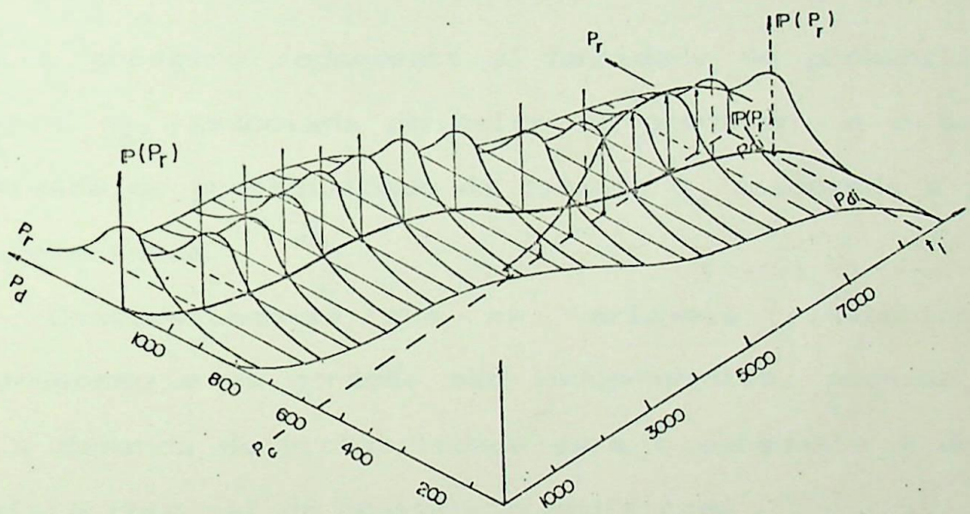


Figura 4.8 Representação gráfica da convolução de duas curvas de demanda

No caso de sistemas de cogeração, o excedente energético mássico de vapor para uma certa configuração

operacional pode ser formulado matemáticamente por:

$$q_{exc} = q_p - q_g \qquad (4.1)$$

onde o índice p representa vapor de processo, e g representa geração de energia eletromecânica. Assumindo-se que as funções densidade de probabilidade, nesse caso, sejam dadas por

$$f_1 (q_p) \qquad e \qquad f_2 (q_g) = f (q_p - q_{exc})$$

onde o primeiro representa a densidade de probabilidade da demanda q_p, associada ao calor do processo, e o segundo a densidade de probabilidade da demanda q_g associada à potência eletromecânica.

Considerando-se que as variáveis aleatórias vapor de processo e de geração são independentes, pode-se mostrar que a demanda de probabilidade para o excedente é dada pela seguinte integral de convolução modificada

$$f_3 (q_{exc}) = \int f_1(q_p) \cdot f_2(q_p - q_{exc}) \, dq \qquad (4.2)$$

resultando

$$f_3(q_{exc}) = \int [dD_1(q_p)/dq] \cdot [dD_2(q_p - q_{exc})/dq] \, dq \qquad (4.3)$$

onde D se refere à função duração, e portanto, uma vez conhecidas as curvas de duração das demandas de vapor para processo e geração, é possível obter-se a curva de duração do excedente. Numericamente, a integral obtida em (4. 3) pode ser resolvida discretizando-se as curvas de duração, conseguindo-se com isso as funções discretas de probabilidades, que combinadas gerarão a função discreta de probabilidade do excedente de vapor. Tal é, em suma, o processo de convolução aplicado a apenas duas cargas em demanda, tal como ocorre na cogeração.

CAPÍTULO 5 ANÁLISE DE UMA SITUAÇÃO PRÁTICA

5.1 Introdução

Uma vez dispostas as condições que se julgam necessárias para a modelagem, conforme discutido nos capítulos anteriores, será apresentada uma simulação utilizando curvas de carga anuais de um certo processo.

A nível de planejamento de um sistema industrial de cogeração, há a necessidade de que sejam estabelecidas uma série de condições iniciais que permitam determinar as características próprias do empreendimento.

É necessário saber, a princípio, o setor industrial ao qual se destina o projeto, uma vez que já se observou, da avaliação do parâmetro ALFA, que existem processos mais ou menos afeitos ao processo de cogeração. São também relevantes a especificação do nível de produção desejada, as demandas energéticas que deverão ser necessárias, a confiabilidade demandada pelo processo.

Estas informações já são satisfatórias para se ter idéia do gerador mais adequado, valendo aqui reforçar a idéia de que tal escolha deve ser criteriosamente discutida com base nas características do processo e demais condições associadas.

Uma vez estabelecidas tais condições, pode-se iniciar a simulação para avaliação dos excedentes de energia com base em séries históricas. Uma vez que deverão ser utilizadas curvas

de carga genéricas, pois que o projeto ainda se encontra em fase de planejamento, é necessário sua escolha cuidadosa com relação ao nível energético demandado, a variabilidade admissível em torno dessas médias de modo a garantir a confiabilidade especificada pelo processo e, em caso de processos afetados de componente sazonal, deve-se verificar se o período considerado se equivale, bem como se as inflexões ocorrem em tempos equivalentes[1].

É nesse ponto que se começa a perceber que a análise das curvas de demanda energética são bem mais complexas que a simples especificação de uma média e uma variância para cada processo, caso esse aceitável apenas quando se tem reconhecidamente processos estacionários não-sazonais.

5.2 Análise das Curvas de Demanda Energética para um certo Processo

5.2.1 Estabelecendo o problema

A Tabela a seguir apresenta valores observados mensalmente, durante um período de 6 anos, das demandas por energia térmica e eletromecânica em um certo processo.

---

1 Como exemplo, pode-se citar o fato de que o uso de séries históricas de demandas energéticas em usinas de álcool referentes à região Sudeste pode redundar em profundos erros se for utilizada para planejamento no Nordeste, uma vez que o período safra/entresafra ocorre em tempos diferentes ao longo do ano.

Tabela 5.1 VALORES DE DEMANDA TERMICA E ELETROMECANICA (10^{-1} ton/h)

	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
1975	112	118	132	129	121	135	148	148	136	119	104	118
	155	142	138	133	126	120	116	121	125	133	142	144
1976	115	126	141	135	125	149	170	170	158	133	114	140
	145	135	134	131	125	120	118	117	125	136	152	158
1977	145	150	178	163	172	178	199	199	184	162	146	166
	160	148	148	139	132	129	133	134	131	138	152	160
1978	171	180	193	181	183	218	230	242	209	191	172	194
	160	146	143	137	132	128	121	123	137	141	151	149
1979	196	196	236	235	229	243	264	272	237	211	180	201
	150	145	143	133	130	127	134	136	138	145	151	162
1980	204	188	235	227	234	264	302	293	259	229	203	229
	164	151	149	156	154	148	137	134	142	174	195	191

onde

ANO $\frac{\text{demanda eletromecânica}}{\text{demanda térmica}}$

Para melhor visualização do comportamento dessas demandas, foram traçados os gráficos representativos da vazão demandada de vapor para atender às necessidades térmica e eletromecânicas, conforme se pode observar na figura 5.1

A avaliação inicial da curva revela uma tendência sazonal estacionária para a demanda térmica, e uma tendência sazonal não-estacionária para a demanda eletromecânica. Isto, embora não afete a análise, pode ser explicado com base na afirmação em 2.4 com respeito à tendência ao crescimento da demanda eletromecânica com o tempo. No presente momento, como o interesse maior desta análise reside na geração de séries sintéticas anuais para demonstrar uma tese, a natureza da

curva não apresenta maiores inconvenientes.

