

3. Modelos de funcionamento transiente de motores a dois tempos.

O modo de operação de um motor é resultado da combinação de diversos parâmetros de desempenho: a potência efetiva, kW_e , o torque, Q_e , a velocidade do eixo de manivelas, N_e , a pressão de alimentação P_s , o consumo específico de combustível, B_e , o coeficiente de excesso de ar, α etc.

O modo de operação é denominado estável se os valores dos parâmetros de desempenho forem invariantes com o tempo. Contudo, é observado que, durante a operação do motor, todos os parâmetros variam em torno de um valor médio. Nesse caso, o valor médio observado é assumido como o parâmetro em condição estável, ou condição de equilíbrio.

São encontradas na literatura (Kyrtatos et al., 2001) funções de transferência elaboradas a partir das equações diferenciais que relacionam a energia gerada pelo motor àquela consumida pelo propulsor, com a hipótese de eixo rígido, isto é, sem considerar a torção da linha de eixos. Estas funções de transferência servirão de base para a análise da reação do motor estando o mesmo com o rendimento térmico reduzido. Para isto, o ganho termodinâmico será ajustado para um valor menor do que aquele utilizado originalmente no modelo, simulando assim um rendimento térmico menor.

3.1. Função de transferência dotada de regulador de velocidade PI(D).

A planta propulsora típica, constituída por um motor de dois tempos acoplado diretamente ao hélice, pode ser representada por um diagrama de blocos como encontrado na literatura (Kyrtatos et al., 2001), na forma apresentada na Figura 7, sendo descrito pela representação de um regulador de velocidade PI(D), (Proporcional, Integral e Derivativo), que aciona as bombas injetoras por intermédio da ação no índice de débito das mesmas (FPI). O sinal de FPI é multiplicado por uma função de transferência formada por uma

constante temporal do atraso de resposta do mecanismo das bombas injetoras, e da ignição (0,25 s). O valor constante de abertura de bombas injetoras, neste modelo ajustado em 111,6 traços, é somado à ação de resposta transiente dada pelo regulador. O sinal resultante da abertura fixa das bombas injetoras e do valor transiente acionado pelo regulador é multiplicado pelo ganho termodinâmico C (kN.m/índice), determinando o torque produzido pelo motor.

O valor do torque obtido, Q_e , é subtraído do valor do torque demandado pelo hélice, representado no diagrama por um termo estático, Q_L , e um termo transiente representado no diagrama de bloco por uma função senoidal.

O resultado da diferença entre os torques, produzido pelo motor, e demandado pelo hélice, é dividido pelo momento de inércia do conjunto, J (kg.m²), conforme a equação de aceleração do conjunto (Krutov, 1987) e (Xiros, 2002):

$$\dot{N}_e = \frac{Q_e - Q_L}{J}, \quad (3.1)$$

onde Q_e representa o torque produzido pelo motor e Q_L , o torque demandado pelo hélice, que pode ser determinado por (Kyrtatos et al., 2001):

$$Q_L = k_q N_e^2, \quad (3.2)$$

onde k_q é o coeficiente do hélice.

O resultado obtido pela equação 3.1 é integrado (1/s), e então reinjetado no regulador de velocidade, onde a intensidade de abertura do índice das bombas injetoras será função da diferença entre o sinal final de rotação do conjunto, e o valor de rotação desejado ou ajustado do motor.

