

1. Introdução

O comércio mundial utiliza o transporte marítimo em 90% das suas transações. Tal fato se deve ao baixo preço do transporte das mercadorias (frete), comparado a qualquer outro modal nessa atividade.

Com motores consumindo óleo pesado residual (bunker), os quais possuem rendimento térmico próximo de 50%, navios demandam, em média, 130 kJ/ton.km, menos energia do que a demandada pelos transportes terrestres, como o ferroviário (283 kJ/ton.km) e o rodoviário (1300 kJ/ton.km). As emissões de CO₂ correspondem a esse desempenho: 15,7, 22,0 e 119,5 g/ton.km respectivamente, para cada um desses modais, como exposto pelo Canadian Shipowners Association (2006).

Praticamente todos os navios da frota mercante mundial consomem bunker em motores de combustão interna de dois tempos, operando no ciclo diesel. Esses motores são turbo alimentados, com resfriamento do ar de alimentação, de injeção direta de combustível, e acoplados diretamente a um propulsor de passo fixo, que possui sua eficiência inversamente proporcional à sua velocidade de rotação. A baixa rotação favorece ao melhor desempenho do processo da lavagem dos produtos de combustão no cilindro pelo ar.

Essa configuração pode fornecer potências da ordem de 80~100 MW utilizando um só motor, o qual é caracterizado pela robustez e confiabilidade, característica essa favorecida por sua simplicidade conceitual.

Nos navios mercantes convencionais (petroleiros, contâneros e carga geral), motores de quatro tempos, também de ciclo diesel e consumindo óleo residual, trabalham com velocidade de rotação constante, e acionam geradores de energia elétrica.

Nas máquinas de combustão interna, o rendimento térmico, definido como a capacidade de transformar em trabalho mecânico a energia química do combustível, diminui quando a razão de ar/combustível de operação é diferente daquela para a qual o motor foi projetado. Assim, não conformidades tanto do lado do ar, como pelo lado do combustível, podem provocar a redução do rendimento térmico, não permitindo ao motor gerar a potência necessária para atender a demanda de torque solicitado pelo hélice, mantendo o mesmo

consumo de combustível. Como resposta à redução de rendimento térmico, o controle do motor (regulador de velocidade) aumenta a vazão mássica de combustível (ação de controle), procurando manter a rotação do motor (variável controlada) sob a mesma demanda de carga. Esse tipo de reação acarreta aumento do consumo específico de combustível e, também, da emissão de fuligem.

Nos motores marítimos, onde a duração do regime de funcionamento contínuo pode chegar a mais de um mês, a geração de fuligem adicional interfere na manutenção do motor. Por exemplo, o intervalo entre a abertura dos cilindros, que é normalmente de 12000 horas de funcionamento, diminui com o aumento do consumo específico e das emissões de particulado, podendo chegar a 2000 horas apenas. Esta redução prejudica a viabilidade econômica do modal, uma vez que o navio terá que parar, ficando fora de operação para abrir cilindros para descarbonização. Note-se que, por razões de segurança, não é permitido aos navios ficarem sem máquina pronta a operar quando atracado em portos ou terminais, tornando-se necessário sua desatracação, perdendo horas ou dias de remuneração contratual.

Além do aspecto comercial, dependendo do tipo de fuligem emitido, podem ocorrer desdobramentos mecânicos como avarias em turbo compressores (Barreto, 2004), e economizadores (MAN, 2004).

Em contrapartida ao nível do rendimento térmico obtido pelos motores de dois tempos operando com resíduo, a quantidade de material particulado emitido pelos mesmos exige ações para sua redução. Valores de emissões de material particulado para esses motores estão na ordem de 1,25 a 1,64 g/kW.h, enquanto em caminhões modernos consumindo óleo diesel a emissão correlata é 0,02 g/kW.h, (Moldanová et al., 2009 e Agrawal et al., 2008).

Portanto fatores complexos devem ser resolvidos no transporte marítimo: (i) manter o baixo preço do combustível marítimo para que o modal continue praticando fretes exequíveis, (ii) reduzir as emissões de material particulado, e (iii) atendimento à legislação quanto a consumir óleos residuais com teores de enxofre reduzido, como estabelecido pelo Marpol 73/78 (2005). Este último aspecto ganha hoje contornos ainda mais complexos com a constatação que combustíveis com baixo teor de enxofre apresentam desempenho de ignição e duração de combustão indesejáveis, a ponto de alterar o consumo específico e a confiabilidade dos motores, como sugerido por Takasaki et al. (2004), o que conduziria a normatização do teor de enxofre a um paradigma tecnológico.

Os motores marítimos propulsores operam em tempo integral sob torque transiente, seja devido ao estado do mar em si, seja pela ação do leme visando manter o rumo comandado pelo piloto automático. Em condições de potência estáveis a geração de fuligem e cinzas mantêm-se aproximadamente a mesma independente da carga operada (Agrawal et al., 2008), mas são poucos os estudos de emissões sob carga transiente.