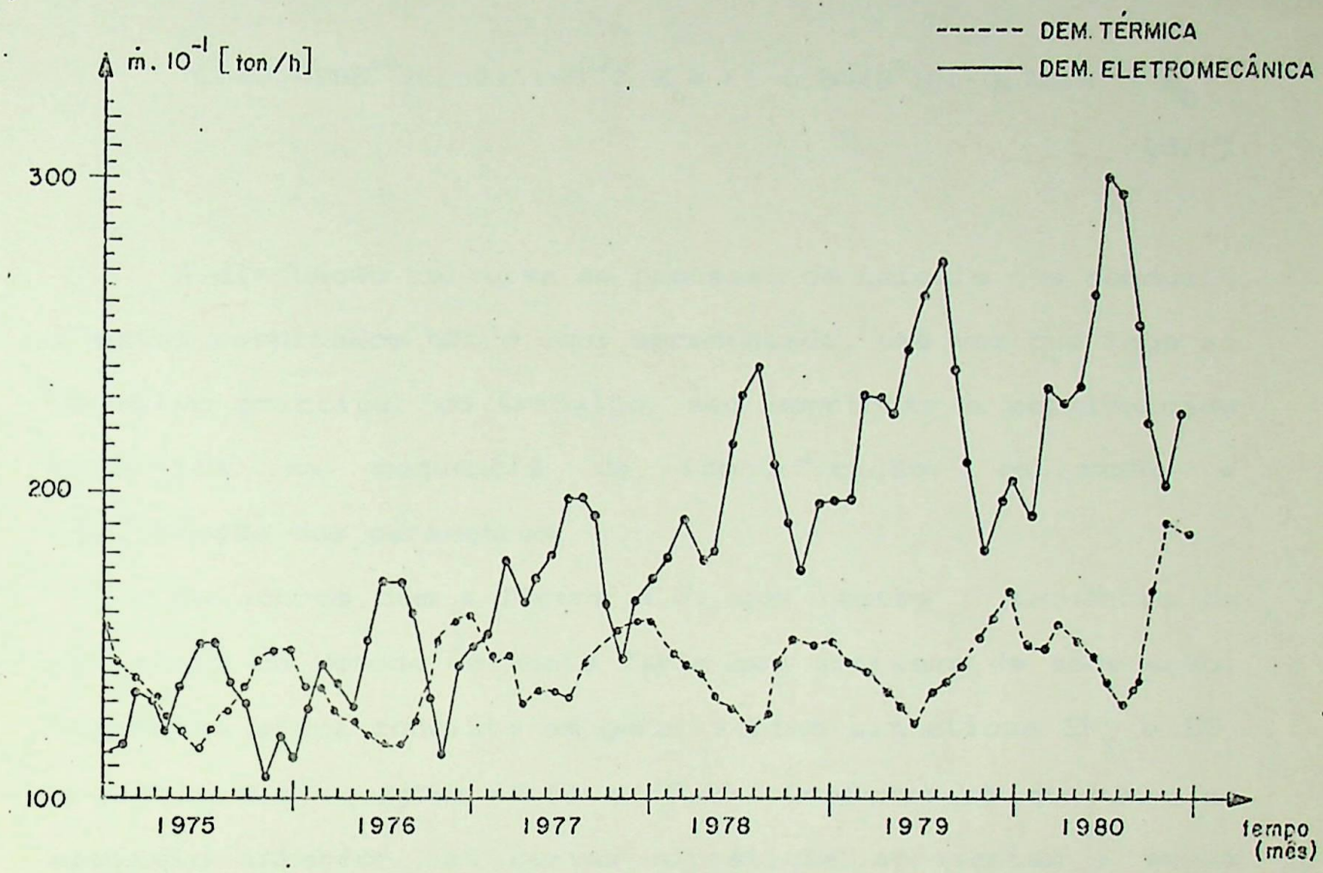


Figura 5.1 Gráfico da vazão de vapor para uso térmico e eletromecânico contra tempo, em certo processo industrial.

Utilizando as técnicas de Box & Jenkins [7], conforme sequência mencionada em 4.4.4.a, e analisando as duas curvas separadamente, são obtidas as expressões:

- para demanda eletromecânica: ARIMA $(0,1,1)\times(0,1,1)_{12}$

$$(1 - B)(1 - B^{12})\, Z_t = (1 - 0.4B)(1 - 0.6B^{12})a_t \qquad (5.1)$$

- para demanda térmica: ARIMA (0,1,2)x(1,1,1)$_{12}$

$$(1+0.928B^{12})(1-B)(1-B^{12})\,Z_t = (1-0.564B^{2})(1-0.761B^{12})\,a_t \qquad (5.2)$$

A discussão relativa ao processo de cálculo que conduziu a estes resultados não é aqui apresentada, uma vez que foge ao objetivo principal do trabalho. sem mencionar a complexidade envolvida na sequência de identificação, estimação e verificação dos parâmetros.

De acordo com a figura 4.7, que resume a sequência de aplicação do Método de Monte Carlo aos sistemas de cogeração, a próxima etapa consiste em gerar séries sintéticas SP_i e SG_i a partir das equações (5.1) e (5.2). Conforme se discutiu no capítulo anterior, as curvas sintéticas apresentam a mesma probabilidade de ocorrer no tempo, se comparadas com as séries históricas, uma vez que as equações que as geram reproduzem exatamente os mesmos componentes de média e desvio padrão das séries históricas, além de acompanharem seus padrões sazonais.

Aplicando-se a propriedade distributiva e os conceitos do operador Translação ao Passado(vide equação A2.3, no Anexo 2), obtém-se as expressões expandidas para demandas eletromecânica e térmica:

-<u>demanda eletromecânica</u>:

$$Z_t - Z_{t-1} - Z_{t-12} + Z_{t-13} = a_t - 0.4\,a_{t-1} - 0.6\,a_{t-12} + 0.24\,a_{t-13} \qquad (5.3)$$

-demanda térmica:

$$Z_t - Z_{t-1} + 0.928\,(Z_{t-9} - Z_{t-10} - Z_{t-11}) - 0.0715\,Z_{t-12} + Z_{t-13} = a_t - 1.325\,a_{t-2} + 0.429\,a_{t-14} \qquad (5.4)$$

5.2.2 Geração de Séries Sintéticas

Para utilização das expressões (5.3) e (5.4) na geração de séries sintéticas é preciso que se estabeleça um algorítmo para geração de ruídos brancos consistentes para com os termos a_{t-j}. Para o seu cálculo, e para efeito deste exemplo, utilizou-se o procedimento condicional, conforme Morettin [28].

Um programa PASCAL, desenvolvido para receber tais expressões, gera os ruídos brancos adequados, e de acordo com os termos relativos ao passado, são calculados os valores obteníveis via simulação para composição de novas séries sintéticas.

Os valores obtidos numa nova série sintética são trabalhados de modo a se compor sua correspondente curva de duração; da análise das curvas geradas em diferentes simulações são escolhidas as curvas da demanda térmica e eletromecânica que apresentam a situação mais desfavorável. Sobre tais curvas, são procedidos os cálculos para que se obtenha sua convolução e consequente excedente de energia.

Para os valores históricos apresentados na Tabela 5.1 foram geradas 5 séries sintéticas e avaliadas comparativamente suas curvas de duração, conforme figura 5.2 e 5.3, para as demandas eletromecânica e térmica, respectivamente. Foram

escohidas as curvas mais desfavoráveis e procedidos cálculos de convolução, cujo resultado é apresentado na figura 5.4

