

UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

COGERAÇÃO EM SIST. ISOLADOS:
EST. DE CASO EM EMBARC. NAVAIS

Guaratinguetá
1997



1110000340



***"Cogeração em Sistemas
Isolados: Estudo de Caso em
Embarcações Navais "***

HEBER LUÍS DA COSTA

72



"COGERAÇÃO EM SISTEMAS ISOLADOS: ESTUDO DE CASO EM
EMBARCAÇÕES NAVAIS"

HEBER LUÍS DA COSTA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

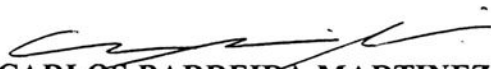
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Maurício Araújo Zanardi
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / Unesp-Feg


Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA
Unesp-Feg


Prof. Dr. CARLOS BARREIRA MARTINEZ
UFMG

340

340

T536.72(043)

C 837 C

Setembro de 1997



DADOS CURRICULARES

HEBER LUÍS DA COSTA

NASCIMENTO	12.12.67 - Barra Mansa/RJ
FILIAÇÃO	Ladeir José da Costa Sônia Sampaio da Costa
1989-1993	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
1994-1997	Ingresso no curso de Pós-Graduação, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP, Câmpus de Guaratinguetá
1994-1997	Ingresso na Mecânica Pesada S.A , onde atua como engenheiro de montagem.

Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

Que nunca deixou de me ajudar, por menor
que fosse a sua contribuição. Que mostrou
sua confiança na minha pessoa



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência e pela minha família e meus amigos.

ao meu orientador, *Dr. José Antônio Perrella Balestieri* que jamais deixou de me incentivar; apesar dos meus tropeços, sempre procurava um ponto positivo; sem a sua orientação, dedicação e ajuda, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível. Pessoa na qual sempre procurarei me espelhar.

aos meus pais *Ladeir e Sônia*, que apesar das dificuldades enfrentadas sempre incentivaram meu estudo.

à dona *Ieda Maria Siggelkow de Almeida Perrella* que sempre me acolheu com alegria em sua casa.

às funcionárias da Biblioteca do Câmpus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

às secretárias da pós - graduação Regina e Elisa pela dedicação e alegria no atendimento.

à Mecânica Pesada S.A., em particular na pessoa do engenheiro *Jean Louis Simal*, pelos dados utilizados no estudo de caso e principalmente pela colaboração na solução de dúvidas pertinentes aos motores em estudo.



SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	8
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	9
1. A COGERAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE GERAÇÃO ISOLADA ..	11
1.1 Introdução	11
1.2 Sistemas isolados: Particularidades do atendimento energético	12
1.3 Alternativas de geração em sistemas isolados	14
1.4 A cogeração no contexto de sistemas isolados	18
1.5 Objetivos deste trabalho e apresentação dos capítulos	20
2. ASPECTOS BÁSICOS DA COGERAÇÃO	23
2.1 Introdução	23
2.2 Conceito	24
2.3 A energia elétrica como produto comercializável	26
2.4 Análise das unidades de processo	29
2.5 Ciclos disponíveis para a cogeração	30
2.6 Dados para a escolha do ciclo	33
2.7 Motores de combustão interna e a cogeração	35
2.8 Comentários	39
3. CONDIÇÃO OPERACIONAIS DE UNIDADES DE COGERAÇÃO SOB CARGAS PARCIAIS EM NAVIOS	40
3.1 Introdução	40
3.2 Unidades geradoras de energia	41
3.3 Consumo de energia em embarcações navais	47
3.4 Variáveis importantes na análise dos motores de combustão interna	54
3.5 Análise das variáveis em cargas parciais	57
3.6 Comentários	65
4. ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO DAS UNIDADES DE COGERAÇÃO COM MOTORES DIESEL EM CARGAS PARCIAIS	66
4.1 Introdução	66
4.2 Condição operacional fora do ponto de projeto (<i>off-design</i>)	66
4.3 Modelagem termodinâmica das unidades Diesel em cogeração	72
4.3.1 Gerador de água fresca	72
4.3.2 Aproveitamento dos gases de escape para recuperação de energia	77
4.4 Estudo de caso com um navio real	81
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	94
6. REFERÊNCIAS	97
Anexos	100
Resumo	105
Abstract	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	- Central de cogeração a vapor e correspondente ciclo termodinâmico	19
Figura 2.1	- Atendimento das demandas de um processo (a) sem cogeração (b) com cogeração	26
Figura 2.2	- Tipos de atendimento de energia em uma planta de cogeração	27
Figura 2.3	- Ciclos térmicos disponíveis para cogeração	32
Figura 2.4	- Aproveitamento energético em motor de combustão interna	36
Figura 3.1	- Ciclo combinado	43
Figura 3.2	- Configurações (a) <i>father-and-father</i> (b) <i>father-and-son</i>	45
Figura 3.3	- Gerador acoplado ao motor principal	46
Figura 3.4	- Água quente para uso geral obtido na jaqueta do motor	49
Figura 3.5	- Troca térmica em navios numa faixa de condições ambientais	51
Figura 3.6	- Ilustração de um motor Diesel de grande porte	58
Figura 3.7	- Variação da potência efetiva de motores Diesel	60
Figura 3.8	- Potência efetiva de unidades Diesel de menor porte	60
Figura 3.9	- Consumo específico de unidades Diesel em cargas parciais	61
Figura 3.10	- Comportamento da pressão média efetiva	62
Figura 3.11	- Variação da temperatura dos gases de escape	63
Figura 3.12	- Variação da temperatura da água após turbo	64
Figura 3.13	- Variação da temperatura do óleo após turbo	64
Figura 4.1	- Comportamento do consumo específico em carga parcial	68
Figura 4.2	- Quadrantes operacionais no ponto de projeto	69
Figura 4.3	- Condição operacional com demandas inferiores ao ponto de projeto	70
Figura 4.4	- Recuperação de energias possíveis em um motor de combustão interna	72
Figura 4.5	- Diagrama de carga do motor	73
Figura 4.6	- Dissipação de calor no trocador de calor de água da jaqueta	74
Figura 4.7	- Diagrama de fluxo de recuperação do calor da água de refrigeração da jaqueta para geração de água fresca	76
Figura 4.8	- Diagrama do sistema de resfriamento de água do motor	76
Figura 4.9	- Diagrama da vazão dos gases disponíveis ($m_{o\%}$)	78
Figura 4.10	- Variação dos gases de exaustão após turbo	79
Figura 4.11	- Mudança na quantidade específica de gás de exaustão	80
Figura 4.12	- Mudança na temperatura dos gases de exaustão	81
Figura 4.13	- Perfis de demanda por potência auxiliar e de propulsão em embarcação naval de passageiro	82
Figura 4.14	- Análise de recuperação térmica no motor 5L 50MC	85
Figura 4.15	- Análise de recuperação térmica no motor 5S 50MC	85
Figura 4.16	- Análise de recuperação térmica no motor 5L 80MCE	86
Figura 4.17	- Análise de recuperação térmica no motor K6SZ 70/150 CL	86



Figura 4.18	- Análise de recuperação térmica no motor K7SZ 70/150 CL	87
Figura 4.19	- Análise de recuperação térmica no motor K8Z 70/120 E	87
Figura 4.20	- Análise de recuperação térmica no motor K8Z 86/160 E	88
Figura 4.21	- Retorno de investimento para o motor 5L50MC	90
Figura 4.22	- Retorno de investimento para o motor 5S50MC	90
Figura 4.23	- Retorno de investimento para o motor 5L80 MCE	91
Figura 4.24	- Retorno de investimento para o motor K 6SZ 70/150 CL	91
Figura 4.25	- Retorno de investimento para o motor K 7SZ 70/150 CL	92
Figura 4.26	- Retorno de investimento para o motor K 8Z 70/120 E	92
Figura 4.27	- Retorno de investimento para o motor K 8Z 86/160 E	93



LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	- Valores da razão potência/calor gerada em alguns ciclos motores	34
Tabela 3.1	- Elenco de motores considerados na análise	58
Tabela 4.1	- Potência absorvida nas diversas demandas de um navio de carga (kW)	82
Tabela 4.2	- Valores agregados por fontes de energia (kW) e por condições operacionais do navio	83



LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

D\$	= custo do combustível
C	= constante do motor
$^{\circ}\text{C}$	= grau Celsius
CA	= caldeira convencional
CF	= carga no freio ou trabalho indicado
COP	= coeficiente de performance
CR	= caldeira de recuperação
D	= demanda
E	= demanda eletromecânica
E_p	= energia primária
h	= entalpia
h_a	= operação do sistema de recuperação (horas/ano)
i	= taxa de juros de mercado
K_p	= fator de correção com base no tipo de hélice
m	= massa
$\dot{M}$	= massa do combustível por unidade de tempo
m^3	= metros cúbicos
MC	= motor de combustão
M_{cr}	= massa da caldeira de recuperação
MCR	= máxima carga nominal contínua
M_{fw}	= produção de água fresca em toneladas por 24 horas
$\dot{M}_{exh}$	= quantidade de gás de escape
$\dot{M}_{L1}$	= quantidade de gás de escape no ponto nominal
mmCA	= milímetros de coluna d'água
MPa	= mega Pascal
$MQ\%$	= média do calor fornecido ao sistema de recuperação
MW	= mega Watt
n	= número de períodos (anos)
N	= rotação por minuto
N_c	= número de cilindros
n_o	= rotação (rpm) no ponto otimizado
Ne	= potência efetiva
O	= ponto otimizado
P	= capital investido para o sistema de recuperação
p_{bar}	= pressão barométrica
P_o	= força (kW) no ponto de otimização
P_{L1}	= força no ponto nominal
PM	= força em (kW) na MCR especificada
P_{me}	= pressão média efetiva
PP	= unidade de processo
P_s	= capacidade de serviço contínua do motor



Q	= calor
$Q\%$	= economia do sistema de recuperação nas respectivas cargas
QCR	= calor fornecido à caldeira de recuperação
QRA	= calor fornecido ao sistema de absorção
Q_{jw}	= dissipação de calor da água da jaqueta
$q_{jw}\%$	= fator de correção da figura 4.6
$Q_{jw,o}$	= dissipação de calor da água da jaqueta no ponto otimizado (O)
$QL1$	= dissipação de calor da água da jaqueta a MCR(L1) nominal
S	= demanda térmica
S	= curso dos pistões
sfc	= consumo específico
T_{ar}	= temperatura ambiente
T_{cw}	= temperatura do ar de recuperação
T_{exh}	= temperatura dos gases de exaustão
TG	= turbina a gás
T_{L1}	= temperatura dos gases de exaustão no ponto nominal
TV	= turbina a vapor
UFA	= unidade de filtragem de ar
UTA	= unidade de tratamento de ar
VHt	= volume do curso de todos os pistões
W	= potência
η_b	= rendimento da bomba
γ	= volume específico
$\$/kW$	= custo por quilo Watt
ΔM_{anb}	= fator mudança na quantidade gases de exaustão nas condições ISO
$\Delta M_{HET/TCS}$	= fator de correção da massa para turbocompressores de alta eficiência e turbo-composto
$\Delta m_{s\%}$	= fator de mudança na vazão dos gases disponíveis
ΔP_0	= contrapressão no ponto de otimização
ΔPM	= contrapressão dos gases na MCR especificada
ΔT_{AMB}	= fator de mudança na temperatura dos gases de escape nas condições ISO
$\Delta T_{HET/TCS}$	= fator de correção da temperatura para turbocompressores de alta eficiência e turbo-composto
ΔT_0	= fator variação na temperatura dos gases de exaustão após turbo
ΔT_s	= fator na mudança na temperatura devido a carga parcial

CAPÍTULO 1

A COGERAÇÃO COMO ALTERNATIVA DE GERAÇÃO ISOLADA

1.1- Introdução

A questão energética tem assumido, nas últimas décadas, posição relevante nas discussões nacionais e setoriais em face da posição de destaque que representa na estrutura de custos das nações em nível global e das empresas em escala microeconômica.

O modelo de desenvolvimento energético atualmente praticado pela maior parte dos países é centralizador, voltado ao suprimento das necessidades dos serviços energéticos através da priorização do consumo, com consequências diretas no planejamento da expansão dos sistemas elétricos de cada país; além disso, as projeções e taxas de crescimento da demanda têm tornado inviáveis muitos dos novos investimentos devido aos altos custos financeiros que representam para todo o sistema, com evidentes repercussões para o meio ambiente.

Nesse contexto, é importante que seja discutida a pertinência dos sistemas descentralizados de geração, não apenas devido à complexidade dos sistemas interligados (e seus conseqüentes riscos e custos) mas também e principalmente pelo fato de haver situações que não comportam outra alternativa - tal é o caso de localidades remotas de base rural e vilarejos, ilhas oceânicas, sistemas para transporte de produtos perecíveis e embarcações navais.

1.2- Sistemas isolados: particularidades do atendimento energético

A produção e a distribuição de energia a partir de unidades centralizadas e de sistemas interligados, tal como acontece em boa parte das regiões com grande incidência populacional, têm sido consideradas satisfatórias principalmente pelas condições de unicidade que é emprestada ao todo, assim como pelo que representam em termos do aumento da confiabilidade do sistema.

O que se observa na sociedade moderna é o aumento crescente da eletrificação, em nível industrial, comercial e residencial, como resultado de um processo de incorporação de tecnologias e facilidades; ainda que passível de críticas e discussões, mesmo a (às vezes frágil) aderência entre o consumo de energia e o Produto Interno Bruto conduz a previsões díspares porém crescentes para o consumo futuro de energia.

Nos sistemas isolados, o que se observa é a necessidade do atendimento das demandas energéticas com considerações diferenciadas com respeito:

- à disponibilidade das fontes energéticas,
- às tecnologias possíveis de serem empregadas,
- à confiabilidade, durabilidade e aos custos de investimento e operacionais da geração,
- aos níveis de emissão de poluentes,
- à qualidade e à frequência do suprimento das energias necessárias para a satisfação de todas as necessidades da unidade de processo, localidade, setor ou país.

Com respeito à disponibilidade das fontes energéticas, é importante ressaltar que os sistemas isolados devem considerar com certo desvelo o levantamento dos tipos e dos recursos disponíveis na localidade para um adequado planejamento; desse modo, comunidades rurais distantes devem ponderar o emprego de recursos agro-florestais relacionados com as atividades agrícola e pecuária, como as biomassas vegetais, assim como o potencial de pequenos aproveitamentos hídricos (pequenas centrais hidrelétricas). De igual modo, embarcações navais devem considerar o conflito (*trade off*) entre o peso morto representado pelas fontes combustíveis necessariamente transportadas e o potencial aumento de carga útil possível de ser transportada.

Em relação às tecnologias em condições de serem empregadas, existe uma grande diversidade de alternativas tecnologicamente viáveis para o emprego em sistemas isolados, cada qual com seus custos, níveis de emissão de poluentes, vantagens e desvantagens associadas à durabilidade dos componentes e dificuldades operacionais e de manutenção:

- aero-geradores para o aproveitamento de energia eólica;
- células fotovoltaicas para o aproveitamento de energia solar;
- mini-turbinas para pequenas quedas d'água;
- emprego de gaseificadores de biomassa e biodigestores associados a motores de combustão interna ou turbinas a gás;
- pequenas máquinas a vapor, acionadas a partir de resíduos agro-florestais queimados em caldeiras.

Finalmente, cabe ressaltar que se encontram associados a cada uma dessas considerações problemas decorrentes de outros envolvimento que não simplesmente os técnicos; existem elementos sociais, econômicos e culturais que podem ser determinantes para a definição dos parâmetros que irão nortear a escolha da estratégia e das tecnologias mais adequadas a cada caso.

1.3- Alternativas de geração em sistemas isolados

A definição das alternativas mais viáveis para a geração de energia em sistemas isolados é função dos recursos disponíveis e das necessidades energéticas expressas pelos processos e serviços desempenhados pelas unidades de processo, localidades ou setores.

De um modo geral, os recursos energéticos podem ser classificados em renováveis e não-renováveis; quase todos os recursos renováveis considerados para utilização no presente momento podem ser direta ou indiretamente relacionados à energia proveniente do sol: energia eólica, radiação e aquecimento solar, quedas d'água e biomassa são diferentes manifestações da energia solar, cujas principais características residem no fato de serem distribuídas em toda a superfície do globo terrestre, em maior ou menor intensidade, serem abundantes e gratuitas. Por outro lado, esses recursos se encontram de forma difusa na natureza e sua conversão para formas úteis de energia prescinde de sistemas intensivos em capital. Recursos geotérmicos, maré-motrizes ou gradientes de temperaturas marítimas são também renováveis, porém extremamente



específicos de localidades oceânicas. Os recursos não-renováveis incluem todas as fontes combustíveis fósseis e minerais.

Em termos de necessidades energéticas, pode-se apresentar diferentes categorias, baseado no tipo e na qualidade da energia demandada.

- energia elétrica, notadamente empregada para iluminação doméstica e comunitária, sistemas de comunicação, acionamento de motores, equipamentos de refrigeração, atividades relacionadas à saúde, etc.
- energia mecânica de rotação, especialmente empregada para transporte de produtos, bombeamento de água, em processos industriais de pequena escala de produção, etc.;
- energia térmica de média intensidade (temperaturas na faixa entre 100 e 300 °C), usada principalmente para cocção, desinfecção, limpeza, etc.;
- energia térmica de baixa intensidade (temperaturas inferiores a 100 C), usada para aquecimento de água doméstica, aquecimento de ambientes, etc;
- energia térmica de refrigeração (temperaturas inferiores a 5 C), empregada para condicionamento de ar, conservação de alimentos, etc.

No caso de localidades rurais e vilarejos, a disponibilidade de resíduos agropecuários e biomassas vegetais pode ser um forte incentivo para a implantação de sistemas de gaseificação e biodigestão, os quais podem ser associados a caldeiras de pequeno porte para geração de vapor/água quente, a motores de combustão interna ou a sistemas de ciclo a gás para geração de energia elétrica/mecânica, assim como energia térmica de baixa (na água de resfriamento) e média intensidades (nos gases de escape). A existência de recursos hídricos pode



recomendar a construção de rodas d'água ou pequenas centrais hidrelétricas, competindo para a geração de energias elétrica e mecânica com vantagens pelo fato de não implicar em emissão de poluentes, contudo ensejando a inundação de áreas agricultáveis e impactos na hidrologia local.

A cogeração é um dos aspectos considerados no meio rural e ainda que seu emprego demande maiores e melhores cuidados em termos de manutenção, sistemas baseados em ciclo a gás têm sido aventados (Roy-Aikins, 1995). Propostas envolvendo motores Diesel, baterias e fontes renováveis também povoam os estudos de sistemas isolados no meio rural (Nayar, 1995); modelos multiobjetivos de otimização matemática desenvolvidos exclusivamente para o planejamento energético no meio rural (Zhen, 1994) ou aplicados a casos gerais a partir da técnica de Programação por Metas - *goal programming* - têm sido propostos para auxiliar o processo de decisão (Ramanathan e Ganesh, 1994).

Ilhas, oceânicas ou pluviais, podem apresentar condições mais favoráveis para a energia eólica, em face das correntes de ar que se formam por causa dos centros de pressão diferenciados das regiões litorâneas; igualmente, as energias maré-motrizas e os gradientes de temperaturas oceânicas podem se apresentar como alternativas competitivas para uma análise comparativas das soluções mais viáveis para essa situação. Dependendo da extensão da ilha, assim como da diversidade vegetal existente, é possível que o manejo de certas culturas que propiciem um maior aproveitamento em termos de produção de energia seja igualmente recomendável.



Unidades para transporte de produtos perecíveis e embarcações navais ocupam, nas presentes considerações, uma análise pormenorizada e mais atenta em função de sua condição dinâmica - aqui exposta em termos de deslocamento espacial - das unidades consumidoras de energia. Unidades para transporte de produtos perecíveis necessitam de intensa carga de refrigeração para sua conservação durante a transferência entre os pontos de produção e de distribuição a varejo; em geral, tais necessidades são atendidas por unidades auxiliares, associadas ao conjunto propulsor principal.

Embarcações navais apresentam restrições adicionais; os cinco níveis de energia são necessários, com limitação na disponibilidade de fontes combustíveis sob pena de vir a permanecer à deriva no caso de um desacerto no aprovisionamento. A propulsão mecânica é desenvolvida basicamente por grandes unidades (motores de combustão interna, unidades a vapor, unidades a gás ou em ciclo combinado, como se verá adiante), cabendo a geração de energia elétrica à mesma ou a unidades menores, que se encarregam do abastecimento dessa última forma de energia em condições especiais. Há ainda a necessidade de suprir-se as energias térmica de média e baixa intensidade para as diversas atividades, realizadas nos diferentes trópicos do globo terrestre, assim como cargas de refrigeração para conservação de produtos perecíveis, condicionamento dos diversos ambientes do navio, etc.

Estando em alto mar, o regime operacional da embarcação deve ser o mais estável possível, a menos de situações especiais, como por exemplo a ocorrência de intempéries em alto mar, que poderiam forçar uma mudança na



marcha das unidades motoras; em aportagens no cais, ou mesmo durante a espera para a aportagem, as unidades geradoras de energia mecânica de propulsão são obrigadas a uma redução na carga, o que implica - para uma condição de cogeração - na busca de outras alternativas de suprimento das necessidades térmicas.

1.4- A cogeração no contexto dos sistemas isolados

A cogeração é, por princípio, a geração de duas ou mais formas de energia útil a partir de uma mesma fonte de energia primária. A partir dessa definição, entende-se que a mesma se insere no contexto das oportunidades de Conservação de Energia como uma forma de atuação sobre as fontes produtoras de energia, que privilegiam o máximo aproveitamento dos recursos naturais.

Quando se considera uma situação sem cogeração, entende-se que as necessidades energéticas devem ser satisfeitas a partir de outras formas de geração; no caso de existirem as cinco necessidades anteriores, para a satisfação de cada uma delas uma parcela de energia primária deveria ser exaurida de tal modo a supri-las. Pelo emprego da cogeração, ainda que não seja possível atender integralmente todas as demandas em todo o período de tempo de operação da unidade de processo, pelo menos deverá ser observável uma redução no consumo das fontes energéticas, com evidente vantagem sobre a geração de forma independente.

Um exemplo ilustrativo, adaptado de Witte *et al*, 1988, permite vislumbrar em números o grande potencial de conservação de energia que a



cogeração pode propiciar. Seja uma unidade de processo que disponha de uma caldeira com 80 % de eficiência e que gera 45000 kg/h de vapor a 5.0 MPa e 370°C. A partir do uso de uma turbina a vapor de contrapressão, com eficiência de 80 %, a unidade gera eletricidade, sendo o vapor obtido da mesma a 1.0 MPa e enviado para o processo; posteriormente, o vapor é condensado para recuperar o calor e retornado à caldeira ainda a 1.0 MPa.

Se comparadas, as quantidades de combustível demandada neste caso e numa situação em que a geração é feita de forma independente, verifica-se que há vantagens na cogeração. Alguns números são aqui omitidos, porém facilmente resgatáveis para fins de verificação. A figura 1.1 ilustra a configuração adotada, bem como o diagrama termodinâmico correspondente.