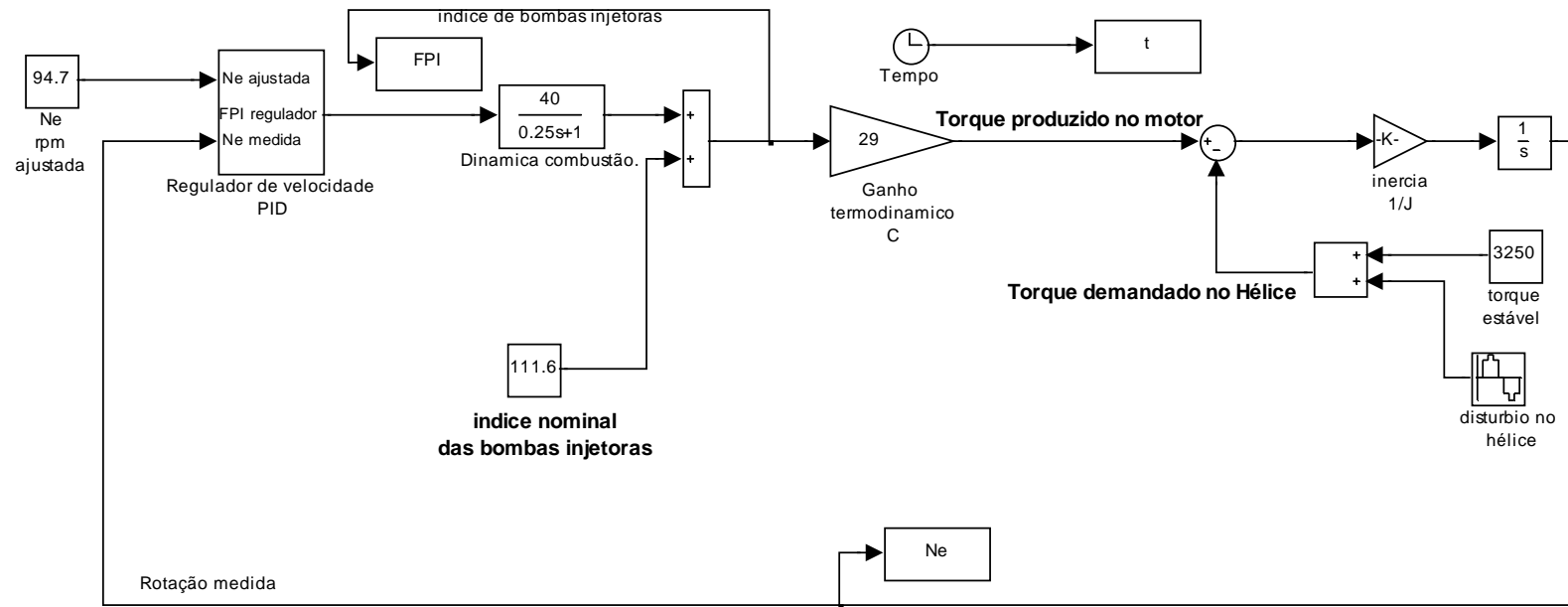


Figura 7-Diagrama de bloco do simulador do motor dotado de regulador de velocidade, e função de transferência.

A configuração do sub sistema do Regulador de Velocidade da Figura 7 está detalhado na Figura 8, onde as constantes de proporcionalidade K_p , integral K_i e derivativo K_d , determinadas na literatura (Kyrtatos et al., 2001), são utilizadas na ajustagem do regulador do modelo a ser testado.

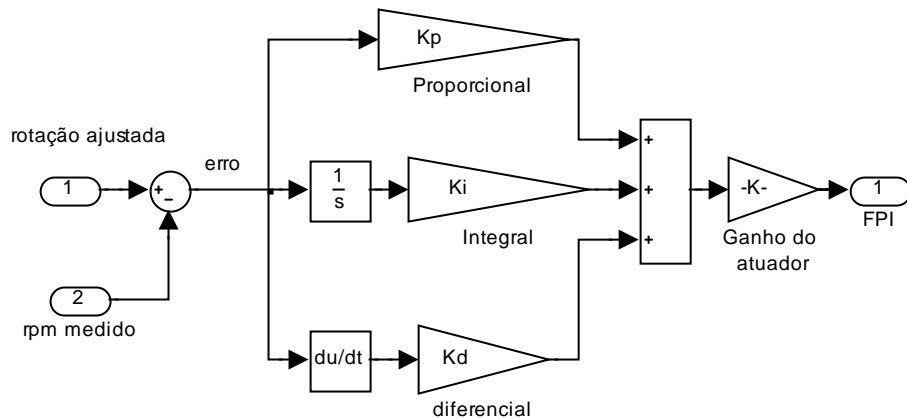


Figura 8-Diagrama de blocos do regulador PI(D) utilizado no controle do FPI.

Os resultados de simulação para a rotação do motor e para o índice das bombas injetoras, sob torque transiente de 10%, encontram-se representados na Figura 9. Para simular uma variação no torque, o coeficiente k_q adquire a forma de uma função senoidal com amplitude de 300 kN.m, e frequência de transiência de 0,628 rad/s.

A parte superior da Figura 9, ilustra a evolução do modelo como encontrado na literatura (Kyrtatos et al, 2001), enquanto a parte inferior da mesma figura, ilustra a evolução obtida pela reprodução do mesmo. Na parte superior da figura, que representa a curva como encontrado na literatura, a linha tracejada representa o histórico do índice das bombas calculado pelo modelo termodinâmico completo citado naquele trabalho. Note-se que a discrepância aparente entre o resultado da literatura e o cálculo é devido somente ao deslocamento da origem do eixo do tempo. A ação observada sobre o índice das bombas injetoras descrita na Figura 9, resulta na variação de 2 rpm, no motor conforme representado na Figura 10.