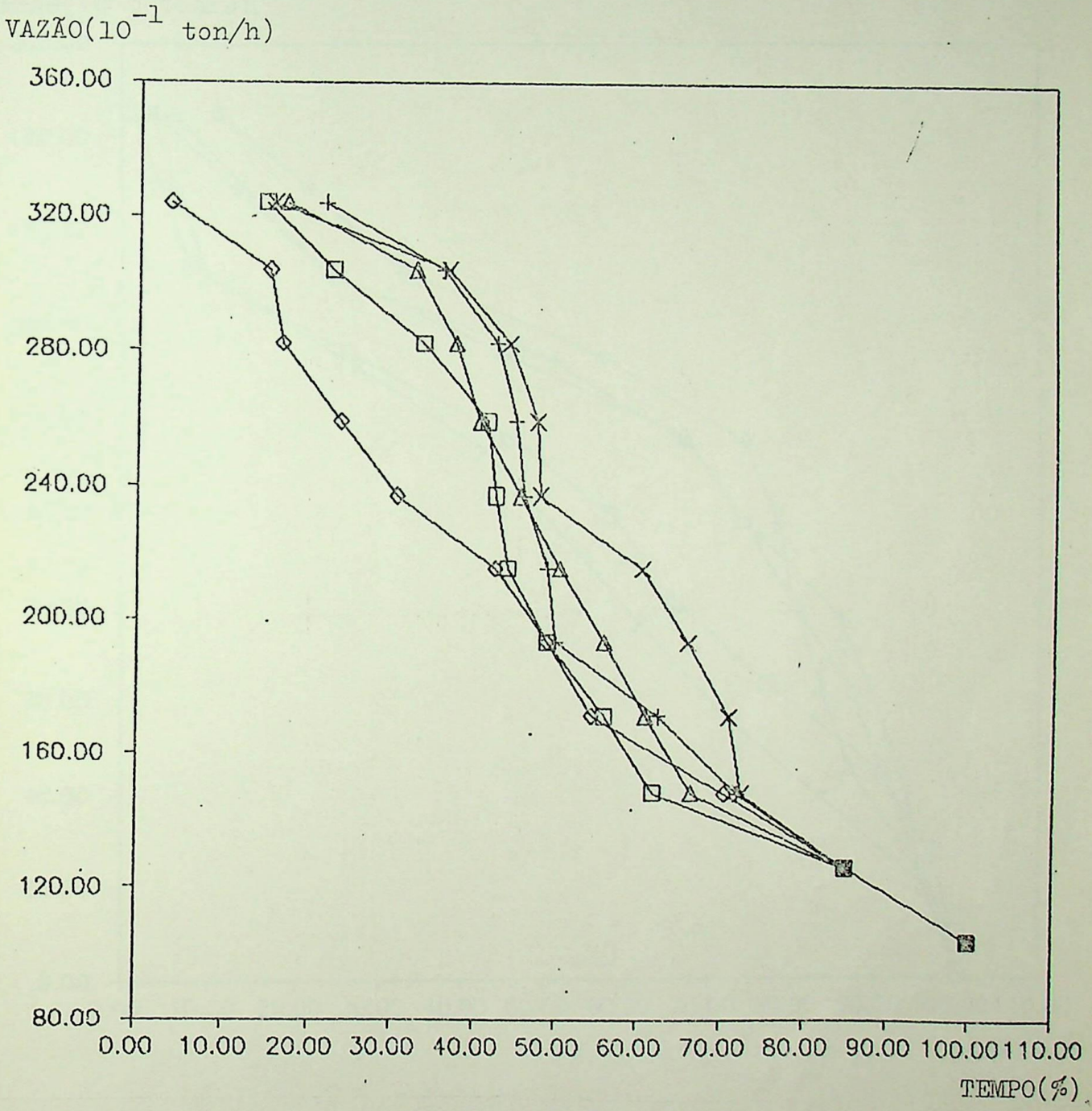


Figura 5.2 Curvas de Duração simuladas para demanda eletromecânica

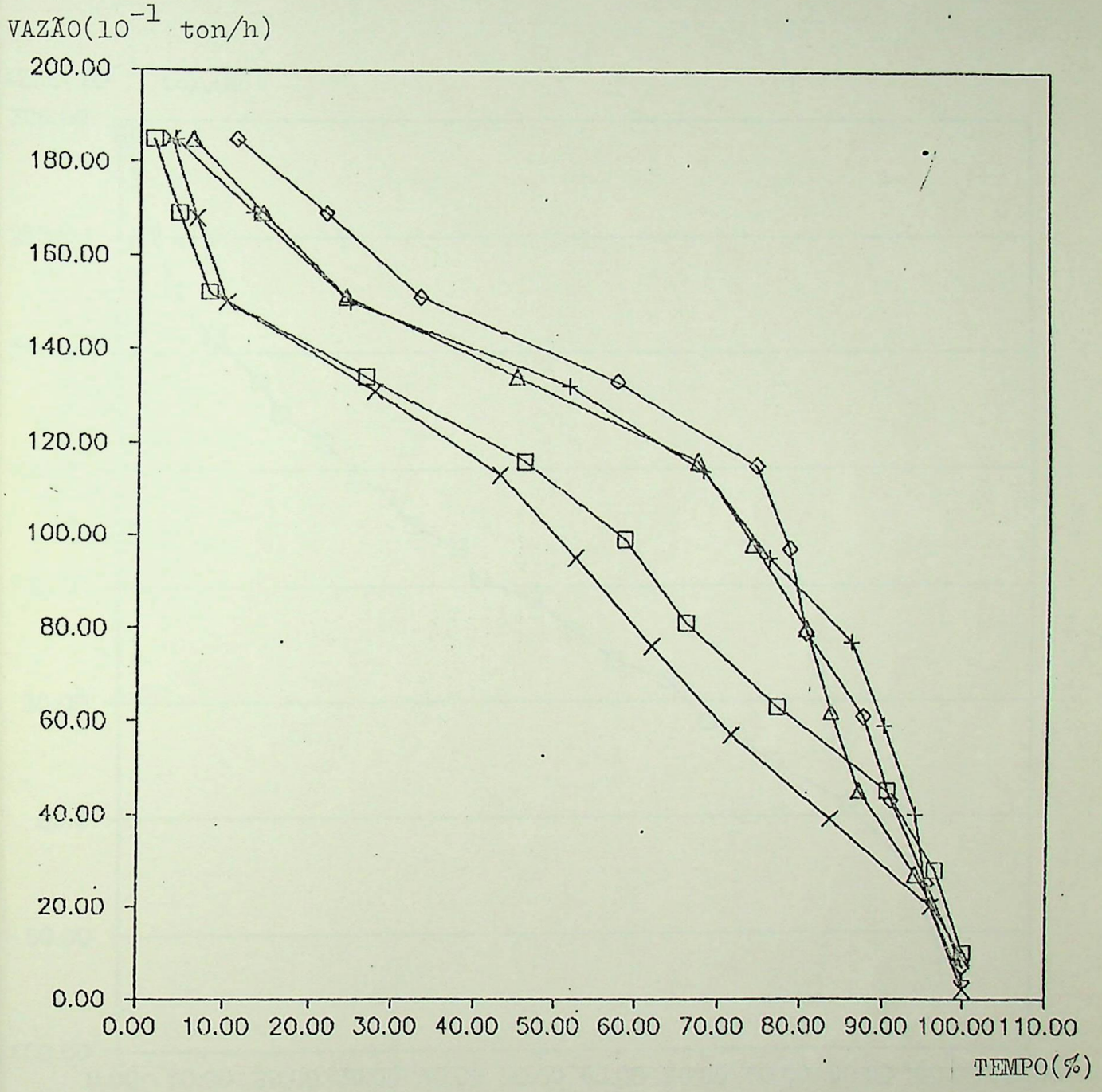


Figura 5.3 Curvas de Duração simuladas para demanda térmica

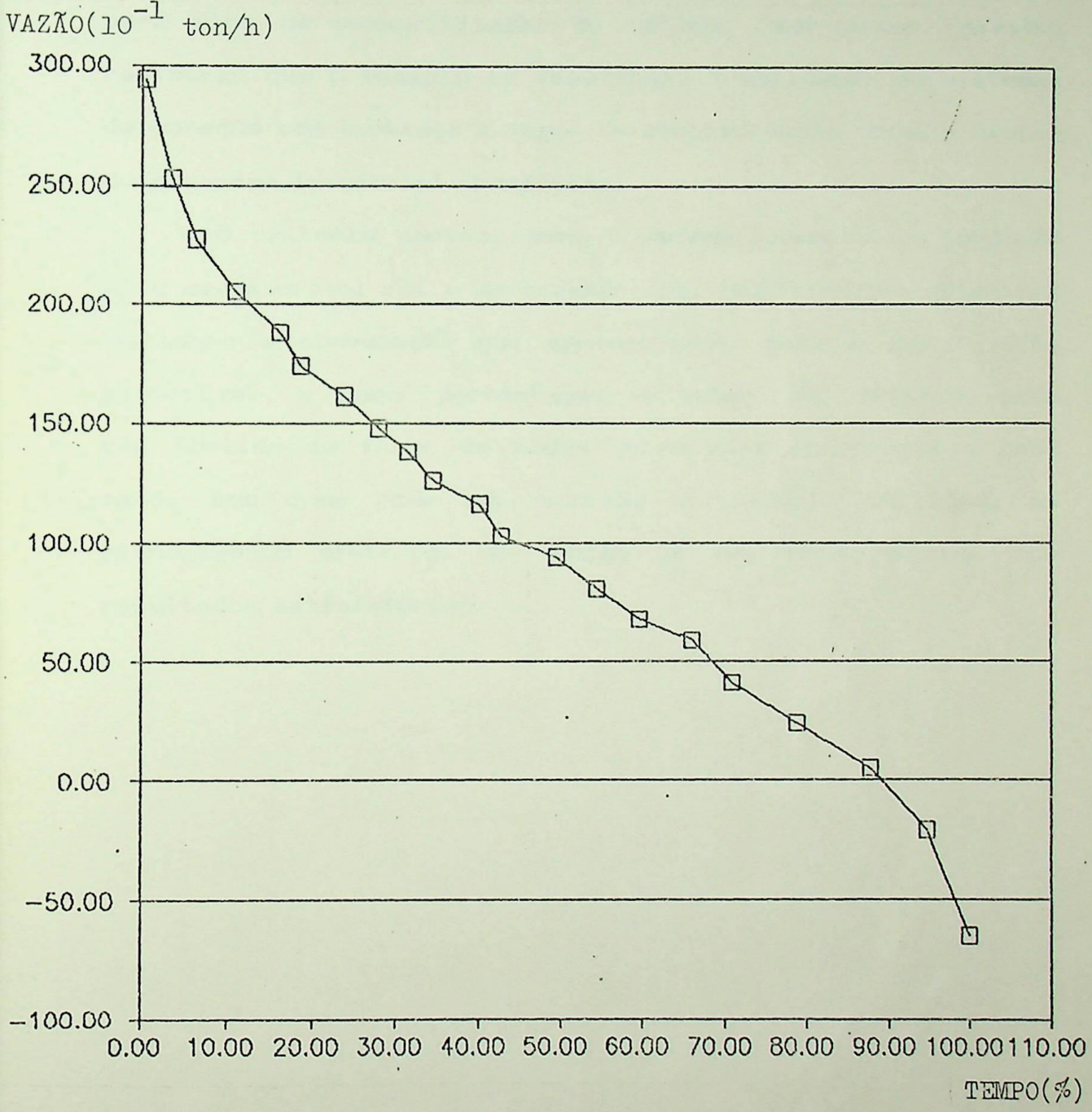


Figura 5.4 Resultado da convolução para o caso mais desfavorável

Vale ressaltar, dentro os diversos comentários que são procedentes para o entendimento deste estudo de caso, que as curvas utilizadas não apresentam relação com qualquer processo industrial conhecido, tendo sido escolhidas meramente para fins de exemplificação do método. Além disso, deve-se registrar que o exemplo se restringiu à aplicação de sistemas de geração com turbinas a vapor de contrapressão, como é típico do panorama industrial brasileiro.

O critério adotado para o estabelecimento da condição mais desfavorável foi o de assumir como pior condição obtenível no tempo a convolução que apresentasse, para a mesma vazão disponível, a menor porcentagem de tempo. Tal critério pode ser abolido em favor de algum outro mais apropriado a cada caso, bem como pode ser adotado o critério utilizado no planejamento elétrico, em função de seu largo emprego com resultados satisfatórios.

CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base nos valores levantados para o parâmetro ALFA, é possível se verificar que as demandas por energia eletromecânica e térmica no Brasil é condizente com os valores apresentados por outros países, revelando como setores que apresentam maiores potencialidades para a cogeração o de papel e celulose, química e processos siderúrgicos/metalúrgicos. Tais valores se apresentam como fontes indicativas interessantes numa primeira análise de um planejamento para uso de sistemas de cogeração.

Os valores de produção de insumos eletromecânicos e térmicos pelos sistemas geradores que se apresentam, no momento, como melhores opções com base na tecnologia dispoível, só puderam ser avaliados a nível geral, com apresentação genérica quanto à utilização de cada um de acordo com a necessidade do processo em questão, especificada pelo parâmetro ALFA. Isto se deve ao fato de que, para apresentarmos resultados específicos de algum equipamento, precisaríamos dispô-lo em uma bancada de testes, situação para a qual não nos propusemos neste trabalho.

Os resultados obtidos via simulação usando Métodos de Monte Carlo se revelam muito bons, especialmente se comparados com avaliações feitas anteriormente usando apenas o Método da Convolução [30]. Naquele caso, a avaliação era determinística uma vez que os cálculos se faziam apenas com

uma curva obtida em certa situação histórica. Neste trabalho, foram estendidos tais conceitos pelo uso de variáveis aleatórias, que impuseram ao problema um caráter mais genérico, conferindo maior confiabilidade aos resultados finais, uma vez que se consideram as situações mais desfavoráveis que poderiam ocorrer durante a operação continuada do sistema.

Diversas propostas estão sendo aventadas para continuidade do trabalho, especialmente aquelas voltadas ao estudo da variabilidade de cargas diárias em processos com demanda consideráveis dos dois insumos energéticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Ackerman, G. Short-Term Load Prediction for Electric-Utility Control of Generating Units. In: Bunn,D.W. & Farmer,E.D. Comparative Models for Electrical Load Forecasting. Belfast,John Willey, 1985,p. 33-42.