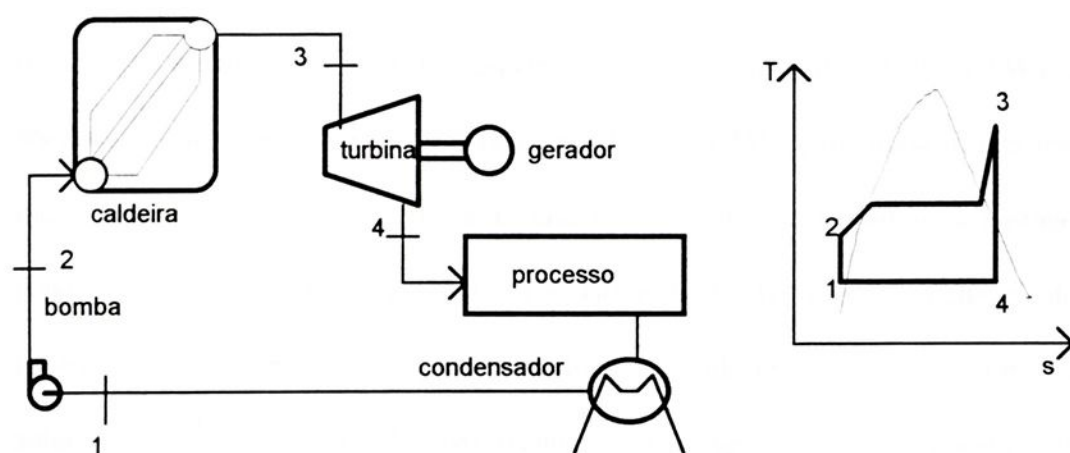


Figura 1.1- Central de cogeração a vapor e correspondente ciclo termodinâmico

Considerando-se a eficiência da turbina, a potência eletromecânica gerada na máquina será

$$\dot{W} = \dot{m}(h_3 - h_4)$$

que para os dados apresentados resulta em 3.70 MW; o calor fornecido ao processo será

$$\dot{Q} = \dot{m}(h_4 - h_{4''})$$

que resulta em 25.80 MW; a energia contida no combustível gasto pode ser obtido pela expressão

$$\dot{F} = \dot{m}(h_3 - h_1)/\eta_b$$

tendo por resultado 35.85 MW. Desse modo, a eficiência total obtida será de 80%, resultado do quociente $(3.70 + 25.80)/35.85$; vale observar ainda que 4" é a simbologia para representar o ponto 4 na condição de líquido resfriado e que a entalpia do ponto 4 já considera a eficiência da turbina.

Se considerarmos geração independente a partir de uma unidade de geração elétrica com consumo específico de calor típico de 10550 kJ/kWh, a necessidade de energia do combustível será de 10.84 MW para geração elétrica, que somada com os 32.25 MW para geração de calor, considerando as mesmas condições anteriores, totalizam 43.09 MW, isto é, 6.25 MW a mais em energia do combustível se comparado com a cogeração. Estes valores validam as afirmações anteriores de que, do ponto de vista técnico, a cogeração é um meio eficiente de geração de energia.

1.5- Objetivos deste trabalho e apresentação dos capítulos



Considerando-se a necessidade de uma mais ampla discussão da questão energética em sistemas isolados e uma vez estabelecidas as bases em que se apoia essa discussão, a proposta deste trabalho é analisar a pertinência da cogeração em embarcações navais como mais uma alternativa para a satisfação das necessidades energéticas ali encontradas.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos associados à cogeração, como estratégias operacionais, os ciclos possíveis de serem empregados, as informações necessárias para a avaliação da melhor configuração, indicativos de custo e eficiência das diversas alternativas técnicas existentes, etc. Procura-se observar, nos pontos em que há distinção entre a geração de energia centralizada e descentralizada, os aspectos que merecem considerações especiais.

No Capítulo 3 são tratadas as diferentes tecnologias empregadas na geração de energia mecânica em embarcações navais, concentrando-se no estudo dos motores de combustão interna baseados na tecnologia Diesel. Para uma considerável faixa de potência são apresentadas as planilhas de teste dos mesmos, identificando as variáveis de maior interesse para o presente estudo; o comportamento de cada parâmetro sob cargas parciais é ilustrado de forma gráfica. Discute-se a pertinência dos valores obtidos com os motores disponíveis para aproveitamento de energia residual.

O Capítulo 4 estabelece a condição operacional de uma embarcação naval a partir de suas curvas de demanda de energias mecânica (para propulsão) e auxiliar (elétrica e térmicas em geral) e fornece uma modelagem termodinâmica para as configurações com motores Diesel estabelecidas pela



prática naval, que será associada aos valores reais apresentados para uma simulação das condições de atendimento das necessidades energéticas. Com base nos resultados dessas simulações serão estabelecidas as condições operacionais com os valores e condições em que a cogeração se torna viável em embarcações navais.

O Capítulo 5 encerra os comentários pertinentes à análise desenvolvida, apresenta as conclusões alcançadas com este trabalho e sinaliza novas linhas de pesquisa para sua continuidade.



CAPÍTULO 2

ASPECTOS BÁSICOS DA COGERAÇÃO

2.1- Introdução

A produção de energia elétrica por empresas privadas, chamada de produção independente, é uma das formas de venda de energia para a concessionária. Essa produção independente inclui centrais de geração convencionais e também sistemas de cogeração.

A energia elétrica é uma forma de energia versátil, altamente eficiente e de larga utilização em todos os setores da atividade humana pela facilidade de sua utilização. Nos últimos anos, houve um aumento significativo da utilização da energia elétrica em diversos setores industriais, como se observa da análise dos Balanços Energéticos Nacional e Estaduais (MME, 1996).

Assim, a cogeração é hoje uma das maneiras mais eficazes de se posicionar os novos investimentos em geração elétrica por representar, de início, a possibilidade de uma efetiva participação da iniciativa privada na geração e venda de excedentes de energia elétrica, também pelos elevados níveis de eficiência obtidos na geração conjunta de calor e eletricidade, bem como pelo aumento da confiabilidade do fornecimento de energia tanto às unidades industriais quanto ao sistema elétrico, que se beneficia dos excedentes elétricos disponíveis e pela redução das emissões de poluentes.



2.2- Conceito

A cogeração é a produção conjunta de duas ou mais formas de energia (eletromecânica e térmica) a partir de uma mesma fonte de energia primária e tem sido utilizada em diversos países, especialmente nos Estados Unidos e em certos membros da Comunidade Européia, como uma forma de participação da iniciativa privada nos investimentos em geração de energia.

Para sistemas isolados, que não se beneficiam de algumas das vantagens da interligação, a cogeração também garante benefícios - redução no consumo de combustível, maior confiabilidade, aumento da eficiência; exemplos práticos de sistemas isolados são os sistemas de transporte marítimo, as unidades agro-industriais distantes de redes de transmissão de eletricidade e ilhas oceânicas.

Para sistemas isolados relativos às embarcações navais, as necessidades energéticas devem ser satisfeitas integralmente pelas unidades de geração existentes a bordo; o abastecimento com fontes energéticas merece um cuidado adicional porque além do custo representado pelo combustível, a previsão de quantidades necessárias e o correspondente adicional de peso podem impor severas restrições às condições operacionais da embarcação.

Uma unidade de processo consiste em um conjunto de unidades de produção que se inter-relacionam para a geração de produtos comerciais. Para a operação de uma unidade de processo é imperativo que haja o consumo de energia elétrica e/ou mecânica e térmica; à demanda eletromecânica será atribuída a variável E e à térmica a variável S , ambas em unidades correntes de potência (kW).



Na condição de geração independente de energia, segundo a figura 2.1(a), a demanda eletromecânica de um processo pode ser atendida a partir da compra de energia elétrica da concessionária e a demanda térmica deve ser suprida via geração de vapor em caldeiras, no próprio parque industrial. Com isso, duas fontes primárias são consumidas para o atendimento do processo.

Para a prática da cogeração, uma máquina térmica é dimensionada de modo a suprir, com o consumo de apenas uma fonte primária, tanto a demanda térmica quanto a demanda eletromecânica. A demanda térmica deve ser suprida preferencialmente, no caso dos parques industriais brasileiros (a energia térmica gerada S' deve ser necessariamente igual à demanda S) mas a energia eletromecânica gerada E' pode ser diferente da demanda necessária no processo E , gerando excedentes comercializáveis com a rede concessionária de energia elétrica quando $E' > E$. No caso de embarcações navais, a demanda eletromecânica deve ser suprida preferencialmente, uma vez que o deslocamento da embarcação (energia mecânica) responde pela maior parcela de demanda. Na figura 2.1, são demonstradas as duas condições.

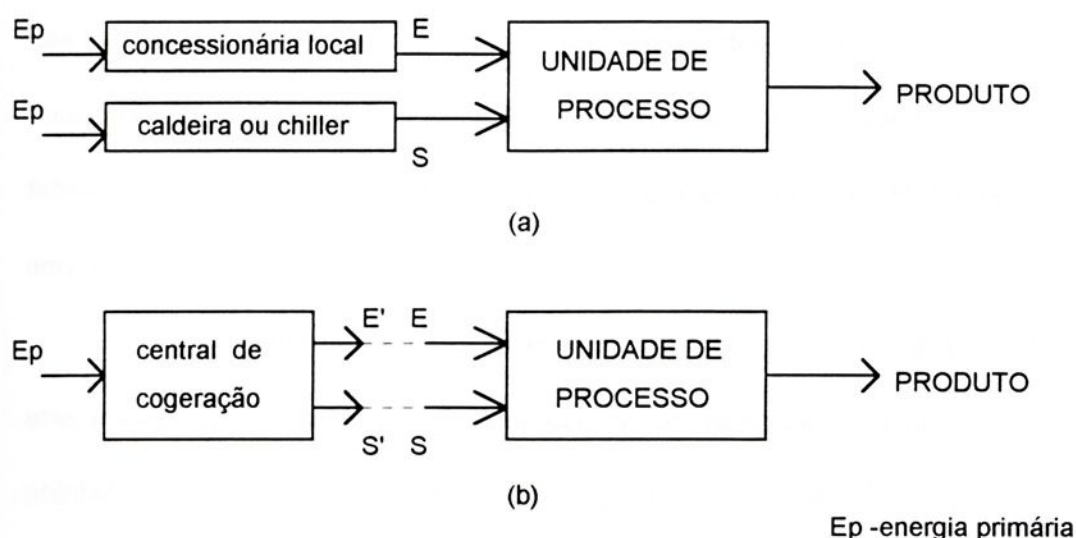


Figura 2.1- Atendimento das demandas de um processo

(a) sem cogeração (b) com cogeração

2.3- A energia elétrica como produto comercializável

A cogeração apresenta uma série de vantagens que, bem aproveitadas, trazem consigo novos conceitos de utilização. O primeiro conceito que deve estar claro é que a cogeração irá fazer parte da planilha de custos do produtor, representando lucros ou prejuízos, dependendo da sua utilização e os parâmetros escolhidos para esse cálculo. Com a produção de excedentes de energia elétrica, essa energia poderá ser vendida para a rede concessionária ou outro consumidor e a empresa terá mais um produto que poderá comercializar; dependendo do tipo de contrato de fornecimento e da quantidade de energia fornecida, a empresa fará maior ou menor investimento na sua unidade geradora.

De uma maneira geral, todo parque de utilidades deve ter a existência de unidades auxiliares para o atendimento da demanda térmica, mesmo

que possua uma central de cogeração. Essa interface entre as unidades convencionais e a central de cogeração deve ser otimizada para que o processo de fabricação tenha a sua demanda de energia térmica satisfeita; na figura 2.2 é apresentado esse esquema.

Portanto, os equipamentos existentes podem ser aproveitados de uma maneira geral, no projeto de uma central de cogeração para um parque de utilidades, tanto por motivos técnicos (aumento da confiabilidade de geração da central) como por motivos econômicos (unidades financeiramente depreciadas podem continuar a fornecer bons resultados), como também servem de unidades reservas (“*stand-by*”) quando ocorrer alguma parada da central de cogeração por motivos de manutenção ou reserva de carga.

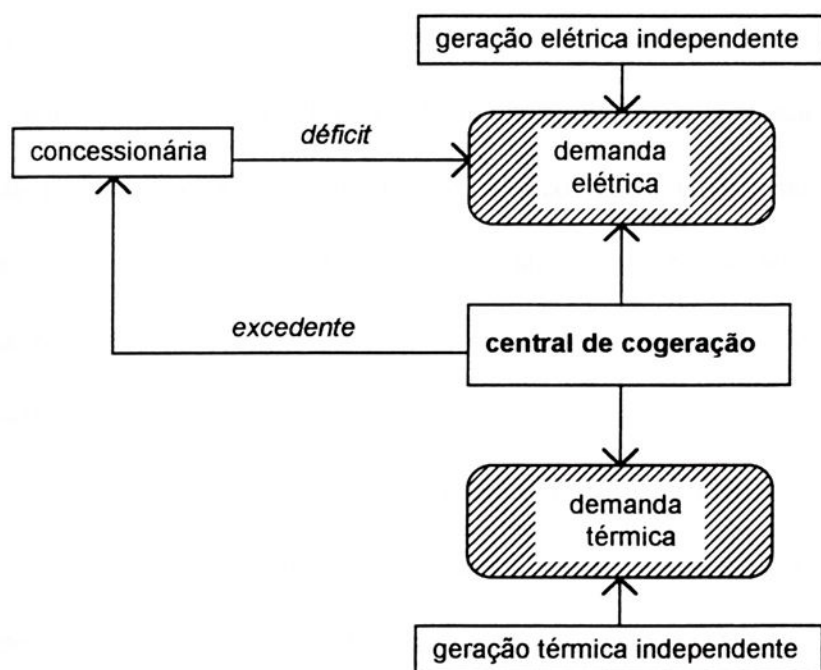


Figura 2.2- Tipos de atendimento de energia em uma planta de cogeração

Em termos operacionais, as estratégias operacionais para centrais de cogeração que as empresas podem adotar são as seguintes:

- Atendimento da demanda térmica

De uma maneira geral, numa central de cogeração é comum o atendimento da demanda térmica total, ou quando isso não é possível existem unidades auxiliares de caldeiras para o complemento da demanda térmica. O que não é comum é a produção além da capacidade do processo porque pode acarretar perdas.

Para esse atendimento, a central de cogeração opera segundo a necessidade do processo, seguindo uma curva de demanda térmica. Se por acaso a demanda do processo for maior que a capacidade do sistema de cogeração, entram em funcionamento as unidades auxiliares de caldeiras para fazer o complemento da carga térmica. A energia elétrica produzida poderá ser vendida no caso de ultrapassar as necessidades do processo e caso contrário, poderá ser comprada da concessionária para suprir o processo. Isso não acontece com sobras de energia térmica, porque não é comum a venda de vapor entre empresas, a menos de polos industriais.

- Atendimento da demanda eletromecânica

Para a demanda eletromecânica, a central de cogeração opera segundo a necessidade do processo segundo uma curva de demanda eletromecânica. Se a demanda for superior ao que a central consegue produzir, energia elétrica é comprada da concessionária para suprir a quantidade não



suprida. A energia térmica liberada é utilizada para atender a demanda térmica do processo e se por acaso não conseguir atender à demanda total, caldeiras auxiliares são utilizadas para o complemento da demanda térmica.

- Despacho econômico

De uma forma geral, a energia cogorada é paga pela concessionária de acordo com a curva de carga elétrica, ou seja, existem preços diferenciados para a compra de energia em função dos horários de picos de energia. Dessa maneira, a empresa pode colocar a central em funcionamento apenas nos horários em que a tarifa paga pela concessionária seja atrativa do ponto de vista econômico.

- Retirada da central de cogeração do sistema

Em princípio, a central de cogeração poderá ficar desligada do sistema nos casos em que os custos operacionais inviabilizem sua operação, mesmo que isto contribua para outro custo, relativo à ociosidade dos equipamentos, ou ainda quando for necessário algum reparo/manutenção na central.

2.4- Análise das unidades de processo

Para uma análise mais detalhada da viabilidade da cogeração em uma unidade de processo é comum a análise de um parâmetro que relaciona as demandas energéticas praticadas, ou seja, as demandas térmica e eletromecânica, assim como os perfis de temperatura empregados nos respectivos processos.

O parâmetro obtido pelo quociente, E/S , conhecido como taxa potência/calor demandado, mostra a quantidade de energia eletromecânica (kW)



necessária para produzir 1 kW de energia térmica, considerando-se que a existência de tais formas de energia são imprescindíveis para certos processos.

De uma maneira geral, a cogeração é mais indicada para os setores que contam com pequena demanda eletromecânica proporcionalmente à demanda térmica; isto porque, para esses casos, o investimento em unidades geradoras de vapor será obrigatória para o atendimento da demanda térmica do processo. No caso de embarcações navais, em que a demanda mecânica predomina, a cogeração pode ser uma boa alternativa independente de tais considerações, devido ao fato de o sistema ser isolado e as demandas elétrica e térmica terem de ser supridas para a satisfação das necessidades.

2.5- Ciclos disponíveis para a cogeração

Para se ter um projeto adequado de uma central de cogeração é necessário que a mesma não só atenda as necessidades energéticas do processo de fabricação mas também consiga garantir uma quantidade excedente de energia.

Os principais ciclos utilizados para projetos de centrais de cogeração são os seguintes:

- ciclo a gás (Brayton);
- ciclo a vapor (Rankine);
- ciclo Combinado;
- ciclo Diesel.

O ciclo a gás é o ciclo padrão de ar para a turbina a gás simples.

O mesmo faz uso de um conjunto de geradores acoplados compressor - câmara de

combustão - turbina a gás. Os gases de exaustão resultantes da combustão que passam pela turbina a gás podem ser aproveitados de duas maneiras: ou trocam energia com a água em caldeiras de recuperação para a geração de vapor ou podem ser utilizados diretamente em processos que admitam a sua aplicação.

O ciclo a vapor é um ciclo que compreende um processo de bombeamento, troca de calor numa caldeira e expansão numa turbina de condensação e extração ou turbina de contrapressão; é o mais comumente empregado em unidades de processo industrial no Brasil devido à disponibilidade de tecnologia existente nessa área.

O ciclo combinado é o que engloba compressor - câmara de combustão - turbina a gás (ciclo a gás) com caldeiras de recuperação e turbinas a vapor (ciclo a vapor), ou seja, após os gases passarem pelas turbinas a gás, eles entram em caldeiras de recuperação e o vapor nelas gerado passa por turbinas a vapor.

Em termos industriais, é possível determinar uma ampla gama de configurações a partir do ciclo escolhido porém, no caso específico de unidades Diesel, tais configurações são um pouco mais limitadas; no caso específico de unidades marítimas a quantidade de configurações existentes fica ainda mais limitada em função do que vêm sendo praticado. Uma vez decidido o ciclo a ser utilizado, é importante também definir a disposição conceitual da central de cogeração em termos dos arranjos possíveis.

Para análise de projeto, é importante verificar se as demandas eletromecânicas serão utilizadas primeiramente ou se as demandas térmicas serão



prioritárias. Sendo atendidas prioritariamente as demandas térmicas e os rejeitos desta demanda utilizados para suprir a demanda eletromecânica, convencionou-se que este ciclo opera em regime *bottoming*. Sendo atendidas as demandas eletromecânicas prioritariamente em relação as demandas térmicas, o ciclo opera em regime *topping*.

Na figura 2.3, são apresentados os esquemas dos três principais ciclos e os tipos de configuração *bottoming* ou *topping*.

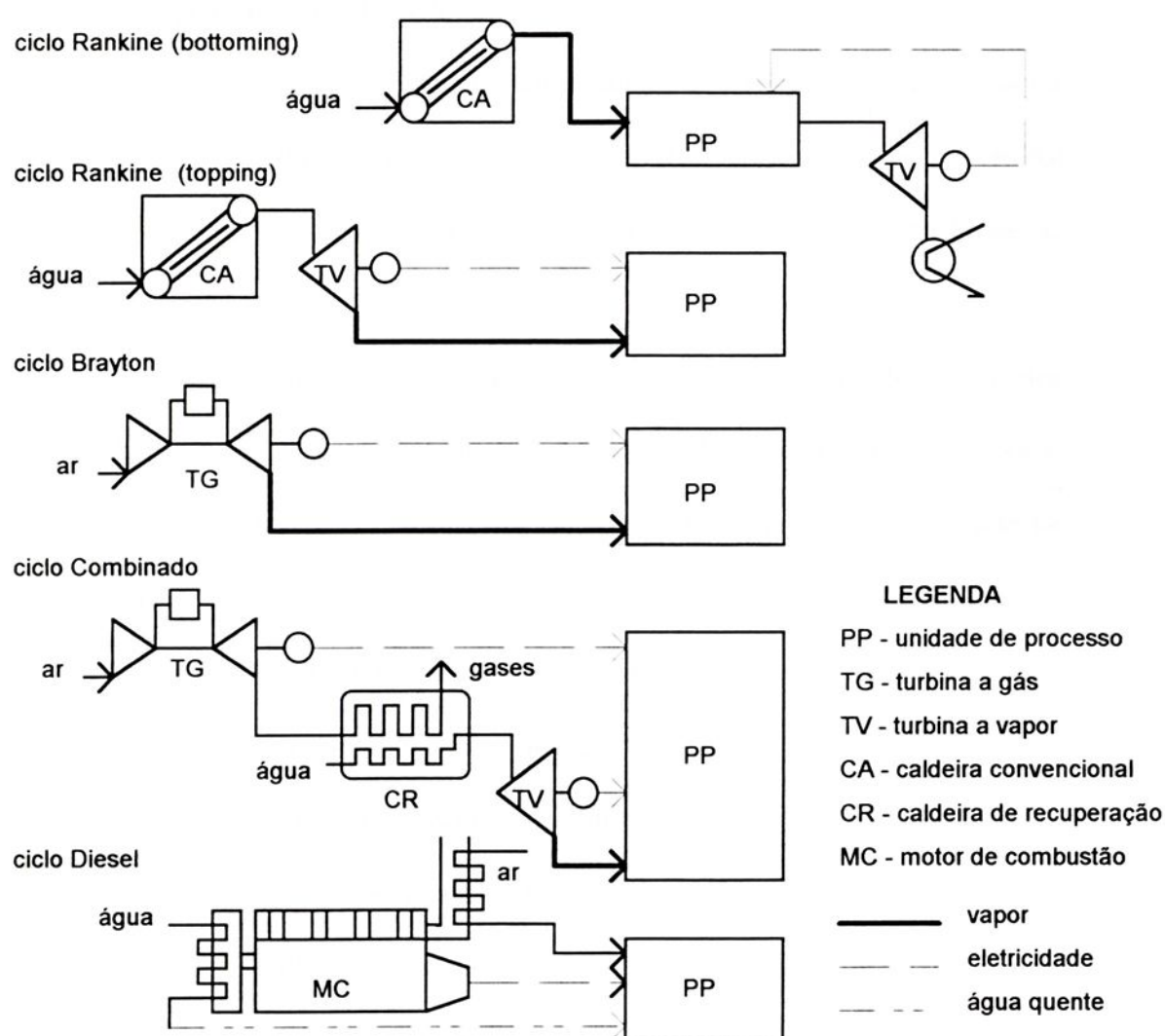


Figura 2.3- Ciclos térmicos disponíveis para cogeração

Uma observação importante é que a maioria dos processos de fabricação utiliza baixos níveis entálpicos, o que limita a geração de energia eletromecânica, portanto o regime *bottoming* apresenta poucas aplicações. Ao contrário do regime *bottoming*, o regime *topping* é utilizado na maioria das centrais de cogeração, devido a utilização primeira da energia eletromecânica e só após essa utilização, têm-se o suprimento da demanda térmica do processo.

2.6- Dados para escolha do ciclo

Através do projeto adequado da central de cogeração, com a escolha ideal dos equipamentos, têm-se a central operando na condição de projeto com o atendimento das demandas térmicas e elétricas e com elevado índice de eficiência.

Para a escolha dos equipamentos, uma série de parâmetros devem ser considerados no planejamento de uma central de cogeração; Gurney *et al*, 1988 e Gorges, 1982, colocam algumas das variáveis que consideram fundamentais para a escolha do ciclo:

- razão potência/calor gerado pelo equipamento;
- consumo específico de vapor;
- consumo específico de combustível;
- consumo específico de calor;
- eficiência termodinâmica;
- variações da eficiência sob cargas parciais;



- temperatura do fluxo térmico;
- limite de rejeição do equipamento;
- disponibilidade e confiabilidade do equipamento.

A razão potência/calor de uma máquina térmica é a razão entre a potência elétrica gerada e a potência térmica gerada. Com isso, para valores dessa razão maiores que um, o ciclo tem maior capacidade de gerar energia eletromecânica; se a razão for menor que 1, então o ciclo tem maior capacidade de gerar energia térmica.

Esses índices variam de acordo com os tipos do ciclo escolhido e também com variações tecnológicas. Através da tabela, podemos observar a variação dos diversos ciclos utilizados para configurações de centrais de cogeração:

Tabela 2.1 - Valores da razão potência/calor gerada em alguns ciclos motores

Ciclo a vapor	Ciclo a gás	Ciclo Combinado	Ciclo Diesel
0.10 a 0.30-contrapressão	0.30 a 0.80	0.60 a 1.50	0.80 a 2.40
0.40 a 1.50-condensação			

Fonte : Walter, 1991

Como se pode observar através da tabela 2.1, as faixas de operação dos ciclos se superpõem em certos valores, o que deixa claro que é necessária uma análise mais aprofundada para a escolha do ciclo mais adequado.

