

4. Fundamentação Teórica

4.1. *Fatores de emissão*

Conforme definição da EPA, fatores de emissão (FE) são valores representativos que estimam a quantidade de um determinado poluente liberado em função de uma atividade associada à liberação desse poluente.

Os fatores de emissão também podem ser expressos como uma taxa de fluxo de massa (kg/h) ou como a massa de poluente emitido pela quantidade de combustível queimado (kg/t) (COOPER, 2002). Porém, a unidade mais precisa (COOPER, 2002), e que será adotada nesse trabalho, é o Fator de Emissão Específico (g/kW.h), que expressa a massa de poluente emitido em termos de potência disponível e tempo de trabalho.

Esses fatores são determinados através de experimentos onde são medidas as quantidades emitidas de cada poluente em função da energia demandada, isto é, potência despendida e tempo decorrido. Através da média desses dados, determina-se então um fator de emissão para um dado poluente, que será representativo, no longo prazo, da média de emissão do equipamento avaliado (EPA, 2009a)

Diversos parâmetros podem influenciar nos valores dos FE, sendo que os principais são: finalidade do motor, velocidade de operação (ou tipo de motor, conforme será explicado mais adiante), tipo de combustível e a porcentagem da capacidade utilizada do motor (CORBETT E KOEHLER, 2003).

4.2. Cálculo das emissões de poluentes

O cálculo de inventário de emissões de poluentes, de uma forma geral, é orientado por uma equação bem simples. Os dados utilizados são, geralmente, o consumo de energia de uma determinada atividade e os fatores de emissão (FE), os quais fazem a correlação entre a quantidade de energia consumida num espaço de tempo (ou seja, o trabalho realizado) e o montante de poluentes emitidos nesse período. De acordo com o trabalho do IPCC (2006), a equação básica que descreve a emissão de um determinado poluente é dada por:

$$Emissão_x = \sum (Energia\ Consum. \times Fator\ de\ Emissão_x)$$

onde “x” é um determinado poluente.

Portanto, no caso da indústria naval, isso significa que nossos dados de interesse serão as potências dos motores principais e auxiliares das embarcações e seus respectivos tempos de operação, para a obtenção da energia demandada. Já para saber os FE adequados, também será necessário determinar o tipo de combustível de cada um dos motores e o regime de operação (se está em cruzeiro, no porto ou em manobras).

Dessa forma, a equação representativa da quantidade de um dado poluente emitida por um navio fica:

$$Emissão_x = \sum_{categoria\ i=1}^n (Potência_a \times Tempo\ Operação_a \times Fator\ de\ Emissão_{xabcd})$$

onde “x” é um determinado poluente, “a” é a aplicação do motor (principal ou auxiliar), “b” é o tipo de combustível consumido, “c” é o tipo do motor (baixa, média ou alta velocidade), “d” é o regime de operação do navio (em cruzeiro, em manobras ou no porto) e “i” representa cada uma das “n” categorias que serão criadas para uma melhor precisão dos resultados.

Observa-se que a equação em questão é análoga à utilizada em outros trabalhos, como o dos autores Corbett e Koehler (2003) e o relatório do IPCC (2006).

Podemos perceber na equação a ausência de termos como o tamanho do navio ou a independência do fator de emissão ao tamanho do motor. Segundo Cooper (2002), inicialmente suspeitava-se que os fatores de emissão poderiam variar em função da potência de um motor também dentro do mesmo tipo de motor e categoria de combustível, mas após conduzir estudos onde classificou os dados de poluentes emitidos em três categorias distintas de motores (pequenos < 1500 kW, médios 1500 – 4000 kW, grandes > 4000 kW), verificou-se uma dispersão considerável dos dados, ficando impossível determinar alguma correlação significativa. Podemos assumir, então, que os fatores de emissão dependem apenas do tipo de motor e combustível utilizado, não dependendo do tamanho do motor.

4.3. Tipos de motores e combustíveis

Os tipos de motores, propulsores e máquinas motrizes de embarcações são comumente subdivididos em cinco categorias: motores de baixa velocidade (slow speed diesel – SSD), média velocidade (medium speed diesel – MSD), alta velocidade⁹ (high speed diesel – HSD), turbina a gás (gás turbine – GT) e turbina a vapor (steam turbine – ST).

