**GPT/003**

**21  a  26  de  Outubro  de  2001**

**Campinas  -  São  Paulo  -  Brasil**

**Grupo  II**

**Grupo  de  Produção  Térmica  e  Fontes  não  Convencionais  (GPT)**

**Geração  Termoelétrica  A  Partir  de  Motores  de  Combustão  Interna**

\*  Alfred  Gunther  Domschke Jean  Cesare  Negri Sergio  Nieri  Barillari

IMT CESP CESP

**RESUMO**

O  objetivo  deste  trabalho  é  apresentar  o  estado  da  arte

Tem  sido  marcante  a  evolução  alcançada  com  Motores

de  Combustão  Interna  (MCI)  tipo  Diesel  na  busca  de

melhores eficiências, no uso de combustíveis

alternativos  mais  econômicos  e  na  construção  de

unidades  com  maiores  potências  unitárias.

A  eficiência  sobretudo  para  MCI  de  2  tempos  tem

atingido  a  marca  de  50%,  enquanto  que  para  MCI  de  4

tempos  já  são  encontrados  valores  de  48%.

No  tocante  a  combustível,  o  uso  tem  sido  ampliado

para  aplicação  de  óleos  de  menor  qualidade  tipo

industriais  e  também  para  o  gás  natural,  aproveitando

a  oferta  atual  deste  energético.

Para  MCI  de  2  tempos  são  encontradas  unidades  até

66,4  MW,  enquanto  que  para  MCI  de  4  tempos  existem

no  mercado  unidades  até  21,6  MW.

Em função desta evolução e dos resultados

alcançados,  o  uso  destas  máquinas  tem  sido  estendido

para  aplicações  estacionárias  de  geração  elétrica,

superando  na  última  década  a  participação  no

crescimento da opção tecnológica nuclear.

Empreendimentos  termoelétricos  com  capacidade  até

200  MW  são  no  setor  viáveis,  competitivos  e  com

vários  exemplos  de  aplicação.

Atualmente  o  uso  de  MCI  para  geração  térmica  supera

a aplicação tradicional em sistemas isolados.

Aplicações  industriais,  comerciais  e  até  mesmo

residenciais  (pool  de  condomínios)  têm  apresentado

competitividade  em  relação  ao  nível  de  tarifas

praticado  em  cada  segmento.  Além  disso,  a  geração

elétrica  com  MCI  Diesel  apresenta  modularidade,  custo

de implantação praticamente constante com a

capacidade,  e  sobretudo  flexibilidade  no  “take  or  pay“

que  o  óleo  combustível  oferece,  redundando  em

aplicações  interessantes  na  geração  distribuída  ou  até

mesmo  no  sistema  interligado.

desta  tecnologia,  caracterizando  uma  instalação  típica

a  nível  de  arranjo,  combustíveis  utilizados,  custos

envolvidos  e  emissões.

Palavras  Chaves:  Geração  Termoelétrica  –  Motores  de

Combustão  Interna  (MCI)  –  Planejamento  da  Expansão

**1.0  –  INTRODUÇÃO**

O  setor  elétrico  brasileiro  tem  pouca  tradição  em

geração  termoelétrica,  limitando-se  a  experiência  com

a     operação     de     Usinas     Termoelétricas     (UTE)

convencionais,      ciclo      Rankine,      utilizando      óleo

combustível  ou  carvão  mineral,  com  cerca  de  2.000

MW  instalados.

A  UTE  com  MCI  é  sem  dúvida  uma  solução  não

ortodoxa.  Considerando  os  predicados  iniciais,  a

tecnologia  Diesel  compete  com  a  turbina  a  gás  na  faixa

até  200  MW,  apresenta  eficiência  no  limite  inferior  do

ciclo  combinado,  pode  utilizar  combustível  residual  ou

gás  natural.  Neste  contexto,  vale  a  pena  considerar  e

analisar  esta  opção.

