

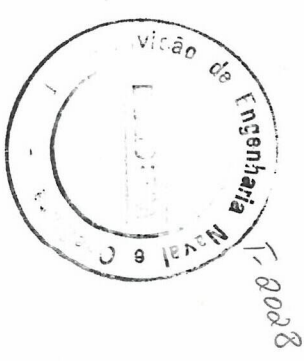
3042325
26/08/20

Serviço de Biblioteca
Biblioteca de Engenharia Mecânica, Naval e Elétrica

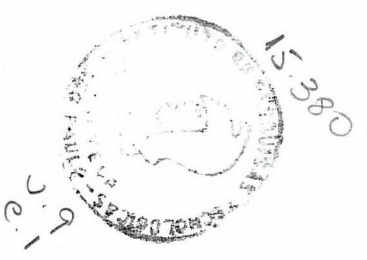
HELIO MITIO MORISHITA
HERNANI LUIZ BRINATI
1986

SOBENA, 10
542

209



SIMULAÇÃO DE MANOBRA DE "CHANGE-OVER" PARA
INSTALAÇÃO PROPULSORA CODOG



SIMULAÇÃO DE MANOBRAS DE "CHANGE-OVER" PARA INSTALAÇÃO PROPULSORA
CODUG

1. INTRODUÇÃO

Com a evolução da construção naval e do equipamento de propulsão tem se verificado um aumento da complexidade das instalações propulsoras que requerem um elevado nível de controle. A aplicação de sistemas de controle automático exige um perfeito conhecimento do comportamento da instalação a ser controlada, quer em regime permanente quer em regime transitória, para definir com precisão as funções do sistema de controle.

Para a previsão do desempenho da instalação propulsora tem-se tornado comum, especialmente para embarcações militares, o emprego da técnica de simulação. A avaliação do desempenho da instalação propulsora é feita pela simulação de manobras padrão do navio, utilizando computador digital ou um sistema híbrido analógico-digital.

Dois são os objetivos básicos da simulação de manobras: prever com boa aproximação o desempenho da instalação propulsora do navio em manobras típicas, e projetar um sistema de controle que otimize o desempenho e evite sobrecarga dos componentes da instalação.

As instalações propulsoras de embarcações militares são, geralmente, do tipo combinado, correspondendo a dois modos de operação distintos. Os estudos de simulação compreendem, normalmente, manobras de aceleração e parada do navio para cada modo de opera-

ção, além da mudança de modos, que é conhecida como operação de "change-over".

O presente trabalho apresenta a simulação da manobra de "change-over" para a instalação propulsora tipo CODOG de uma Corveta. Este trabalho contém alguns resultados de um projeto desenvolvido para a Marinha do Brasil no CEPEN - Centro de Estudos e Pesquisas do Departamento de Engenharia Naval da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - sobre simulação dinâmica de instalações propulsoras de uma Corveta.

2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO E DA MANOBRAS

A instalação propulsora da Corveta é do tipo CODOG - motor Diesel ou turbina a gás; uma representação esquemática do sistema está mostrado na figura 1. A embarcação tem dois eixos propulsores; no modo Diesel cada eixo é acionado por um motor através de engrenagens reductoras; no modo turbina uma única máquina aciona os dois eixos. A instalação dispõe de embreagens auto-sincronizadas que permitem o engate das máquinas principais, de acordo com o modo de operação selecionado. Para assegurar a partida dos motores Diesel em vazio são incluídos na instalação acoplamentos flutuantes.

A figura 2 é uma ilustração esquemática do comando de operação do sistema, compreendendo a seleção do modo de operação, Diesel ou turbina, e o acionamento da manete de potência - "power control lever", PCL.

A partir da posição de PCL são gerados os sinais de passo demandado para o hélice e "power level angle". PLA, para a

turbina (modo turbina) ou rotação demandada para o motor (modo Diesel).