[2] Agência para Aplicação de Energia. Consumo de Energia nas Indústrias do Estado de São Paulo. Relatório Final, São Paulo, CESP/CPFL/ELETROPAULO/ COMGÁS,1989, Série Divulgação e Informação 041.

[3] Aguiar,R.J., Collares-Pereira,M. & Conde,J.P. Simple Procedure for Generating Sequences of Daily Radiation Values Using a Library of Markov Transition Matrices. Solar Energy,New York, 40(3):269-279,1988.

[4] Aplinger,J.L. & Priestley,R.R. Overwiew of the DEUS Screening and Evaluation Model. EPRI Cogeneration Seminar, Oakland (CA), 1982.

[5] Babus'Haq,R.F., Probert,S.D. & O'Callaghan,P.W. Assessing the Prospects and Commercial Viabilities of Small-Scale CHP Schemes. Applied Energy, England,vol.31,1988,p.19-30.

[6] Berman,I.M. Cogeneration, Combined-Cycles and Synthetic Fuels: an Overwiew. Power Engineering, November 1983,p. 42-50.

[7] Box,G.E.P. & Jenkins,G.M. Time Series Analysis - Forecasting and Control. Holden-Day,San Francisco, 1970.

[8] Carnevalle,E. & de Lucia,M. Gas Turbine Cogeneration: Range of Convenience in Textile Plant. International Symposium on Turbomachinery,

Combined-Cycle and Cogeneration, New York, 1987, IGTI Proceedings, ASME, p. 317-321.

[9] Chase, D. L., Carberg, W. G. & Clemens, R. S. Combined-Cycle Cogeneration Systems Design. Gas Turbine Reference Library, GE Corp, USA, GER 3457, 1984, p. 2-10.

[10] Comissão Nacional de Energia, GT-1415, Planejamento - Subgrupo de Referências Básicas. Relatório Final, Brasília, 1988, p. 15-17.

[11] Companhia Energética de Minas Gerais. Balanço Energético do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte, 1987.

[12] Conant, M. A. & Gold, F. R. A Geopolítica Energética. Rio de Janeiro, Atlântica, 1978.

[13] Frydman, I. (coord.)- Grupo de Trabalho sobre Autoprodutores de Energia Elétrica. Potencial de Autoprodutores- Módulo III. Relatório Final apresentado ao DNAEE - Dep. Nacional de Águas e Energia Elétrica, 1987.

[14] Goldemberg, J. Conservação e Uso Final da Energia. In: Leite, R. C. C. Anais do Seminário 'Alternativas para uma Política Energética'. Campinas, Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), 1985, p. 23-48.

[15] Gorges, H. A. Cogeneration for the Industrial End User. Gas Turbine World, Sept. 1982; p. 42-47 Jan. 1983, p. 30-35.

[16] Graham, V. A., Hollands, K. G. T. & Unny, T. E. A Time Series Model for K_t with Applications to Global Synthetic Weather Generation. Solar Energy, New York, 40(2) :83-92, 1988.

[17] Hu, S. D. Cogeneration. Reston, Reston Publishing Co., 1985.

[18] Kelhofer,R. A Comparison of Power Plants for Cogeneration Heat and Electricity. Brown Boveri Public. CHT 040163E :2-9, Switzerland,1982.

[19] Kelman,J. Modelos Estocásticos no Gerenciamento dos Recursos Hídricos.In : Barth, F.T. *et alli*.Modelos para Gerenciamento dos Recursos Hídricos. São Paulo, Nobel/ABRH,1987,p.327-424.

[20] Kovacik,J.M. Cogeneration Application Consideration. In: Gas Turbine Reference Library, GE Corp.,USA, GER 3430,1984,p.2-12.

[21] Krenzinger,A. & Macagnan,M.H. Estudo Comparativo de Diferentes Modelos de Geração de Séries de Radiação Solar. In: Anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia, Dez/1988,p.389-393.