**2.0  -  EVOLUÇÃO  DA  TECNOLOGIA**

Todo  aumento  no  custo  da  energia  ou  toda  nova

necessidade  para  o  seu  uso  causa  progressos  na

evolução  de  sua  utilização.  Após  as  crises  do  petróleo

de  1973  e  1979,  um  grande     desenvolvimento  no

rendimento  dos  motores  Diesel,  que  ultrapassou  os

50%,  após  ter  estagnado  por  várias  décadas  no

entorno  de  40%  (ref.  1).  A  mudança  no  cenário

econômico  da  energia  viabilizou  a  implementação  de

idéias,  muitas  das  quais  existiam  há  muito  tempo.

Os  motores  Diesel  de  aplicação  marítima  evoluíram  de

tal  forma,  que  eliminaram  completamente  o  seu

\*  IMT  Instituto  Mauá  de  Tecnologia

Rua  Comendador  Elias  Zarzur,  2.036  São  Paulo  –  SP  –  04736-003

fone  (0xx)  (11)  5574-0688

e\_mail:  alunosmba@maua.br

**2**

principal concorrente, que eram os ciclos

convencionais  a  vapor  tipo  Rankine  (ref.  4).

O  emprego  da  turboalimentação,  combinado  ao  projeto

mecânico,  que  hoje  já  permite  pressões  máximas  de

combustão  acima  de  200  bar,  foram  os  meios

empregados  na  obtenção  destas  melhorias.

Nos  MCI  a  eficiência  aumenta,  na  medida  em  que  se

utiliza  dimensões  físicas  maiores.  A  causa  para  esta

melhoria  reside  em  menor  perda  de  calor,  própria  dos

cilindros  de  grande  tamanho,  e  na  menor  perda

mecânica  por  atrito  viscoso  nos  mancais,  cuja

proporção  diminui,  na  medida  em  que  o  motor  torna-se

maior.  Evidentemente  existem  outros  fatores  que

influem  na  eficiência,  como  a  rapidez  da  queima,  a  taxa

de  compressão,  a  máxima  pressão  de  combustão,  etc.

Uma  vantagem  adicional  das  grandes  dimensões  é  o

aumento  da  durabilidade,  pois  o  material  desgastado

das  superfícies  afetadas  dos  MCI  é  removido  sempre

na  mesma  velocidade,  independentemente  do  tamanho

dos  motores.  Em  conseqüência,  o  desgaste  percentual

fica  favorecido.

Naturalmente,  na  medida  em  que  aumentam  as

dimensões,  a  massa  e  o  custo  de  fabricação  sofrem

acréscimos  importantes.  Tanto  os  motores  de  4

tempos,  como  também  os  de  2  tempos,  apresentam

peso  crescente  com  o  diâmetro  dos  cilindros,  mas  se

mantém  em  grupos  distintos.  Podem  ser  observadas

influências  de  modernização  de  projetos,  bem  como  de

grandes  variações  nas  relações  curso/diâmetro  dos

motores  de  2  tempos.

**2.1  Motores  de  Dois  Tempos**

Os  motores  de  dois  tempos  são  os  maiores  MCI  que

hoje se fabricam. Fazem uso de sistemas

biela/manivela  providos  de  cruzeta,  essenciais  para

permitir  o  resfriamento  dos  pistões  por  circulação  de

água,  medida  necessária  em  face  das  elevadas  cargas

térmicas  que  sofrem  estes  motores.  Além  disso,  o

sistema  biela/manivela  com  cruzetas  é  o  único

mecanismo  que  possibilita  a  realização  de  cursos  de

pistão  tão  longos  quanto  necessário,  tipicamente  de  2

a  3  vezes  o  diâmetro  do  cilindro,  para  possibilitar  o

acionamento direto do hélice, nas aplicações

marítimas.

Apresentam  os  menores  custos  de  operação  e

manutenção  (O&M),  da  ordem  de  0,0039  US$/kWh

(ref.  4).  A  separação  entre  os  circuitos  de  lubrificação

dos  cilindros  e  dos  mancais  e  os  maiores  intervalos

entre  revisões  são  os  principais  motivos  para  uma

baixa  despesa  de  manutenção.