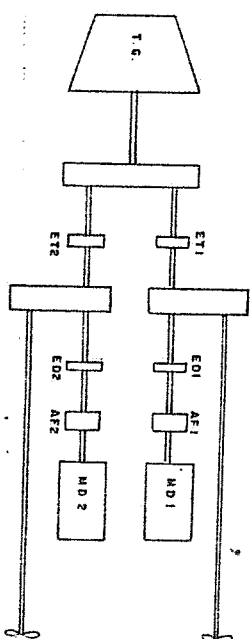


Fig. 1 - Arranjo Esquemático da Instalação Propulsora

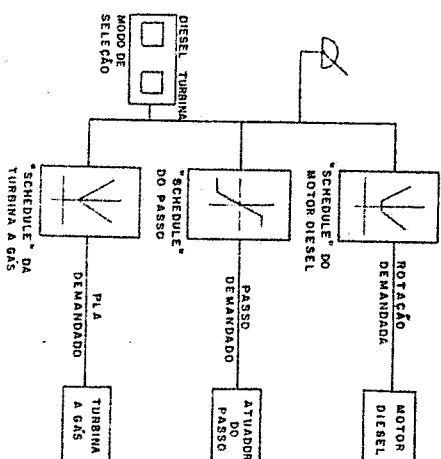


Fig. 2 - Esquema do Sistema de Controle da Propulsão

As funções passo (PCL), PLA (PCL) e rotação demandada (PCL), chamadas programas de operação - "schedules" - são determinadas previamente de modo a se obter o ponto mais conveniente de operação da instalação propulsora para cada velocidade do navio.

A demanda de PLA estabelece a potência requerida da turbina a gás determinando, portanto, a injeção de combustível. Análogamente, para o motor Diesel a rotação demandada determina, em função da carga, a injeção de combustível requerida.

A manobra de "change-over" consiste na mudança de um modo de operação da instalação propulsora para outro. No presente trabalho são considerados dois modos de operação:

- operação no modo Diesel - um motor por eixo;
- operação no modo turbina - acionamento simultâneo dos dois eixos.

No estudo do "change-over" pode-se configurar dois casos distintos. Um deles representa uma situação ideal, em que no caso de operação com modo Diesel os eixos dos motores (e também dos hélices) apresentam a mesma rotação e mesmas características de aceleração.

O outro caso apresenta a situação em que existe um "mismatch" entre os dois eixos; isto implica em que, quando no modo Diesel, os eixos propulsores apresentam rotações diferentes; também quando se processa a passagem turbina-Diesel os eixos dos motores podem ter rotações diferentes.

Há uma série de fatores que podem ser causa do "mismatch", citando-se entre eles diferenças nas características dos reguladores de velocidade ou das rotações demandadas (posições diferentes das manetes para os dois bordos), bem como diferenças nos torques dos propulsores, etc.

Pode-se avaliar que a passagem de um modo para outro é uma operação complexa, requerendo o emprego de um sistema de controle adequado para evitar solicitações excessivas sobre as máquinas, bem como oscilações indesejáveis na rotação dos eixos ou na velocidade do navio.

O sistema de controle aqui considerado prevê as seguintes funções para manobra de "change-over":

- limite de "change-over" - máximo valor de PCL no qual se permite a passagem de modos;
- taxa de aceleração lenta, (de PLA) para a turbina a gás;
- demanda de "change-over" de PLA para a turbina;
- taxa de desaceleração (de PLA) para desacoplamento ("power down rate") da turbina;
- taxa de aceleração lenta (de rotação demandada) para os motores Diesel;
- demanda de "change-over" de rotação para motor Diesel;
- taxa de desaceleração (de rotação demandada) para desacoplamento ("power down rate") dos motores Diesel;
- posição de referência para cremalheira ("fuel rack datum") dos motores Diesel.