As aplicações ou finalidades de um motor em um navio são, de uma forma geral, como motor principal ou motor auxiliar. Os motores principais compõem primariamente o sistema de propulsão. Também podem ser acoplados à geradores (geradores de eixo), fornecendo eletricidade durante navegação em alto mar e, ainda, podem ajudar a gerar vapor através de trocadores de calor acoplados ao seu exaustor. Alguns

⁹ Cooper (2002) define SSD aqueles motores com velocidade até 300 rpm, MSD com velocidades entre 300 a 1000 rpm e HSD aqueles com velocidade acima de 1000 rpm.

petroleiros também utilizam os motores principais em operações de carregamento e descarregamento de seus tanques, mas esses casos são exceções (COOPER, 2002).

Já os motores auxiliares são responsáveis fundamentalmente pela geração de energia elétrica a bordo para fins como iluminação, ventilação, funcionamento de guindastes, bombas, dentre outras funções (COOPER, 2002). Também podem ser responsáveis pelo funcionamento dos thrusters, se a embarcação dispuser de sistema de posicionamento dinâmico, usualmente chamado de DP¹⁰.

Os combustíveis mais comumente utilizados pelos tipos de embarcações que serão estudadas nessa pesquisa são, em ordem crescente de pureza e de viscosidade, o Diesel Residual Pesado (RO – residual oil – ou HFO – heavy fuel oil), Diesel Destilado Leve (MGO – marine gas oil) e o Diesel Marítimo (MDO – marine diesel oil), o qual é uma mistura de MGO com uma pequena quantidade de RO. Entretanto, devido a restrições de normas e especificações nacionais, o MDO não é comercializado no Brasil.

A especificação técnica considerada nesse trabalho para os combustíveis mencionados acima são:

Combustível	Diesel Residual Pesado (RO)	Diesel Marítimo (MDO)	Diesel Destilado Leve (MGO)
Densidade a 15°C	0,965 kg/m ³	0,900 kg/m ³	0,852 kg/m ³
Viscosidade a 50°C	204 mm ² /s	19,3 mm ² /s	3,1 mm ² /s
Teor de carbono	86,61 %	86,68 %	86,74 %
Teor de enxofre	1,91 %	0,93 %	0,23 %
Teor de oxigênio	< 0,1 %	< 0,1 %	< 0,1 %

¹⁰ DP é a abreviatura comumente utilizada no meio naval para “Dynamic Positioning”, que em português significa Posicionamento Dinâmico. São navios que conseguem manter uma posição fixa no mar sem ancorar, utilizando motores (usualmente chamados de thrusters) elétricos ou a diesel, os quais são partes da planta auxiliar de um navio

Teor de Hidrogênio	11,43 %	12,62 %	13,23 %
Teor de Nitrogênio	0,33 %	< 0,1 %	< 0,1 %

Tabela 1 - Especificação técnicas dos combustíveis considerados para os fatores de emissão.

Esses valores se mostram compatíveis com o diesel marítimo utilizado no Brasil, uma vez que o teor máximo utilizado pela Petrobras é de 1% (PETROBRAS, 2011). Já o óleo Bunker, por se tratar de um óleo residual e, portanto, menos processado e puro, contém naturalmente teor de enxofre mais elevado.

4.4. Outros equipamentos fonte de emissão

Alguns outros equipamentos a bordo de um navio, como boilers, geradores de emergência e incineradores, também são considerados fontes emissoras de poluentes. Entretanto, a proporção dessas emissões, se comparado com os motores principais e auxiliares, são muito pequenas e podem ser desprezadas (COOPER, 2002).

Outra significativa fonte de poluição provém da evaporação de compostos orgânicos voláteis (VOC) que ocorre durante o carregamento e descarregamento dos tanques de petroleiros (COOPER, 2002), tanto nos portos quanto em operações de offloading¹¹ em alto mar, como, por exemplo, formaldeído (CH₂O) e etileno (C₂H₄). Essa e outras fontes de emissão que não provém da queima de combustível são chamadas de emissões fugitivas. Entretanto, esses tipos de emissões não estão no escopo desse trabalho e serão desconsideradas. A título de informação, a quantidade das emissões fugitivas no de gases de efeito estufa pode ser considerada significativa. Por exemplo, no setor de transporte, essas emissões chegam a 50.740 t no ano de 2008, enquanto que o total nacional (E&P, Refino e Transporte) chega a 13.042.379 (BRASIL,

¹¹ Offloading é a operação de transferência de petróleo de uma plataforma (geralmente um FPSO) para um navio aliviador.