Verificando o consumo específico, o ciclo a vapor é o que apresenta a taxa mais alta de utilização do combustível; o ciclo Diesel, por sua vez, é o que apresenta a menor taxa.

Analisando a razão potência/calor gerado, o ciclo a vapor converte a maior parcela da energia do combustível para a energia térmica, enquanto o ciclo Diesel converte a maior parte da energia contida no combustível para potência de eixo (energia eletromecânica).

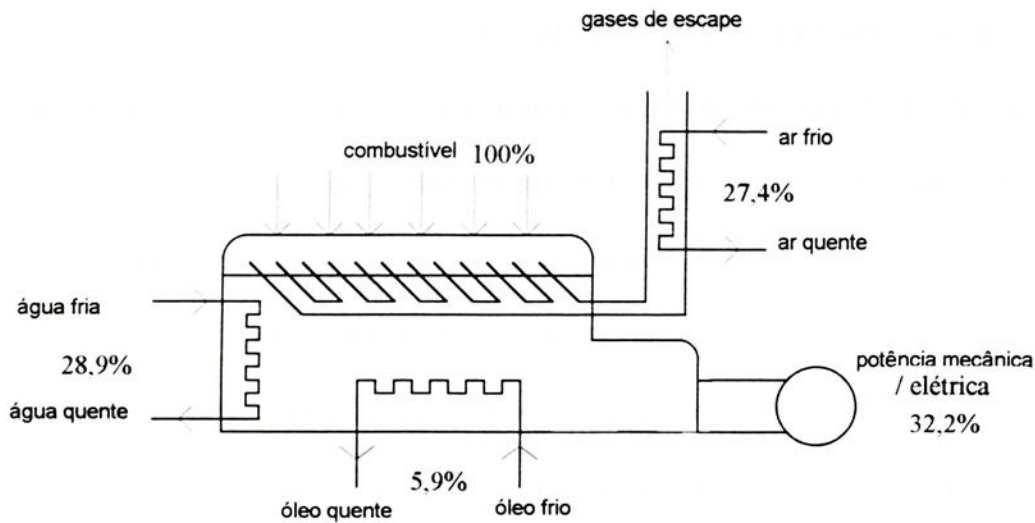
2.7- Motores de combustão interna e a cogeração

O objetivo deste trabalho é analisar a viabilidade de grandes unidades Diesel empregadas em embarcações navais para a prática da cogeração em sistemas isolados; assim, é importante que sejam caracterizados alguns aspectos relevantes desses equipamentos.

Os motores de combustão interna alternativos desenvolvidos com tecnologia Diesel se caracterizam por apresentarem a combustão sob pressão (aproximadamente) constante a partir de um sistema de injeção (bomba injetora) que introduz o combustível nas câmaras dos pistões para a compressão; a distribuição sequencial do combustível nos diversos cilindros garante uma geração regular de potência mecânica, visto que o eixo de geração e cilindros se encontram solidários através de bielas e virabrequim.

A segunda Lei da Termodinâmica estabelece que, em decorrência de irreversibilidades naturais dos processos físicos, parte significativa da energia fornecida a uma máquina térmica para a produção de potência é perdida na forma de calor; no caso dos motores Diesel, cerca de 65% da energia fornecida pelo combustível é consumida na forma de calor dissipado nos gases de exaustão, na água de arrefecimento e no óleo de lubrificação do motor (vide figura 2.4).





Fonte: catálogo Waukesha

Figura 2.4- Aproveitamento energético em motor de combustão interna

Com base nessas considerações, é importante observar que na recuperação de uma ou mais dessas formas de energia rejeitadas na forma térmica, associado à produção de energia mecânica ou elétrica no eixo, se encontra estabelecido o conceito da cogeração.

As embarcações navais que empregam motores de combustão interna, seja de dois ou quatro tempos (em função da rotação necessária no eixo), são grandes unidades com demandas expressivas de potência mecânica para propulsão; além dessa, são também expressivas as demandas elétrica (para iluminação, sistemas de navegação, radiocomunicação, etc.) e térmicas (na forma de água quente, vapor e água gelada, para utilização em cozimento, aquecimento, refrigeração, desinfecção, lavagem, conservação de alimentos e cargas; etc.). Independentemente do ciclo térmico empregado, essas demandas devem ser plenamente satisfeitas pelas unidades geradoras existentes na embarcação.

Normalmente, os combustíveis utilizados merecem uma atenção especial não apenas por causa de seu custo mas também porque é necessário fazer uma previsão da quantidade necessária para uso em percurso e com isso o navio terá um adicional de peso que deve ser bem analisado.

É necessário também que seja analisado o consumo de energia nas diversas atividades em diferentes ambientes, pois as embarcações navais podem estar em vários pontos do planeta, submetidas às mais variadas condições atmosféricas e sendo assim necessária a auto-suficiência de todas as formas de energia.

Numa embarcação naval, com suas restrições típicas de energia e pela necessidade de que todas devam ser plenamente satisfeitas, a cogeração vem a ser uma alternativa viável, pois através da recuperação energética de motores Diesel, tem-se uma fonte de energia que poderá ser aproveitada e atender as condições operacionais do navio.

Para satisfazer as necessidades de energia, é necessário que se conheçam as condições operacionais através das curvas de demanda de água quente, água gelada, vapor, energia elétrica e potência mecânica de propulsão dos motores utilizados. No caso de motores Diesel é necessário que se conheçam as curvas de variação de carga em relação aos dados de projeto, como rendimento mecânico, consumo específico, potência efetiva, eficiência, etc. Com esses dados, é possível fazer uma estimativa da disponibilidade energética e quanto dessa energia se pode aproveitar.



Através da combinação de diferentes motores de grande porte com motores de pequeno porte (chamados de *father-and-son*) para o acionamento do eixo propulsor e para acrescentar uma rotação geradora de pelo menos uma máquina, tem-se conseguido uma otimização nos equipamentos, com uma maior economia de combustível para o sistema de geração de energia elétrica. Isso é necessário porque enquanto o motor principal não estiver em plena carga e conseqüentemente à potência máxima é necessário que um motor de menor capacidade movimente o eixo gerador para produzir energia elétrica. Na medida em que a carga do motor principal aumenta, proporcionalmente sua potência também aumenta e acoplando o gerador no motor principal, tem-se a produção de energia elétrica e energia eletromecânica exclusivamente através do motor principal.

Além da potência de eixo que pode ser aproveitada para a produção de energia elétrica, sendo que a energia principal é para propulsão do navio, no motor principal tem-se ainda os gases de escape que se encontram em altas temperaturas e que podem ser aproveitados em trocadores de calor (ou caldeiras de recuperação) para a produção de vapor. Esse vapor pode produzir energia elétrica através de uma turbina a vapor ou pode ser ainda aproveitado diretamente em algum processo de aquecimento e/ou secagem, bem como a produção de água gelada em sistemas de refrigeração por absorção. Além destes dois tipos de energia que podem ser aproveitados num processo de cogeração, tem-se ainda outra fonte de energia térmica residual na água de resfriamento do motor.



2.8 Comentários

Nesse capítulo procurou-se apresentar a cogeração no contexto dos sistemas isolados, caracterizando-se os ciclos térmicos disponíveis e as formas pelas quais ela é operacionalizada. Em face de sua grande capacidade de potência mecânica, os motores alternativos baseados na tecnologia Diesel têm sido preferencialmente empregados em grandes embarcações navais, o que motivou seu estudo particular neste trabalho.

No próximo capítulo serão apresentados os valores correspondentes às condições parciais de carga em uma ampla faixa de motores Diesel de um grande fabricante, ressaltando-se os parâmetros que encontram maior aderência na questão da cogeração; com base nesses parâmetros serão posteriormente analisadas as condições para o aproveitamento múltiplo da energia em unidades de cogeração.



CAPÍTULO 3

CONDIÇÃO OPERACIONAL DE UNIDADES DE COGERAÇÃO SOB CARGAIS PARCIAIS EM NAVIOS

3.1- Introdução

A cogeração tem sido apresentada como uma alternativa das mais importantes no atual contexto da utilização dos recursos energéticos, tanto pelo aspecto do uso racional de energia primária que ela enseja quanto pela capacidade de redução na emissão de poluentes e aumento da confiabilidade de geração para a unidade de processo. Quando praticada em sistemas interligados, a cogeração pode se mostrar um investimento altamente vantajoso, na medida em que as tarifas de compra da energia excedente da central de cogeração sejam condizentes com os custos envolvidos no empreendimento.

No caso específico dos sistemas isolados, a cogeração pode ser aventada como uma alternativa vantajosa, principalmente por sua condição de tecnologia conservadora de energia, visto que desloca o consumo adicional de combustível para o atendimento de necessidades térmicas da unidade de processo, que de outra forma seriam satisfeitas pelo acionamento de novos equipamentos.

As embarcações navais constituem um exemplo de sistema isolado cujas demandas de energia não podem ser satisfeitas por outras fontes que não a autoprodução; nesses casos, em que o veículo pode se deslocar por longos períodos em condição estacionária, é desejável a máxima utilização das fontes



combustíveis disponíveis. Nesse capítulo são estabelecidas as condições operacionais de grandes unidades Diesel empregadas em embarcações navais, as configurações usualmente propostas e são avaliadas as condições em carga parcial das variáveis mais relevantes dessas unidades na cogeração.

3.2 - Unidades geradoras de energia

As embarcações navais constituem um importante segmento dos sistemas isolados e que poderia auferir benefícios com a prática da cogeração. Dependendo do porte e da finalidade da embarcação naval, pode-se fazer uso dos ciclos a vapor (Rankine), a gás (Brayton), combinado (gás e vapor) ou Diesel para a geração de potência eletromecânica.

De acordo com Brady e Luck, 1994, as turbinas a gás foram estabelecidas como máquina de propulsão naval nas últimas três décadas. Inicialmente, turbinas a gás foram consideradas adequadas somente para embarcações pequenas, cascos de alta performance e para fragatas e *destroyers* como auxiliares na configuração combinada. Turbinas a gás são selecionadas para embarcações navais baseado no sistema de propulsão, para projetos de embarcações desde 300 toneladas (barcos costeiros de patrulhamento) até 50.000 toneladas (transportadores e navios rebocadores); o uso de turbinas a gás no campo marítimo comercial tem sido ainda limitado, com observações mais recentes das mesmas, no entanto, para essa finalidade. As principais razões para o aumento do uso de turbinas a gás nos barcos é o seu peso reduzido, baixo volume,



alta disponibilidade, baixo custo de investimento, baixa emissão de poluentes e custos operacionais acessíveis.

A vantagem do peso reduzido por unidade de potência na saída tem sido reconhecida para a turbina a gás. O peso reduzido, em comparação com motores Diesel, permite aumentar a carga ou o combustível adicional a ser transportado. Para configurações com cascos de alto desempenho, que derivam aumento da força dinâmica ou aumento de potência, o peso de motores Diesel torna-se proibitivo para níveis de potência acima de 20 MW. A turbina a gás se torna, então, a única escolha prática de propulsão para prover potência para operação em alta velocidade; entretanto, uma unidade combinada de turbinas a gás com motores Diesel menores para baixas velocidades de cruzeiro pode ser uma alternativa atrativa para algumas aplicações.

O volume pequeno do conjunto da turbina a gás também beneficia o desenho de alto desempenho do casco. A maioria das aplicações navais que transportam passageiros e cargas em tempo crítico tem volume limitado; a densidade de carga paga é baixa e a necessidade de prover volume é o principal desafio. Aplicações militares de turbinas a gás tem sempre uma necessidade vital de segurança e disponibilidade do sistema. A experiência acumulada de mais de cinco milhões de horas de operação em aplicações marítimas militares tem mostrado que a disponibilidade, que excede 99.9 %, pode ser tipicamente realizada. Alta disponibilidade de propulsão não é menos importante em aplicações comerciais. O aumento de rendimento depende de operação contínua e a reputação de segurança e serviço na hora é imperativo quando passageiros ou cargas são transportados em



tempo crítico. A disponibilidade no sistema de propulsão é dependente, assim, de dois parâmetros, o tempo entre a ação de manutenção requerida e o tempo efetivo da manutenção quando requerido.

O custo de investimento para a propulsão da unidade inclui o primeiro movimento e o suporte para sistemas auxiliares, além de custos de instalações. Para equivalente capacidade de potência sustentada, custos de sistema de propulsão são comparados entre Diesel e turbinas a gás para potência total necessária de 10 para 20 MW. Acima de 20 MW, o sistema de turbina a gás fornece um relação mais favorável se comparada com o motor Diesel em menor custo específico (\$/kW) e instalação consideravelmente mais econômica para uma menor e mais leve turbina a gás com poucos sistemas de suporte. Uma alternativa pouco convencional e esperada num futuro próximo é o ciclo combinado (figura 3.1).

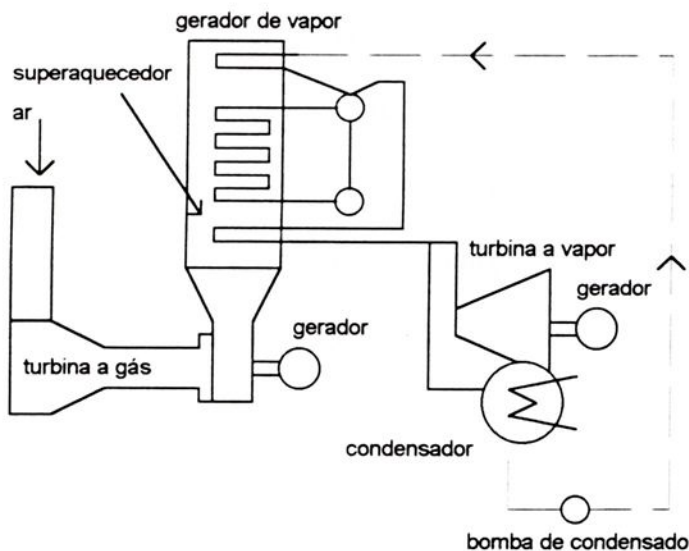


Figura 3.1- Ciclo combinado

Para uma embarcação naval em que é utilizado o ciclo Diesel, as demandas de energia térmica e eletromecânica (inclusive propulsão) devem ser satisfeitas totalmente pelas unidades geradoras. Normalmente, os combustíveis utilizados merecem uma atenção especial, porque além do seu custo, é necessário fazer uma previsão de sua quantidade que será utilizada e com isso se terá um adicional de peso que deverá ser analisado.

É necessário também que seja analisado o consumo de energia, pois embarcações navais podem estar em diferentes pontos do planeta, submetidos as mais variadas condições atmosféricas e será necessário o abastecimento de todas as formas de energia. Numa embarcação naval, com diversas restrições de energia e todas devendo ser satisfeitas, a cogeração vem a ser uma alternativa viável, pois através da recuperação energética de motores Diesel, tem-se uma fonte de energia que poderá ser aproveitada e atender as condições operacionais do navio.

Para que isso aconteça, é necessário que se conheçam as condições operacionais através das curvas de demanda de água quente, água gelada, vapor, energia elétrica e potência mecânica dos motores utilizados. No caso de motores Diesel, é necessário que se conheçam as curvas de variação de carga (%) em relação aos dados de projeto como rendimento mecânico, consumo específico, potência efetiva, eficiência, etc.

Com esses dados, é possível fazer uma estimativa da disponibilidade de energia e quanto dela se pode aproveitar nas diferentes necessidades do processo. No caso de motores Diesel, existem unidades de 2 e 4 tempos com uma grande faixa variável de potência. Os motores destinados à



propulsão mecânica ou acionamento são os de maior potência e são chamados de *father*. Os motores destinados a acionamento elétrico do gerador são os de menor potência e são chamados de *son*.

Através das combinações de diferentes motores de grande porte com motores de grande e pequeno porte (chamadas de *father-and-father* e *father-and-son*) para o acionamento do eixo propulsor e para acrescentar uma rotação geradora de pelo menos uma máquina, tem-se conseguido uma otimização nos equipamentos, com uma maior economia de combustível para o sistema de geração de energia elétrica (Anônimo, 1988a/1988b) - figura 3.2.

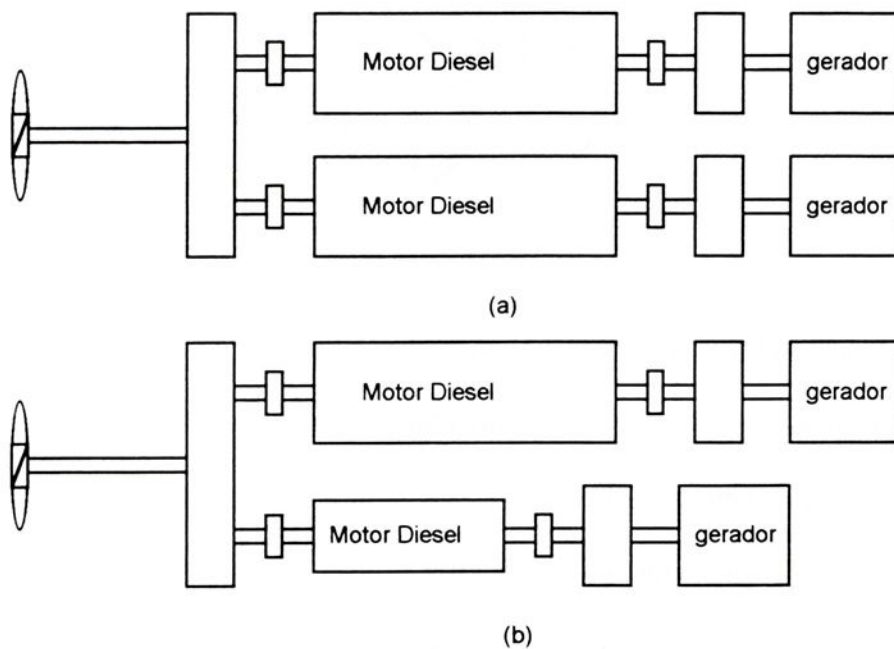


Figura 3.2- Configurações:

(a) *father-and-father* (b) *father-and-son*

Isso é necessário porque, enquanto o motor principal não atinge sua plena carga e conseqüentemente a potência máxima, é necessário que um motor auxiliar de menor capacidade movimente o eixo gerador, para produzir

energia elétrica. Na medida em que a carga do motor principal aumenta, sua potência também aumenta proporcionalmente e, desse modo, acoplando-se o gerador no motor principal, tem-se a produção de energia elétrica e energia eletromecânica exclusivamente através do motor principal (figura 3.3).

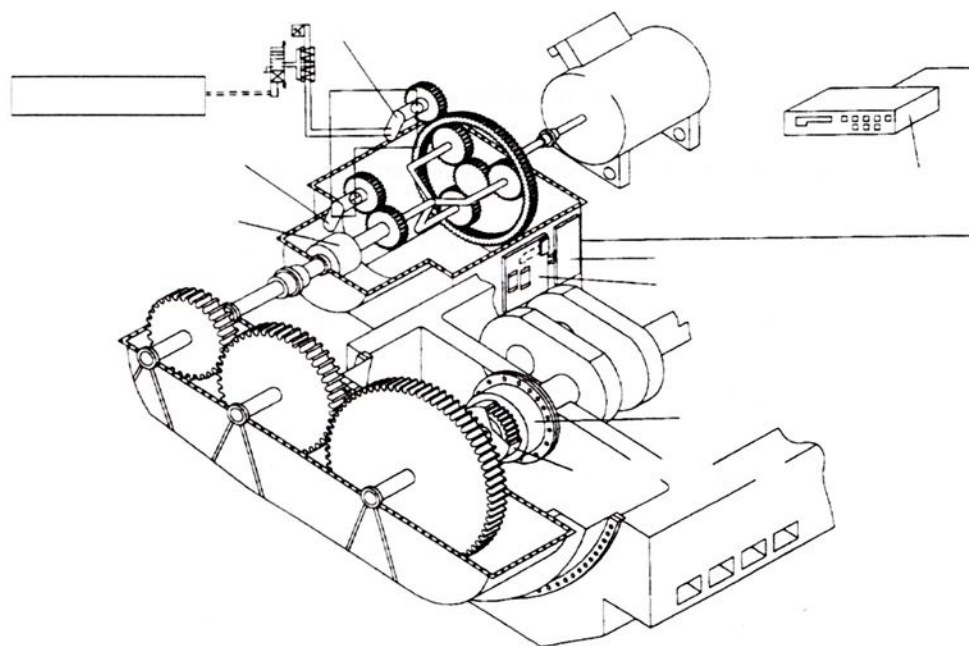


Figura 3.3- Gerador acoplado ao motor principal

Isso está se tornando uma constante na prática naval, com crescente solicitação dos armadores nesse sentido, visando uma melhor economia das principais máquinas de acionamento e ao mesmo tempo provendo uma maximização na flexibilidade operacional.

Com relação ao motor principal, além da potência de eixo que pode ser aproveitada para a produção de energia elétrica (sendo que a energia principal é para propulsão do navio) tem-se os gases de escape do motor que estão a alta temperatura e que podem ser aproveitados num trocador de calor (caldeira)

para a produção de vapor. Esse vapor pode produzir energia elétrica através de uma turbina a vapor ou pode ser aproveitado diretamente para algum processo de aquecimento. Além destes dois tipos de energia que podem ser aproveitadas num processo de cogeração, tem-se ainda a água de resfriamento do motor.

3.3- Consumo de energia em embarcações navais

Em 1928 já havia uma consciência da necessidade do uso eficiente de energia em termos de embarcações navais (Sessions, 1986). Chittenden e Cooper, 1973, revisaram as fontes de combustível futuro quase antes da crise de energia ocorrer; Brown e Plumb, 1984, examinaram o consumo de energia em navios de guerra em detalhes, olhando para os efeitos no casco e no maquinário de propulsão, seguindo com uma exame adicional do propósito do maquinário principal, concentrando em detalhes no sistema COGAS (*gas*) usando caldeiras que aproveitam o calor dispendido por outra fonte (caldeiras de recuperação de calor) para fornecer vapor. Tal aplicação seria cara em termos de custos de desenvolvimento, isto é, retorno de investimento maior do que dois ou três anos. Pouca atenção tem sido dada ao consumo de energia de sistemas auxiliares exceto para o desenvolvimento de equipamentos para dessalinização por osmose reversa.

Blackman, 1983, demonstrou os benefícios do propulsor Diesel-elétrico integrado com o sistema de suprimento elétrico doméstico, o qual aumenta a economia de combustível em baixas velocidades. O aumento da economia abaixo de 15 nós decorre das características do gerador Diesel quando na faixa de 35% a 80% de sua carga total e do uso do equipamento para osmose reversa para

dessalinização. Owen, 1981, mostrou que a eficiência dos equipamentos para osmose reversa, comparadas com outros métodos de dessalinização, é superior. O padrão de mudança do consumo de energia total do sistema auxiliar é demonstrado a partir da seguinte comparação, feita com navios tipo COGOG (*gas or gas*): a dessalinização passou de cerca de 27% para menos de 5% a partir da inserção do processo de osmose reversa em navios; com isso, a carga de aquecimento e ar condicionado teve espaço para ser aumentada (Sessions, 1986).

- Aquecimento de água na jaqueta do motor

Os maiores candidatos para uma fonte de aquecimento são os dois aquecedores (resistências elétricas) de água quente adaptados com aquecedores de 150 kW. A variação de força para os aquecedores (resistências elétricas) pode ser significativa e a força do motor principal poderá decrescer notavelmente durante o período de banhos diários. As exigências de energia são de baixas taxas, com temperaturas menores do que 70 °C, a qual pode ser fornecida facilmente pela jaqueta de água do motor Diesel a 90 °C.

Um sistema de água quente possível utilizando o calor perdido pelo sistema de refrigeração da jaqueta do motor Diesel é mostrado na figura 3.4; algum aquecimento elétrico está incluído para atividades em portos.