3. LÓGICA DA MANOBRAS DE "CHANGE-OVER"

A definição da manobra de "change-over" apresentada na seção anterior, não é suficiente para uma perfeita compreensão do processo que ocorre durante a mudança de modos. É descrita, a seguir, a lógica que rege a manobra e que é utilizada em sua simulação.

ção.

3.1 - Passagem Diesel-Turbina

i) Quando o navio opera no modo Diesel as embreagens Diesel, ED1 e ED2, estão travadas. Para se efetuar a passagem para o modo turbina estas embreagens são destravadas, sendo enviado, por outro lado, sinal de travamento para as embreagens da turbina assim que elas engatarem.

ii) A turbina recebe demanda de PLA de "change-over"; esta demanda corresponde ao valor de "schedule" para o PCL de operação mais um desvio pré-estabelecido, cuja finalidade é garantir que a turbina assume a carga independente de "mismatch" nos "schedules" da turbina e do Diesel. A variação na demanda de PLA é efetuada em taxa lenta ("slow rate") para garantir passagem gradual da carga com pequenas oscilações no processo.

iii) Se os dois eixos estiverem operando com mesma velocidade as duas embreagens da turbina, ET1 e ET2, serão engatadas simultaneamente. Neste instante a variação da demanda de PLA passa a ser feita em "normal rate" (taxa normal). Se houve "mismatch" de rotação nos eixos, uma das embreagens da turbina, ET1 ou ET2, engatará antes da outra. Nesse último caso, apenas depois que a segunda embreagem for engatada é que a demanda de PLA passa a aumentar em "normal rate" (taxa normal).

iv) Quando a embreagem da turbina é engatada em um eixo, passando a turbina a assumir parte da carga, o motor Diesel acoplado àquele eixo sofre redução do "fuel rack" (cremalheira de combustível), que é determinada pelas características do regulador de velocidade. Observar que quando o torque da turbina se soma ao do motor

Diesel, há uma tendência a acelerar o eixo, que vai ser evitado pela atuação do regulador.

v) Quando a cremalheira de combustível cair abaixo de um valor de referência ("fuel rack datum"), altera-se a demanda de rotação do motor para o valor de "idle" (marcha lenta) em "power down rate" (taxa de desacoplamento).

vi) Quando se reduz a demanda de rotação do motor, há uma redução adicional na cremalheira de combustível e consequente queda no torque fornecido pelo motor. As embreagens dos motores ED1 e ED2 desengatam quando o torque transmitido através delas se tende a tornar negativo.

vii) Quando as duas embreagens dos motores Diesel tiverem sido desengatadas, aplica-se demanda de "schedule" (programa) para PLA com taxa normal de variação.

Com esta lógica pode-se observar as seguintes fases durante a passagem do modo Diesel para o modo turbina a gás:

- a) Fase 1 - estão engatadas as embreagens ED1 e ED2.
 - b) Fase 2 - estão engatadas as embreagens ED1, ED2 e ET1 (ou ET2).
 - c) Fase 3 - estão engatadas as embreagens ED1, ED2, ET1 e ET2.
 - d) Fase 4 - estão engatadas as embreagens ED2 (ou ED1), ET1 e ET2.
 - e) Fase 5 - estão engatadas as embreagens ET1 e ET2.
- Se não houver "mismatch" as fases 2 e 4 não ocorrem.

3.2 - Passagem Turbina-Diesel

i) Quando o navio opera com turbina as embreagens correes

pendentes, ET1 e ET2, estão engatadas e travadas. Para se efetuar a passagem para o outro modo as embreagens da turbina são destravadas, sendo enviado sinal de travamento para as embreagens Diesel quando elas engatarem.

ii) Os motores Diesel operando em marcha lenta recebem demanda de rotação de "change-over"; analogamente ao que ocorre com a turbina, a demanda de "change-over" corresponde ao valor de "schedule" para o PCL de operação mais um desvio pré-estabelecido. A variação da demanda de rotação é efetuada em taxa lenta ("slow rate").

iii) Quando um motor Diesel atinge a rotação do eixo a embreagem correspondente engata a trava; aplica-se, então, demanda de rotação de "schedule" com taxa normal de variação.

iv) Assim que as duas embreagens Diesel, ED1 e ED2, tiverem engatados, aplica-se à turbina demanda de PLA de marcha lenta com taxa de desacoplamento ("power down rate").

v) A média que PLA diminui o torque fornecido pela turbina de potência se reduz; as embreagens da turbina, ET1 e ET2, desengatam quando o torque transmitido por elas tende a se tornar negativo.