2010a). Para maiores informações a respeito de emissões fugitivas, o relatório “Emissões Fugitivas de Gases de Efeito Estufa na Indústria do Petróleo e Gás Natural” (BRASIL, 2010a) poderá ser consultado.

4.5. Principais poluentes emitidos

Os poluentes emitidos podem ser chamados de primários ou secundários. Os primários são aqueles emitidos diretamente no meio ambiente, enquanto os secundários são aqueles originados a partir de alguma reação química dos poluentes primários. No caso desse estudo, estaremos analisando os poluentes primários, ou seja, aqueles que são lançados à atmosfera diretamente pela exaustão dos navios.

Motores utilizados em navios, em geral SSD ou MSD, têm uma eficiência muito alta na combustão, convertendo praticamente todo o carbono do combustível, e também o enxofre neste contido, em CO_2 e SO_2 . Enquanto esses elementos dependem essencialmente do tipo de combustível queimado, a quantidade de NO_x depende basicamente do tipo de motor, pois motores de baixa velocidade trabalham um maior período em altas temperaturas, o que aumenta a eficiência da combustão, mas também aumenta a reação de fixação do oxigênio e nitrogênio do ar em NO_x (COOPER, 2002).

Outros poluentes também são emitidos na queima, como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e material particulado (PM).

Apesar do CO ser um agente de efeito estufa muito mais potente que o CO_2 , a quantidade de CO emitida por navios pode ser assumida como insignificante (**Figura 6**) e será desconsiderada nesse trabalho. A razão disso é que o CO é resultado de uma queima incompleta do combustível, o que é quase nulo, justamente devido à alta eficiência da combustão desses motores.

As emissões de hidrocarbonetos (HC) podem assumir a forma de gases, micro partículas ou até mesmo pequenas gotas e são emitidos pelos gases da exaustão, devido à queima incompleta de combustível nos

motores das embarcações (EPA, 2010c). Também podem ser proveniente da evaporação do combustível dos tanques do navio, por exemplo.

As emissões de metano (CH_4) são comumente separadas e determinadas a parte em inventários de emissão, uma vez que esse gás é um forte agente do efeito estufa. Entretanto, a quantidade de CH_4 presente nos combustíveis marítimos é quase insignificante e, assim, as emissões de CH_4 proveniente de embarcações movidas a RO, MDO e MGO são praticamente nulas. Segundo RIO DE JANEIRO (2007), as emissões de CH_4 proveniente de óleo diesel marítimo em todo o estado do Rio de Janeiro, no ano de 2005, correspondem a 60 t, enquanto o total geral emitido no estado do RJ foi de 427.900 t, no mesmo período. Portanto, não se faz necessário contabilizar em separado as emissões de metano proveniente da queima de combustível em navios.

Já as emissões de PM consistem basicamente em matérias sólidas ou líquidas muito finas¹², que são expelidas em suspensão, juntamente com os gases da exaustão. No caso de navios, constituem-se geralmente de partículas de combustível não queimado, partículas de óleo lubrificante, fuligem e sulfato (SO_4). São comumente classificadas também de acordo com o diâmetro. Por exemplo, PM_{10} significa partículas com diâmetro inferior a 10 micrometros (μm) e $\text{PM}_{2,5}$ representa partículas com diâmetro menos que 2,5 μm (EPA, 2007).

Ainda há alguns poluentes secundários, que são originados posteriormente, como o ozônio (O_3), por exemplo, também chamado de “ozônio troposférico”, que é formado a partir de poluentes precursores como NO_x e VOCs, em reação com a luz natural (EEA, 2009; EPA, 2007).

Podemos citar ainda outros tipos de poluição proveniente de navios, como a poluição do mar causada por óleos, esgotos e águas de serviço e de lastro do navio. Porém, esses itens fogem ao escopo da presente dissertação, que busca quantificar apenas os principais poluentes atmosféricos.

¹² Seus diâmetros podem variar desde diâmetros inferiores a 100 ηm (ultrafinas) até mais de 10 μm (grandes). (EPA, 2007).

4.6. Gases de efeito estufa emitidos

Dentre o levantamento feito acima dos principais gases e poluentes emitidos por navios, apenas o CO₂, o CO e o CH₄ são agentes do efeito estufa. Entretanto, como mencionado, as quantidades emitidas de CH₄ e o CO são insignificantes, ficando o CO₂, portanto, como o único gás de efeito estufa a ser considerado nessa pesquisa.