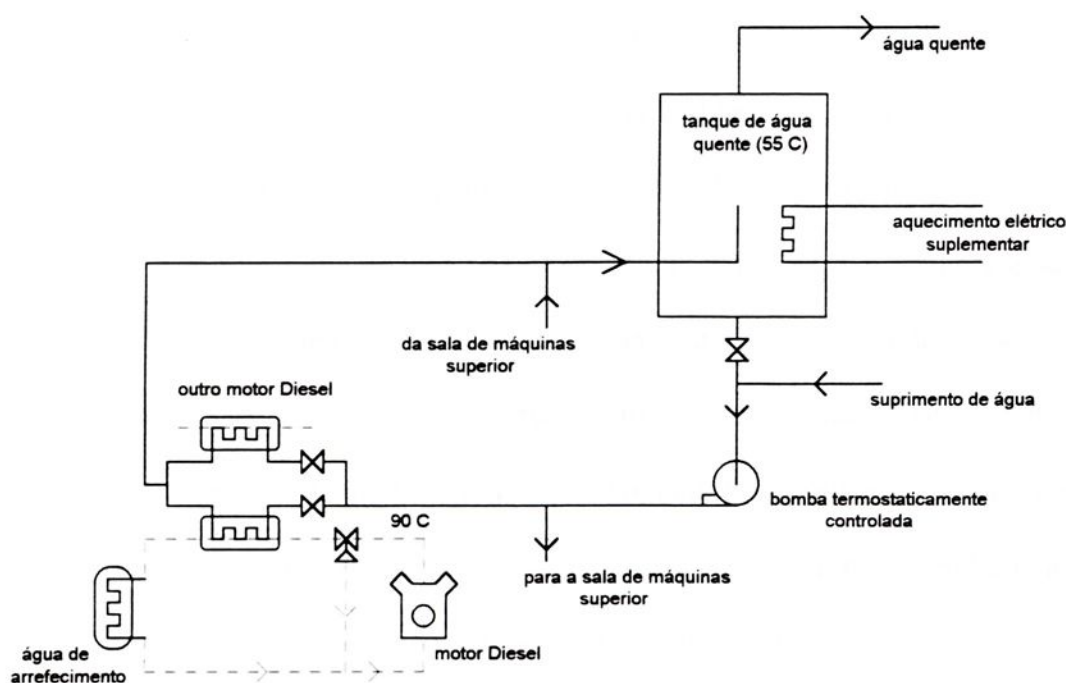


Figura 3.4- Água quente para uso geral obtido na jaqueta do motor

Nesse circuito, o custo do equipamento adicional de dois (ou quatro) trocadores de calor, uma bomba e tubulações num navio novo, equilibrado pela redução da tubulação de recirculação do sistema de água quente, duas bombas de circulação e cabos elétricos, é provavelmente para ser recuperado dentro de dois anos de uso com taxas de juros do mercado. O principal inconveniente associado ao uso do calor perdido dos motores Diesel tem sido associado a uma possível degradação de sua confiabilidade; o projeto deve, procurar então, minimizar esse aspecto.

- Problemas de projeto num sistema de transferência de calor

O projeto de um sistema de resfriamento e aquecimento interligados com um sistema de ventilação tem sido por vezes inadequado por

faltar uma avaliação geral do balanço de energia do navio numa ampla faixa de condições atmosféricas (figura 3.5). Um exemplo típico de uma consideração inadequada pode ser encontrado pelo exame da troca de calor em um computador refrigerado a ar para apoio de uma sala de operações numa fragata. Os programas de computador estariam susceptíveis a uma perda de integridade se os componentes eletrônicos fossem superaquecidos; o ar resfriado vem de uma unidade de tratamento de ar (UTA) que também alimenta a plataforma e a cabine dos oficiais, enquanto a unidade de tratamento de ar recebe significativas quantidades de ar fresco via uma unidade de filtragem de ar (UFA).

Do ponto de vista do projeto dos navios, deve-se considerar que a sala de computadores e os compartimentos não habitados e dotados de equipamentos eletrônicos devem ser hermeticamente selados; devem também ter suas próprias unidades de refrigeração, cujo fornecimento de força para o ventilador deve ser o mesmo daquele para os equipamentos eletrônicos. Um pequeno desumidificador regenerativo pode também ser utilizado. No exemplo citado, a temperatura do ar refrigerado poderia ser reduzida para cerca de 25 °C, a qual permitiria reduzir a quantidade de ar sendo circulada.



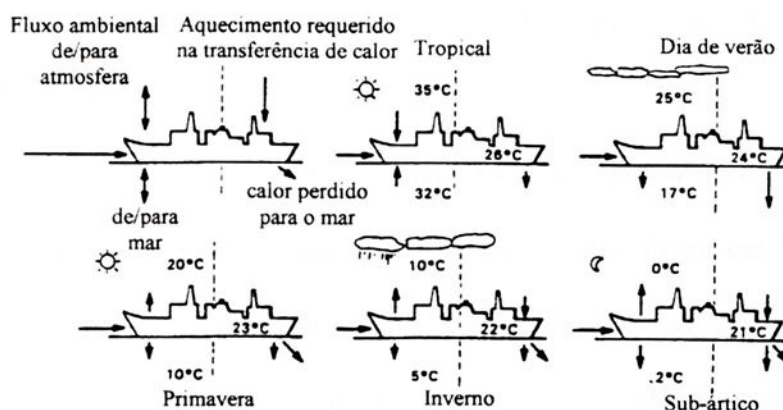


Figura 3.5- Troca térmica em navios numa faixa de condições ambientais

Compartimentos eletrônicos perto do sistema de armas de navios de guerra podem ser arrefecidos por um pequeno sistema de água resfriada, garantindo razoável integridade contra danos de ação. Compartimentos eletrônicos localizados longe do centro de armas, tal como uma cabine rastreadora na popa, deveria ter um equipamento de resfriamento independente rejeitando calor para a atmosfera, se possível usando o mesmo fornecimento de força do qual se serve o sistema de armamento.

- Sistema de transferência de calor (Redistribuição)

A temperatura do ar por todo um navio é razoavelmente constante por causa da troca de ar e circulação no sistema de água associado. Esta temperatura do ar pode ser regulada pela alteração da temperatura no principal trocador de calor. Nos trópicos, a transferência de calor principal seria completamente aberta para o equipamento de água refrigerada e, se necessário, perda de calor adicionada a ele. Este arranjo utiliza calor dos muitos equipamentos elétricos tais como transformadores, motores e luzes para compensar as perdas de

calor através das bandejas de ventilação, pontos de acesso reforçados e do revestimento do casco.

Aquecedores elétricos em lugares como hangares e todos os sistemas de ventilação mecânica seriam reduzidos significativamente em tamanho ou eliminados e poucos resfriadores de água extras seriam incorporados. Quando as temperaturas do ar são intermediárias, o resfriamento do duto do trocador de calor pode ser efetuado por um resfriador com água direta do mar ao invés de um sistema de circulação de água resfriada. Calor pode ter de ser adicionado ao sistema quando as temperaturas externas são baixas, com o motor Diesel sendo o principal candidato para essa fonte.

- Equipamentos para água resfriada

Equipamentos para água resfriada são projetados correntemente para rejeitar calor para a água do mar a uma temperatura constante de 32°C usando um caminho alternativo (*by-pass*) ou um sistema de recirculação para possibilitar o equipamento funcionar em plena carga nos trópicos. Com um navio operando principalmente no Atlântico Norte há uma penalidade de perda no coeficiente de performance (COP) de cerca de 18% sobre as condições em que a temperatura de resfriamento da água seria permitida cair para 25 °C.

Um equipamento também pode suportar maior carga em temperaturas de água do mar mais baixas; no entanto, equipamento adicional pode ser necessário para elevar o circuito de gás ou para remover seu excesso, dependendo de onde o navio se encontrar. Uma outra opção é aumentar a



temperatura do duto de água refrigerada em condições temperadas, a qual novamente aumenta o coeficiente de performance e permite ao equipamento suportar cargas maiores. Isto poderia ser realizado pelo controle da carga do equipamento na temperatura de retorno da água resfriada (13°C) e não na temperatura de fornecimento ($6-5^{\circ}\text{C}$) para sistemas de fluxo constante.

- Sistemas de ventilação

O controle da temperatura do ar nas unidades de tratamento de ar pelo uso de termostatos de circuitos de água individual aumenta a eficiência do sistema, reduz a necessidade por aquecimento elétrico adicional e tem sido comercialmente explorado muitas vezes em anos recentes com grandes vantagens. O uso de termostatos ao invés de válvulas reduz as exigências de bombeamento de água e permite um “fator de diversidade” para sistemas de água resfriada a ser explorados.

Trocadores de calor regenerativos para o ar de entrada para os compartimentos como a enfermaria com 100% de ar fresco e galerias de dutos com 50% de ar fresco deveriam ser consideradas como um meio de redução dos custos de combustíveis e tornando o meio ambiente melhor no último caso.

- Desumidificação

O uso de unidades de tratamento para remover umidade do ar aumenta consideravelmente para as funções da estrutura de ventilação nos trópicos, quando se tem que lidar com outros problemas, tais como dutos



bloqueados, ao lado da limpeza de filtro. A umidificação real, usando um processo de resfriamento, envolve tomar a temperatura do ar bem abaixo da temperatura ambiente desejada e então reaquecer para obter a correta umidade. Enquanto a atividade anterior pode ser realizada economicamente com o sistema de resfriamento de água, a última exige um circuito de aquecimento adicional. Ao contrário, em climas frios a água precisa ser evaporada no ar aquecido para prevenir ressecamento excessivo.

- Aquecimento central

Além da necessidade ocasional de adicionar calor ao sistema de aquecimento central e aquecer água fresca, outros itens que podem exigir calor incluem a centrífuga de óleo lubrificante principal, além de tanques e combustíveis. O problema se torna igualmente interessante quando o navio se encontra em mares frios, ocasionando precipitação do combustível nos tanques. A única maneira de aquecer o combustível nas quantidades exigidas é pelo uso do calor perdido. Em portos, este aquecimento central poderia ser suprido pelo “vapor da costa”, isto é, vapor produzido pela área de utilidades em unidades de cogeração, com uma eficiência térmica acima de 70%.

3.4- Variáveis importantes na análise dos motores de combustão interna

O uso de energia em navios não deve ser assumido com independência entre as partes, com gráficos de carga e suprimento de água refrigerada independentes, mas com base em uma análise geral das aletas de



resfriamento, das fontes de energia e das fontes geradoras de calor. Uma análise do fluxo e refluxo de calor existentes no navio em situação típica precisa ser feita para diferentes climas e em diferentes condições de carga; isso conduz a uma série de diagramas de fluxo de calor e energia antes que o sistema completo seja projetado. Controladores devem ser incorporados para otimizar o sistema para diferentes regimes através de válvulas para o controle de temperatura, manutenção de subsistemas de pressão e estabelecendo a carga sobre equipamentos para água refrigerada.

Algumas variáveis de importância dos motores Diesel em condições operacionais diversas são apresentadas a seguir:

- **Potência efetiva:** É a potência elétrica ou mecânica disponível na tomada de força, para a produção de trabalho útil.

$$Ne = Pme \times N \times C$$

sendo:

N - rotação do motor (rpm)

C - constante do motor (m³), com

$$C = \frac{VHt}{450} \text{ (450 para 2 tempos e 900 para 4 tempos)}$$

$$VHt = \frac{\pi \times D^2}{4} \times S \times Nc$$

S - curso do pistão do motor

Nc - número de cilindros

VHt - volume do curso de todos pistões (m^3)

D - diâmetro do pistão (m)

- **Consumo específico:** O consumo específico de combustível, para determinada potência efetiva e velocidade angular do motor, é o consumo por unidade de potência. Esse consumo se refere ao poder calorífico inferior do combustível e é expresso em :

kg / cvh - potência efetiva mecânica

kg / kWh - potência efetiva elétrica

$$sfc = \frac{\dot{M}}{Ne}$$

sendo:

$\dot{M}$ - massa do combustível por unidade de tempo (kg/h)

Ne - Potência efetiva (kW)

- **Pressão média efetiva:** Um parâmetro de interesse especial ligado aos motores de combustão interna é o trabalho realizado sobre o êmbolo dividido pelo volume de deslocamento. Essa quantidade tem a dimensão de pressão e é igual à pressão constante que se fosse exercida sobre o êmbolo durante todo o curso motor forneceria um trabalho igual ao do ciclo. Portanto, a pressão média efetiva é uma pressão fictícia constante que se supõe agir sobre o pistão durante o curso motor e que produz um trabalho igual ao que é efetivamente obtido sobre a árvore do

virabrequim (trabalho indicado), feitas as deduções das perdas de atrito e outras perdas registradas (cerca de 10%).

$$P_{me} = \frac{CF}{C}$$

sendo:

CF - carga no freio ou trabalho indicado (kJ)

C - constante do motor, sendo

$$C = \frac{VHt}{450} \text{ (450 para 2 tempos e 900 para 4 tempos)}$$

3.5 - Análise das variáveis em cargas parciais

O elenco de motores para os quais se realizará a análise de aproveitamento energético dos gases de escape dos motores está baseado em planilhas de testes obtidas junto à Mecânica Pesada S.A., com motores montados com base na tecnologia MAN B&W.

Na análise dos motores distinguem-se as grandes unidades empregadas para propulsão mecânica das embarcações e os motores pequenos, os quais são destinados ao atendimento da demanda elétrica das mesmas quando a carga propulsora se encontra abaixo de determinados valores. A tabela 3.1 apresenta o elenco de motores, discriminando os modelos de grande e pequeno portes; a figura 3.6 ilustra duas faces de um motor típico dos modelos em análise.

Tabela 3.1 - Elenco de motores considerados na análise

classificação dos motores	número de cilindros	disposição dos pistões	porte dos motores	Potência máxima efetiva (kW)
5L 50 MC	5	em linha	grande	6078,68
5S 50 MC	5	em linha	grande	7041,84
5L 80 MCE	5	em linha	grande	12553,83
K 6SZ 70/150 CL	6	em linha	grande	9844,43
K 7SZ 70/150 CL	7	em linha	grande	11570,22
K 8Z 70/120 E	8	em linha	grande	8338,19
K 8Z 86/160 E	8	em linha	grande	13634,36
12 V 20/27	12	em V	pequeno	1200,00
16 V 20/27	16	em V	pequeno	1538,89
8 L 23/30	8	linha	pequeno	1039,98

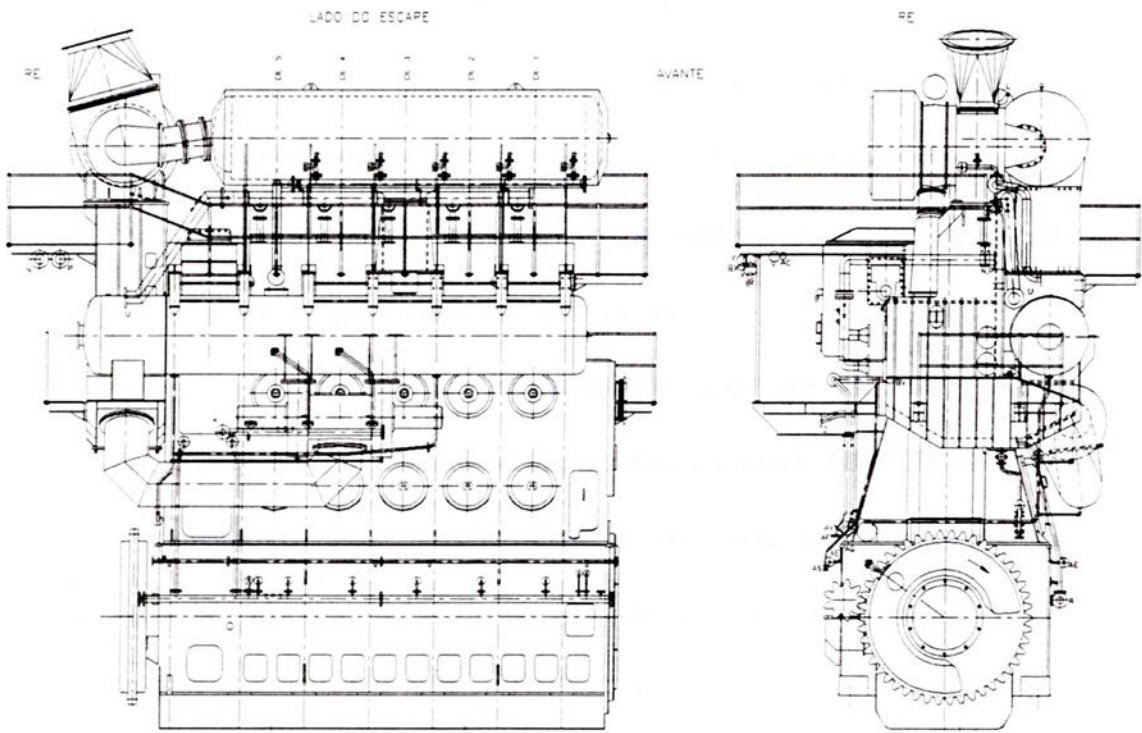


Figura 3.6 - Ilustração de um motor Diesel de grande porte

As principais variáveis de interesse para a análise do potencial de utilização de unidades Diesel em centrais de cogeração para aplicações navais são:

- potência (W),
- consumo específico (Bsfc),
- pressão média efetiva (Bmep),
- temperatura dos gases de escape (Tg),
- temperatura da água após turbo (Tágua)
- temperatura do óleo (Tóleo).

As unidades de geração apresentam valores variáveis de tais parâmetros de acordo com a carga imposta no freio dinamométrico, o qual simula as condições operacionais para um certo sistema em atividades de regime permanente ou transitório. Apesar de projetados para operar no ponto de máxima eficiência, nem sempre a unidade opera em tal condição, sendo importante o conhecimento acerca do comportamento dos parâmetros mais importantes do sistema para o seu melhor gerenciamento operacional.

As condições de cargas parcial e total de interesse para o ensaio de unidades de geração são **25%** (condição inferior de teste), **50%**, **75%**, **90%** (em geral, avaliada em duas tomadas distintas, por representar um ponto de elevada eficiência), **100%** e **110%** (limite superior de teste), representando deste modo um leque considerável de possíveis situações operacionais.

A comparação entre unidades Diesel de grande e pequeno portes de um grande fabricante do setor, empregadas respectivamente para propulsão/atividades auxiliares e geração elétrica, permite identificar unidades com possibilidades de classificação como unidades *father* ou *son*. A avaliação da potência efetiva pode ser ilustrada na figura 3.7.



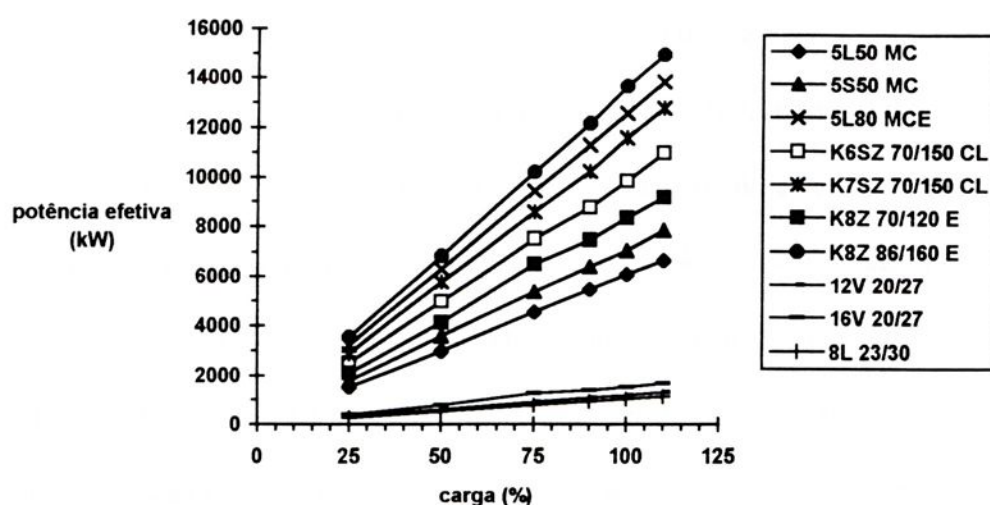


Figura 3.7- Variação da potência efetiva de motores Diesel

Os modelos 20/27 (12 e 16 cilindros em V) e 23/30 (8 cilindros em linha) apresentam potência efetiva de até 1800 kW em carga parcial, enquanto os demais modelos podem atingir valores mais altos (até 16000 kW a 110% de carga para o modelo K8Z 86/160E). Deste modo, apresenta-se os resultados dos modelos de menor porte em separado, na figura 3.8.

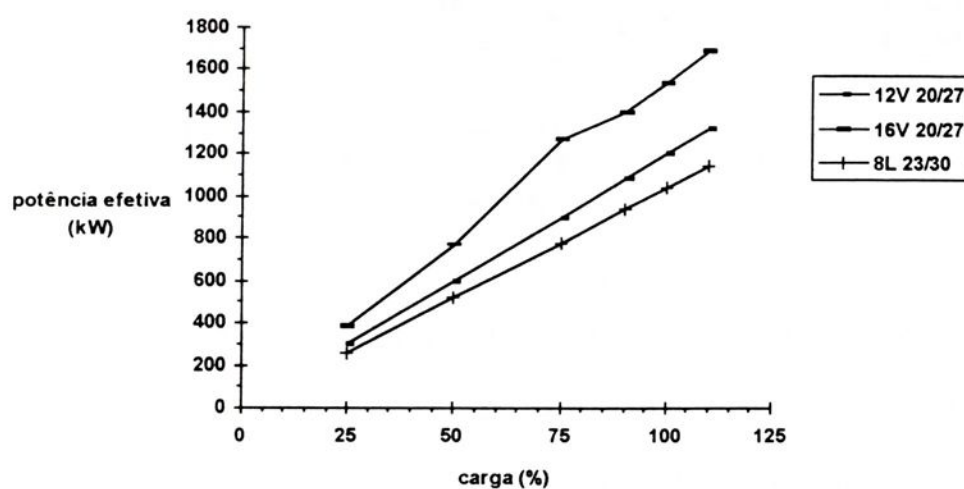
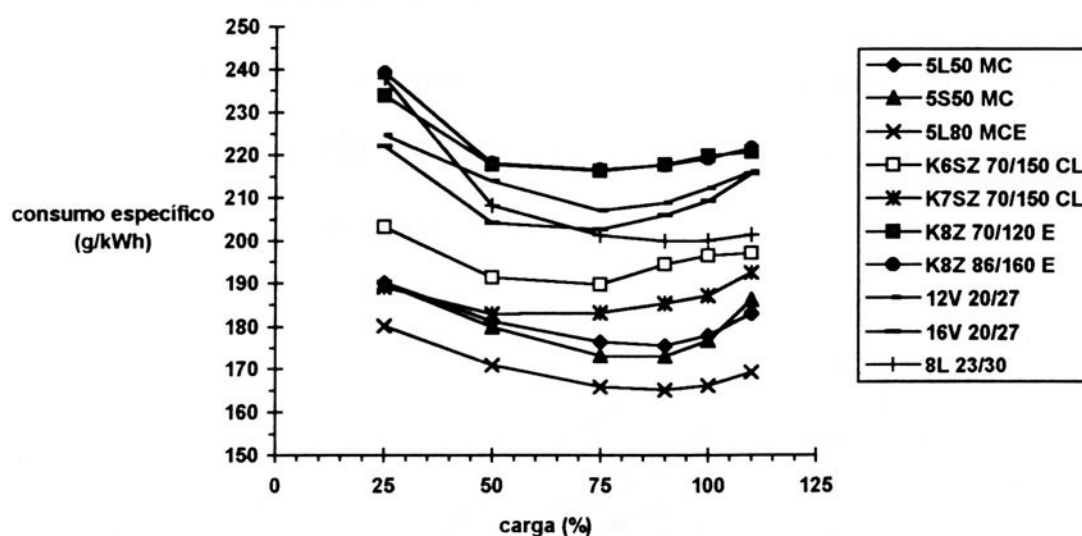


Figura 3.8- Potência efetiva de unidades Diesel de menor porte

O consumo específico é outro parâmetro de grande importância na análise comportamental das unidades de geração; com base nesse valor, definem-se as quantidades necessárias para certos percursos da embarcação naval, assim como aquelas referentes à reserva estratégica. A figura 3.9 identifica as unidades em diferentes condições de carga parcial. Usualmente, tais valores são computados para condições ISO (25 °C de temperatura ambiente, 25 °C de temperatura da água de resfriamento do resfriador de ar, pressão barométrica de 1 bar) e para um Poder Calorífico Inferior de 42707 kJ/kg (10200 kcal/kg) para o combustível (com tolerância de $\pm 3\%$).