Como a lógica descrita acima pode-se observar as seguintes fases durante a passagem do modo turbina para o modo Diesel:

- Fase 1 - estão engatadas as embreagens ET1 e ET2.
- Fase 2 - estão engatadas as embreagens ET1, ET2, ED2 (ou ED1).
- Fase 3 - estão engatadas as embreagens ET1, ET2, ED2 e ED1.
- Fase 4 - estão engatadas as embreagens ET1 (ou ET2), ED2 e ED1.
- Fase 5 - estão engatadas as embreagens ED2 e ED1.

4. MODELOS PARA SIMULAÇÃO

Os modelos matemáticos para simulação da manobra de "change-over" devem considerar todas as fases da operação. As distintas situações que ocorrem durante as mudanças de modos de operação e os correspondentes modelos são listados a seguir.

4.1 - Acionamento dos Eixos Através dos Motores Diesel

Esta situação corresponde ao modo de operação Diesel: então engatadas as embreagens ED1 e ED2. As equações do movimento correspondentes são:

$$\frac{dN_{m_i}}{dt} = \frac{1}{2\pi J_{m_i}} [Q_{mt_i} - Q_{a_i}] \quad i=1,2 \quad (4.1)$$

$$\frac{dN_{h_i}}{dt} = \frac{1}{2\pi J_{h_i}} [Q_{a_i} \cdot RRD - Q_{f_i} - Q_{h_i}] \quad i=1,2 \quad (4.2)$$

$$\frac{dN_{pt}}{dt} = \frac{1}{2\pi J} [Q_{pt} - Q_a] \quad (4.3)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{M} \left[T_{h_1}(1-t) + T_{h_2}(1-t) - R_t \right] \quad (4.4)$$

onde:

- Nm - é a rotação do motor Diesel
- Nh - é a rotação do eixo do hélice
- Jm - é o momento de inércia do eixo do motor
- Qmt - é o torque do motor Diesel
- Qa - é o torque transmitido no acoplamento fluido

RRD - é a razão de redução para operação com motor Diesel

sel

Qf - é o torque de atrito

Qh - é o torque do hélice

Jh - é o momento de inércia do eixo do hélice

Npt - é a rotação da turbina de potência

Qi - é o torque resistente para turbina desacoplada do eixo propulsor

V - é a velocidade do navio

M - é a massa do navio, incluindo-se a sua massa vir

tual

Th - é o empuxo do hélice

t - é o coeficiente de redução da força propulsora

Rt - é a resistência ao avanço do navio.

Se não ocorrer "mismatch" os empuxos Th₁ e Th₂ serão iguais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

4.2 - Acionamento dos Eixos Através da Turbina

Esta situação corresponde ao modo turbina; estão engatadas as embreagens ET1 e ET2. As equações do movimento correspondentes são:

guais.

onde:

Jtg - é o momento de inércia do eixo da turbina de potência e eixo propulsor

Nr - é a rotação do eixo cardan

Q2 - é o torque de atrito para o motor Diesel desacoplado do eixo propulsor

J3 - é o momento de inércia do eixo cardan.

Para o movimento do navio emprega-se a equação (4.4).

4.3 - Acionamento Simultâneo dos Eixos Através dos Motores Diesel e da Turbina

Estão engatadas nesta condição as embreagens ED1, ED2, ET1 e ET2. A equação do movimento para os eixos propulsores nesta condição é a seguinte:

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

Qfid - é o torque perdido por atrito em todo o conjunto.