**2.2  Motores  de  4  tempos**

Os  motores  de  4  tempos  com  potência  unitária  e

tamanho  físico  menor,  na  faixa  de  0,5  a  22  MW,

evoluíram  de  forma  paralela.  Têm  encontrado  uso

competitivo  nas  aplicações  de  espaço  restrito,  como

lanchas  rápidas,  "ferry-boats",  etc.  Sua  maior  potência

por  unidade  de  massa  tem  como  contrapartida  um

rendimento      efetivo      ligeiramente      menor,      sendo

observados  valores  no  intervalo  de  40  a  48%,  valendo

as  eficiências  maiores  para  as  unidades  com  maior

tamanho  de  cilindro.

**3.0  -  ÁREAS  DE  APLICAÇÃO**

A  geração  termoelétrica  em  sistemas  isolados  é  a

principal  aplicação  da  tecnologia  de  MCI  tipo  Diesel.

Além  de  uma  aplicação  modular,  onde  unidades  são

adicionadas  em  função  do  crescimento  da  carga,  é  a

tecnologia  indicada  para  cargas  até  30  MW.  A  curva  de

carga  não  apresenta  decréscimo  sensível  da  eficiência,

já  que  a  curva  de  consumo  específico  versus  carga  é

praticamente  plana  acima  de  25%  de  carga.

Pode  ser  aplicada  em  cogeração,  fornecendo  além  de

energia  elétrica,  outros  energéticos  ao  usuário,  tais

como,  aquecimento  a  médias  temperaturas  e  geração

de  vapor  de  baixa  pressão.  A  conexão  diretamente  na

rede  de  distribuição  tem  baixo  impacto,  podendo  trazer

alívio  e  benefícios  na  diminuição  de  compras  de

energia  externas  ao  sistema  local.

No  sistema  interligado  com  unidades  da  ordem  de  200

MW  esta  tecnologia  tem  como  principal  ponto  positivo

a  possibilidade  de  flexibilização  do  combustível  líquido

estocável,  sem  restrição  de  “take  or  pay”.

Em  termos  de  aplicação,  são  reportadas  diversas

instalações  com  capacidade  da  ordem  de  200  MW,

destacando-se:

• UTE  Bauang  de  215  MW  com  MCI  Sulzer  nas

Filipinas

• UTE  Foshan  de  179  MW  com  MCI  Man  –

Burmeister&Wain  na  China.

A  China  nos  últimos  anos  tem  se  destacado  como  um

importante  comprador  de  usinas  deste  tipo,  incluindo

diversos  fabricantes.

Há  registros  de  uso  de  cogeração  em  unidades

utilizando  diesel  ou  gás  em  setores  têxtil,  cerâmico,

hortaliças  e  flores.

**4.0  -  LAY  OUT  E  SISTEMAS**

O  arranjo  típico  de  uma  UTE  com  MCI  é  modular,

sendo  que  os  grupos  motor-gerador  são  colocados

paralelos  a  lateral  da  casa  de  máquinas.  Portanto,  a

lateral  tem  a  dimensão  fixa,  determinada  pelo

comprimento  do  grupo  motor-gerador.  Os  motores  são

colocados  lado  a  lado  na  dimensão  perpendicular  a

lateral,  de  acordo  com  o  número  de  unidades  a  serem

instaladas.  É  nesta  direção  que  existe  a  reserva  de

espaço  para  a  ampliação.  Na  figura  11  é  apresentado

um  exemplo  de  arranjo.  Além  do  requisito  de  área,  que

2

geralmente  varia  de  60  a  80  m  /MW  instalado,  a  casa

de  máquinas  deve  possuir  volume  adequado  para

dissipação  do  calor  e  ruído,  variando  entre  0,4  e  1,2

3

m  /kW  instalado.  A  área  total  da  usina  depende  dos

sistemas  auxiliares,  sobretudo  subestação  e  sistema

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Combsutível | EPM | MF30 | MF60 | MF80 | MF100 | MF150 | MF180 | MF270 | Mf380 | bunkerC |
| %diluente | 40 | 39 | 31 | 25 | 21 | 18 | 15 | 11 | 8 | 6 |