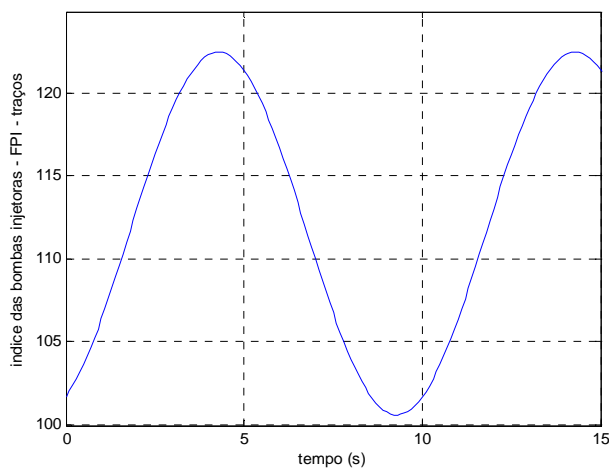
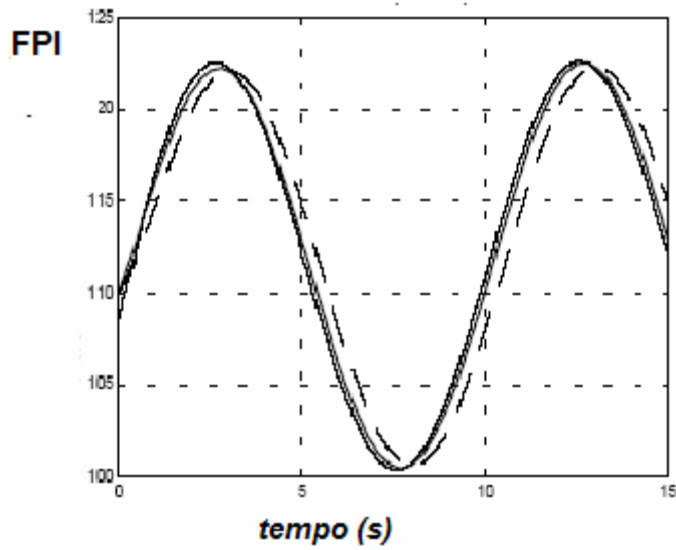


Figura 9—Histórico do índice das bombas injetoras determinado pelo modelo encontrado na literatura (Kyrtatos et al., 2001) (superior), e o resultado da implementação no modelo da Figura 7.

Sabe-se, da prática, que a redução do rendimento térmico exige que o regulador de velocidade aumente a abertura do índice das bombas injetoras, aumentando assim a quantidade de combustível debitado, para manter a mesma rotação, e torque produzido pelo motor. Em outras palavras, o índice das bombas aumenta, mas esta abertura adicional não é transformada em um aumento correspondente do torque, ou seja, há uma redução do ganho termodinâmico.

De modo a confirmar o que se observa nos motores reais, é aplicado uma redução do ganho termodinâmico no modelo, originalmente de 29 kN.m/%FPI, em 5,4,3,2,1 e 0.5 %, simulando a redução do rendimento térmico.

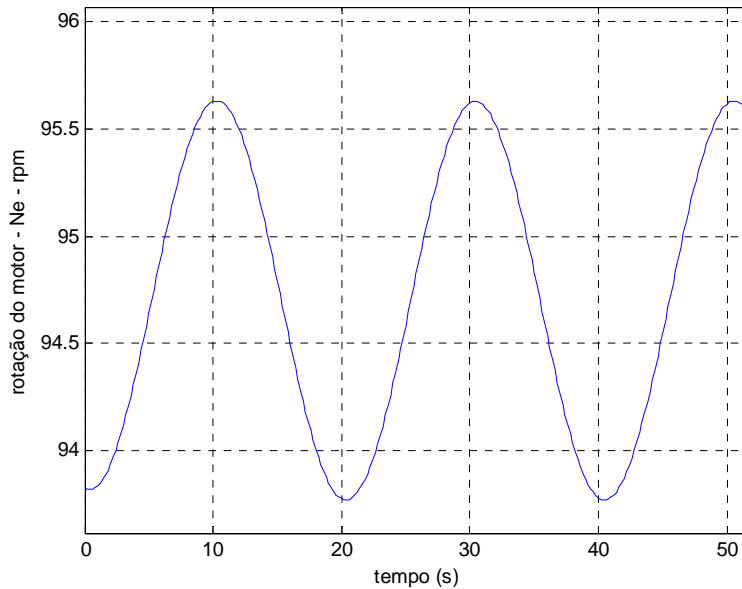


Figura 10—Evolução da rotação (Ne) da simulação do modelo descrito em Kyratatos et al., (2001).