Para o movimento dos eixos dos motores aplica-se a equação (4.1) enquanto que para o movimento do navio usa-se (4.4).

-11-

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

Qfid - é o torque perdido por atrito em todo o conjunto.

Para o movimento dos eixos dos motores aplica-se a equação (4.1) enquanto que para o movimento do navio usa-se (4.4).

-11-

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

Qfid - é o torque perdido por atrito em todo o conjunto.

Para o movimento dos eixos dos motores aplica-se a equação (4.1) enquanto que para o movimento do navio usa-se (4.4).

-11-

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

Qfid - é o torque perdido por atrito em todo o conjunto.

Para o movimento dos eixos dos motores aplica-se a equação (4.1) enquanto que para o movimento do navio usa-se (4.4).

-11-

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

Qfid - é o torque perdido por atrito em todo o conjunto.

Para o movimento dos eixos dos motores aplica-se a equação (4.1) enquanto que para o movimento do navio usa-se (4.4).

-11-

onde:

Jtg - é o momento de inércia reduzido à rotação dos eixos propulsores de todo o conjunto - turbina, saídas dos acoplamentos fluidicos, embreagens e engrenagens reductoras, hélices e eixos

4.4 - Acionamento de um Eixo por Motor Diesel e do Outro Eixo por Motor Diesel e Turbina

Estão engatadas nessa condição as embreagens ED1, ED2 e ET1 (ou ET2). Admitindo-se que ET1 esteja engatada, tem-se a seguinte equação para o eixo 1:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{1}{2\pi J_1} [Q_{a1} - RRD - Q_{pt1} - Q_{ft1}] \quad (4.9)$$

onde:

J_1 - é o momento de inércia, reduzido à rotação do eixo propulsor, do conjunto constituído por turbina, saída do acoplamento fluídico 1, embreagens e engrenagens correspondente, hélice 1 e eixo

Q_{ft1} - é o torque perdido por atrito nesse conjunto.

Para o movimento do eixo 2 aplica-se a equação (4.2),

enquanto que para movimento dos eixos motores e do navio aplicam-se, respectivamente, as equações (4.1) e (4.4).

4.5 - Acionamento dos Eixos pela Turbina e por um Motor

Estão engatadas nesta condição as embreagens ET1, ET2 e ED2 (ou ED1). Admitindo-se que ED2 esteja engatada, tem-se a seguinte equação para os eixos:

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{1}{2\pi J_1} [Q_{pt1} - RRT + Q_{a1} - RRD - Q_{h1} - Q_{h2} - Q_{ft1}] \quad (4.10)$$

onde:

J_1 - é o momento de inércia reduzido à rotação do eixo propulsor, do conjunto constituído pela turbina, saída do acoplamento fluídico 2, embreagens e engrenagens correspondentes, hélices e eixos

Q_{ft2} - é o torque perdido em atrito nesse conjunto.

Para o movimento do eixo cardan 1 aplica-se a equação (4.7), enquanto que para o movimento dos eixos motores e do navio são utilizadas, respectivamente, as equações (4.1) e (4.4).

Os modelos matemáticos do motor Diesel, turbina a gás, hélice de passo controlável, acoplamento fluídico e engrenagem redutora foram fornecidos pelos respectivos fabricantes.

5. RESULTADOS

Com base na lógica da manobra e nos modelos matemáticos apresentados respectivamente nas seções 2 e 3 foi elaborado um programa de computador para simular o "change-over" em um computador digital. Neste trabalho são apresentados os resultados obtidos com a simulação de duas manobras:

I - passagem do modo Diesel para o modo turbina a gás e vice-versa a 65% do PCL sem "mismatch";

II - passagem do modo Diesel para o modo turbina a gás a 65% do PCL com "mismatch".