[22] Kusterer,H. H_2/O_2 Steam Generator can Supply Short-Term Electric Peak Loads.Power Engineering, 23(6) : 37-41,June/1989.

[23] Le Goff,P. Energetique Industrielle.Paris,Technique et Documentation, 1979, tomo 1.

[24] Light Serviços de Eletricidade S.A. Balanço Energético do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, Light,1986.

[25] Lowder, J.R.A. Aspects of Meeting Complex Industrial Energy Demand Patterns using Recuperated Gas Turbines. In: O' Callaghan,P. Energy for Industry. Oxford,Pergamon Press,1979,p.173-188.

[26] Lyle,O. The Efficient Use of Steam. London,Her Majesty's Stationery Office, 9th impr.,1968, 912p.

[27] Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. Brasília, 1988.

[28] Morettin,P.A. & Toloi,C.M.C. Previsão de Séries Temporais. São Paulo, Atual Editora, 1985.

[29] Morse, F. T. Power Engineering and Design. New York, D. Van Nostrand Co., 1942.

[30] Nogueira, L. A. & Santos, A. H. M. Aplicações do Método da Convolução na Estimativa do Comportamento Energético de Sistemas de Cogeração. In: Anais do II Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Águas de Lindóia, 6-8 Dez. 1988.

[31] Nogueira, L. A. & Santos, A. H. M. Considerações Técnico Econômicas Aplicadas à Cogeração Elétrica e Calor de Processo em Indústrias. In: Anais do IX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, GPT-12, Belo Horizonte, 1987.

[32] Piggot, J. L. Short-Term Forecasting at British Gas. In: Bunn, D. W. & Farmer, E. D. Comparative Models for Electrical Load Forecasting, Belfast, John Willey, 1985, p. 173-211.

[33] Poulallion, P. L. Cogeração Industrial e Ciclo Combinado - Custos e Nacionalização de Equipamentos. In: Anais do 2° Seminário Internacional sobre Gás Natural. Salvador, Instituto Brasileiro do Petróleo, p. 44-55.

[34] Pulliam, E. R. Cogeneration: the California Experience. In: Anais do I Simpósio Brasileiro sobre Co-Geração de Energia na Indústria. Campinas, 1989, p .

[35] Rau, N. S., Toy, P. & Schenk, K. F. Expected Energy Production Costs by the Method of Moments. IEEE Transactions On P. A. & S., Sept./Octb., 1980, p. 1908-15

[36] Rousso, J. Conservação de Energia na Indústria. Panorama Atual e Aspectos Restritivos. In: A Crise dos Combustíveis Líquidos - A Visão do Setor Industrial. Rio de Janeiro, Conf. Nacional da Indústria, 1980, vol. 2, p. 31-56.

[37] Saliby, E. Repensando a Simulação : A Amostragem Descritiva. São Paulo, Atlas/Editora da UFRJ, 1989.

[38] Samuel, A.E. & Chia, T.H. Lumped Parameter Modelling of Multi-Building Energy System. In: Kydes, A.S. *et alli* (edt.). Energy Modeling and Simulation. Amsterdam, IMACS/North Holland Publ. Co., 1983, p. 225-234.

[39] Santos, L.A.A. Distribuição ótima entre Potências de Compra e Auto-Geração no Paralelismo Consumidor-Concessionária, Itajubá, dissertação de mestrado, EFEI, 1983.

[40] Schwarzenback, A. Cogeneration : Fundamental Considerations. Brown Boveri Rev., 80(3), p. 160-165.

[41] Sterling, M.J.H. & Bargiela, A. Adaptative Forecasting of Daily Water Demand. In: Bunn, D.F. & Farmer, E.D. Comparative Models for Electrical Load Forecasting. Belfast, John Willey, 1985, p. 213-225.

[42] Stremel, J.P. Production Costing for Long-Range Generation Expansion Planning Studies. IEEE Trans. on Power Apparatus & Systems. Vol. PAS 101, n. 3, March 1982, p. 526-536.

[43] _____ & Rau, N.S. The Cumulant Method Of Calculating LOLP, IEEE pp. A79, 506-7, presented to the IEEE Press 1979 Summer Meeting, Vancouver, Brithish Columbia, Canada.

[44] Trevisan, O.V. & Macedo, I.C. Estudo da Estrutura de Uso Industrial da Energia Térmica no Estado de São Paulo. In : Anais do V Cong. Brasileiro de Engenharia Mecânica. Campinas, 1979, p. 86-95.

[45] Tucci, C.E.M. Modelos Determinísticos. In: Barth, F.T. *et alli*. Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos. São Paulo, Nobel/ABRH, 1987, p. 207-324.

[46] Vardi, J. & Avi-Itzhak, B. Electric Energy Generation - Economics, Reliability and Rates. Cambridge, The MIT Press, 1981.

[47] Vichnievsky, R. Thermodynamique Appliquèe aux Machines. Paris, Masson et Cie., 1967.

ANEXOS

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : FERRO GUSA E ACO

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 99.7

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	1927.0	2901.0	.052
1971	3048.0	3156.0	.075
1972	3313.0	3646.0	.071
1973	3172.0	3956.0	.062
1974	4268.0	4584.0	.072
1975	4690.0	5506.0	.066
1976	5674.0	5575.0	.079
1977	6321.0	6288.0	.078
1978	6873.0	6465.0	.083
1979	7967.0	7358.0	.084
1980	8639.0	7723.0	.087
1981	8294.0	6426.0	.100
1982	8456.0	6502.0	.101
1983	8674.0	7377.0	.092
1984	10922.0	9492.0	.090
1985	11781.0	10237.0	.090
1986	12423.0	10857.0	.089
		ALFA MEDIO:	.081

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : CIMENTO

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 80.8

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	1038.0	1183.0	.084
1971	1130.0	1288.0	.084
1972	1309.0	1451.0	.087
1973	1574.0	1599.0	.095
1974	1753.0	1786.0	.094
1975	1967.0	1899.0	.099
1976	2015.0	2291.0	.084
1977	2214.0	2467.0	.086
1978	2442.0	2641.0	.089
1979	2630.0	2577.0	.098
1980	3221.0	2529.0	.122
1981	3082.0	2506.0	.118
1982	3023.0	2494.0	.116
1983	2442.0	1784.0	.131
1984	2320.0	1635.0	.136
1985	2455.0	1854.0	.127
1986	3005.0	2103.0	.137
		ALFA MEDIO:	.105

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : FERRO LIGAS

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 92.1

PERIODO [ano]	DEM. ELETROMECANICA [GWh]	DEM. TERMICA [1000 tep]	ALFA [-]
1970	574.0	49.0	.987
1971	787.0	52.0	1.275
1972	876.0	57.0	1.295
1973	945.0	81.0	.983
1974	1087.0	95.0	.964
1975	1319.0	113.0	.984
1976	1390.0	157.0	.746
1977	1760.0	142.0	1.044
1978	1935.0	159.0	1.026
1979	2239.0	116.0	1.627
1980	2902.0	199.0	1.229
1981	3237.0	183.0	1.491
1982	3041.0	394.0	.650
1983	3405.0	331.0	.867
1984	3793.0	410.0	.780
1985	4165.0	438.0	.801
1986	4352.0	458.0	.801
		ALFA MEDIO:	1.032

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : OUTROS METAIS

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 48.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	3414.0	121.0	4.553
1971	3141.0	154.0	3.291
1972	3935.0	181.0	3.508
1973	5620.0	193.0	4.698
1974	5783.0	223.0	4.184
1975	6618.0	275.0	3.883
1976	7761.0	298.0	4.202
1977	8667.0	409.0	3.419
1978	9179.0	537.0	2.758
1979	11149.0	547.0	3.289
1980	11384.0	603.0	3.046
1981	9881.0	488.0	3.267
1982	10531.0	503.0	3.378
1983	12188.0	669.0	2.940
1984	14767.0	728.0	3.273
1985	18480.0	705.0	4.229
1986	22546.0	727.0	5.004
		ALFA MEDIO:	3.701