Analisar como um rendimento térmico degradado influencia a resposta do motor ao torque transiente é o objetivo deste trabalho.

Para promover a avaliação do rendimento térmico do motor, é necessário conhecer suas condições reais de demanda de potência, pois mesmo operando de modo estável, os motores marítimos turbo alimentados por serem diretamente acoplados aos hélices, possuem seu tempo de resposta dependentes da solicitação de potência controlado pela inércia do hélice e do rotor do turbo alimentador. A resposta transiente do turbo alimentador pode não acompanhar, em alguns regimes de demanda de potência, a vazão de combustível injetada quando ocorre solicitação de aumento de torque. Isto ocorre pois o tempo de resposta do turbo aumenta na razão inversa da potência fornecida. Desse modo, quanto menor a carga operada (em relação à carga para a qual o motor foi especificado), maior será o tempo de resposta do turbo à variação da mesma.

Se a resposta do turbo não acompanha, ou acompanha com certo atraso a variação de carga, ocorre alteração da razão ar/combustível em relação a seu valor de projeto, provocando assim a queda momentânea do rendimento térmico a ser quantificada, e a geração transitória de fuligem.

A metodologia para a construção da análise do rendimento térmico em motores propulsores de dois tempos sob regime transiente, será elaborada a partir da aplicação de modelos existentes na literatura dotados de parâmetros de um motor real. Deve-se ressaltar que nenhum dos modelos a serem apresentados desenvolvem a análise do rendimento térmico originalmente, desse modo, sub modelos são implementados para promover esta análise nos modelos originais.

No Capítulo 2, será introduzida a modelagem clássica de ciclos teóricos diesel descrito em (Heywood, 1988), a qual permite uma análise do rendimento térmico para motores operando em regime constante, ou estável. Entende-se como estado de funcionamento estável, aquele estado onde os parâmetros de funcionamento do motor são invariantes com o tempo ou, ainda, variando em torno de um valor específico, (Krutov, 1987). Nesse tipo de modelagem, é elaborado o conceito de ganho termodinâmico, que vem a ser uma constante

que permite determinar o torque do motor a partir de seu produto com o índice das bombas injetoras. O ciclo teórico para motores de dois tempos turbo alimentados, e as equações da eficiência isentrópica do turbo e do compressor centrífugo também são apresentados neste capítulo, assim como. as relações entre o motor propulsor, o hélice e o casco do navio.

No capítulo 3 são descritos os modelos de função de transferência completa encontrados na literatura (Xiros, 2002, Kyrtatos et al., 2001), onde as constantes temporais de atraso para o turbo compressor, da resposta do sistema de injeção, e o ganho termodinâmico são incorporados. Quando esses modelos são acoplados a sub modelos que simulam o torque transiente incidente e a um sub modelo de regulador de velocidade, a resposta da simulação computacional do modelo como planta propulsora pode ser estudada. No Apêndice I, coeficientes calculados a partir dos dados de um motor real de 17 MW, que opera no navio DPST (*Dynamic Position Shuttle Tank*) Ataulfo Alves, são utilizados nestes modelos, e seus resultados apresentados na seção 3.2. Como, na prática, observa-se que a reação do motor ao operar com rendimento térmico reduzido é aumentar o consumo, a redução do ganho termodinâmico em funções de transferência simulará a redução do rendimento térmico o que permitirá a observação da reação do motor à incidência de cargas transientes.

No capítulo 4 é introduzida a abordagem termodinâmica tradicional apresentada por Xiros (2002), que será utilizada com parâmetros de desempenho do motor real de 17 MW do navio DPST Ataulfo Alves obtidos durante os testes de aceitação. Para implementar a análise do rendimento térmico durante sua aceleração, um sub modelo é desenvolvido e incorporado ao modelo original da literatura. Neste modelo as relações termodinâmicas são utilizadas para calcular as acelerações do turbo compressor e do motor, e os resultados correspondentes também são apresentados neste capítulo.

Os sub modelos de torque transitório e do regulador de velocidade, desenvolvidos nos modelos de função de transferência, no capítulo 3, são acoplados a um modelo próprio de valor médio que utiliza relações termodinâmicas, permitindo a análise do rendimento térmico sob aceleração, e sob torque transiente do motor real de 17 MW.

Por fim, dados de desempenho obtidos a bordo por um sistema de aquisição de dados são utilizados para ajustar a frequência de incidência das ondas e da ação do leme no modelo elaborado. Os sub modelos para torque transiente são ajustados com a frequência encontrada, e sob essa demanda o rendimento térmico pode ser observado a partir de relações termodinâmicas. Os

resultados experimentais são apresentados no Capítulo 5, e a comparação entre os resultados experimentais e de modelagem no Capítulo 6.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões e perspectivas do trabalho.