As respostas correspondentes a manobra I são apresentadas nas figuras 3.a e 3.b, onde pode-se observar cinco etapas distintas. Na primeira etapa, identificada por $K_E = 0,25$, o modo de propulsão é Diesel e a turbina a gás está sendo acelerada com taxa

constante de variação de PLA. Na segunda etapa, identificada por $KE = 0,5$, a turbina a gás é acoplada ao sistema de propulsão e, juntamente com o motor Diesel, aciona o hélice. Como consequência tem-se um aumento da rotação dos eixos do hélice; o governador de velocidade do motor Diesel atua diminuindo a injeção de combustível (variação da posição da cremalheira) até que as embreagens dos motores são desengatadas passando-se para a terceira etapa da manobra, identificada por $KE = 0,75$. Nesta etapa a turbina a gás assume toda a carga da propulsão; os motores Diesel são inicialmente desacelerados para a sua rotação de marcha lenta e depois de permanecer certo tempo neste estado eles são novamente acelerados para assumir a carga da propulsão. Quando as embreagens dos motores Diesel engatam, tem início a quarta etapa da manobra, identificada por $KE = 1,0$. Nesta situação os motores Diesel e a turbina acionam concomitantemente os eixos propulsores, embora já tenha iniciado o decréscimo de PLA da turbina. Esta etapa perdura até que o eixo da turbina é desacoplado e o sistema volta ao estado do início da simulação com $KE=0,25$. O importante a observar é que a simulação revela a exequibilidade da transferência dos modos de operação com os valores de controle adotada sem que a rotação do hélice e a velocidade do navio sofram variações acentuadas. No exemplo mostrado, houve uma variação de 20% na rotação do hélice e de 3,5% na velocidade do navio.

Nas figuras 4.a e 4.b são mostrados os resultados da simulação para a manobra II, onde pode-se observar cinco etapas distintas. Na primeira etapa tem-se operação com modo Diesel enquanto a turbina a gás é acelerada com taxa de variação de PLA constante.

A segunda etapa tem início quando a embreagem ET1 da turbina engata no eixo propulsor 1, identificada por $KE = 0,4$. Nesse instante o eixo propulsor 2 é acionado por motor Diesel e o eixo