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : MINERACAO E PELOTIZACAO

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 61.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	453.0	219.0	.263
1971	535.0	291.0	.234
1972	622.0	328.0	.241
1973	745.0	635.0	.149
1974	1055.0	716.0	.187
1975	1221.0	821.0	.199
1976	1204.0	901.0	.170
1977	1510.0	1018.0	.188
1978	1803.0	1383.0	.166
1979	2080.0	1470.0	.180
1980	2714.0	1558.0	.221
1981	3730.0	1231.0	.385
1982	3509.0	1255.0	.355
1983	4281.0	1160.0	.469
1984	5086.0	1074.0	.602
1985	5604.0	872.0	.816
1986	4590.0	924.0	.631
		ALFA MEDIO:	.320

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : PAPEL E CELULOSE

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiéncia : 73.8

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	1667.0	473.0	.371
1971	1765.0	564.0	.329
1972	1846.0	619.0	.314
1973	1987.0	810.0	.268
1974	2181.0	920.0	.249
1975	2275.0	1042.0	.230
1976	3234.0	1475.0	.231
1977	3621.0	1526.0	.250
1978	3864.0	1406.0	.289
1979	4469.0	1414.0	.332
1980	5089.0	1358.0	.394
1981	5059.0	1292.0	.412
1982	5124.0	1308.0	.412
1983	5704.0	1241.0	.483
1984	5919.0	1190.0	.523
1985	6695.0	1210.0	.582
1986	7019.0	13980	.528
		ALFA MEDIO:	.364

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : CERAMICO

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 77.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	559.0	1133.0	.050
1971	657.0	1214.0	.054
1972	666.0	1263.0	.053
1973	672.0	1321.0	.051
1974	697.0	1466.0	.048
1975	683.0	1517.0	.045
1976	1002.0	1762.0	.057
1977	1101.0	1840.0	.060
1978	1214.0	1820.0	.067
1979	1307.0	1966.0	.067
1980	1931.0	1993.0	.098
1981	2183.0	1825.0	.120
1982	2428.0	1623.0	.151
1983	3045.0	1348.0	.227
1984	3143.0	1234.0	.256
1985	3159.0	1285.0	.247
1986	3665.0	1363.0	.271
		ALFA MEDIO:	.113

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : TÊXTIL

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiéncia : 65.3

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	1936.0	493.0	.467
1971	2142.0	582.0	.437
1972	2340.0	638.0	.436
1973	2631.0	674.0	.464
1974	2861.0	725.0	.469
1975	3030.0	757.0	.476
1976	3332.0	850.0	.466
1977	3458.0	858.0	.479
1978	3733.0	842.0	.527
1979	4027.0	881.0	.543
1980	4576.0	857.0	.635
1981	4434.0	706.0	.746
1982	4653.0	718.0	.770
1983	4446.0	603.0	.876
1984	5121.0	530.0	1.148
1985	5849.0	437.0	1.591
1986	5991.0	645.0	1.306
		ALFA MEDIO:	.696

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : ALIMENTOS E BEBIDAS

Fonte de Dados : BALANCO ENERGÉTICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 98.6

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	1757.0	4184.0	.033
1971	2007.0	4577.0	.035
1972	2273.0	5085.0	.035
1973	2658.0	5575.0	.038
1974	3136.0	5732.0	.043
1975	3677.0	5555.0	.052
1976	3965.0	6262.0	.050
1977	4501.0	7196.0	.049
1978	5064.0	6837.0	.058
1979	5402.0	6497.0	.065
1980	6722.0	6839.0	.077
1981	7227.0	6613.0	.086
1982	7336.0	6486.0	.089
1983	7725.0	6545.0	.093
1984	9212.0	6410.0	.113
1985	9876.0	5911.0	.132
1986	10538.0	5938.0	.140
		ALFA MEDIO:	.070

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : QUÍMICO

Fonte de Dados : BALANCO ENERGETICO NACIONAL

Período considerado : 1970 a 1986

Eficiência : 75.9

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1970	2646.0	880.0	.307
1971	2941.0	1122.0	.268
1972	3359.0	1318.0	.261
1973	3871.0	1381.0	.287
1974	4435.0	1524.0	.298
1975	4538.0	1634.0	.284
1976	5557.0	1835.0	.310
1977	6694.0	2145.0	.319
1978	7142.0	2436.0	.300
1979	7781.0	3133.0	.254
1980	7980.0	3483.0	.234
1981	7800.0	2779.0	.287
1982	9066.0	2312.0	.401
1983	10021.0	2476.0	.414
1984	11291.0	2543.0	.454
1985	13675.0	2796.0	.500
1986	13364.0	3016.0	.453
		ALFA MEDIO:	.331

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : CIMENTO

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 80.8

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	638.0	624.0	.098
1979	663.0	642.0	.099
1980	788.0	702.0	.108
1981	825.0	685.0	.116
1982	813.0	646.0	.121
1983	625.0	525.0	.114
1984	688.0	450.0	.147
1985	713.0	484.0	.141
1986	813.0	521.0	.150
		ALFA MEDIO:	.122

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : FERRO GUSA E ACO

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiéncia : 99.7

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	2813.0	1992.0	.110
1979	3325.0	2328.0	.111
1980	3375.0	2462.0	.107
1981	3275.0	2041.0	.125
1982	3463.0	2210.0	.122
1983	3125.0	2046.0	.119
1984	3650.0	2379.0	.119
1985	4050.0	2695.0	.117
1986	4475.0	2810.0	.124
		ALFA MEDIO:	.117

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : FERRO LIGAS

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 92.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	1100.0	110.0	.843
1979	1225.0	112.0	.922
1980	1788.0	166.0	.908
1981	1950.0	192.0	.856
1982	1963.0	176.0	.940
1983	2050.0	228.0	.758
1984	2350.0	258.0	.768
1985	2763.0	299.0	.779
1986	2988.0	328.0	.768
		ALFA MEDIO:	.838

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : MINERACAO E PELOTIZACAO

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 61.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	800.0	149.0	.682
1979	1063.0	156.0	.866
1980	1375.0	172.0	1.015
1981	1288.0	142.0	1.152
1982	1338.0	126.0	1.349
1983	1088.0	124.0	1.115
1984	1263.0	149.0	1.077
1985	1438.0	160.0	1.142
1986	1475.0	150.0	1.249
		ALFA MEDIO:	1.072

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : PAPEL E CELULOSE

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 73.8

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	75.0	170.0	.046
1979	275.0	222.0	.130
1980	300.0	269.0	.117
1981	288.0	194.0	.156
1982	338.0	268.0	.133
1983	325.0	256.0	.134
1984	350.0	262.0	.140
1985	375.0	284.0	.139
1986	413.0	275.0	.158
		ALFA MEDIO:	.128

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : CERAMICO

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 77.1

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	88.0	214.0	.041
1979	88.0	244.0	.036
1980	75.0	282.0	.027
1981	75.0	276.0	.027
1982	75.0	218.0	.035
1983	75.0	184.0	.041
1984	75.0	191.0	.040
1985	75.0	224.0	.034
1986	100.0	243.0	.041
		ALFA MEDIO:	.036

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : TÊXTIL

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 65.3

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	350.0	70.0	.594
1979	363.0	71.0	.608
1980	375.0	70.0	.637
1981	400.0	53.0	.897
1982	413.0	59.0	.832
1983	413.0	60.0	.818
1984	325.0	53.0	.729
1985	463.0	73.0	.754
1986	550.0	80.0	.817
		ALFA MEDIO:	.743

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : ALIMENTOS E BEBIDAS

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 98.6

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	388.0	388.0	.079
1979	400.0	439.0	.072
1980	425.0	431.0	.078
1981	463.0	401.0	.091
1982	513.0	439.0	.092
1983	400.0	498.0	.063
1984	538.0	470.0	.090
1985	763.0	458.0	.131
1986	825.0	478.0	.136
		ALFA MEDIO:	.092

CÁLCULO DO PARÂMETRO ALFA PARA DIVERSOS SETORES INDUSTRIAIS

Setor Industrial : QUIMICO

Fonte de Dados : BALANCO ENERG. DE MINAS GERAIS

Período considerado : 1978 a 1986

Eficiência : 75.9

PERIODO	DEM. ELETROMECANICA	DEM. TERMICA	ALFA
[ano]	[GWh]	[1000 tep]	[-]
1978	488.0	54.0	.924
1979	563.0	55.0	1.047
1980	825.0	81.0	1.041
1981	663.0	68.0	.997
1982	663.0	70.0	.968
1983	825.0	70.0	1.205
1984	950.0	86.0	1.130
1985	1100.0	89.0	1.264
1986	1250.0	105.0	1.217
		ALFA MEDIO:	1.088

ANEXO 2 : SÉRIES TEMPORAIS

Serão apresentadas, a seguir, algumas informações relativas às séries temporais, com o intúito de servir como fonte de consulta rápida.