4.7. Efeitos nocivos dos poluentes

Como já mencionado anteriormente, os poluentes emitidos podem ser prejudiciais ao seres humanos e também à atmosfera.

4.7.1. Efeitos ao ser humano

O aumento dos níveis de SO₂ e O₃ pode resultar num acréscimo dos casos de pneumonia e gripe na população idosa. No caso do SO₂, este também está associado a doenças cardiovasculares (ESTEVES et al, 2007).

Esteves et al relatam que o material particulado (PM) e o O₃ estão associados a casos de doenças respiratórias e redução da capacidade de ventilação nos pulmões, uma vez que atingem as vias aéreas mais distas, onde são feitas as trocas de gases nos pulmões. Também podem provocar tosse e dor retroesternal ao inspirar. De acordo com Ribeiro e Assunção (2002), os PM também são responsáveis por casos de asma e câncer. A EPA (2007) também relaciona o O₃ a casos de asma e a inflamações dos tecidos pulmonares e o PM também a casos de doenças cardiopulmonares, cardiovasculares, partos prematuros, bebês de baixo peso e mortalidades infantil e neonatal.

Ainda segundo Esteves et al (2007), o CO está relacionado a intoxicações, com efeitos principalmente sobre o coração. Já os NO_x são agentes oxidantes que atingem as porções mais periféricas do pulmão, devido sua baixa solubilidade, e podem causar intoxicações.

Ribeiro e Assunção (2002) também constatam que em casos de concentração muito elevada de SO₂, pode ocorrer edema pulmonar e até mesmo a morte. Em pessoas asmáticas e ou que sofrem doenças pulmonares obstrutivas, o NO_x é bastante prejudicial. Ainda segundo os autores, o O₃ pode causar também forte irritação nos olhos e na pele, além de inflamação nos pulmões. Já o CO, em pacientes com doenças isquêmicas do coração, resulta numa menor tolerância a exercícios físicos. Também podem ocasionar dores de cabeça, náuseas, tonturas, alterar a percepção visual, diminuir a capacidade de realizar tarefas e, em mulheres grávidas, pode prejudicar o desenvolvimento do feto ou, até mesmo, levá-lo à morte.

As emissões de HC contêm componentes tóxicos que podem causar câncer e diversos outros danos à saúde, como problemas pulmonares e respiratórios (após reagirem e formar O₃) (EPA, 2010c).

Por sua vez, os VOCs podem trazer irritações na membrana mucosa, conjuntivite e sensibilidade e irritação na pele, além de lesões no esôfago, traqueia, trato gastro-intestinal, vômitos, perda de consciência e desmaios, quando em grandes quantidades (EPA, 2009b).

4.7.2. Efeitos ao meio ambiente

Algumas das preocupações com danos ao meio ambiente causados por emissão de poluentes são as chuvas ácidas. A emissão de SO₂, na presença de um catalisador, como o dióxido de nitrogênio (NO₂), e juntamente com o vapor d'água presente no ar, pode formar o ácido sulfúrico (H₂SO₄), originando o que chamamos de chuva ácida. Os NO_x também são responsáveis por chuvas ácidas, pois reagem formando o ácido nítrico (EPA, 2010a).

Essas chuvas ácidas, além de serem agressivas ao ser humano, podendo resultar em câncer, diarreia e até mesmo mal de Alzheimer, segundo alguns estudos, também contaminam plantações, lençóis freáticos, alimentos, agredem a vegetação e pode elevar o pH de rios, lagos e oceanos, ameaçando espécies marinhas (EPA, 2010b). Além disso, também podem danificar estruturas metálicas e até mesmo monumentos históricos feitos em mármore ou calcário, acelerando o processo de corrosão, além de poderem causar nevoeiros ácidos (EPA, 2010b).



Figura 14 - Exemplos de danos causados por chuva ácida em estátuas e vegetações (WIKIPEDIA, 2010).

Segundo Salgado (2003), o SO_2 acelera o processo de corrosão de aços e até mesmo em pinturas, podendo ser também um dos responsáveis pela degradação de pedras como calcário e mármore. De acordo com o autor, estudos mostram que edificações contendo material calcário também são afetadas pelo SO_2 , formando uma crosta negra, bem como a argamassa.