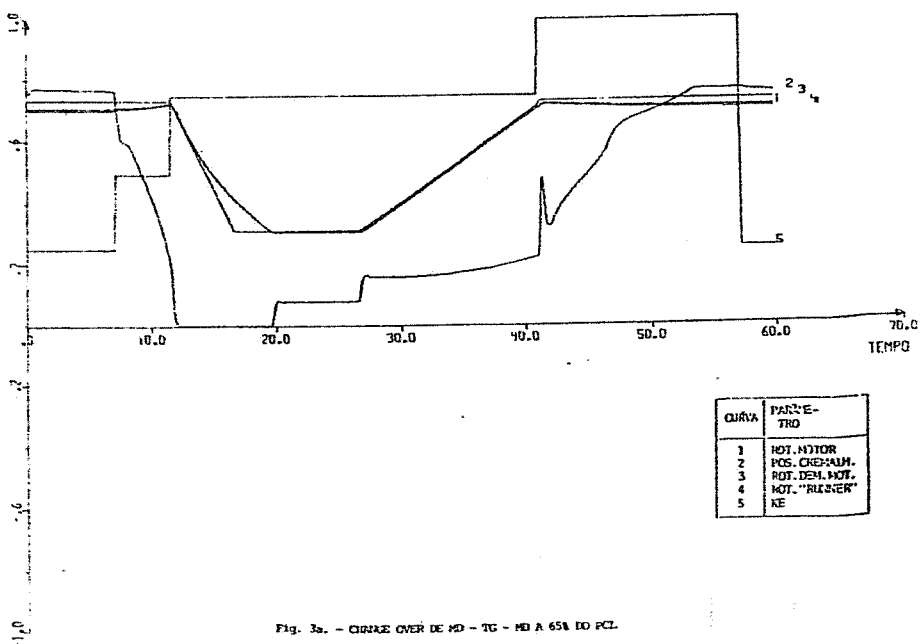
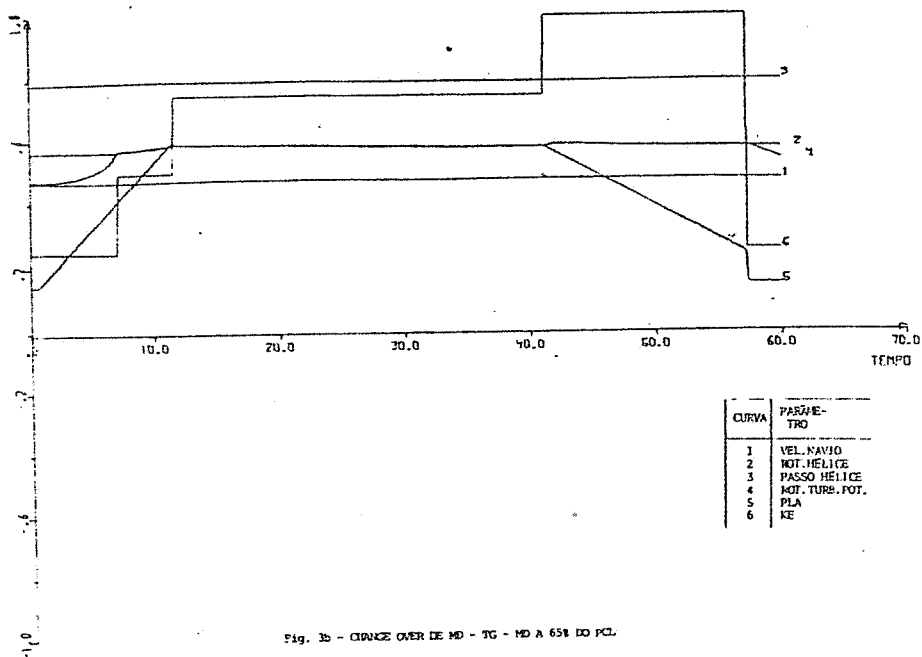
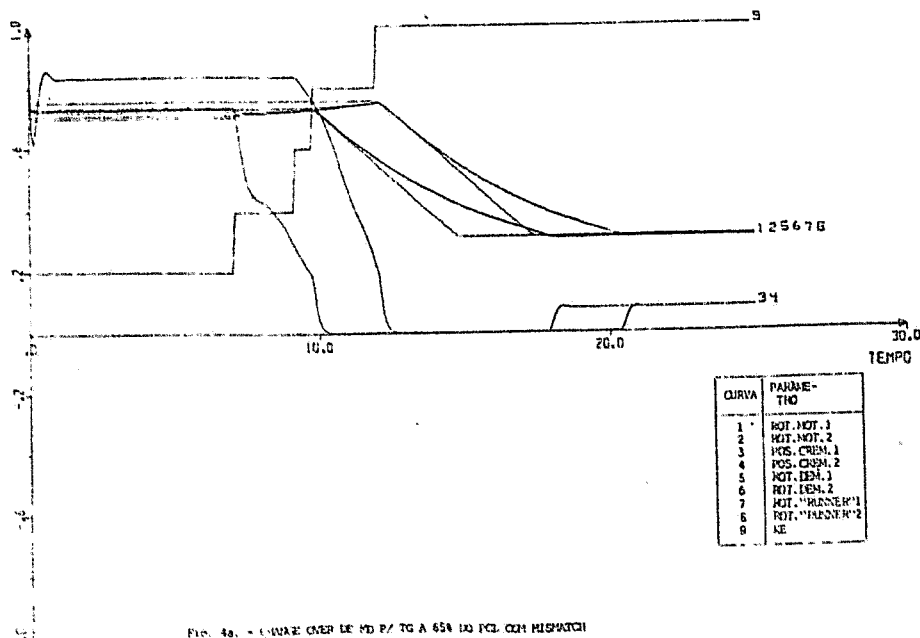