Fonte: Mecânica Pesada S. A .

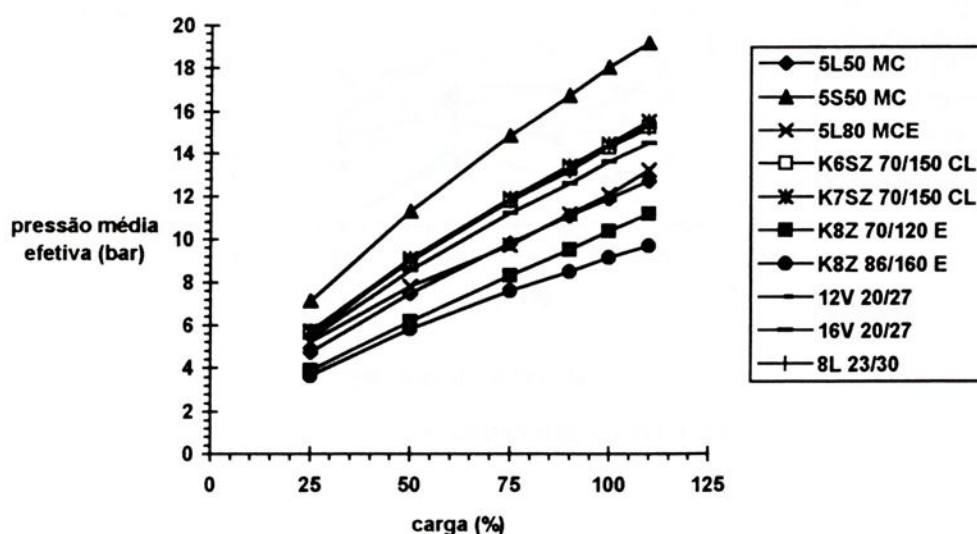
Figura 3.9- Consumo específico de unidades Diesel em cargas parciais

Observa-se, aqui, um fato interessante: a unidade 5L80 MCE é uma das que apresenta maior potência efetiva (12000 kW a 100% de carga) e no entanto conta com o menor consumo específico (cerca de 170 g/kWh a 100% de

carga); as três unidades de menor potência efetiva apresentam consumos específicos superiores a esta unidade.

A pressão média indicada representa uma pressão constante tal que, ao atuar sobre o êmbolo do pistão do motor, realiza um trabalho que é igual ao trabalho dos gases durante todo o ciclo (em forma gráfica, corresponde à altura de um retângulo cuja área e base são respectivamente iguais à área e à base do diagrama indicador); a pressão média efetiva é aquela que realmente se verifica no interior da unidade de geração.

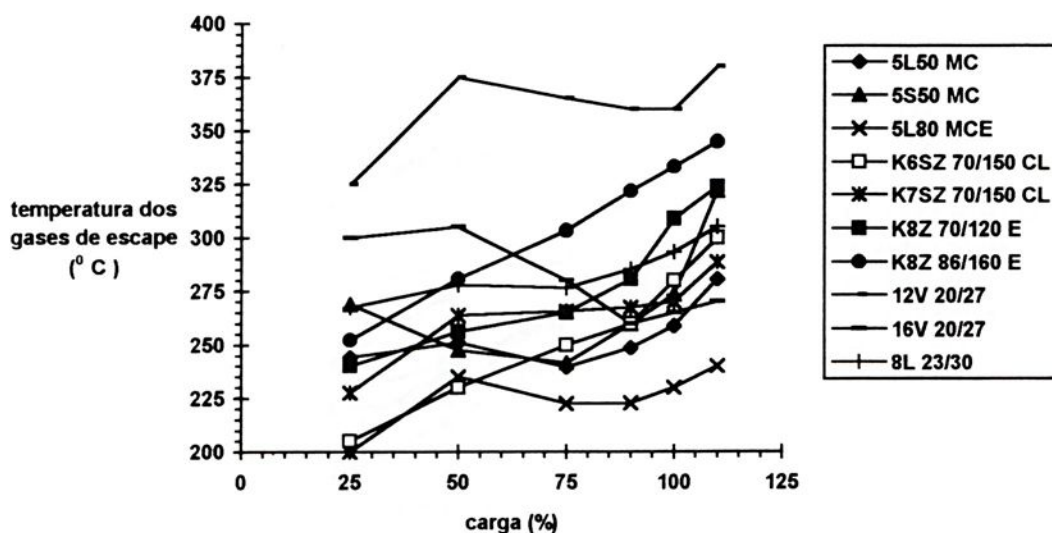
A figura 3.10 apresenta, para as unidades de geração Diesel em estudo, o comportamento da pressão média efetiva nas diferentes condições de carga parcial; observa-se um comportamento crescente com o aumento da carga, sendo que muitas das unidades se apresentam coincidentes sobre a mesma faixa de variação (14 bar a 100% de carga).



Fonte: Mecânica Pesada S. A .

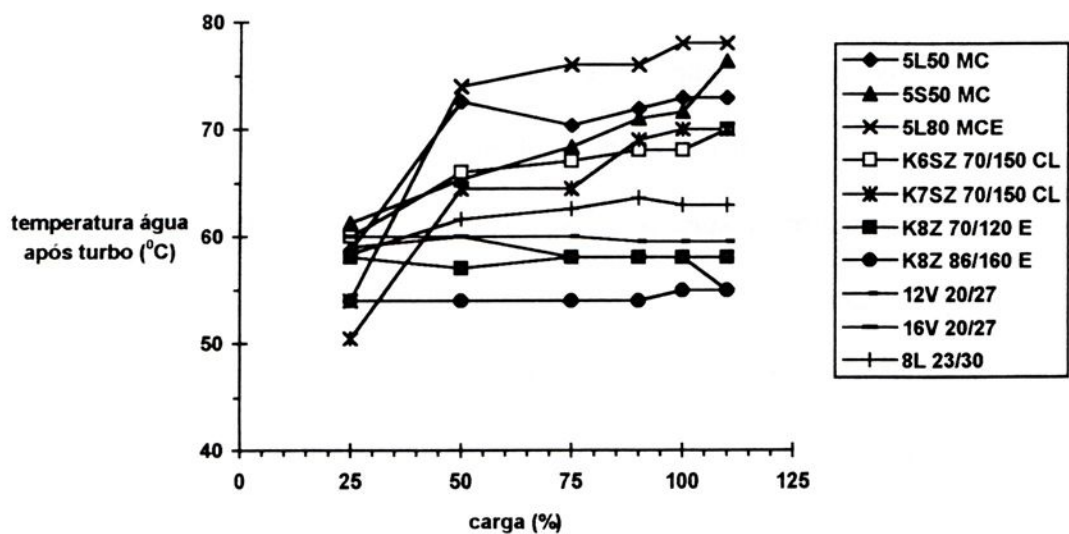
Figura 3.10 - Comportamento da pressão média efetiva

As temperaturas que seguem foram coletadas de modo a garantir elementos para uma análise de recuperação térmica em uma eventual unidade de cogeração. De acordo com as figuras 3.11, 3.12 e 3.13, observa-se que as maiores temperaturas são obtidas junto aos gases de escape do motor. A maior temperatura obtida (cerca de 375 °C a 50% de carga) não está vinculada a uma máquina de grande potência, mas sim a uma unidade pequena (12V 20/27). As temperaturas da água após o turbo e do óleo após o turbo apresentam valores da ordem de até 80°C, o que possibilita seu posterior emprego em atividades auxiliares da embarcação naval, de acordo com a vazão em massa disponível.



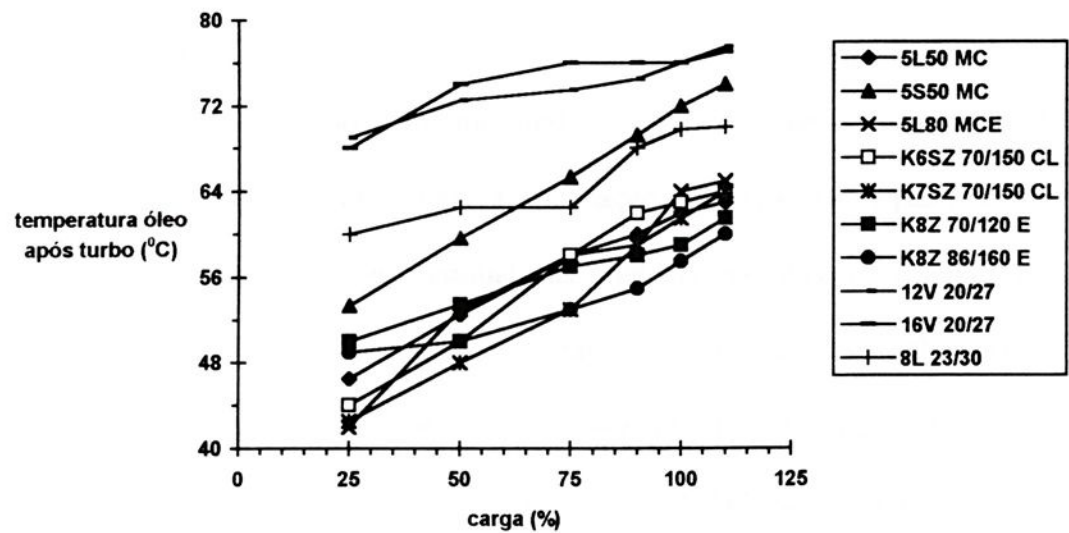
Fonte: Mecânica Pesada S. A .

Figura 3.11- Variação da temperatura dos gases de escape



Fonte: Mecânica Pesada S. A .

Figura 3.12- Variação da temperatura da água após turbo



Fonte: Mecânica Pesada S. A .

Figura 3.13 - Variação da temperatura do óleo após turbo

Os valores apresentados permitem vislumbrar uma considerável disponibilidade para a prática da cogeração em embarcações navais; os níveis de

temperatura alcançados nos gases de escape, água e óleo de resfriamento dos motores Diesel permitem que sejam previstas condições altamente vantajosas para o aproveitamento de energias residuais, especialmente aquelas que podem servir para o atendimento das demandas de baixa capacidade térmica.

Ainda que os fabricantes de grandes unidades Diesel para aplicações navais venham oferecendo ao mercado e mesmo grande parte dos armadores já venham demandando produtos dotados de sistemas poupadores de energia, a avaliação aprofundada de utilização de energias residuais se torna pertinente em face das expectativas de restrição da disponibilidade de combustíveis fósseis.

3.6- Comentários

Um estudo mais aprofundado para os sistemas, com especial ênfase das embarcações navais, para quantificação das capacidades passíveis de serem atendidas com a energia residual das unidades motoras, deve então ser procedido. A condição estratégica do emprego de tais energias em embarcações navais deve contemplar, dentre os diversos aspectos operacionais, as diferentes reações do sistema cogenerador em cargas parciais - e portanto distintas da condição de projeto do sistema - frente às variadas condições operacionais de uma embarcação naval (condições permanentes e transitórias).



CAPÍTULO 4

ANÁLISE DE INTEGRAÇÃO DAS UNIDADES DE COGERAÇÃO COM MOTORES DIESEL EM CARGAS PARCIAIS

4.1- Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da simulação de um estudo de caso tomado para um navio real. Inicialmente são discutidas as condições operacionais de um sistema de cogeração em cargas parciais e totais (no ponto de projeto); com base no levantamento de possibilidades de recuperação térmica em um motor de combustão interna são apresentadas as formulações correspondentes para cada uma delas; a partir da constatação de que nos gases quentes eliminados pelos motores reside uma fonte considerável de energia com potencial de aproveitamento, são simulados diversos motores que apresentam condições de atendimento prioritário à demanda mecânica para propulsão e avaliados em sua capacidade de recuperação de energias térmicas (quente e frio) e elétrica.

4.2- Condição operacional fora do ponto de projeto (*off-design*)

Uma central de cogeração emprega diferentes máquinas térmicas, de acordo com o ciclo térmico e a configuração recomendadas para cada caso. Tais máquinas térmicas apresentam comportamentos característicos, os quais podem ser estabelecidos a partir de curvas que retratam o comportamento das



variáveis fundamentais em função da carga de esforço a que a mesma pode ser submetida.

O emprego de máquinas térmicas em centrais de cogeração contempla, nas avaliações preliminares (por exemplo, no projeto básico), valores de eficiência, potência de geração, consumos específicos e outras variáveis fundamentais no chamado ponto de projeto. As avaliações técnicas e econômico-financeiras feitas a partir dos valores do ponto de projeto expressam valores médios que devem ser obtidos pela central de cogeração quando em operação, mas não fazem menção a possíveis diferenças possíveis de ocorrer no caso de variação nas premissas de projeto.

A título de exemplo, suponha uma máquina térmica como a da figura 4.1, projetada para operar com 90% de carga e que apresenta um certo consumo específico de combustível nesse ponto, o qual deverá se deslocar na medida em que a carga variar; a variação da carga em laboratório pode ser obtida por meio da mudança de tensão em um freio, o que simula as mudanças na solicitação da máquina térmica em sua operação em campo. Mesmo nos setores industriais mais constantes em suas curvas de carga térmica e elétrica (elementos fundamentais de um projeto de central de cogeração), como indústrias de papel e celulose, por exemplo, ocorrem por vezes oscilações no perfil diário ou mensal em decorrência de problemas operacionais, alterações no planejamento da produção, etc, obrigando a variações de carga nas máquinas térmicas para acomodar tais oscilações.



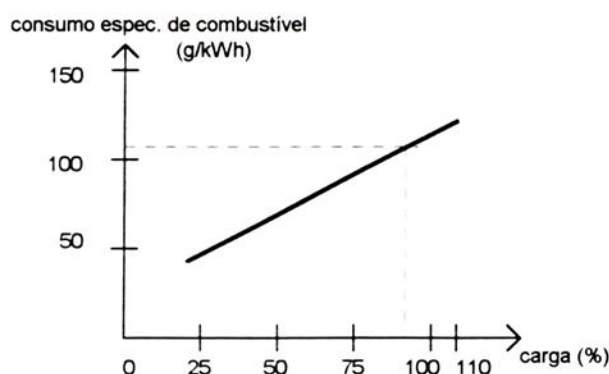


Figura 4.1- Comportamento do consumo específico em carga parcial

Notadamente no caso de sistemas isolados (fazendas sem eletrificação, ilhas, navios), as oscilações podem ser muito maiores por necessidade de acomodação de manobras próprias de cada atividade (operação de descarga em navios, por exemplo); nesses casos, a avaliação de um projeto de central de cogeração apenas no ponto de projeto pode mascarar os resultados esperados e por consequência deturpar os índices econômicos e financeiros.

O projeto de uma central de cogeração é usualmente desenvolvido para a condição operacional mais favorável de todo o sistema; assim, uma vez estabelecida a estratégia (paridade térmica, paridade elétrica ou despacho econômico), é importante validar o comportamento do arranjo proposto em condições operacionais adversas, isto é, fora do ponto de projeto.

A capacidade de geração térmica e eletromecânica de uma configuração ou arranjo de máquinas proposto para uma central de cogeração pode ser desenhada, dentro de certas faixas operacionais, em um diagrama que relaciona sua capacidade de produção de energias térmica (S') e eletromecânica (E'); a figura 4.2 ilustra um diagrama deste tipo. Nela, o ponto (E'^* , S'^*) é

admitido como o ponto de projeto adotado segundo a estratégia proposta para a integração entre a planta de processo e a unidade de cogeração (Horlock, 1987).

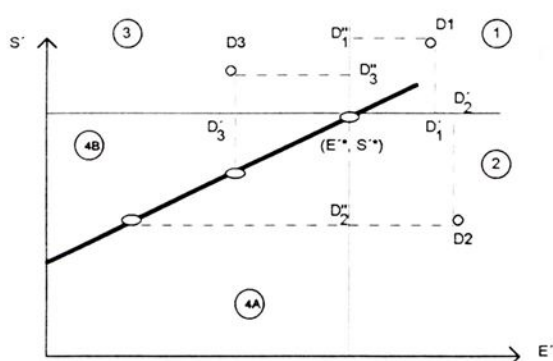


Figura 4.2 - Quadrantes operacionais no ponto de projeto

De acordo com a figura 4.2, a demanda por energias térmica e eletromecânica da unidade de processo pode se encontrar em um dos quatro quadrantes relativamente à curva operacional da central de cogeração; desse modo, a unidade poderá ser operada no ponto de projeto ou fora dele nos pontos ao longo da curva. Os quatro modos de operação a seguir descritos, considerando que se parta da análise no ponto de projeto (E'^* , S'^*), são:

- **Quadrante 1:** a demanda D_1 supera as necessidades térmicas e elétricas da central de cogeração; as alternativas que são disponíveis seriam a compra de energia suplementar ou a operação em marcha forçada, caso os equipamentos utilizados assim o permitam; o ponto D'_1 implica na aquisição apenas de eletricidade enquanto o ponto D''_1 implica aquisição apenas de energia térmica.

- **Quadrante 2:** para atender à demanda D_2 há excedente de calor ou outra forma de energia térmica, disponível para comercialização; no entanto, a eletricidade demandada supera a quantidade disponível. No ponto D'_2 não há excedente de energia térmica, porém eletricidade deve ser adquirida.

- **Quadrante 3:** para atender ao ponto de demanda D_3 haverá excedente de eletricidade porém com *déficit* de energia térmica.

- **Quadrante 4:** na região 4 as demandas por energias térmica e elétrica são sempre inferiores àquelas que podem ser supridas pela central de cogeração no ponto de projeto. Assim, operar no ponto (E'^*, S'^*) significa dispor de excedentes térmicos e elétricos para venda.

De acordo com a figura 4.3, que representa quatro pontos de carga parcial dentro do quarto quadrante, é possível analisar a condição operacional de uma central de cogeração dimensionada para o ponto de projeto porém submetida a demandas inferiores à sua capacidade nominal.

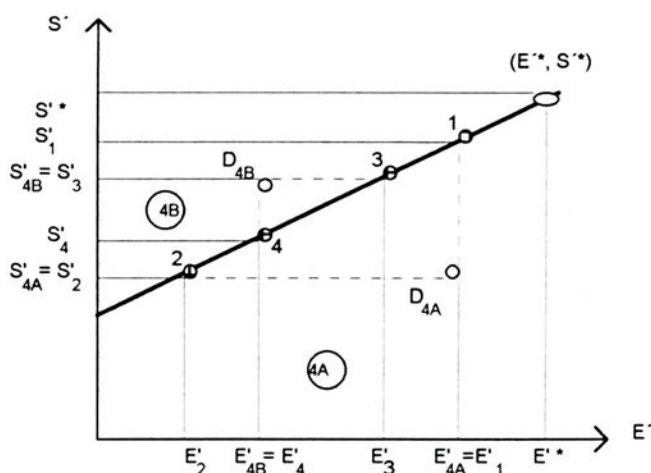


Figura 4.3 - Condição operacional com demandas inferiores ao ponto de projeto

Para demandas situadas no quadrante 4A, que representa a parte inferior da curva, as demandas por energia térmica e elétrica são ambas inferiores àquela que pode ser suprida pela central de cogeração no ponto de projeto. Assim, operar no ponto (E'^* , S'^*) significa dispor de excedentes térmicos e elétricos para venda.

Uma alternativa seria operar a central no ponto 1, com excedente de energia térmica ($S'_1 - S'_{4A}$) e atendimento integral da energia elétrica ($E'_1 = E'_{4A}$); outra alternativa, menos interessante, seria operar no ponto 2, com atendimento integral da demanda térmica ($S'_2 = S'_{4A}$) porém com déficit de energia elétrica ($E'_{4A} - E'_2$).

Na região 4B as demandas térmica e eletromecânica são novamente inferiores às energias produzidas na central de cogeração, logo a unidade pode operar com excedente de ambas as formas de energia. De modo alternativo, a operação da unidade no ponto 3 garantiria atendimento integral da demanda térmica e excedente de eletricidade ($E'_3 - E'_{4B}$); se a demanda elétrica for atendida integralmente no ponto 4, haverá déficit de energia térmica ($S'_{4B} - S'_4$).

Na prática, uma central de cogeração deverá certamente responder às mudanças na demanda, que ocorrem diária e mensalmente em decorrência de oscilações na solicitação pela planta de processo, notadamente no primeiro caso, e devido a pressões horo-sazonais, devendo contar com estruturas alternativas da própria unidade ou externas para o pleno atendimento.

4.3- Modelagem termodinâmica das unidades Diesel em cogeração

Os aproveitamentos de energia possíveis em um motor de combustão interna seriam correspondentes às formas elétrica e térmica (quente e frio); para a geração elétrica corresponderia o acoplamento do eixo principal de propulsão mecânica a um gerador elétrico por meio de uma caixa de engrenagens. Para a geração de energias térmicas propõe-se o emprego de caldeira de recuperação de calor para geração de vapor ou água quente considerando um rendimento de 80% e resfriadores (*chillers*) de absorção de água e amônia para geração de água gelada considerando um COP de 0,65. A figura 4.4 ilustra as possibilidades de recuperação de energia possíveis.

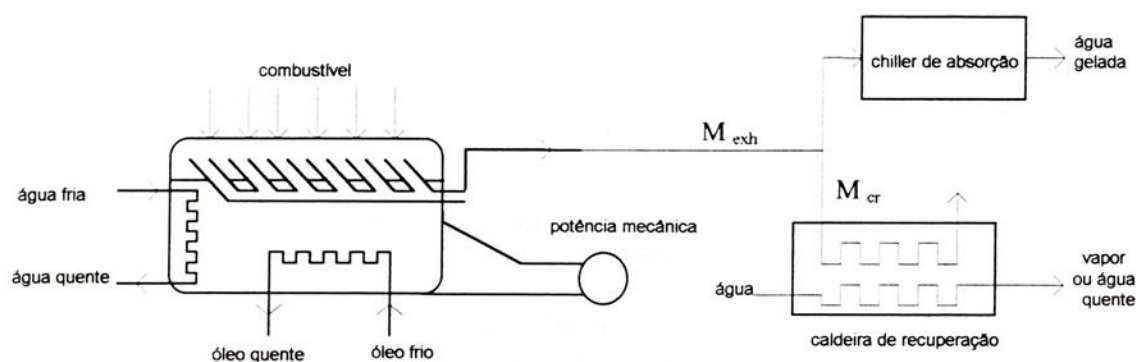
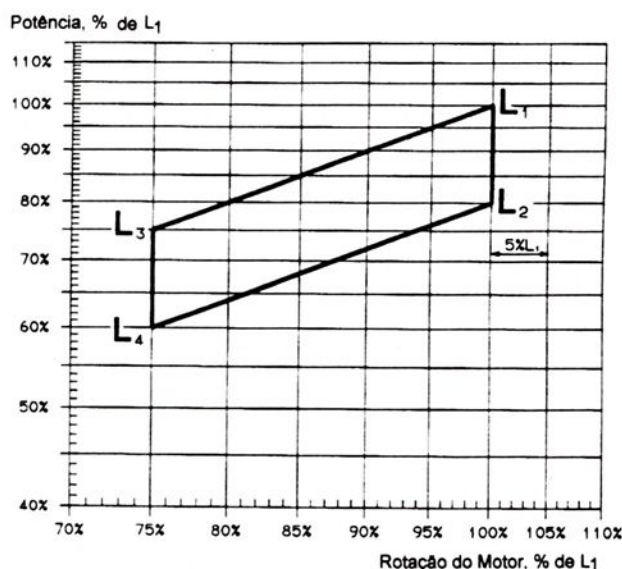


Figura 4.4 - Recuperação de energias possíveis em um motor de combustão interna

4. 3.1- Gerador de Água Fresca

Se um gerador de água fresca for instalado e estiver utilizando o calor do sistema de refrigeração à água da jaqueta, deve se notar que o calor

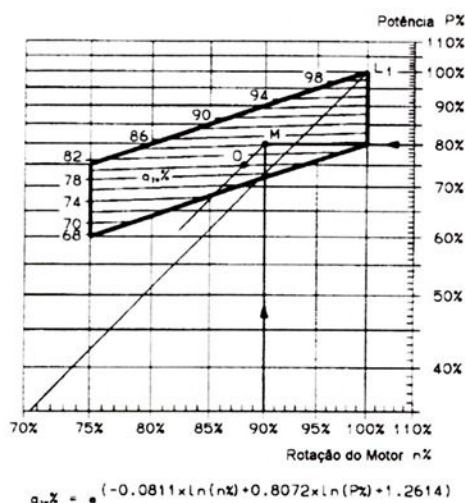
realmente disponível do sistema é menor do que o indicado pelos valores de dissipação de calor válidos para a máxima carga nominal contínua (MCR, *maximum continous rating*) no ponto de maior capacidade, isto é, a 100% de potência e 100% de rotação no ponto L1 da figura 4.5. Isto é porque os últimos valores são usados para dimensionamento do refrigerador à água da jaqueta e assim incorpora uma margem de segurança a qual pode ser necessária quando o motor está operando sob condições específicas, tal como sobrecarregado; normalmente, esta margem é de 10% na MCR nominal.



Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

Figura 4.5- Diagrama de carga do motor

Para um motor Diesel com capacidade limitada, isto é, um motor tendo um MCR (M) especificado e/ou um ponto de otimização (O) diferente de L1, a dissipação de calor da água da jaqueta para os pontos M e O pode ser encontrada, como anteriormente descrito, por meio da figura 4.6.



Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

Figura 4.6 - Dissipação de calor na jaqueta de resfriamento de água

Em operação em carga parcial, menor do que a força otimizada, a verdadeira dissipação de calor da água da jaqueta será reduzida de acordo com curvas específicas da operação naval; o calor realmente disponível para um motor Diesel com capacidade limitada pode então ser encontrado como segue:

- Força do motor entre a força otimizada e a especificada:

Para forças entre a especificada MCR(M) e a otimizada (O), o diagrama da figura 4.6 deve ser usado, dando o fator de correção de porcentagem “qjw%” e assim

$$Q_{jw} = Q_{L1} \times q_{jw}\% / 100 \times 0,90 \quad [1]$$

- Força do motor abaixo da força otimizada:

Para forças menores do que a otimizada, o valor $Q_{jw,o}$ encontrado para o ponto O por meio da equação [1] deve ser multiplicado por um fator de correção k_p :

$$Q_{jw} = Q_{jw,o} \times K_p \quad [2]$$

sendo:

Q_{jw} = dissipação de calor da água da jaqueta

$QL1$ = dissipação de calor da água da jaqueta a $MCR(L1)$ nominal

$q_{jw}\%$ = fator de correção da figura 4.6

$Q_{jw,o}$ = dissipação de calor da água da jaqueta no ponto otimizado (O), encontrado por meio da equação [1]

k_p = fator de correção com base no tipo de hélice (em geral, 0.85)

0,90 = fator para uma margem de sobrecarga, condições de ambiente tropical

É assumido que a dissipação de calor seja mais ou menos independente das condições ambientes, mesmo assim o fator de sobrecarga de cerca de 0,87 ao invés de 0,90 é mais preciso para condições ambiente correspondendo a temperatura ISO ou menor. Se necessário, todo o calor da água da jaqueta realmente disponível pode ser usado, desde que um sistema de controle de temperatura especial garanta que a temperatura de resfriamento da água da jaqueta na saída do motor não caia abaixo de um certo nível. Tal sistema de controle de temperatura pode consistir de um tubo de desvio (*by-pass*) especial instalado no sistema de refrigeração da jaqueta (figura 4.7) ou um componente embutido especial, como uma função inicia/para (*start/stop*) automática, ou similar. Se tal controle de temperatura especial não é aplicado, recomenda-se limitar o calor utilizado a um máximo de 50% do calor realmente disponível no MCR específico e somente usar o gerador de água fresca nas cargas do motor acima de 50%. A figura 4.8 ilustra o sistema global de resfriamento da água do mar no qual se insere o sistema de geração de água fresca da figura 4.7.

Quando se usar um gerador de água fresca normal do tipo

evaporador a vácuo simples efeito, a produção de água fresca pode ser estimada como 0,03 tonelada/24h por 1kW de calor, isto é:

$$M_{fw} = 0,03 \times Q_{jw} \quad (\text{tonelada/24h}) \quad [3]$$

sendo M_{fw} a produção de água fresca em toneladas por 24 h e Q_{jw} em kW.

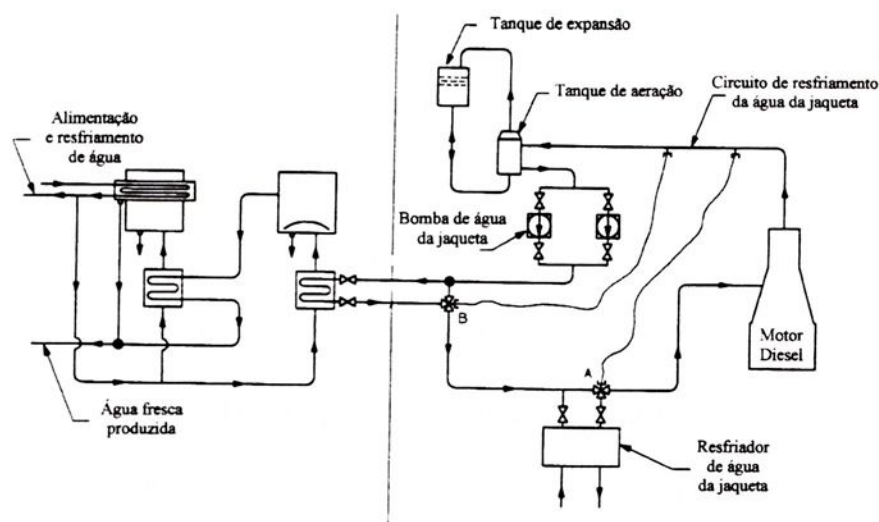


Fig. 4.7- Diagrama de fluxo de recuperação do calor da água de refrigeração da jaqueta para geração de água fresca

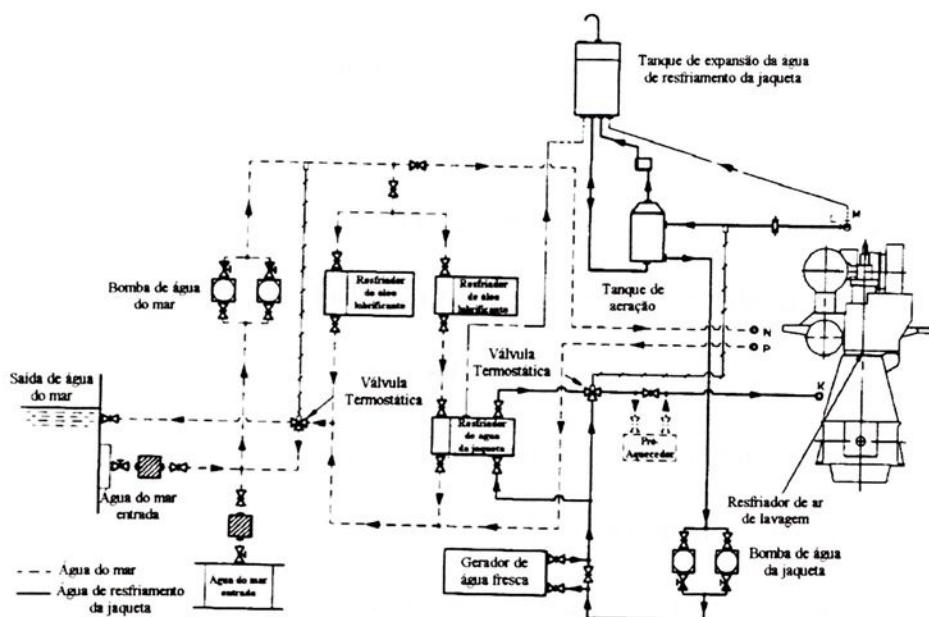


Figura 4.8- Diagrama do sistema de resfriamento de água do motor

4. 3.2- Aproveitamento dos gases de escape para recuperação de energia

São apresentados a seguir elementos que deverão permitir o cálculo da vazão de gases e exaustão para que seja viabilizada a recuperação térmica dos motores empregados em navios, de modo a se analisar a possibilidade técnica se recomendar a prática da cogeração nos mesmos.

Os valores dos gases de exaustão a serem realmente gerados, na prática dependem dos seguintes fatores:

a) ponto de otimização do motor (ponto O):

- P_o : força (kW) no ponto de otimização
- n_o : rotação (rpm) no ponto de otimização

b) condições ambientes e pressão traseira dos gases de exaustão:

- T_{ar} : temperatura ambiente (°C)
- p_{bar} : pressão barométrica (mbar)
- T_{cw} : temperatura do ar de recuperação (°C)
- Δp_o : contrapressão dos gases de exaustão (mmCA) no ponto

de otimização

c) capacidade de serviço contínua do motor (ponto S), válida para hélices de passo fixo (*Fixed pitch propeller* - FPP) ou hélices de passo controlável (velocidade do motor constante - *Constant engine speed* - CPP)

- P_s : capacidade de serviço contínua do motor (kW)

d) Se os turbocompressores convencionais são substituídos por outros, de alta eficiência ou sua combinação com um sistema turbo-composto, a quantidade de

gás exaurido e a temperatura dos gases de exaustão têm que ser corrigida por valores correspondentes ΔM_{HET} , ΔM_{TCS} , ΔT_{HET} e ΔT_{TCS} .

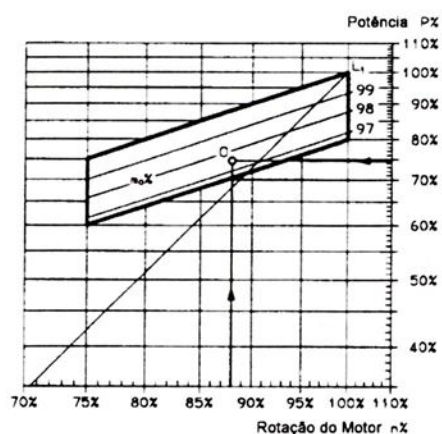
Para possibilitar a estimativa dos dados reais dos gases de exaustão numa capacidade de serviço arbitrária, a indústria metal-mecânica emprega o método de cálculo a seguir:

$\dot{M}_{exh}$: quantidade de gás de escape (kg/h), a ser encontrado

T_{exh} : temperatura dos gases de exaustão (°C), a ser encontrado

Os cálculos parciais baseados nos fatores de influência acima foram resumidos nas equações [4] e [5]. Os cálculos parciais baseados no fatores de influência são descritos como segue:

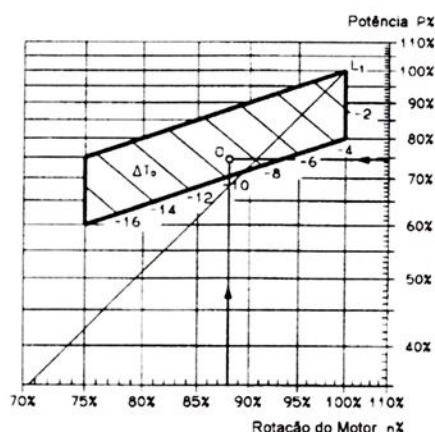
a) correção para escolha do ponto de otimização: ao se escolher um ponto de otimização “O” diferente daquele MCR nominal ponto “L1”, as mudanças resultantes na quantidade específica de gás de escape e na temperatura são encontradas usando como entradas nas figuras 4.9 e 4.10 os valores de porcentagem correspondente (de L1) para força otimizada $P_{O\%}$ e rotação $n_{O\%}$.



$$m_O\% = -14.9388 \times \ln(n_O\%) + 14.9388 \times \ln(P_O\%) + 100$$

Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

Figura 4.9 - Diagrama da vazão de gases disponíveis (mO%)



$$\Delta T_o = 35.5195 \times \ln(n_o) + 14.9410 \times \ln(P_o) - 232.3792^\circ \text{C}$$

Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

Figura 4.10- Diagrama da temperatura dos gases de exaustão após turbo

$$\dot{M}_{exh} = \dot{M}_{L1} \times \frac{P_o}{P_{L1}} \times \frac{m_{O\%}}{100} \times \left(1 + \frac{\Delta M_{amb}}{100}\right) \times \left(1 + \frac{\Delta m_{s\%}}{100}\right) \times \frac{P_{s\%}}{100} \times \left(1 + \frac{\Delta M_{HET/TCS}}{100}\right) \quad (\text{kg/h}) \quad [4]$$

$$T_{exh} = T_{L1} + \Delta T_o + \Delta T_{AMB} + \Delta T_s + \Delta T_{HET/TCS} \quad (^\circ \text{C}) \quad [5]$$

sendo:

M_{L1} : gases de exaustão (kg/h) no ponto nominal para turbocompressores convencionais

T_{L1} : temperaturas dos gases de exaustão depois do turbocompressor ($^\circ \text{C}$) no ponto nominal para turbocompressor convencional

b) Correção para condições ambientes reais e contrapressão: Para condições ambientes diferentes da ISO 3046/1-1986 e contrapressão diferente de 300 mmCA no ponto de otimização (O), os fatores de correção correspondente aos valores dos gases de exaustão podem ser encontrados a partir das equações [6] e [7].

$$\Delta M_{AMB\%} = -0.41 \times (T_{ar} - 25) - 0.03 \times (p_{bar} - 1000) + 0.19 \times (T_{cw} - 25) - 0.011 \times (\Delta P_o - 300) \quad (\%) \quad [6]$$

$$\Delta T_{amb} = 1.6 \times (T_{ar} - 25) + 0.01 \times (p_{bar} - 1000) + 0.1 \times (T_{cw} - 25) + 0.05 \times (\Delta P_o - 300) \quad (^\circ \text{C}) \quad [7]$$

sendo a seguinte nomenclatura empregada:

$\Delta M_{amb\%}$: mudança na quantidade dos gases de exaustão (%) da quantidade nas condições ISO

ΔT_{amb} : mudança na temperatura dos gases de exaustão, em °C

A contrapressão no ponto de otimização pode ser aproximadamente calculada por:

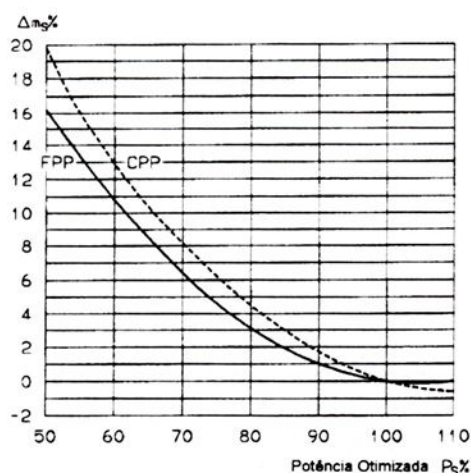
$$\Delta P_O = \Delta PM \times (P_O/PM)^2 \quad \text{sendo:}$$

PM: força em kW na MCR especificada

ΔPM : contrapressão dos gases de exaustão na MCR especificada (mmCA)

c) Correção para carga do motor: As figuras são utilizadas para determinar as mudanças relativas nos dados específicos do gás de exaustão quando funcionando à carga parcial, comparando os valores no ponto de otimização, ou

$$\text{seja: } P_s \% = \frac{P_s}{P_o} \times 100\%$$

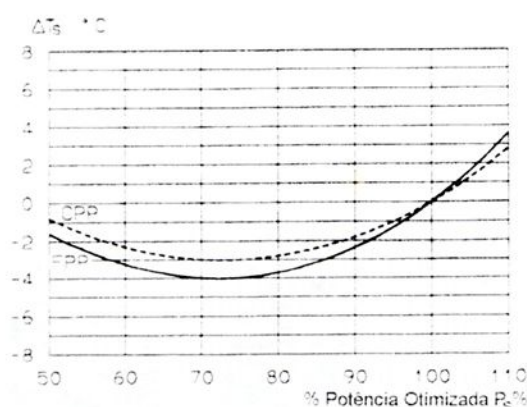


$$\Delta m_{g\%} = 0.0055 \times P_s^2 - 1.15 \times P_s + 60 \quad (\text{FPP})$$

$$\Delta m_{g\%} = 0.0055 \times P_s^2 - 1.22 \times P_s + 67 \quad (\text{CPP})$$

Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

Figura 4.11- Diagrama de mudança na quantidade específica de gás de exaustão



$$\Delta T_{g_{FPP}} = 0.005 \times P_{p\%}^2 - 0.72 \times P_{p\%} + 22 \quad (\text{FPP})$$

$$\Delta T_{g_{CPP}} = 0.0043 \times P_{p\%}^2 - 0.63 \times P_{p\%} + 20 \quad (\text{CPP})$$

Fonte: MAN B&W - Project Guides, 1994

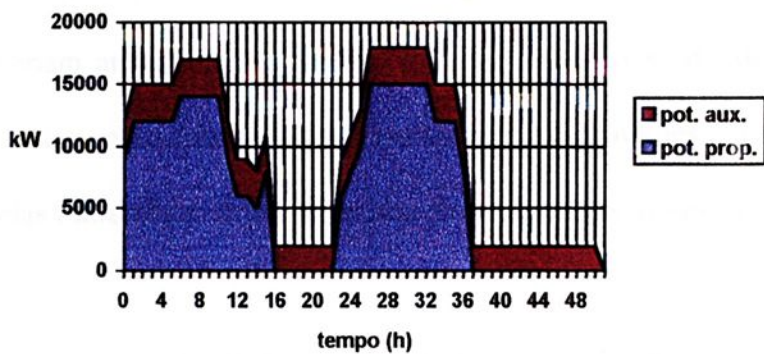
Figura 4.12- Diagrama de mudança na temperatura dos gases de exaustão

4.4-Estudo de caso com um navio real

O comportamento das demandas de energia em embarcações navais depende em grande escala de sua utilização e, por consequência, dos motores empregados; desse modo, de acordo com as características de cada embarcação, é de se esperar que haja uma maior ou menor possibilidade de recuperação térmica nos gases de escape, o que apenas permite que as conclusões aqui apresentadas sejam consideradas para as embarcações de mesma classe e com características semelhantes.

Um exemplo de curva de demandas para uma embarcação naval de passageiros é apresentada na figura 4.13; para o estudo de caso a ser apresentado, porém, serão considerados os valores fornecidos na tabela 4.1, cujos totais discriminados em termos de substituição energética (os valores originais

eram inteiramente para consumo de energia elétrica) já se encontram contemplados na tabela 4.2.



Fonte: Hackman e Lassila, 1995

Figura 4.13- Perfis de demanda por potência auxiliar e de propulsão em embarcação naval de passageiros

Tabela 4.1- Potência absorvida nas diversas demandas de um navio de carga (kW)

Denominação	Condições operacionais do navio					
	no mar essencial	no mar normal	em manobra	operação descarga	no porto fundeado	em lastro
sala de máquinas (contínuo)	189,3	190,7	156,2	56,4	63,6	190,7
sala de máquinas (intermitente)	59,6	43,8	63,6	30,5	26,7	36,0
sala de máquinas (diversos)	35,0	10,7	6,6	64,0	18,0	128,0
ar condicionado/ventilação	0,0	60,6	60,6	60,6	60,6	60,6
frigorífica de provisões	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4
frigorífica de carga	0,0	241,2	241,2	241,2	241,2	241,2
máquinas de convés	15,4	105,0	161,1	346,0	3,0	15,4
cozinha/copa	0,0	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
lavanderia	0,0	2,5	0,0	2,5	2,5	2,5
oficinas	0,0	15,6	0,0	15,6	15,6	15,6
iluminação	68,8	68,8	68,8	98,9	98,9	68,8
eq ^{tos} . náuticos/aux. Navegação	10,5	10,5	7,9	2,2	2,2	10,5

Fonte: Indústrias Reunidas Caneco S.A.

Considerando que parte dessa demanda pode ser atendida por fontes disponíveis de energia térmica (quente e fria), mantendo-se o restante

(principalmente as demandas não-substituíveis) para o atendimento a partir da geração elétrica, apresenta-se na tabela 4.2 os valores agregados de cada uma das mesmas; considerou-se, para a sua composição, que os itens copa/cozinha e lavanderia seriam atendidos pelas fontes quentes disponíveis, ar condicionado e ventilação, assim como necessidades frigoríficas para provisões e cargas seriam atendidas pelas fontes frias, as demais sendo atendidas pelas fontes elétricas.

Tabela 4.2- Valores agregados por fontes de energia (kW) e por condições operacionais do navio

Fontes de Energia	Condições operacionais do navio					
	no mar essencial	no mar normal	em manobra	operação descarga	no porto fundeado	em lastro
Quente	0,0	32,5	30,0	32,5	32,5	32,5
Fria	5,4	307,2	307,2	307,2	307,2	307,2
Elétrica	378,6	445,1	464,2	613,6	228,0	223,8

Com base no equacionamento apresentado e tomando por referência a figura 4.4, foi desenvolvido um código computacional para simulação das condições operacionais de navios com diferentes motores, dentre aqueles apresentados no Capítulo 3; o código computacional foi desenvolvido em Pascal for Windows.

O código computacional permite dois tipos de análise:

- numa primeira versão, é possível explorar a energia térmica recuperada em cada um dos motores selecionados (de acordo com os níveis de demanda fornecidos) em seus valores correspondentes ao ponto de carga parcial que melhor se ajusta à soma das demandas mecânica e elétrica, considerando um gerador acoplado ao eixo principal (*father-and-son*); são apresentados

igualmente os motores de geração exclusivamente elétrica (utilizados quando em operação de descarga, no porto fundeado, em lastro e em manobra).

- numa segunda versão, o código calcula as disponibilidades térmicas (para geração de vapor ou água quente e água gelada) em diversas condições parciais de carga (superiores a 75%, uma vez que não se concebe um projeto em que as unidades principais operem abaixo desse limite).

Considerando-se que a visualização em termos gráficos fica mais favorecida para essa última possibilidade, são apresentados a seguir os resultados alcançados na simulação do presente estudo de caso com base na segunda versão segundo as figuras 4.14 a 4.20; para todos os motores de grande porte foram considerados os valores de 10^5 Pa de pressão barométrica e temperatura ambiente de 20 °C, para um combustível com poder calorífico inferior de 42707 kJ/kg (10200 kcal/kg segundo o padrão ISO).

Em cada um dos diagramas é apresentada a disponibilidade de calor fornecido à caldeira de recuperação proporcionalmente à vazão de gases de escape do motor ($\frac{\dot{M}_{cr}}{\dot{M}_{exh}}$); com isso, obtém-se curvas crescentes de recuperação térmica para a produção de vapor ou água quente (QCR) enquanto proporcionalmente se obtém, com o diferencial de vazão disponível nos gases de escape, idêntica relação para o sistema de refrigeração por absorção (QRA), ou seja, $(1 - \frac{\dot{M}_{cr}}{\dot{M}_{exh}})$, respectivamente para as cargas de 75% a 110%.