**3**

de  resfriamento.  Este  último  é  colocado  externamente

•  Viscosidade:  700  cSt  a  50  C

•  Densidade:  0,991  g/ml  a  15  C

ao  prédio  da  usina

**5.0  -  COMBUSTÍVEIS**

**5.1  Óleo  residual**

Para  os  MCI  de  2  tempos  a  especificação  básica

deocombustível  é  a  seguinte:

o

o

O  óleo  n.6  da  especificação  americana  atende  a  estes

requisitos.  No  tocante  ao  óleo  nacional  1A  ou  1B,  a

o

viscosidade  não  é  atendida,  já  que  a  50  C  o  valor  é  de

1.370  cSt.  Entretanto,  a  curva  da  viscosidade  com  a

temperatura  para  o  óleo  nacional  é  mais  inclinada,

alcançando  no  valor  limite  especificado  entre  135  e  150

o C  o  valor  necessário  de  12  a  14  cSt  para  a  injeção.

Portanto,  a  princípio  os  óleos  1A  ou  1B  podem  ser

utilizados  in  natura  nestes  motores  ou  eventualmente

com  algum  beneficiamento  junto  ao  preparo  no  refino

nestes  motores.

Existem  no  mercado  óleos  especialmente  preparados

para  uso  em  aplicação  marítima.  A  obtenção  destes

óleos  é  a  partir  de  óleo  1A  através  de  uma  diluição  com

óleos  de  menor  viscosidade.  Os  óleos  são  o  EPM,  os

MF`s  (“maritime  fuels”)  e  bunker  C.  Os  óleos  diluentes

são  o  Odec  Raro  (óleo  decantado  raro),  o  OLR  (óleo

leve  de  reciclo)  ou  o  óleo  diesel.  Na  tabela  a  seguir  são

apresentados  teores  de  diluição  típicos:

O  EPM,  MF  380  e  bunker  C  são  os  óleos  mais

utilizados  e  possuem  a  viscosidade  de  30,  380  e  420

o

cSt  a  50  C,  respectivamente.

Para  os  MCI  de  4  tempos  de  projeto  mais  antigo  a

especificação  é  mais  restritiva,  quando  o  diâmetro  do

cilindro  é  menor.  No  entanto,  desde  1999  a  MAN-B&W

complementou  sua  linha  com  3  motores  pequenos,

cujos  cilindros  medem  16  cm,  21  cm  e  27  cm  de

diâmetro,  e  que  consomem  o  mesmo  óleo  residual

empregado  nos  motores  grandes,  com  520  a  820

2

mm  /s  a  50ºC.  O  menor  destes  motores,  o  5L-16/24

produz  500  kW  a  1200  rpm  (ref.  1).

As instalações necessárias para condicionar o

combustível  oneram  os  custos  de  investimento  destas

UTE.