Fig. 3a. - CURVA OVER DE PD - TC - PD A 65% DO PCL

-16-



-17-



VAL

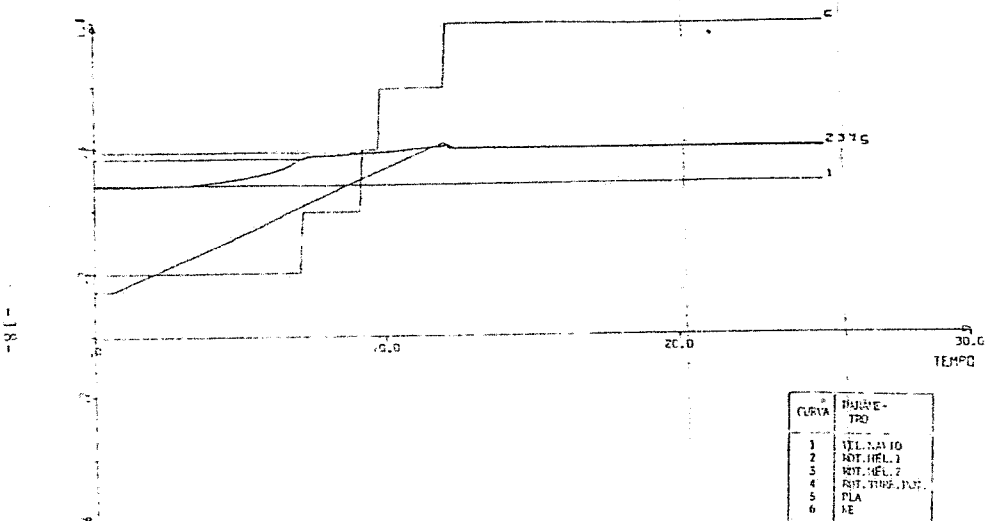


Fig. 4b - Gráfico de tempo versus velocidade (km/h) do PCL com motor Diesel.

1 é acionado por turbina e motor Diesel. Como consequência a rotação deste eixo aumenta e o governador de velocidade do motor atua diminuindo a injeção de combustível. Após alguns segundos neste estado ocorre o engate da embreagem ET2 ao eixo propulsor 2, iniciando-se a terceira etapa, identificada por KE = 0,6. Neste instante os dois eixos são acionados por motor Diesel e turbina a gás. Esta situação perdura até que a embreagem do motor 1 desacopla passando-se para a etapa 4, identificada por KE = 0,8. Nesta etapa o eixo 1 é acionado somente pela turbina a gás e o outro pela turbina e motor Diesel, embora já esteja diminuindo a injeção de combustível desta. A quinta etapa se inicia quando a embreagem do motor 2 desacopla e a turbina a gás assume toda a carga da propulsão, enquanto os dois motores Diesel são acelerados para a rotação de marcha lenta.

Foi observada novamente uma pequena oscilação na rotação dos eixos e na velocidade do navio. As oscilações foram de 5,5% para o eixo de rotação menor, de 3% para o outro eixo e de 2,4% para a velocidade do navio.

6. CONCLUSÕES

As manobras apresentadas neste trabalho constituem apenas um exemplo de aplicação do procedimento desenvolvido para simulação digital de manobras de "change-over". Os resultados obtidos são bastante satisfatórios indicando que este tipo de manobra pode ser simulada apenas em computador digital, dispensando o emprego de sistemas híbridos que oferecem, evidentemente, melhores resultados.

Convém ressaltar que a simulação efetuada baseou-se nos

valores seleccionados para os parâmetros do sistema de controle. Em um programa de projeto da instalação propulsora a simulação deve ser utilizada para determinar as leis de controle requeridas e os valores mais convenientes dos parâmetros.