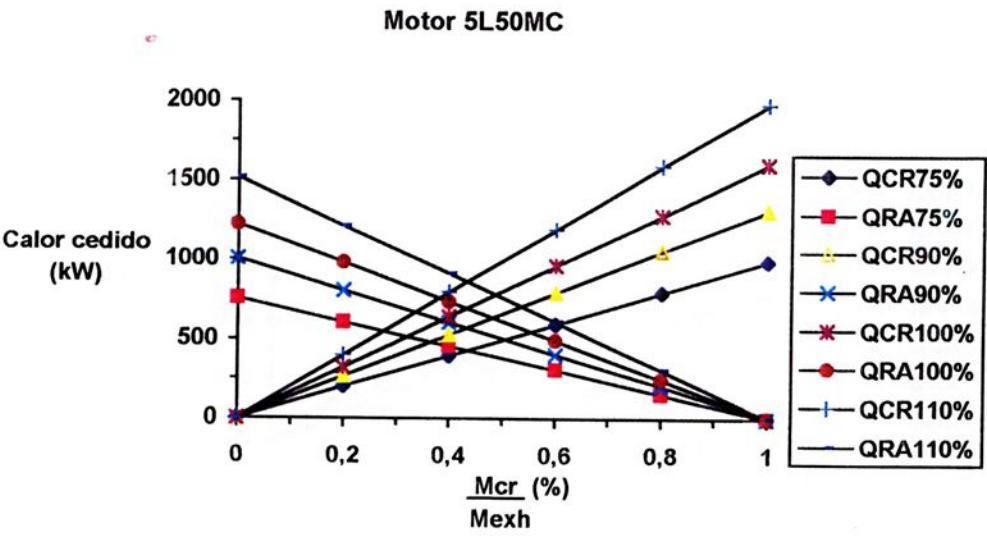


Figura 4. 14 - Análise de recuperação térmica no motor 5 L 50MC

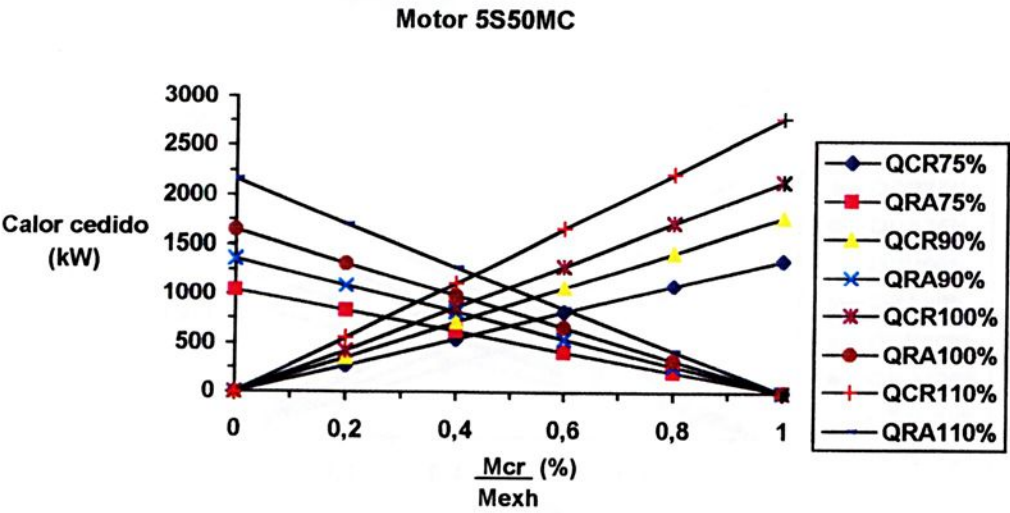


Figura 4. 15 - Análise de recuperação térmica no motor 5 S 50MC

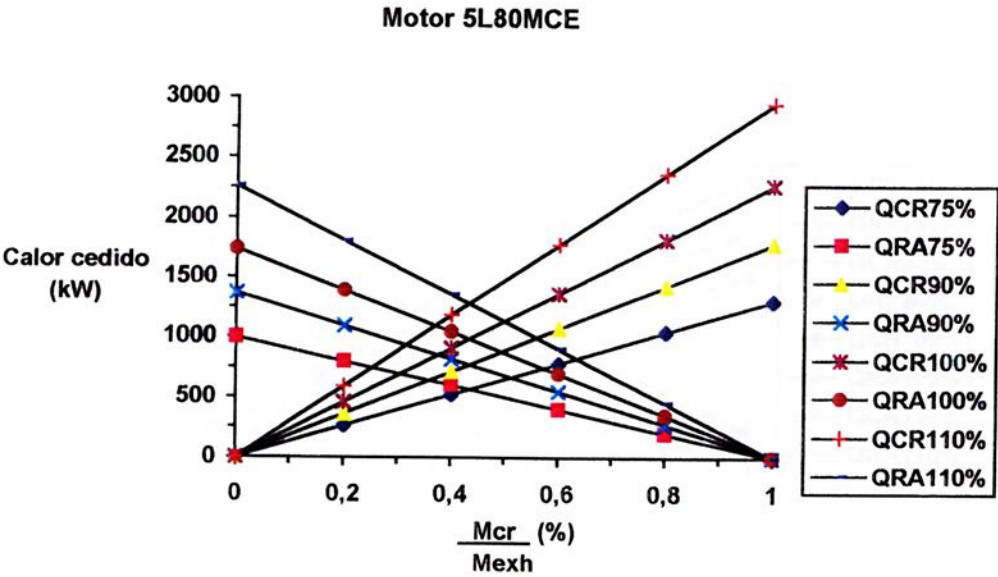


Figura 4. 16 - Análise de recuperação térmica no motor 5 L 80MCE

Motor K6SZ 70/150 CL

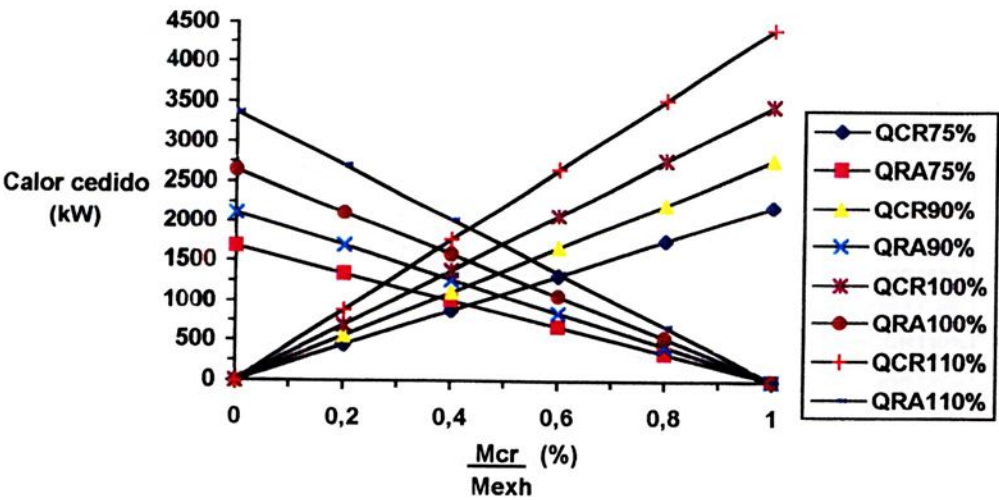
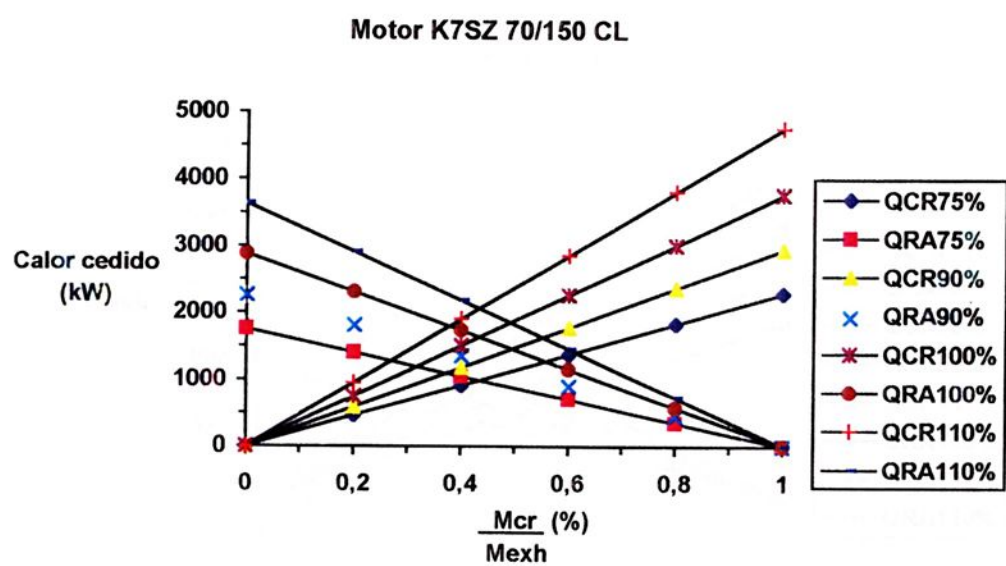
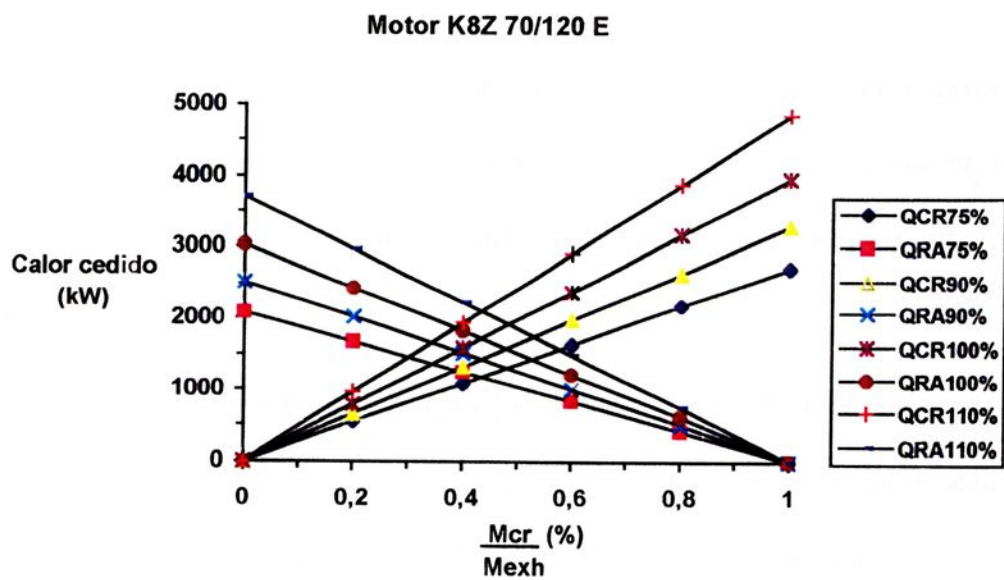


Figura 4. 17 - Análise de recuperação térmica no motor K 6SZ 70/150 CL



Carga parcial	Potência mecânica (kW)
75%	8580,25
90%	10220,53
100%	11570,23
110%	12773,02

Figura 4. 18 - Análise de recuperação térmica no motor K 7SZ 70/150 CL



Carga parcial	Potência mecânica (kW)
75%	6487,90
90%	7466,56
100%	8338,19
110%	9153,49

Figura 4. 19 - Análise de recuperação térmica no motor K 8Z 70/120 E

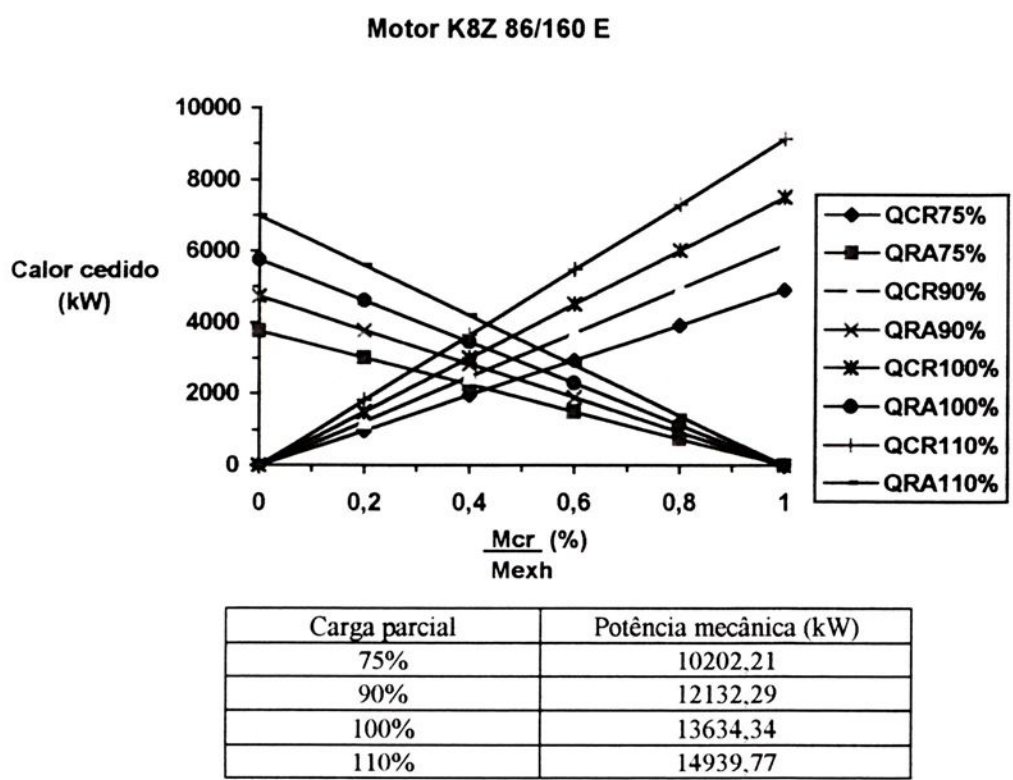


Figura 4. 20 - Análise de recuperação térmica no motor K 8Z 86/160 E

Devido a disponibilidade do calor fornecido pelos gases de escape, pode-se fazer uma estimativa do prazo de retorno ou prazo de recuperação do investimento num sistema de recuperação considerado no presente estudo de caso.

Através da equação [8], temos a estimativa de economia do sistema de recuperação, considerando-se para isso que o sistema opere segundo uma carga constante e estimando 16 h/dia ou 5840 h/ano de operação.

$$Q\% = \frac{sfc \times MQ\% \times D\$ \times ha}{\gamma} \quad [8]$$

sendo a seguinte nomenclatura empregada:

sfc - consumo específico de combustível (g/kWh)

$MQ\%$ - calor cedido pelos gases de escape nas cargas de 75% a 110%

$(QCR+QRA) / 2$ (kW)

DS - custo do combustível (US\$/litros)

ha - operação do sistema de recuperação (horas/ano)

γ - volume específico

$Q\%$ - economia do sistema de recuperação nas respectivas cargas (US\$/ano)

Considerando que a taxa de empréstimo do capital seja de 11%

aa, a equação [9] apresenta o número de períodos para o retorno do investimento

$$P = Q\% \times \frac{(1+i)^n - 1}{i \times (1+i)^n} \quad [9] \quad \text{sendo:}$$

P - capital investido para o sistema de recuperação, estimando:

motores 5L50MC e 5S50MC - US\$ 1.800.000,00

motores 5L80 MCE : K8Z 70/120 E : K6SZ 70/150 CL : K7SZ 70/150 CL

US\$ 2.200.000,00

K 8Z 86/160 E - US\$ 3.000.000,00

i - taxa de juros de mercado (considerado 11% aa)

n - número de períodos (anos).

São apresentados a seguir nas figuras 4.21 a 4.27 os resultados

obtidos do prazo de retorno do investimento num sistema de recuperação para o presente estudo de caso.

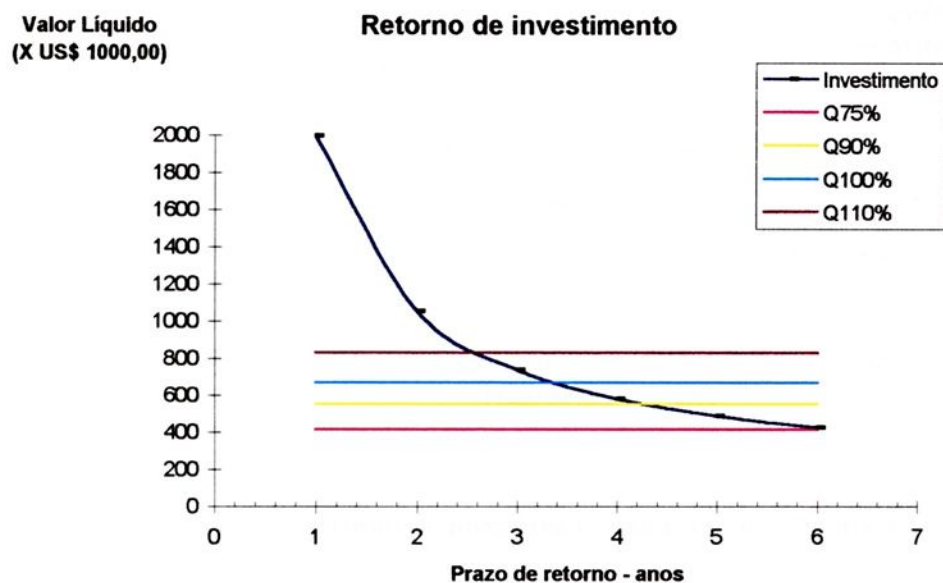


Figura 4.21 - Retorno de investimento para o motor 5L50MC

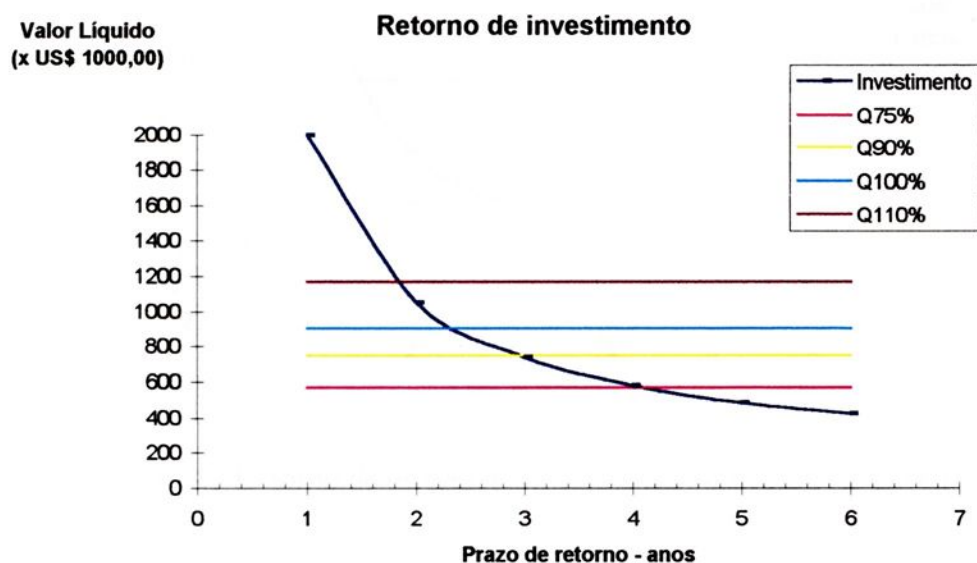


Figura 4.22 - Retorno de investimento para o motor 5S50MC

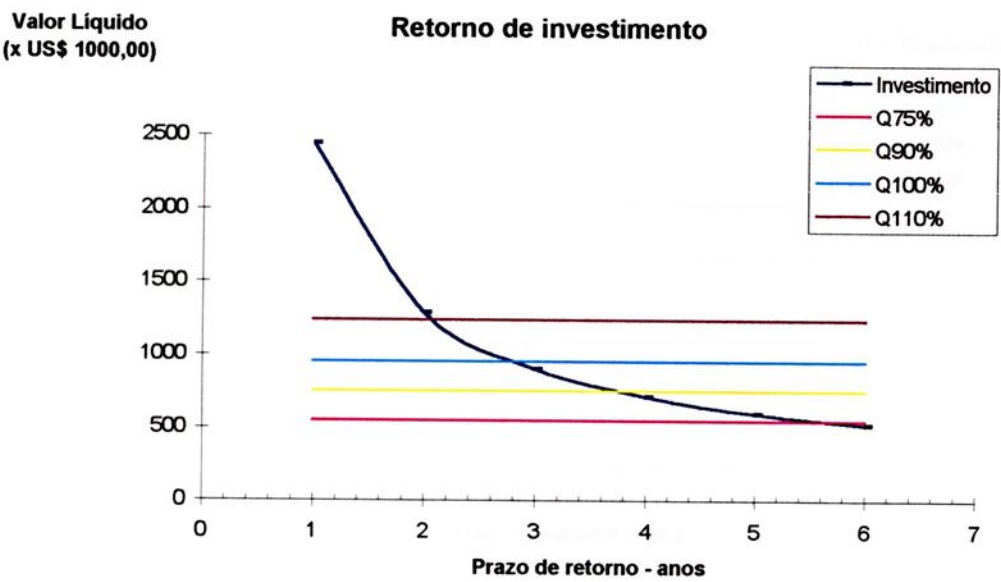


Figura 4.23 - Retorno de investimento para o motor 5L80MCE

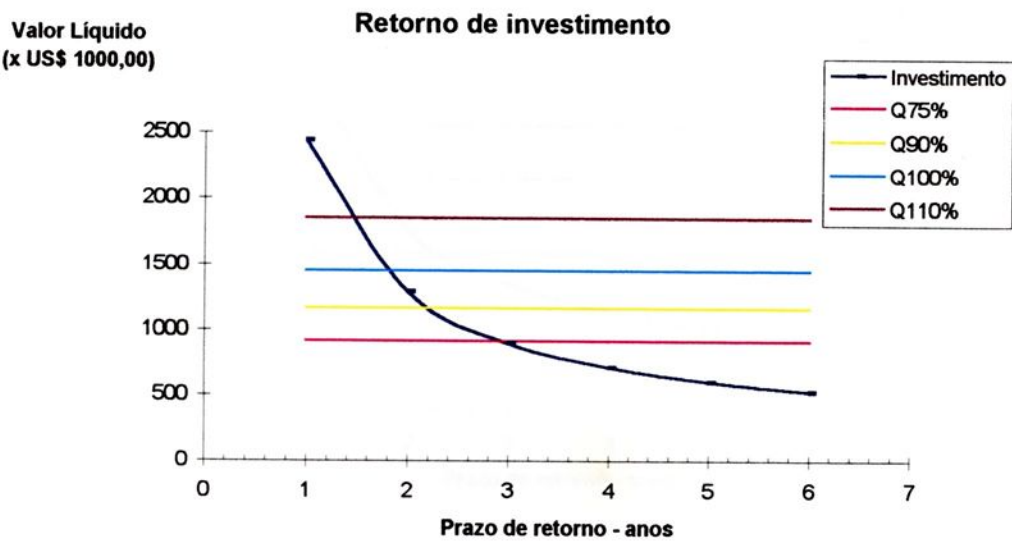


Figura 4.24 - Retorno de investimento para o motor K 6SZ 70/150 CL

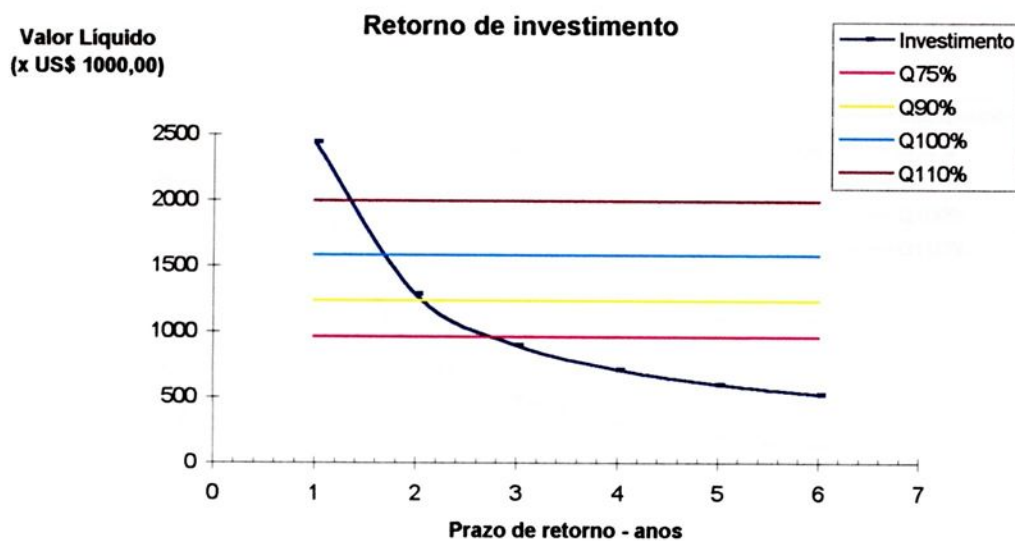


Figura 4.25 - Retorno de investimento para o motor K 7SZ 70/150 CL

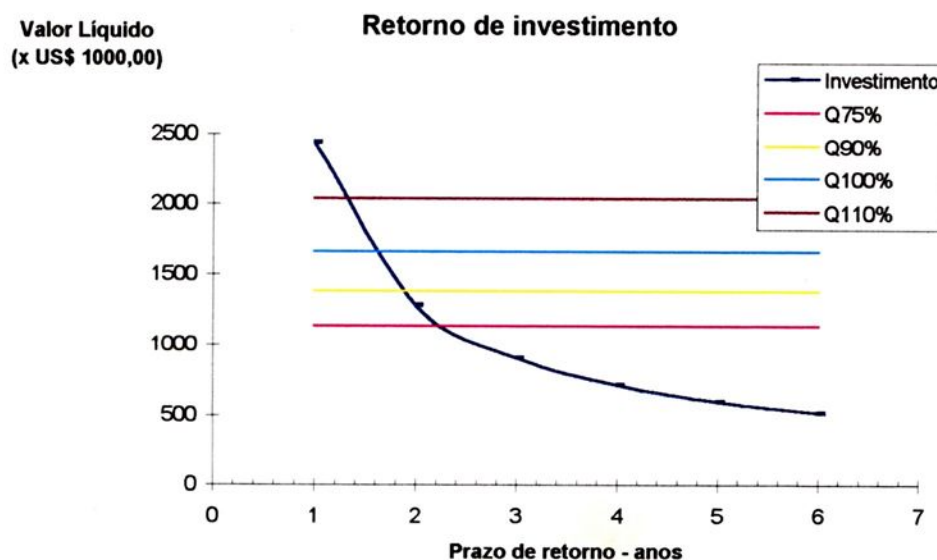


Figura 4.26 - Retorno de investimento para o motor K 8Z 70/120 E

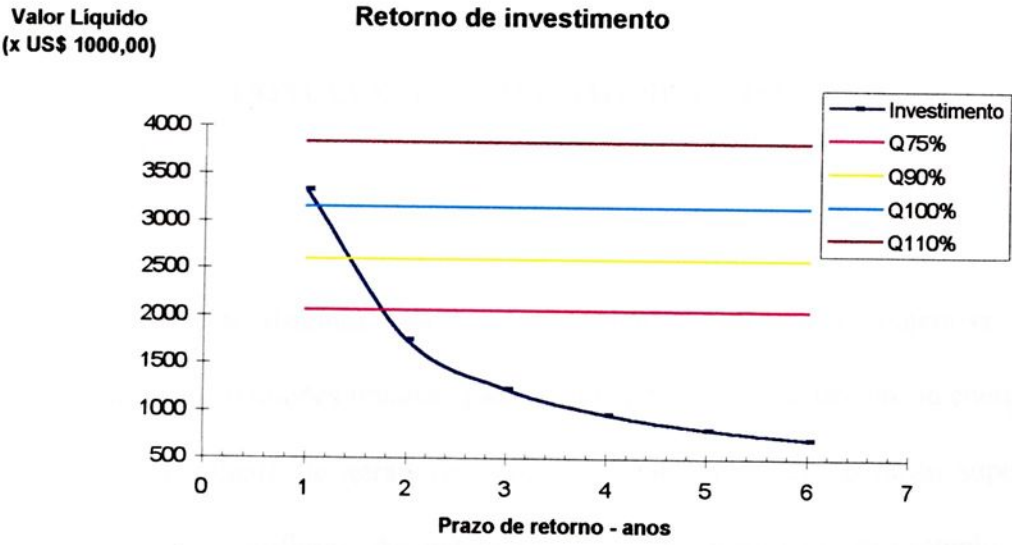


Figura 4.27 - Retorno de investimento para o motor K 8Z 86/160 E

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os sistemas isolados apresentam a necessidade imperiosa de serem dotados de condições mínimas para o atendimento das demandas de energia de forma independente de geradores externos, bem como sua operação supera quaisquer questões tarifárias. As embarcações navais constituem um exemplo de sistema isolado cujas demandas de energia não podem ser satisfeitas por outras fontes que não a auto-geração; nesses casos, em que o veículo pode se deslocar por longos períodos em condição estacionária, é desejável a máxima utilização das fontes combustíveis disponíveis.