**5.2  Gás  natural**

O  uso  de  gás  natural  pode  ser  feito  em  motores  de

ignição  por  faísca,  que  na  maioria  das  vezes  são

operados  em  mistura  pobre,  com  mais  de  70  %  de

excesso  de  ar.  O  diâmetro  dos  cilindros  é  limitado  em

conseqüência  do  problema  da  detonação,  que  se

agrava  na  medida  em  que  aumenta  o  diâmetro.  Hoje

não  se  produzem  unidades  além  do  diâmetro  de  32

cm.  A  ignição  da  mistura  pobre  requer  elevadas

energias  e  o  uso  de  velas  para  este  fim  não  é  possível,

quando  o  diâmetro  do  cilindro  excede  160  mm.  Nos

motores  com  cilindros  de  160  mm  e  menor,  o  uso  de

velas  para  descargas  em  alta  energia  somente  se  torna

viável  mediante  emprego  de  medidas  especiais  para

aumentar  a  durabilidade  e  confiabilidade  do  sistema  de

ignição,  como  o  controle  da  tensão  em  cada  vela,  a

identificação  de  falhas  de  ignição,  o  emprego  de  mais

do  que  uma  vela  por  cilindro,  etc.  O  menor  diâmetro  do

cilindro  destes  motores  reduz  sua  eficiência,  que  além

disso  é  prejudicada  pela  menor  taxa  de  compressão,

que  por  sua  vez  depende  dos  recursos  empregados

para  evitar  a  detonação.  Estes  são  o  controle

eletrônico  da  mistura  e  da  pressão  do  turbo  -  o

processo  Miller  (ref.  1),  a  otimização  da  câmara  de

combustão  principal,  para  permitir  combustão  rápida

em  regime  de  mistura  pobre,  para  citar  os  principais.

Unidades  com  maior  diâmetro  de  cilindro  (acima  de

160  mm)  empregam  uma  pequena  antecâmara,

provida  de  vela  e  abastecida  por  uma  mistura  ar/gás

aproximadamente  estequiométrica,  que  se  inflama  com

facilidade  e  representa  cerca  de  1%  da  energia  do  gás

consumido  em  plena  carga.  O  conteúdo  desta  câmara

é  despejado  para  a  câmara  principal,  formando

múltiplos  pontos  de  início  de  ignição,  contendo

algumas  centenas  de  milhares  de  vezes  mais  energia

do  que  uma  vela  de  ignição.  Este  sistema  de  ignição  é

utilizado  em  motores  até  o  limite  de  320  mm  de

diâmetro  de  cilindro,  pelo  menos  até  agora.

Os  rendimentos  obtidos  com  estes  motores  ficam  muito

próximos  aos  de  motores  Diesel,  e  poderão  até  mesmo

excedê-los,  uma  vez  que  a  combustão  do  metano  se

dá  em  tempo  mais  curto  do  que  o  óleo  Diesel  (ref.  1).

Na  referência  1,  a  Ricardo  Consulting  Engineers

formulou  como  meta  ambiciosa  para  futuros  motores  a

gás  a  aproximação  ao  rendimento  de  50%.

A  emissão  de  NOx  destes  motores  a  gás  que  operam

em  mistura  pobre  não  passa  de  0,5  g/kWh,  da  ordem

de  1/5  da  emissão  de  motores  Diesel.  Não  necessitam

de  catalisadores,  a  não  ser  para  a  oxidação  do  CO,

quando  as  exigências  legais  são  extremamente

severas  (menores  do  que  650  ppm).

O  gás  obtido  das  redes  públicas  muitas  vezes  varia  em

composição,  afetando  o  poder  calorífico  e  o  número  de

metano,  que  mede  a  resistência  à  detonação,  tendo

como  parâmetro  o  metano  puro.  Os  sistemas  de

gerenciamento  dos  motores  a  gás  fazem  as  correções

necessárias  para  manter  a  potência  do  motor,  como  a

correção  da  mistura  ar-combustível  para  compensar  o

poder  calorífico,  ou  o  empobrecimento  desta  mistura

para  evitar  a  detonação.  Quando  não  se  consegue

mais  manter  a  potência  em  função  destas  correções,  a

potência  é  reduzida  até  que  uma  operação  normal  seja

restabelecida.  Para  compensar  estas  quedas  de

potência  poderá  ser  necessário  instalar  motores

adicionais,  ou  se  poderá  optar  para  o  uso  de  motores

bi-combustíveis,  que  permitam  a  mudança  de  gás  para

óleo  Diesel  durante  os  períodos  em  que  a  qualidade  do

gás  é  insuficiente.

**Thank you for using Wondershare PDFelement.**

**You can only convert up to 5 pages in the trial version.**

**To get the full version， please purchase the program here:**

[*http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db*](http://cbs.wondershare.com/go.php?pid=973&m=db)