Para permitir uma quantificação do aumento de FPI, a simulação foi efetuada sem a aplicação de torque transiente. A resposta do índice das bombas injetoras (FPI) à redução do ganho encontra-se representada na Figura 11. O valor original, de 111,6 traços de abertura das bombas injetoras, aumenta para 117,1 traços (incremento de 4,9%), no caso de uma redução de 5% de rendimento térmico.

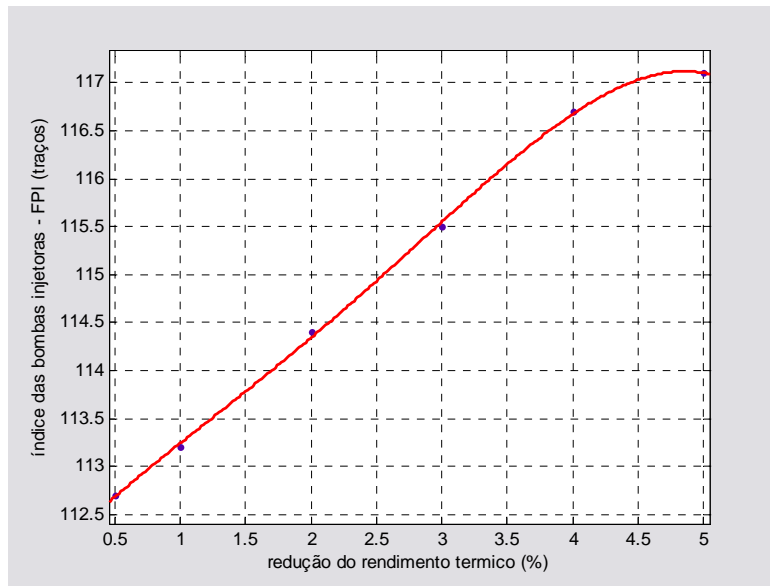


Figura 11-Evolução do índice das bombas injetoras sob a correspondente redução do rendimento térmico.

Durante a navegação exige-se do motor, além da resposta à variação de torque transiente devido a modificações da superfície do mar, reação ao aumento da resistência ao avanço ocasionado por correções de rumo.

Inserindo-se um sinal de função degrau ao torque transiente do hélice, de maneira a simular a mudança de rumo, pode-se determinar o tempo que o sinal de rotação do modelo necessita para voltar à rotação original estando o rendimento térmico (ganho termodinâmico) reduzido.

A resposta do modelo com o rendimento térmico original, e com o rendimento térmico degradado em 5%, para o índice das bombas injetoras, é mostrada na Figura 12, onde está representada a incidência de um sinal de torque transiente em $t=300$ s, simulando a mudança de rumo, sob um torque contínuo transiente de 200 kN.m com uma frequência de 0,628 rad/s.

A variação de 15 traços no índice de bombas injetoras ocorreu tanto para o modelo com o rendimento térmico original como para o rendimento térmico reduzido, porém com o rendimento térmico reduzido o índice inicia a reação a partir de um patamar mais elevado (110 traços) do que quando o modelo ajustado com o rendimento térmico correto (105 traços). Com o rendimento térmico reduzido, o regulador fornece mais combustível,

Note-se porém que a faixa de variação do FPI não ocorrerá em um motor real, visto que o mecanismo de atuação das bombas injetoras é dotado de um esbarro mecânico. Para que o mesmo não atue, a marcha (rotação) do navio terá que ser reduzida se o navio estiver sujeito a este tipo de mar.

A ação do regulador no índice das bombas injetoras (FPI) produz a estabilidade na rotação do motor, como apresentado na Figura 13. É verificado que não há variação significativa na evolução da resposta do modelo para o sinal de rotação nas duas situações, mas o tempo de recuperação dos resultados para o sinal de rotação com menor rendimento térmico (linha tracejada) é ligeiramente maior do que o sinal análogo para o modelo ajustado com o rendimento térmico original. Esses efeitos combinados permitem concluir que há uma maior geração de fuligem, uma vez que, como a vazão de massa de ar permanece constante, haverá uma redução da razão ar/combustível (Hendricks 1989 e Xiros 2002).