Os resultados obtidos permitem concluir para o estudo de caso em questão que:

- devido às disponibilidades energéticas presentes em motores de combustão interna (gases de escape, água de refrigeração, óleo lubrificante), a capacidade de atender às estratégias operacionais com um sistema de cogeração se torna viável na medida em que as mesmas possam ser de alguma forma recuperadas e por sua conversão possam ser utilizadas na substituição de demandas tradicionalmente elétricas;
- as demandas de energia elétrica utilizadas para aquecimento e resfriamento podem ser substituídas pela utilização de vapor/água quente em caldeiras de recuperação, enquanto que água gelada pode ser obtida através de um sistema

de absorção, configurando-se assim um aproveitamento múltiplo em sistema de cogeração;

- com base na análise dos sete motores de grande porte considerados na base de dados levantada, foi possível verificar que na faixa operacional em que os motores de navios são utilizados (entre 75% e 110%, de acordo com o tipo de atividade em que se encontram realizando) há uma grande disponibilidade energética; a menor energia disponibilizada para geração de vapor ou água quente foi de 986,43 kW, correspondente ao motor 5 L 50MC, na condição de 75% de carga, o que supera em grande quantidade a demanda correspondente a esses vetores energéticos no estudo de caso apresentado (no caso, 32,5 kW);
- em termos de atendimento da demanda fria, isto é, a geração de água gelada no sistema de refrigeração por absorção, o menor valor obtido foi de 754,33 kW, no mesmo motor e na mesma condição de carga, o que também supera a demanda apresentada no estudo de caso (no caso, 307,2 kW);
- o consumo específico de combustível para esse motor, nessa condição de carga, corresponde a 176,52 (g/kWh) e a potência mecânica desenvolvida é de 4533,00 kW; considerando-se que a energia fornecida pelo combustível, nessa condição, é de 9048 kW, observa-se que o navio apresenta uma eficiência de propulsão de 50,0% e assumindo-se uma eficiência global (mecânica, elétrica e térmica) o aproveitamento energético chegaria a 65,9% para o caso em que todo o gás de escape do motor fosse para a caldeira de recuperação;
- um dos motores, o 5 L 80 MCE, apresenta para 100% de carga uma capacidade de produção de vapor ou água quente de 2151,24 kW com uma potência



mecânica de propulsão de 12554 kW e consumo específico de 166,21 g/kWh; em comparação com o motor K 8Z 86/160E, que apresenta uma potência térmica dissipada na forma de vapor ou água quente de 7521,60 kW para uma potência mecânica de propulsão de 13634 kW e consumo específico de 219,35 g/kWh, observa-se que o primeiro é mais recomendável para o presente estudo de caso em termos de propulsão mecânica, visto que apresenta menor capacidade de recuperação térmica e menor consumo específico;

- uma outra abordagem da mesma questão, a qual valorizasse as oportunidades de recuperação térmica, poderia indicar o motor K 8Z 86/160E haja vista que o mesmo supera em cerca de 3,5 vezes o motor 5 L 80 MCE; em termos de eficiência global, motor K 8Z 86/160E apresenta 63,9% e o motor 5 L 80 MCE apresenta 64,2%, enquanto que a eficiência puramente mecânica seria, respectivamente, 40,3% e 53,2%, o que revela a semelhança tecnológica de ambos com uma recomendação do emprego do primeiro para sistemas isolados outros que não especificamente embarcações navais, enquanto que o motor 5L80 MCE é mais indicado para propulsão naval no presente estudo de caso. Levando em consideração o retorno do investimento para o sistema de recuperação, pode-se notar que o motor K8Z 86/160E tem o melhor desempenho entre os motores estudados, levando-se em conta a abordagem de recuperação térmica; retorno de investimento em torno de um ano para 100% de carga, mesmo considerando um sistema de recuperação mais caro devido a capacidade do equipamento; cerca de US\$ 3.000.000,00.



REFERÊNCIAS

- 1- ANÔNIMO. Father-and-son engine combinations for optimum economy and maximum flexibility. *The Motor Ship*, v. 69, n. 6, p. 25-28, 1988a.
- 2- ANÔNIMO. The case for father-and-father engine installations. *The Motor Ship*, v. 69, n. 7, p.16-17, 1988b.
- 3 -ABDEL-RAHMAN, A. A., IBRAHIM, M.K., SAID, A. A. An improvement of part load performance of diesel engines operating at constant speed conditions. *Proc. Inst. Mech. Engineers*, v. 208, n. A1, p. 21-25, 1994.
- 4- BALESTIERI, J.A P. Planejamento de centrais de cogeração: uma abordagem multiobjetiva. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica/Unicamp, tese (doutorado), 1994.
- 5- BALESTIERI, J.A.P. Cogeração - participação da indústria na geração de energia elétrica. Relatório Interno. Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia, UNESP, 1994.
- 6- BLACKMAN, R.S. Type 23 frigate- the engineering development. *Journal of Naval Engineering*, v. 28, n. 1, p. 5-15, 1983.
- 7- BRADY, C.O , LUCK, D.L. The increased use of gas turbines as commercial marine engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, v. 116, n.4, p. 428-433, 1994.
- 8 -BROWN, D.K, PLUMB, C.M. Energy consumption in the Royal Navy. *Journal of Naval Engineering*, v. 28, n. 2, p. 182-192, 1984.



- 9- CHITTENDEN, L.H., COOPER, B.G. Future fuel resources, the naval problem. *Journal of Naval Engineering*, v. 28, n.3, p. 395-414, 1974.
- 10- GORGES, H.A. Cogeneration for the industrial end user - Part 1. *Gas Turbine World*, v. 12, n. 5, p. 42-47, 1982.
- 11- GURNEY, J.D. et al. Industrial combined heat and power: investment, savings and decision-making. *Proceedings Institution Mechanical Engineers*, v. 202, n. A1, p. 23-27, 1988.
- 12- HACKMAN, T., LASSILA, T. Cleaner exhaust gas with diesel-electric propulsion. *Engine Powe Products International*, p 39-41, 1995.
- 13- HIRSCHFELD, H. Engenharia econômica e análise de custos, p. 30, 229-235, 422 - 1992.
- 14- HORLOCK, J.H. Cogeneration: combined heat and power - thermodynamics and economics. Exeter, Pergamon, p. 210 - 1987.
- 15- MAN B&W - Project Guides. (relativo às dez diferentes unidades apresentadas), 1st Edition, p. 6.04-6.17, 1994
- 16- MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA - Balanço Energético Nacional, 1996.
- 17- NAYAR, C.V. Recent developments in decentralized mini-grid Diesel power systems in Australia. *Applied Energy* v. 52, p. 229-242, 1995.
- 18- OWEN, M.R. Reverse osmosis. *Journal of Naval Engineering*, v. 26, n. 3, p. 409-415, 1981.



- 19- RAMANATHAN, R., GANESH, L.S. A multi-objective evaluation of decentralized electricity generation options available to urban households. *Energy Convers. Mgmt.* v. 35, n. 8, p. 661-670, 1994.
- 20- ROY-AIKINS, J.E.A. Cogeneration in rural development. *Energy* v. 20, n. 2, p. 95-104, 1995.
- 21- SESSIONS, M.P.N., The efficient use of energy in warship auxiliary systems. *Journal of Naval Engineering*, v. 29, n. 3, p. 508-518, 1986.
- 22- VAN WYLEN, G.J., SONNTAG, R.E. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. São Paulo, Edgard Blucher, 1993.
- 23- ZHEN, F. An MLP model applicable to rural energy system. *Energy Sources*, v. 16, p. 195-207, 1994.
- 24- WALTER, A.C.S. *Cogeração: análise de tecnologias, fatores condicionantes e experiências internacionais*. Campinas: UNICAMP, (publicação interna), 1991.

ANEXO A - Condições de carga parcial e total das variáveis de interesse em estudo

Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50MC	1518,8	2987,4	4533	5473,8	6078,7	6661,6
5S50MC	1783	3565,3	5346,6	6407,4	7041,8	7853,1
5L80MCE	3221,1	6304,7	9413,9	11292	12554	13825
K6SZ70/150 CL	2498,9	4960,6	7496,3	8755,8	9844,4	10967
K7SZ70/150 CL	2877,5	5775,9	8580,2	10221	11570	12773
K8Z70/120 E	2087	4126,8	6487,9	7466,6	8338,2	9153,5
K8Z86/160 E	3521,7	6839,2	10202	12132	13634	14940
12V 20/27	300	600	900	1080	1200	1320
16V 20/27	384,7	769,41	1270,3	1397,1	1538,9	1692,6
8L 23/30	259,98	519,98	779,99	935,99	1040	1144

Tabela 1 - Variação da potência efetiva em motores Diesel (kW)

Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50 MC	190,13	181,24	176,52	175,61	178,04	183,14
5S50 MC	189,75	179,93	173,21	173,03	176,73	186,23
5L80 MCE	180,3	170,95	165,83	165,06	166,21	169,38
K6SZ 70/150 CL	203,35	191,33	189,6	194,48	196,52	197,16
K7SZ 70/150 CL	189,09	182,97	183,28	185,4	187,08	192,52
K8Z 70/120 E	233,79	217,76	216,35	217,79	219,9	220,82
K8Z 86/160 E	239,23	218,1	216,6	217,72	219,35	221,78
12V 20/27	224,72	213,99	207,04	208,86	212,23	216,15
16V 20/27	222,17	204,14	202,64	206,04	209,29	215,77
8L 23/30	237,89	208,24	201,4	200,06	200,22	201,47

Tabela 2 - Variação do consumo específico (g/kWh)

Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50 MC	4,73	7,495	9,83	11,11	11,91	12,71
5S50 MC	7,13	11,33	14,84	16,75	18,01	19,15
5L80 MCE	5,20	7,81	9,72	12,21	12,8	13,22
K6SZ 70/150 CL	5,68	8,98	11,783	13,29	14,293	15,26
K7SZ 70/150 CL	5,715	9,11	11,93	13,4	14,47	15,55
K8Z 70/120 E	3,89	6,17	8,32	9,04	9,81	10,4
K8Z 86/160 E	3,65	5,8	7,6	8,5	9,15	9,7
12V 20/27	5,73	9,09	11,92	13,43	14,43	15,38
16V 20/27	5,4	8,57	11,23	12,6	13,61	14,5
8L 23/30	5,5	9,1	11,8	13,2	14,3	15,2

Tabela 3 - Comportamento da pressão média efetiva (bar)



Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50 MC	244,29	251,17	239,57	248,86	259,07	280,57
5S50 MC	269	247,5	241,67	260	273,33	321,67
5L80 MCE	200	235	222,5	222,75	230	240
K6SZ 70/150 CL	205	230	250	260	280	300
K7SZ 70/150 CL	227,5	263,75	265,65	267,5	270	288,75
K8Z 70/120 E	240	256,25	265	280,48	308,75	323,75
K8Z 86/160 E	252,5	280,83	303,33	321,67	333,33	345
12V 20/27	325	375	365	360	360	380
16V 20/27	300	305	280	260	265	270
8L 23/30	267,5	277,88	276,25	285,21	293,29	305

Tabela 4 - Variação da temperatura dos gases de escape (°C)

Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50 MC	58,667	72,66	70,33	72	73	73
5S50 MC	61,33	65,33	68,33	71	71,66	76,33
5L80 MCE	54	74	76	76	78	78
K6SZ 70/150 CL	60	66	67	68	68	70
K7SZ 70/150 CL	50,5	64,5	64,5	69	70	70
K8Z 70/120 E	58	57	58	58	58	58
K8Z 86/160 E	54	54	54	54	55	55
12V 20/27	59	60	60	59,5	59,5	59,5
16V 20/27	60	60	58	58	58	55
8L 23/30	58,33	61,66	62,66	63,66	63	63

Tabela 5 - Variação da temperatura da água após turbo (°C)

Classificação dos motores	Carga parcial em %					
	25	50	75	90	100	110
5L50 MC	46,5	52,5	58	60	62	63
5S50 MC	53,33	59,66	65,33	69,2	72	74
5L80 MCE	42	53	58	59	64	65
K6SZ 70/150 CL	44	50	58	62	63	64
K7SZ 70/150 CL	42,5	48	53	59	61,5	64
K8Z 70/120 E	50	53,5	57	58	59	61,5
K8Z 86/160 E	49	50	53	55	57,5	60
12V 20/27	69	72,5	73,5	74,5	76	77,5
16V 20/27	68	74	76	76	76	77
8L 23/30	60	62,5	62,5	68	69,76	70

Tabela 6 - Variação da temperatura do óleo após turbo (°C)

ANEXO B - Disponibilidade térmica dos motores estudados com variação da vazão mássica

5L50MC	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	197,29	394,57	591,86	789,15	986,43
QF75 %	754,33	603,46	452,60	301,73	150,87	0,0
QQ90 %	0,0	262,70	525,40	788,10	1050,80	1313,50
QF90 %	1004,44	803,55	606,66	401,78	200,89	0,0
QQ100 %	0,0	319,77	639,55	459,32	1279,09	1598,86
QF100 %	1222,66	978,13	733,60	489,06	244,53	0,0
QQ110 %	0,0	396,27	792,55	1182,88	1585,09	1981,37
QF110 %	1515,16	1212,13	909,10	606,07	303,03	0,0

5S50MC	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	271,48	542,96	814,44	1085,42	1357,40
QF75 %	1038,01	830,41	622,81	415,20	207,60	0,00
QQ90 %	0,0	356,13	712,26	1068,39	1424,52	1780,65
QF90 %	1361,67	1089,34	817,00	544,67	272,33	0,0
QQ100 %	0,0	430,25	860,49	1290,74	1720,99	2151,24
QF100 %	1645,06	1316,05	987,04	658,03	329,01	0,0
QQ110 %	0,0	556,06	1112,12	1668,18	2224,24	2780,30
QF110 %	2126,11	1700,69	1275,67	850,44	425,22	0,0

5L80MCE	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	260,66	521,32	781,98	1042,64	1303,29
QF75 %	996,64	797,31	597,98	398,65	199,33	0,0
QQ90 %	0,0	356,75	713,51	1070,26	1427,01	1783,76
QF90 %	1364,06	1091,24	818,43	545,62	272,01	0,0
QQ100 %	0,0	454,32	908,64	1362,96	1817,28	2274,60
QF100 %	1737,10	1389,48	1042,26	694,84	347,42	0,0
QQ110 %	0,0	590,70	1181,40	1772,09	2362,79	2953,49
QF110 %	2258,55	1806,84	1355,13	903,42	451,71	0,0

K6SZ 70/120 E	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	438,48	876,96	1315,44	1753,92	2192,40
QF75 %	1676,54	1341,23	1005,92	670,62	335,31	0,0
QQ90 %	0,0	553,78	1107,56	1661,34	2215,12	2768,90
QF90 %	2117,39	1693,92	1270,44	846,96	423,48	0,0
QQ100 %	0,0	691,22	1382,44	2073,66	2764,88	3456,10
QF100 %	2642,90	2114,32	1585,74	1057,16	528,58	0,0
QQ110 %	0,0	882,71	1765,42	2648,13	3530,83	4413,54
QF110 %	3375,06	0700,05	2025,05	1350,02	675,01	0,0

K7SZ 70/150CL	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	457,54	915,07	1372,61	1830,15	2287,68
QF75 %	1749,40	1399,52	1049,64	699,76	349,88	0,0
QQ90 %	0,0	590,16	1180,33	1170,49	2360,66	2950,82
QF90 %	2256,51	1805,21	1353,91	902,60	451,30	0,0
QQ100 %	0,0	753,57	1507,14	2260,72	3014,29	3767,86
QF100 %	2881,30	2305,04	1728,78	1152,52	576,26	0,0
QQ110 %	0,0	951,41	1902,83	2854,24	3805,66	4757,07
QF110 %	3637,76	2910,21	2182,66	1455,10	727,55	0,0

K8Z 70/120 E	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	543,86	1087,72	1631,58	2175,44	2719,30
QF75 %	2079,47	1663,57	1247,68	831,79	415,89	0,0
QQ90 %	0,0	658,24	1316,47	1974,71	2632,95	3291,18
QF90 %	2516,79	2013,43	1510,07	1006,72	503,36	0,0
QQ100 %	0,0	792,86	1585,73	2378,59	3171,45	3964,31
QF100 %	3031,53	2425,23	1818,92	1212,61	606,31	0,0
QQ110 %	0,0	969,96	1939,91	2909,87	3879,82	4849,78
QF110 %	3708,65	2966,92	2225,19	1483,46	741,73	0,0

K8Z 86/160 E	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
QQ75 %	0,0	982,02	1964,04	2946,05	3928,07	4910,09
QF75 %	3754,77	3003,82	2252,86	1501,91	750,95	0,0
QQ90 %	0,0	1236,31	2472,62	3708,92	4945,23	6181,54
QF90 %	4727,06	3781,65	2836,24	1891,82	945,41	0,0
QQ100 %	0,0	1504,32	3008,64	4512,96	6017,28	7521,60
QF100 %	5751,81	4601,45	3451,09	2300,72	1150,36	0,0
QQ110 %	0,0	1827,58	3655,15	5482,73	7310,30	9137,88
QF110 %	6987,79	5590,23	4192,67	2795,12	1397,56	0,0

ANEXO C: Relação entre a potência e a rotação através da Lei do Hélice

$$LEI\ DO\ HÉLICE = N_1 : N_2 = n_1^3 : n_2^3 \quad \therefore n_2 = 100 \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_1}} \quad Em\ \%$$

POT N	ROT n	POT N	ROT n	POT N	ROT n	POT N	ROT n	POT N	ROT n
5 %	36,84 %	30 %	66,95 %	55 %	81,93 %	80 %	92,83 %	105 %	101,64 %
10 %	46,42 %	35%	70,48 %	60 %	84,34 %	85 %	94,73 %	110 %	103,26 %
15 %	53,13 %	40 %	73,48 %	65 %	86,62 %	90 %	96,55 %	115 %	104,77 %
20 %	58,48 %	45 %	76,63 %	70 %	88,79 %	95 %	98,31 %	120 %	106,28 %
25 %	63,00 %	50%	79,37 %	75 %	90,86 %	100 %	100%	125 %	107,73 %
1/4 CARGA		1/2 CARGA		3/4 CARGA		1/1 CARGA		1 1/10 CARGA	

COSTA, H.L. *Cogeração em sistemas isolados: estudo de caso em embarcações navais*. Guaratinguetá, 1997. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

RESUMO

Este trabalho teve como principal objetivo a avaliação da prática da cogeração em embarcações navais operando em cargas parciais. As embarcações navais constituem um exemplo de sistema isolado cujas demandas de energia não podem ser satisfeitas por outras fontes que não a autoprodução; nesses casos, em que o veículo pode se deslocar por longos períodos em condição estacionária, é desejável a máxima utilização das fontes combustíveis disponíveis. Os resultados obtidos permitem concluir que: a- devido às disponibilidades energéticas a capacidade de atender às estratégias operacionais com um sistema de cogeração se torna viável; b- as demandas de energia elétrica utilizadas para aquecimento e resfriamento podem ser substituídas pela utilização de vapor/água quente (caldeira de recuperação) e água gelada (sistema de absorção) configurando-se assim um sistema de cogeração; c- analisando os motores considerados para a prática da cogeração verifica-se que na faixa operacional em que os motores de navios são utilizados (entre 75% e 110%, de acordo com as atividades realizadas) há uma grande disponibilidade energética; a menor energia disponibilizada para geração de vapor ou água quente foi de 986,43 kW; em termos de atendimento da demanda fria utilizando um sistema de refrigeração por absorção, o menor valor obtido foi de 754,33 kW, o que supera a demanda energética apresentada no estudo de caso.



COSTA, H.L. Cogeneration in Isolated Systems: Case to Marine Ships. Guaratinguetá, 1997. p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

The present work has as main objective the evaluation of practice of cogeneration in marine ships running part load. Marine ships are an example of isolated system which energy demands may not be satisfied by other sources than the self-generation; in these case, in which the ship may be conducted for long time in a steady state condition, is desirable that maximum utilization of available fuel sources. The results outcome allow to conclude that: a) due to energetic availability the capacity of attend operational strategies with a cogeneration system becomes feasible; b) power demands used to heating and cooling may be replaced by employment of steam/hot water (recovery boiler) and cold water (absorption system) outlining thus a cogeneration system; c) analyzing the considered engines to cogeneration practice occur that within operational rate in which engine ships are used (between 75% and 110%, according to performed activities) there is a great energetic availability; the lesser available energy to steam generation or hot water was 986,43 kW; in terms of attending the cold demand using an absorption cooling system, the lesser figure get was 754,33 kW, what overcome the energetic demand shown in the case.

Keywords: isolated system, power demands, thermal availability, cogeneration,



Autorizo a reprodução deste trabalho

Guaratinguetá, 19 de setembro de 1997

HEBER LUÍS DA COSTA