O CO_2 também se torna um dos responsáveis pela acidificação dos mares e oceanos. Toda água é levemente ácida por natureza (pH em torno de 5,2), devido à concentração natural de CO_2 . Porém, a elevação dessa concentração de CO_2 também resulta numa maior dissolução desse gás nos oceanos, afetando e podendo levar algumas espécies marinhas até mesmo à extinção.

Outra importante consequência ao meio ambiente é o aquecimento global, provocado pelos gases de Efeito Estufa. Os principais gases responsáveis por esse fenômeno são: dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), perfluorcarbonetos (PFC's), hidrofluorcarbonetos (HFC's), clorofluorcarbonetos (CFC's) e hexafluoretos de enxofre (SF_6). Esses gases se acumulam na atmosfera, impedindo que a radiação infravermelha, recebida pela Terra, retorne para o espaço. Outros gases ajudam a degradar a camada de ozônio, que filtra boa parte da radiação infravermelha que chega ao planeta, potencializando o efeito estufa. Dentre esses gases, os mais relevantes são os CFC, CO_2 , NO (óxido nítrico) e NO_2 (óxido nitroso) (WWF, 2010). As principais consequências diretas do aquecimento global são o aumento da temperatura média mundial resultando em alterações e intensificações de fenômenos climáticos como o El Niño, tornados, tempestades, chuvas torrenciais, alagamentos e o derretimento das calotas polares.

A elevação do nível do mar já tem surtido efeitos em diversas ilhas cuja altitude máxima é de poucos metros, tais como: Tuvalu, Caroline, Birnie, Kiritimati, grande parte do arquipélago das Maldivas, dentre outras, onde parte de suas terras estão sendo tomadas pela acelerada elevação do nível dos oceanos, causando prejuízos humanitários, ambientais e levantando questões éticas entre as nações e ilhas atingidas e os países desenvolvidos, os quais seriam os principais responsáveis (BROWN, 2010; UNEP, 2010). Além da ameaça de inundação de países baixos e a destruição de parte de cidades nobres como, por exemplo, Nova Iorque, Massachusetts e Rio de Janeiro, dentre tantas outras, imensas plantações situadas em planícies costeiras e próximas ao nível do mar estão ameaçadas de alagamento, sendo Bangladesh um desse exemplo (BROWN, 2010; GREENPEACE, 2007). Segundo estimativas do Greenpeace, aproximadamente 634 milhões de pessoas estariam em risco devido à elevação do nível dos oceanos (GREENPEACE, 2007).

Outro estudo comprova a elevação da altura média das ondas no Oceano Pacífico, de 7 m (em 1990) para 14 m, o que também põe em

risco populações de regiões costeiras (ALBUQUERQUE, 2010). Segundo este estudo, dentre as possíveis causas para esse fenômeno estão: a mudança nas rotas das tempestades e a maior potência dos ventos na região, o que já vem a ser conseqüência do aquecimento global. Outros efeitos indiretos do aquecimento global apontados por estudos recentes são a liberação de milhões de toneladas de CO anualmente devido ao derretimento e conseqüente desprendimento de CO das geleiras do Ártico (PENEIRA..., 2010) e também a alteração nos padrões dos furacões, que tendem a ser cada vez mais raros, porém com maior intensidade e poder de destruição (GRANDELLE, 2010).

A formação de ozônio troposférico (O_3) pela reação do NO_x e VOCs com a luz também traz conseqüências à natureza como, por exemplo, danos às vegetações e ecossistemas. As folhas absorvem O_3 , que pode se difundir para células de outras regiões da planta, inibindo ou danificando componentes e funções celulares, geralmente manifestadas visivelmente através de pontos de necrose, envelhecimento precoce e redução da fotossíntese. E, uma vez que as plantas são o centro da cadeia alimentar de muitos ecossistemas, esses também acabam prejudicados indiretamente pelo O_3 (EPA, 2007).

A deposição de PM sobre as folhas das plantas inibe a fotossíntese, induzindo à queda prematura das folhas, causando danos e reduzindo a produtividade da planta. Alguns PMs também afetam quimicamente a vegetação, aumentando a acidez e trazendo lesões ao vegetal (SALGADO, 2003). Além disso, PMs também reduzem a visibilidade, o que afeta o aproveitamento de atividades diárias e da luz do sol, além de se depositarem em ecossistemas aquáticos e terrestres, podendo contaminar a água, as espécies marinhas, o solo e as plantas (EPA, 2007). Por fim, segundo Salgado (2003), também aumentam a absorção de radiação solar na atmosfera