O modelo apresentado a seguir se aplica às séries estacionárias (que se desenvolvem no tempo ao redor de uma média constante). A figura a seguir representa em diagrama de blocos um filtro linear.

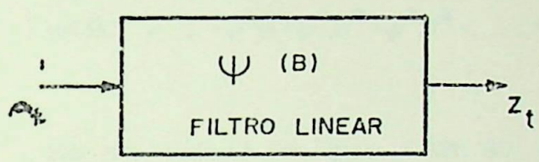


Figura A2.1 Filtro Linear

$\Psi(B)$ é a função de transferência do filtro; a_t é a entrada e Z_t é a saída em forma de série temporal; a_t é chamado ruído branco e pode ser encarado como uma série de valores que guiam o sistema; consiste de uma sequência de variáveis aleatórias, sem correlação alguma, com média zero e variância constante, isto é,

$$E(a_t) = 0 \qquad (A2.1)$$

$$\text{var}(a_t) = \sigma^2 \qquad (A2.2)$$

A equação que rege o filtro linear é :

$$Z_t = \mu + a_t + \psi_1 . a_{t-1} + \psi_2 . a_{t-2} + \ldots = \mu + \psi(B) . a_t \qquad (A2.3)$$

Tal equação conduz à definição da função de

transferência como sendo

$$\psi(B) = 1 + \psi_1 B + \psi_2 B^2 + \psi_3 B^3 + \ldots \qquad (A2.4)$$

uma vez que o operador B, aplicado sobre uma entrada ou saída resulta na translação ao passado, isto é,

$$B^m a_t = a_{t-m} \qquad (A2.5)$$

Se nesse instante assumir-se que a função de transferência $\psi(B)$ é definida pela igualdade

$$\psi_j(B) = \phi^j(B) \qquad (A2.6)$$

à qual se associa o peso ϕ ao operador autorregressivo, resultra de (A2.4) e (A2.6)

$$\psi(B) = 1+\phi^1 B+\phi^2 B^2+\phi^3 B^3+\ldots = \sum \phi^j B^j = \sum (\phi B)^j \qquad (A2.7)$$

$$(j = 0, \infty)$$

Se se admitir que (A2.3) se reduza a

$$Z_t = \mu + a_t - \theta . a_{t-1} \qquad (A2.8)$$

então a nova situação de $\psi(B)$ será

$$\psi(B) = -\theta$$

$$\Rightarrow \sum \psi_j = 1 - \theta \qquad (A2.9)$$

$$\psi_j(B) = 0 \text{ para } \forall\ j > 1$$

Rearranjando

$$a_t = (1 - \theta B)^{-1} . \mathcal{Z}_t = \Pi(B)\, \mathcal{Z}_t \qquad (A2.10)$$

Se nesse instante assume-se que não mais a função de transferência (porque $\psi(B)$ relaciona Z_t com a_t, e nesse caso a relação é entre a_t e Z_t) e sim uma relação de peso Π é definida pela igualdade

$$\Pi_j(B) = 1 + \theta^1 B^1 + \theta^2 B^2 + \ldots = \sum \theta^j B^j \qquad (A2.11)$$

$$j=0, \infty$$

$$\Pi_j = -\theta^j \qquad (A2.12)$$

sendo que

$$a_t = \Pi(B).\mathcal{Z}_t \qquad (A2.13)$$

PROCESSO AUTORREGRESSIVO - AR(p)

O modelo autoregressivo é aquele que apresenta a entrada do filtro em função da saída $\mathcal{Z}_t$ afetada de peso $\phi(B)$,

$$\phi(B).\mathcal{Z}_t = a_t \qquad (A2.14)$$

Esta equação se origina de um equacionamento em que se considera o valor presente de $\mathcal{Z}_t$ como uma soma ponderada (pelos pesos $\phi_j(B)$) de valores passados $\mathcal{Z}_{t-1}$, $\mathcal{Z}_{t-2}$,...,e mais um ruído branco a_t; logo, na forma expandida,

$$\mathcal{Z}_t = \phi_1\mathcal{Z}_{t-1}+\phi_2\mathcal{Z}_{t-2}+\ldots+\phi_p\mathcal{Z}_{t-p}+ a_t \qquad (A2.15)$$

onde o operador autorregressivo ϕ, estacionário de ordem p, é

$$\phi(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \ldots - \phi_p B^p \qquad (A2.16)$$

PROCESSO MEDIAS MOVEIS - MA(q)

Apresenta a saída $\mathcal{Z}_t$ como função da entrada a_t afetada de pesos através do operador $\theta(B)$,

$$\mathcal{Z}_t = \theta(B).a_t \qquad (A2.17)$$

onde $a_t \sim N(0,1)$, isto é, números aleatórios entre 0 e 1, e

$$\theta(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \ldots - \theta_q B^q \qquad (A2.18)$$

que resulta na forma expandida

$$\mathcal{Z}_t = a_t - \theta_1 a_{t-1} - \theta_2 a_{t-2} - \ldots - \theta_q a_{t-q} \qquad (A2.19)$$

PROCESSO ARMA (p, q)

O modelo ARMA resulta da consideração de ocorrência dos dois processos, o autorregressivo e o de médias móveis, em certa análise. Como tal, é uma composição das equações anteriores para os processos individuais,

$$\phi(B).\tilde{z}_t = \theta(B).a_t \qquad (A2.20)$$

ou ainda

$$\tilde{z}_t = \phi_1\tilde{z}_{t-1}+\phi_2\tilde{z}_{t-2}+\ldots+\phi_p\tilde{z}_{t-p}+ a_t - \theta_1 a_{t-1}+ - \theta_2 a_{t-2} - \ldots - \theta_q a_{t-q} \qquad (A2.21)$$

PROCESSO ARIMA (p, d, q)

Utilizado quando as séries são não-estacionárias, porém não explosivas. A técnica ARIMA consiste em tomar-se um número finito (d) de diferenças na série Z_t de modo a torná-la estacionária e poder-se aplica o modelo ARMA; se Δ representa tal diferença, aplicando-se a transformação

$$w_t = \Delta^d.Z_t \qquad (A2.22)$$

tantas vezes quantas forem necessárias, obtém-se a estacionaridade perseguida, e é possível aplicar-se o modelo ARMA modificado para

$$\phi(B).\Delta^d.Z_t = \theta(B).a_t \qquad (A2.23)$$

de ordem (p,d,q); na maioria dos casos, d = 1 ou d = 2.

SÉRIES AFETADAS DE COMPONENTE SAZONAL

Nos casos em que se verifica a existência de uma componente com comportamento periódico s, onde similaridades na série ocorrem a cada s intervalos do tempo básico,o modelo

ARIMA precisa ser adicionado de novas componentes que levem em conta tal fator. Considerando-se que o comportamento da variável em estudo no mês i de um certo ano mantém estreita relação com o mês i dos anos anteriores, então o modelo a ser utilizado neste caso é o chamado " modelo sazonal multiplicativo ", representado pela equação

$$\phi(B).\Phi_p(B^s).\Delta^d.\Delta_s^D.\tilde{z}_t = \theta_q(B).\Theta_Q(B^s).a_t \qquad (A2.24)$$

onde o processo resultante será de ordem $(p,d,q)x(P,D,Q)_s$, e

$$\Delta_s = 1 - B^s \qquad (A2.25)$$

$\Phi(B^s)$ e $\Theta(B^s)$ são polinômios em B^s de graus P e Q, respectivamente.