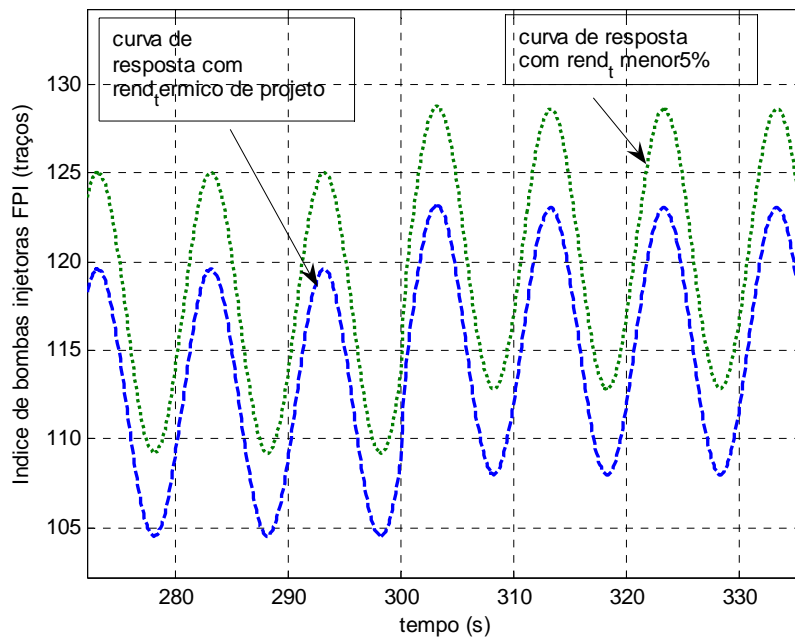


Figura 12—Evolução da reação do sistema a um sinal degrau de 100 kN.m, no instante de 300 s, e um sinal de torque transiente contínuo de 200 kN.m, frequência de 0,624 rad/s. O ganho termodinâmico de projeto foi reduzido em 5%..

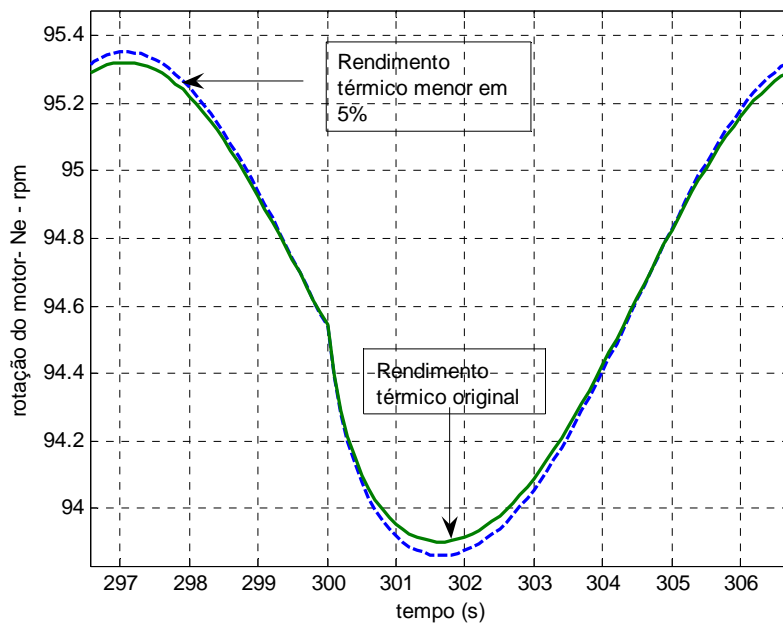


Figura 13—Evolução da resposta de rotação do modelo encontrado na literatura (Kyrtatos et al., 2001) nas condições de rendimento térmico original e reduzido em 5%.

Pode-se concluir que o modelo encontrado na literatura permite a análise qualitativa de um motor com rendimento térmico degradado a partir da redução do ganho termodinâmico, uma vez que:

- a) Compatível com que ocorre na prática, o índice de bombas injetoras e por conseguinte a vazão de massa de combustível *umenta* sob a operação de um motor sob menor rendimento térmico,
- b) O tempo de resposta aumenta à medida que o rendimento térmico é reduzido.
- c) Em funcionamento estável o aumento do índice das bombas injetoras varia (linearmente) com a redução do rendimento térmico.
- d) O conceito de ganho termodinâmico encontrado na literatura de controle (Kyrtatos et al., 2001) pode ser conceitualmente comparado ao rendimento térmico de um motor.

Pelo exposto, a análise do rendimento térmico a partir da utilização de funções de transferência pode ser efetuada, mas não permite a descrição das reações do turbo compressor e da razão de ar combustível. Para

estudar estes parâmetros, modelos algébricos devem ser utilizados, os quais serão desenvolvidos no próximo capítulo.