TABELA A1. COMPORTAMENTO DAS FAC E FACP DE UM PROCESSO ARIMA(p,d,q)

ORDEM	(1,d,0)	(0,d,1)
comportamento de ρ_k	decai exponencialmente	somente $\rho_1 \neq 0$
comportamento de ϕ_{kk}	somente $\phi_{11} \neq 0$	decaimento exponencial dominante
estimativas iniciais	$\phi = \rho_1$	$\rho_1 = -\theta/(1+\theta^2)$
regiao de admissibidade	$-1 < \phi < 1$	$-1 < \theta < 1$

ORDEM	(2,d,0)	(0,d,2)
comportamento de ρ_k	mistura de exponenciais ou ondas senoides amortecidas	somente $\rho_1 \neq 0$ e $\rho_2 \neq 0$
comportamento de ϕ_{kk}	somente $\phi_{11} \neq 0$ e $\phi_{22} \neq 0$	dominada por mistura de exponenciais ou senoides amortecidas
estimativas iniciais	$\phi_1 = \dfrac{\rho_1(1-\rho_2)}{1-\rho_1^2}$	$\rho_1 = \dfrac{-\theta_1(1-\theta_2)}{1+\theta_1^2+\theta_2^2}$
	$\phi_2 = \dfrac{\rho_2-\rho_1^2}{1-\rho_1^2}$	$\rho_2 = \dfrac{-\theta_2}{1+\theta_1^2+\theta_2^2}$
regiao de admissilidade	$-1 < \phi_2 < 1$ $\phi_2 - \phi_1 < 1$ $\phi_2 + \phi_1 < 1$	$-1 < \theta_2 < 1$ $\theta_2 - \theta_1 < 1$ $\theta_2 + \theta_1 < 1$

ORDEM	(1,d,1)
comportamento de ρ_k	decai exponencialmente apos lag 1
comportamento de ϕ_{kk}	dominada por decaimento exponencial apos lag 1
estimativas iniciais	$\rho_1 = (1-\phi\theta)(\phi-\theta)/(1+\theta^2-2\phi\theta)$ e $\rho_2 = \rho_1\phi$
reg. admissibilidade	$-1 < \phi < 1$, $-1 < \theta < 1$

ANEXO 3 : MÉTODO DOS CUMULANTES - SÉRIE DE GRAM-CHARLIER

A expansão em série de Gram-Charlier é utilizada para representar a curva de duração por oferecer uma grande flexibilidade nas simulações probabilísticas.

Quando truncada nos termos de segunda ordem, a série de Gram-Charlier pode ser representada como segue:

$$f(Z) = N(Z) - (G_1/6)N^{(3)}(Z) + [(G_2/24)N^{(4)}+(G_1/72)N^{(6)}] - \ldots \quad (A3.1)$$

onde Z... variável normalizada com média zero (μ=0) e desvio padrão unitário (σ=1)

N(Z)... distribuição normal de frequências

G_1, G_2... constantes

$N^{(j)}(Z)$... j-ésima derivada da distribuição normal de frequências

As expressões seguintes definem matematicamente estas funções:

$$Z = (X - \mu)/ \sigma \quad (A3.2)$$

$$N(Z) = (1/\sqrt{2\pi})\exp(-Z^2/2) \quad (A3.3)$$

$$N^{(1)}(Z) = -Z\,N(Z) \quad (A3.4)$$

$$N^{(2)}(Z) = -(Z^2-1)\,N(Z) \quad (A3.5)$$

$$N^{(3)}(Z) = (-Z^3+3Z)\,N(Z) \quad (A3.6)$$

$$N^{(4)}(Z) = (Z^4-6Z^2+3)\,N(Z) \quad (A3.7)$$

$$N^{(5)}(Z) = (-Z^5+10Z^3-15Z)\,N(Z) \qquad (A3.8)$$

$$N^{(6)}(Z) = (Z^6-15Z^4+45Z-15)\,N(Z) \qquad (A3.9)$$

A série pode ser facilmente expandida para incluir mais termos. A aproximação da função será tanto melhor quanto maior for a ordem dos cumulantes envolvidos.

Integrando-se a expressão (A3.1) obtém-se a função de probabilidade acumulada F(Z):

$$F(Z) = \int_{-\infty}^{Z} f(Z) \qquad (A3.10)$$

ou

$$D(Z) = 1 - F(Z) = \int_{Z}^{\infty} N(x)dx + (G_1/6)\,N^{(2)}(Z) + - [(G_2/24)N^{(3)}(Z) + (G_3/72)N^{(6)}(Z)] + \ldots \qquad (A3.11)$$

onde D(Z) é a curva de duraçãode carga em função de Z, e para se transformar a variável (não normalizada), utiliza-se a equação (A3.2). Vale lembrar que μ e σ se referem à média e desvio padrão da função resultante da convolução.

Para obter-se os cumulantes, primeiro é necessário calcular-se os momentos:

$$M_{i,k} = \sum_{j=1}^{m} P_{j,k}\,(C_{j,k}) \qquad (A3.12)$$

onde $M_{i,k}$ ... momento de ordem i da distribuição k

$P_{j,k}$ ... probabilidade de ocorrência de $C_{j,k}$

$C_{j,k}$ ... capacidade relativa a uma discretização j e à distribuição k

m ... número de discretizações realizadas na distribuição de frequência

De posse desses momentos, obtém-se os momentos centrais de acordo com as fórmulas de recorrência que seguem:

$$MC_{2,k} = M_{2,k} - M_{1,k}^2 \qquad (A3.13)$$

$$MC_{3,k} = M_{3,k} - 3\,M_{2,k}\,M_{1,k} + 2\,M_{1,k}^3 \qquad (A3.14)$$

$$MC_{4,k} = M_{4,k} + 6\,M_{2,k}\,M_{1,k}^2 - 4\,M_{3,k}\,M_{1,k} - 3\,M_{1,k}^4 \qquad (A3.15)$$

$$MC_{5,k} = M_{5,k} - 5\,M_{4,k}\,M_{1,k} + 10\,M_{3,k}\,M_{1,k}^2 + - 10\,M_{2,k}\,M_{1,k}^3 + 4\,M_{1,k}^5 \qquad (A3.16)$$

$$MC_{6,k} = M_{6,k} - 6\,M_{5,k}\,M_{1,k} + 15\,M_{4,k}\,M_{1,k}^2 + - 20\,M_{3,k}\,M_{1,k}^3 + 15\,M_{2,k}\,M_{1,k}^4 - 5\,M_{1,k}^6 \qquad (A3.17)$$

Os cumulantes de ordem i relativos à distribuição k ($k_{i,k}$) são obtidos a seguir :

$$k_{1,k} = M_{1,k} \qquad (A3.18)$$

$$k_{2,k} = MC_{2,k} \qquad (A3.19)$$

$$k_{3,k} = MC_{3,k} \qquad (A3.20)$$

$$k_{4,k} = MC_{4,k} - 3\,MC_{2,k}^2 \qquad (A3.21)$$

$$k_{5,k} = MC_{5,k} - 10\,MC_{2,k}\,MC_{3,k} \qquad (A3.22)$$

$$k_{6,k} = MC_{6,k} - 15\,MC_{2,k} - 10\,MC_{3,k}^2 + 30\,MC_{2,k}^3 \qquad (A3.23)$$

O cumulante de ordem i da função resultante da

convolução é dado por

$$kE_i = \sum_{k=1}^{n+1} k_{i,k} \qquad (A3.24)$$

onde n é o número de distribuições convoluidas. A partir desses resultados, pode-se obter os parâmetros:

$$\mu = kE_1 \qquad (A3.25)$$

$$\sigma^2 = kE_2 \qquad (A3.26)$$

$$G_i = [\ 1/(\sigma^{i+2})\ ]\ kE_{(i+2)}\ ,\ i = 1,2,3,4 \qquad (A3.27)$$

No caso caso em questão, conforme abordado em cogeração, tem-se apenas duas distribuições, a do consumo de vapor de processo e a referente ao consumo de vapor para produção de energia eletromecânica.

Após o cálculo dos momentos, calculam-se os momentos centrais e os cumulantes correspondentes; realizam-se a soma dos cumulantes de mesma ordem e calculam-se os parâmetros da série de Gram-Charlier, conforme descrito anteriormente.

Aplicando-se a equação (A3.11) tem-se a curva de duração, em função da variável normalizada.

DATA 13 07 / 1990
PROC
FDD. PPG
LIV.
Cz$ DOAÇÃO

I.V [illegible] O
BIB - EFEI

DATA	Rubrica

EFEI / BIBLIOTECA

ESTE LIVRO DEVE SER DEVOLVIDO NA ÚLTIMA DATA CARIMBADA.

22.01.2003		
07/02/03		
30.7.2003		
24.05.04		
15.07.04		
05.11.04		
12/06/06		
16/10/06		
04.12.2006		
22/02/07		
25/09/03		
14/04/03		
04/09/12		

EFEI - BIBLIOTECA MAUÁ
8200613
NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA