



FAULT TREE ANALYSIS FOR NON STOICHIOMETRIC COMBUSTION OF DIESEL GAS ENGINE INSTRUCTIONS

Adenilson Cristiano Belizário

Universidade de São Paulo
acbelizario@usp.br

Gilberto Francisco Martha de Souza

Universidade de São Paulo
gfmsoouza@usp.br

Abstract. *In order to reduce pollutants emissions from internal combustion engines with compression blend ignition, designed to operate as the Diesel cycle, it has been developed in recent years devices to operate as the Diesel cycle, with the addition of new fuels, which in addition to reducing pollutant could lower the cost of operation, due to the possibility of use of some fuels with greater availability. In this case it is used only the diesel oil as the pilot flame, which is responsible for the ignition of the second fuel, the natural gas. Many publications discuss the environmental and the economic gain the use of natural gas as fuel application, however nothing is said about the change of reliability indexes and the appearance of new failure modes in the engine. In This study through system reliability analysis tool called Fault tree analysis, a failure mode that are inserted into the internal combustion engine when it comes to operate as dual fuel, the non stoichiometric combustion of this engine is analysed. For that analyses it is necessary to split the engine into subsystems showing its functional tree and integrating diesel gas kit in this system. New failure mode appears with greater occur and severity than the existing in the traditional diesel engine system, leading to new design and maintenance practices. The end user, according to this need, will have one more parameter to choose whether to adopt a Diesel Gas system.*

Keywords: stoichiometric, engine, diesel gas, dual fuel, reliability

Nota do Autor: O Trabalho foi submetido a tradução juramentada e será enviado em inglês em sua versão final.

1. INTRODUCTION

O Motor diesel está presente na movimentação de carros, caminhões, trens, navios e geradores de energia, por isto é um grande símbolo do avanço tecnológico dos séculos XX e XXI, porém uma grande inconveniente deste equipamento é sua emissão de poluentes, que causam danos ambientais e a saúde humana. Devido a isto nos últimos procurou-se alternativas para a redução dos elementos nocivos emitidos por este motor, como dióxido de enxofre e materiais particulados ^[41].

Uma alternativa encontrada, ocorre através da substituição de grande parte do óleo diesel combustível, por gás natural, que não possui enxofre em composição e não emite material particulado, instalando no motor diesel um dispositivo chamado “kit diesel gás” que é responsável por introduzir na câmara de combustão o gás natural responsável pela substituição de boa parte do óleo diesel combustível.

Porém, a adição de um novo dispositivo no motor fará com que surjam novos modos de falha e intensificará alguns modos de falha já existentes no motor diesel, um dos casos ocorrerá com a combustão fora de estequiometria ^[4]. A estequiometria é a proporcionalidade correta de combustíveis para uma combustão completa, e quando estas proporcionalidades não são respeitadas, ocorre falhas no motor, perda de desempenho e despejo de combustível não queimado no meio ambiente ^[55]. Através da análise por árvore de falhas, este trabalho estudará a probabilidade de ocorrência da combustão fora de estequiometria em um motor adaptado para “kit diesel gás”.

Inicialmente, será realizado um estudo no dispositivo “kit diesel gás”, analisando a funcionalidade de seus componentes e quais seus respectivos modos de falha, e como se desenvolveria a falha combustão fora de estequiometria. Com isto, através de bancos de dados publicados, chega-se aos índices de confiabilidade de cada componente envolvido diretamente neste modo de falha e apresenta-se os valores de ocorrência desta falha para 4.000 horas, que seria o tempo da primeira grande revisão para pequenos caminhões trafegando em trechos urbanos, e na evolução temporal desta falha ^{[35],[40]}.

Este trabalho visa orientar o projetista na evolução deste tipo de dispositivo e a pensar na redução da ocorrência deste tipo de falha e também fornece ao usuário final um parâmetro para que possa avaliar melhor a escolha deste tipo de sistema.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Confiabilidade e Falhas

De uma forma genérica, a Confiabilidade está associada com a operação do equipamento com sucesso, ou seja, que este execute as funções para o qual foi projetado, preferencialmente na ausência de falhas. Para a análise em Engenharia é necessário definir a confiabilidade como uma probabilidade^{[52], [46]}.

Porém, para definir confiabilidade, também é necessário que defina-se falha. O termo falha é de difícil definição uma vez que depende de cada caso particular. De forma geral, o termo é definido como a incapacidade de um componente, ou sistema fazer frente ou satisfazer o seu desempenho esperado. A falha está associada diretamente com as necessidades e conceitos do usuário do item ou sistema, uma vez que se podem ter falhas simples, que alterem um sistema somente visualmente, ou falhas catastróficas e complexas que possam por em risco a vida dos operadores, ou a integridade do meio ambiente^{[7], [16], [46]}.

Para realizar análises de confiabilidade sob o enfoque paramétrico (utilizando métodos estatísticos, baseando-se nos dados de falha associados ao fenômeno estudado, coletados experimentalmente, pode-se ajustar a distribuição que melhor representa a função densidade de probabilidade dos tempos de falha, permitindo, consequentemente, determinar a melhor representação estatística das funções de confiabilidade e da taxa de falha)^{[16], [28]}.

Neste artigo devido aos mecanismos de falhas dos componentes apresentados nesta dissertação os modelos utilizados serão os exponenciais, que podem ser utilizados para modelar a confiabilidade de sistemas com causas heterogêneas de falhas e com taxas de falhas independentes e aleatórias^{[16], [46]}, muito comum a componentes eletrônicos e o modelo de Weibull, que mostra-se bastante adequada à análise de falha em equipamentos mecânicos, os quais usualmente apresentam falhas por dano acumulado^[18].

Distribuição exponencial

A distribuição exponencial se caracteriza por ter uma função de taxa de falha constante, e é a única com esta propriedade. É uma das mais simples em termos matemáticos e extensivamente utilizada como modelo para tempo de vida de produtos eletrônicos^{[46], [56]}.

Empregada em casos onde as falhas ocorrem de forma aleatória com uma taxa fixa e sem apresentar um mecanismo de desgaste, a função de densidade de probabilidade para o tempo de falha t com distribuição exponencial é dada por:

$$f(t) = (1/\alpha)e^{(-t/\alpha)}, t \geq 0 \quad (1)$$

onde $\alpha < 0$ é o tempo médio de vida, ressaltando-se que o parâmetro α tem a mesma unidade do tempo de falha t , ou seja, se t é medido em horas, α também será medido em horas.

A função de confiabilidade $R(t)$, que é a probabilidade de o produto permanecer operacional até o tempo t , é dada por^[46]:

$$R(t) = e^{(-t/\alpha)} \quad (2)$$

A taxa de falha associada à distribuição exponencial é constante e igual a $1/\alpha$, ou seja, uma unidade da amostra velha, que ainda não falhou, tem a mesma probabilidade de falhar em um intervalo futuro que uma unidade nova. Esta propriedade é chamada de falta de memória da distribuição exponencial.

Confiabilidade de Sistemas

Um sistema é uma coleção de itens cuja adequada operação coordenada leva ao funcionamento do sistema conforme as especificações do projeto. Na análise de confiabilidade de sistemas, deve-se modelar a relação funcional entre vários itens (peças, circuitos, sub sistemas) para determinar a confiabilidade do sistema como um todo^{[29], [30]}. A avaliação da confiabilidade de um sistema baseada no estudo da confiabilidade de seus elementos básicos é um dos aspectos mais importantes da análise de confiabilidade de sistemas^[46].

Árvore de Falhas (FTA's)

As Árvores de Falhas são modelos de representação lógica, e representam a caracterização qualitativa de uma falha do sistema, ou seja, a combinação de eventos iniciais (falhas de componentes) que causam a ocorrência do evento topo, e através de métodos como álgebra booleana, avalia-se a árvore de falha quantitativamente, calculando a probabilidade de ocorrência do evento topo^{[29], [30]}.

A avaliação quantitativa das Árvores de Falha envolve a determinação da probabilidade de ocorrer uma falha. A porta OU representa a união de dois ou mais eventos e o evento de saída será a soma da probabilidade de ocorrência dos eventos de entrada. A porta E representa a intersecção de dois ou mais eventos e o evento resultante será a multiplicação da probabilidade de ocorrência dos eventos de entrada^[30].

3. O KIT DIESEL GÁS

O conceito da tecnologia diesel-gás (*Dual Fuel*) tem sua base na utilização do motor original do ciclo diesel e na queima combinada do gás natural com o óleo diesel. Esta alteração é obtida através da instalação de uma adaptação do motor original sem modificações estruturais, mantendo-se um ciclo de funcionamento mais eficiente, adaptação esta que foi chamada de Kit Diesel Gás ^{[2], [9]}.

Nessa aplicação o consumo de diesel é reduzido a uma injeção piloto, responsável pelo início da combustão do combustível gás natural que, por sua vez, entra no cilindro do motor juntamente, ou com um pequeno atraso em relação à injeção do óleo diesel, dependendo do “kit” utilizado ^{[42], [25]}. Na Figura 1 é mostrado os possíveis arranjos do bico injetor no cilindro do motor *dual fuel*.



Fig. 1. Arranjo de injeção piloto e injeção de gás na câmara de combustão^[4].

Algumas vantagens do sistema diesel-gás são as pequenas alterações no motor, a flexibilidade para utilização de óleo diesel puro ou de óleo diesel e gás simultaneamente e possibilidade de operação dos motores convertidos com as condições de torque e potência próximas a do motor original utilizando somente o óleo diesel ^{[2], [21]}.

A substituição de parte do óleo diesel pelo gás natural já proporciona, em um primeiro momento, uma redução significativa de material particulado nas emissões de escape e também o potencial para redução dos poluentes NOx (flexibilidade em se trabalhar com mistura pobre, atraso na injeção de Diesel e ignição da mistura ar mais gás), SO2 e CO2 (menor relação carbono/hidrogênio do gás natural) ^{[1], [14], [25]}.

A. Operação

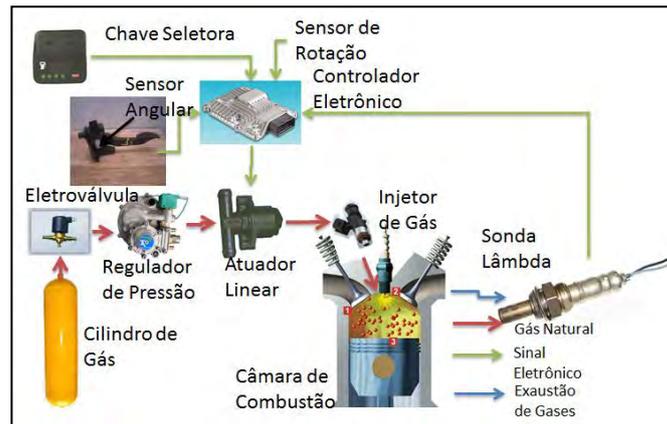
No kit diesel gás de terceira geração, após o acionamento do seletor, ocorre a abertura da eletroválvula do cilindro do gás e este escoou pela tubulação até o regulador de pressão, onde esta é reduzida até 1 bar ^{[6], [9], [12]}.

Após esta regulação o gás chega até o atuador linear, que atua como uma borboleta, liberando a passagem de uma certa quantidade de gás para o injetor de gás de acordo com sinais do controlador eletrônico, que interpreta informações originadas pelos sensores do sistema e calcula a quantidade de gás a ser injetada ^{[6], [9], [12], [55]}.

O injetor de gás proverá o gás no interior da câmara de combustão, após a injeção de diesel (piloto). Neste momento o gás entra em combustão fazendo com que o motor realize trabalho. Na saída dos gases de exaustão é colocada a sonda lambda para verificar a quantidade de oxigênio na saída e realimentar o controlador eletrônico, para que este faça a correção da entrada de gás ^{[11], [55]}. A Figura 2 representa o funcionamento do kit diesel gás.

A.C. Belizário, G. F. M. Souza

FAULT TREE ANALYSIS FOR NON STOICHIOMETRIC COMBUSTION OF DIESEL GAS ENGINE

Fig. 2. Esquema de funcionamento kit diesel gás de terceira geração^[4].

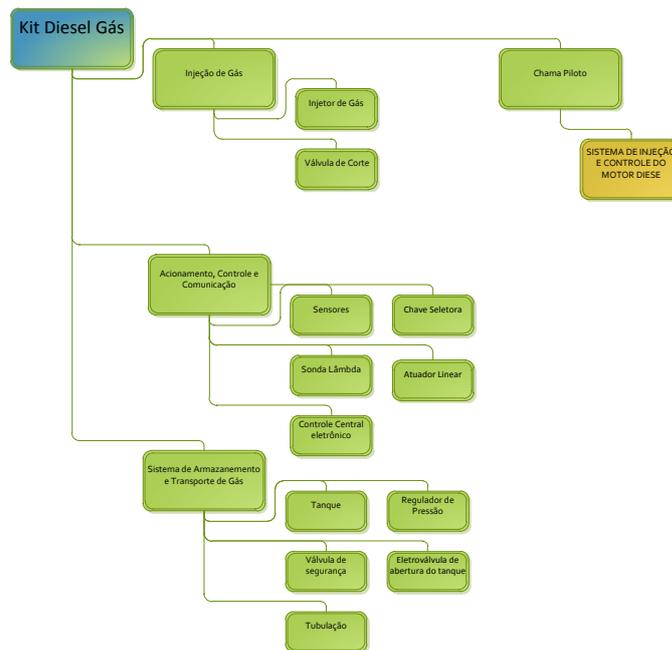
Sub divisão do kit diesel gás

O sistema de Injeção de Gás é composto pelo injetor de gás, que é responsável pela injeção do gás dentro da câmara de combustão após a injeção do combustível piloto (óleo diesel), válvula de corte, que regula a quantidade de gás.

O sistema de Acionamento Controle e Comunicação é composto por: Sensores de pedais, que informam a necessidade de combustível na câmara de combustão para regular torque do motor, sensor de quantidade de gás, para informar quando há pouco gás e realizar retorno automático a operação somente diesel e sensores de temperatura. O seletor é acionada pelo usuário, acionando os modos de operação somente diesel e *dual fuel*. A sonda lambda (ou sonda de oxigênio) verifica a quantidade de oxigênio que está saindo na exaustão do motor, para alimentar o controlador eletrônico, visando um ajuste estequiométrico melhor da mistura de combustível. O controlador eletrônico é responsável pela interpretação de todos esses sinais e comandar a operação do motor diesel, interagindo com o controlador eletrônico do motor. O atuador linear torna a mistura mais rica ou pobre com o sinal recebido do controlador eletrônico.

O sistema de Armazenamento e Transporte de gás é composto pelo tanque de gás, que deve ser regulamentado pelo INMETRO, ou órgão internacional, pela válvula de segurança que deverá abrir em caso de pressão acima do limite de segurança e evacuar gás do sistema, sistemas de transporte, composto pela tubulação de gás e regulador de pressão, que deve regular a pressão do gás na tubulação.

O sistema de Chama Piloto é composto pelo subsistema de injeção e controle do motor diesel. Sua função é disponibilizar a pequena quantidade de óleo diesel ao sistema para o início da combustão. Neste caso o sistema de controle e acionamento do kit diesel gás deve se comunicar com o controlador central diesel. O controlador central diesel enviará um sinal para os injetores diesel, que reduzirá a quantidade de diesel injetada na câmara de combustão diesel para até 5% da quantidade inicial. A pequena quantidade de óleo diesel injetada será suficiente para iniciar a combustão em contato com o ar a alta temperatura. Com a combustão da pequena quantidade de óleo diesel, o gás injetado detonará e realizará o ciclo de potência. Esta subdivisão é mostrada na Figura 3.

Fig. 3. Árvore de Funcional do kit diesel gás^[4].

Estequiometria da Combustão Diesel Gás

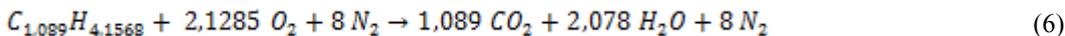
A mistura ar e gás deve ser bastante homogênea e sua queima induz valores de pico e taxas de elevação de pressão inferiores às verificadas para os motores do ciclo Diesel, resultando num funcionamento mais "estável" e silencioso do motor. O mesmo ocorre quando fala-se da mistura álcool e ar e hidrogênio e ar^{[17], [55]}.

A relação ar/combustível controlada pelo controlador eletrônico e injetores de gás deve estar dentro de certos limites, pois as misturas muito pobres podem causar falhas no motor e as muito ricas favorecem a ocorrência de detonação,^[55].

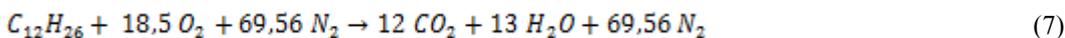
Estes valores são calculados através de um parâmetro chamado lâmbda (λ). Para calcular este parâmetro é necessário inicialmente estabelecer a relação estequiométrica ideal, que é dada por^{[17], [55]}:

$$\left(\frac{A}{C}\right)_S = \frac{\text{massa de ar ideal}}{\text{massa de combustível ideal}} \quad (5)$$

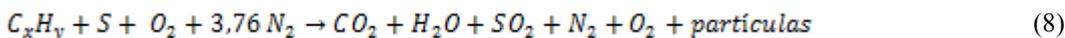
O diesel é um predominantemente um dodecano ($C_{12}H_{26}$), que contém impurezas (S, N, etc), o gás natural é um hidrocarboneto C_xH_y , e o ar que é misturado ao gás natural é rico em N_2 e O_2 . A equação da combustão real do gás natural se dá por^{[11], [13], [14]}:



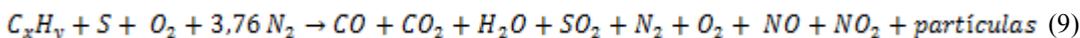
e a combustão do diesel é^{[27], [48]}:



A equação da combustão completa não balanceada da mistura diesel gás se dá por^{[11], [13], [14]}:



e a equação não balanceada da combustão incompleta é^{[11], [13], [14], [33]}:



Embora a combustão de diesel e da combinação diesel mais gás resulte na mesma equação geral, a combustão do diesel gás, devido a predominância do metano, resulta em parcelas maiores em massa de CO_2, H_2O e O_2 e menores de SO_2 ^[11].

Quando λ é menor que zero, a combustão tem excesso de oxigênio e pouco combustível, fazendo com que a combustão tenha pouca probabilidade de ocorrer, esta combustão é conhecida como combustão pobre. Quando λ é maior que 1, tem-se excesso de combustível, o que significa que este não é queimado completamente. Esta combustão é chamada de combustão rica. Quando λ é igual a 1, a combustão está na sua relação ideal, denominada de combustão estequiométrica^{[17], [37] [55]}.

4. DISCUSSÃO E RESULTADOS: A FALHA POR COMBUSTÃO INADEQUADA

Modo de falha por combustão inadequada

Considera-se combustão inadequada quando o combustível que chega a câmara de combustão é insuficiente para a operação do motor (combustão pobre), não ocorrendo queima, ou ocorrendo queima parcial de combustível no motor, possibilitando que este seja paralisado, ou quando há excesso de combustível, fazendo que ocorra uma combustão incompleta (combustão rica), e o excesso de combustível é rejeitado para o meio-ambiente^{[9], [21], [55]}.

A combustão inadequada é resultado da mistura fora de estequiometria, associada a não capacidade de correção deste evento^{[8], [38], [21]}.

A mistura fora de estequiometria pode ocorrer devido a problemas com a injeção de diesel piloto e de gás^{[4], [38], [21]}.

As falhas na injeção piloto de diesel podem estar relacionadas ao combustível de baixa qualidade, volume de óleo diesel injetado em quantidade errada, que pode ter origens na bomba injetora diesel e no kit *dual fuel*, e também falha no bico injetor diesel, que é causado por entupimento, mau contato elétrico ou desgaste de componentes^{[4], [38]}.

As falhas da injeção de gás estão relacionadas à baixa qualidade do gás, falha no comando eletrônico, atuador linear e no misturador de gases^{[4], [38], [21]}.

A capacidade de não correção destes eventos está associada às falhas no comando elétrico, e nos sistema de controle e automação causados por falhas na sonda de oxigênio^{[4], [55]}.

Para que a combustão inadequada ocorra devem ocorrer os eventos descritos na árvore de falhas apresentada na Figura 4.

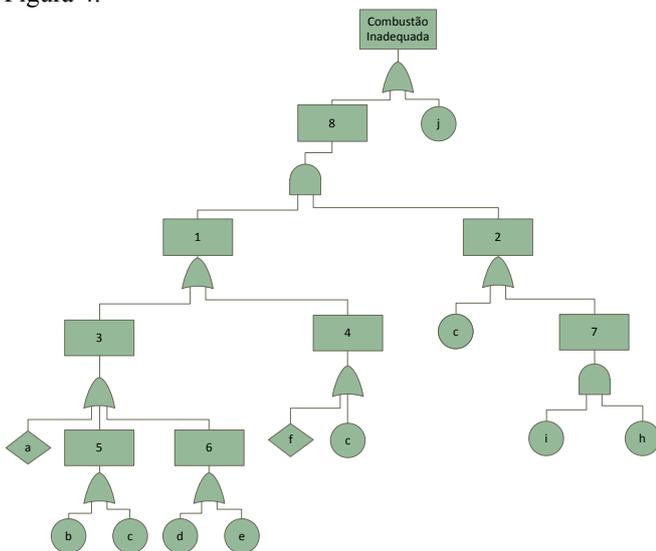


Fig 4. Desenvolvimento de árvore do Kit Diesel Gás para Combustão Inadequada^[4].

A Tabela 1 apresenta os números e letras utilizados na construção da árvore de falhas apresentada na Figura 4.

TABELA 1 – NÚMEROS E LETRAS PARA COMBUSTÃO INADEQUADA UTILIZADOS NA FTA

Item	Evento	Probabilidade de Falha
1	Mistura fora de Estequiometria	F(1)
2	Não há correção	F(2)
3	Injeção Diesel Piloto	F(3)
4	Injeção Gás	F(4)
5	Cálculo de injeção Diesel errado	F(5)
6	Falha no bico injetor Diesel	F(6)
7	Falha no controle e automação	F(7)
8	Falha na mistura	F(8)
A	Combustível de baixa qualidade	a
B	Problemas na bomba injetora	b
C	Falhas no controlador eletrônico	c

D	Falha mecânica	D
E	Entupimento	E
F	gás de baixa qualidade	f
H	falha na sonda lambda	h
I	falha sistema de malha aberta (modo de operação do controlador eletrônico)	i
J	falha no atuador linear	j

A equação da Probabilidade de Falhas é calculada por Álgebra de Boole, conforme relações abaixo:

$$F(T) = (F(8)) \text{ OU } j \quad (10)$$

$$F(8) = (F(1) \text{ E } F(2)) \quad (11)$$

$$F(1) = F(3) \text{ OU } F(4) \quad (12)$$

$$F(3) = a \text{ OU } F(5) \text{ OU } F(6) \quad (13)$$

(5.5)

(5.6)

$$F(5) = b \text{ OU } c \quad (14)$$

$$F(6) = e \text{ OU } d \quad (15)$$

$$F(4) = f \text{ OU } c \quad (16)$$

$$F(2) = c \text{ OU } F(7) \quad (17)$$

$$F(7) = i \text{ E } h \quad (18)$$

Rearranjando as equações 12 e 17 com as equações 13,14,15, 16 e 18, tem-se:

$$F(2) = c \text{ OU } [i \text{ E } h] \quad (19)$$

$$F(1) = \{a \text{ OU } [b \text{ OU } c] \text{ OU } [e \text{ OU } d]\} \text{ OU } \{f \text{ OU } c\} \quad (20)$$

Substituindo OU por + e E por \cdot em 19 e 20., tem-se^{[29],[30]}:

$$F(2) = c + [i \cdot h] \quad (21)$$

$$F(1) = a + b + c + d + e + f \quad (22)$$

(5.15)

$$F(T) = (a + b + c + d + e + f) \cdot [c + (i \cdot h)] + j \quad (23)$$

$$F(T) = c + j + [(a + b + d + e + f) \cdot (i \cdot h)] \quad (24)$$

A falha no controlador eletrônico do circuito ou a falha no atuador linear isoladas geram a combustão inadequada^[4].

A falha pode ocorrer, também se ocorrerem falhas de algum dos componentes bomba injetora Diesel, ou do kit gás (*dual fuel*), ou até mesmo problemas associados à qualidade dos combustíveis, associados à falha na sonda lambda e no modo de malha aberta, que é o modo em que o controlador eletrônico gerencia o sistema sem sinais de correções enviados pela sonda.

Considera-se uma falha no modo de malha aberta como uma falha geral do comando elétrico, então o valor de i assumiria c , portanto a fórmula 21 passa a ser:

$$F(2) = c + [c \cdot h] \quad (25)$$

$$F(2) = c \cdot [1 + h] \quad (26)$$

$$F(2) = c \quad (27)$$

Substituindo em (11)

$$F(T) = (a + b + c + d + e + f) \cdot [c] + j \quad (28)$$

$$F(T) = (a + b + d + e + f + 1) \cdot [c] + j \quad (29)$$

$$F(T) = c + j \quad (30)$$

(5.23)

Neste caso os valores de c e j assumem os valores de falha de controlador eletrônico e do atuador linear respectivamente.

Modelagem de falha de componentes críticos

De acordo com o modo de funcionamento e características do equipamento, através de dados obtidos em banco de dados na literatura pode-se encontrar a confiabilidade dos principais componentes do sistema diesel gás^{[5], [53]}.

Para componentes eletrônicos utiliza-se a norma Military Standard 217F (United States of America, Department of Defense, 1991), e com isso pode-se calcular os valores de confiabilidade utilizando a distribuição exponencial^[46].

1) Controlador Eletrônico

Utilizando o cálculo proposto pela MIL-HDBK-217F^[53] página 5-3, e modelando o controlador como microprocessador tem-se:

$$\lambda = (C_1 \cdot \pi_t + C_2 \cdot \pi_e) \cdot \pi_Q \cdot \pi_L \text{ Falhas por } 10^6 \text{ Horas} \quad (31)$$

Acima de 16 Bits de Memória $C_1 = 0,28$

$C_2 = 0$ para microprocessador

$\pi_Q = 1,0$ para microprocessador

$\pi_L = 5,8$ para circuito linear

$$\lambda = 1,624 \cdot 10^{-6}$$

Como se trata de equipamento eletrônico, e os mecanismos de falha são aleatórios pode-se calcular a confiabilidade como distribuição exponencial como visto na equação (2).

$$R(t) = e^{(-1,624 \cdot 10^{-6} \cdot t)} \quad (32)$$

Para 4.000 horas

$$R(t) = 99,35\%$$

$$F(t) = 0,65\%$$

$$MTTF = 615.763 \text{ horas}$$

Segue na Figura 5 a curva de confiabilidade para controlador eletrônico.



Fig. 5. Gráfico Confiabilidade X Tempo do Controlador Eletrônico^[4].

2) Atuador Linear

Utilizando o cálculo proposto pela MIL-HDBK-217F^[53] na página 12-3, segue:
Considerando Motor DC Síncrono.

$$\lambda = \lambda_b \cdot \pi_e \cdot \pi_s \cdot \pi_n \text{ Falhas por } 10^6 \text{ Horas} \quad (33)$$

Fator Ambiental $\pi_e = 1,0$

fator de tamanho $\pi_s = 2$ – Motor Síncrono e pequeno.

Fator de polos $\pi_n = 3,2 - 4$ polos

λ_b taxa de falha básica para trabalho a 80°C = 0,27

$$\lambda = 1,728 \cdot 10^{-6}$$

Como se trata de equipamento eletrônico e os mecanismos de falha são aleatórios pode calcular como exponencial como visto na equação 2^[53].

$$R(t) = e^{(-1,728 \cdot 10^{-4} \cdot t)} \quad (34)$$

Para 4000 horas

$$R(t) = 99,31\%$$

$$F(t) = 0,69\%$$

$$MTTF = 578.703 \text{ horas}$$

Segue na Figura 6 curvas de confiabilidade para o atuador linear.



Fig. 6. Gráfico Confiabilidade X Tempo do Atuador Linear^[4].

B. Probabilidade de falha por Combustão Inadequada para 4.00 horas e evolução temporal.

Avalia-se também a confiabilidade para 120.000 quilômetros percorridos, pois neste momento se faz a primeira grande revisão no motor, onde há troca significativa de peças (inclusive recomenda-se a troca da bomba injetora) e por isso, seria o momento indicado para a primeira grande revisão do kit diesel gás^[35]. Para avaliar em horas trabalhadas, deve-se estimar a velocidade média de tráfego. A velocidade média de tráfego da cidade de São Paulo é de 30 km/h, caso que os 120.000 km fossem percorridos a esta velocidade o tempo necessário seria de 4000 horas^[40]. Estima-se que o sistema está instalado em um caminhão urbano pequeno, trabalhando em grandes cidades onde sua operação será realizada com variação de carga e velocidade, diferentemente de um caminhão estradeiro que costuma operar a velocidade constante em condições menos severas^[4].

Considerando a equação 30 e a probabilidade de falha calculada acima, tem-se na Tabela 2 a estimativa de falhas acumuladas para 4.000 horas.

TABELA 2 – NÚMEROS E LETRAS PARA COMBUSTÃO INADEQUADA UTILIZADOS NA FTA

Falha de Combustão Inadequada 4000 horas			
	c	j	F(T)
Estimativa	0,647%	0,517%	1,182%

Na Figura 7 é apresentada as curva da probabilidade de falha acumulada para a falha combustão inadequada.



Figura 7. – Estimativa de falhas x Tempo do Kit Diesel Gás para Combustão Inadequada^[4]

5. CONCLUSION

Este trabalho teve como objetivo prever a ocorrência de combustão fora de estequiometria do motor diesel adaptado para Diesel-Gás, identificando os itens críticos e os novos modos de falha que surgiriam. Para tanto, foi necessário inicialmente entender o funcionamento deste sistema, e quais os componentes utilizados na operação. Para isto foi necessário subdividir o kit diesel gás de acordo com sua funcionalidade e levantou-se o funcionamento do sistema como um todo, dos subsistemas e de seus itens, possibilitando a construção da árvore funcional do kit diesel gás.

Foi possível também, considerando estas falhas do motor operando com o kit gás, executar a análise por árvore de falhas. Através disto, possibilitou-se levantamento de dados sobre a confiabilidade dos itens críticos deste kit diesel gás com o auxílio de bancos de dados publicados em referências bibliográficas, resultando na análise de falha de cada item e identificando o impacto destas na combustão fora de estequiometria sobre a operação do motor.

A probabilidade de uma combustão fora de estequiometria é de 1,182%, que faz com que o motor opere com desempenho abaixo do esperado e emita mais poluentes para o meio ambiente, ficando em desacordo com a legislação ambiental.

Apesar da redução na emissão de poluentes, e de consumo de óleo diesel, a adição desses novos componentes reduzirá a confiabilidade do motor, aumentando a probabilidade de falha considerando a inserção de novos modos de falha em relação ao motor diesel original.

6. REFERENCES

- [1] G. Arcidiacono, G. Campatelli. "Reliability Improvement of a Diesel Engine Using the FMETA Approach". Quality and reliability engineering international, New Jersey, vol. 20, 2nd ed., p. 143-154. 2004.
- [2] P.T. Babu, P. R. Srivathsan, V. N. Banugopan, S. Prabhakar, K. Annamalai. "Experimental Investigation on Performance and Emission Characteristics of Dual Fuel Split Injection of Ethanol and Diesel in CI engine". In: Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering (FAME), Ieee conference publications, Chennai, India: 2010, p. 135 – 140.
- [3] Barringer & Associates, Inc. "Weibull Database". Barringer e Associates, Inc 2010. disponível em: <<http://www.barringer1.com/wdbase.htm>>. Acesso em 24 de Janeiro de 2012.
- [4] A.C. Belizário. "Avaliação da confiabilidade do motor diesel com a adição de sistemas de injeção de gás na câmara de combustão". 2006. 142 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- [5] H.P. Bloch, K. F. Geitner, "Machinery Analysis and Troubleshooting: Pratical Machinery Management for Process Plan". 3th Ed., v. 2. Houston: Gulf Publishing Company, 1999.
- [6] Bosch. "The Bosch Automotive Handbook". 4th ed. Stuttgart: Society of Automotive Engineers, 1997.
- [7] F. J. Carazas. "Decisões Baseadas em Risco - Método Aplicado na Indústria de Geração de Energia Elétrica para a Seleção de Equipamentos Críticos e Políticas de Manutenção". 218 p. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
- [8] O. Colin, A. P. Cruz, S. Jay. "Detailed chemistry-based auto-ignition model including low temperature phenomena applied to 3-D engine calculations". Proceedings of the Combustion Institute, v.30, 2nd ed., p. 2649–2656. Rueil-Malmaison Cedex, France, 2005.
- [9] G. W. Conceição. "A Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental da Inserção do Gás Natural Veicular em Frotas do Transporte Coletivo Urbano de Passageiros". 240 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [10] S. Cordiner, M. Gambino, S. Iannaccone, V. Rocco, R. Scarelli, "Numerical and Experimental Analysis of Combustion and Exhaust Emissions in a Dual-Fuel Diesel/Natural Gas Engine". Energy & Fuels, v. 22, 3th Ed., p. 1418 - 1424. Naples, Itália, 2008.
- [11] Y. J. Costa. "Análises Energética e Exergética de um Motor de Combustão Interna Operando com uma Mistura de Diesel e Gás Natural". 2007. 185 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 2007.
- [12] Delphi Sistemas Automotivos. "Gerações de kit diesel gás fabricados pela Delphi Systems do Brasil". Cotia, São Paulo, Brasil. 23 de Março de 2011. Visita Técnica.
- [13] J. C. Egúsquiza. "Redução das Emissões em Motores Diesel-gás". 117 p. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- [14] J. C. Egúsquiza, S. L. Braga, C. V. Braga. "Performance and Gaseous Emissions Characteristics of a Natural Gas/Diesel Dual Fuel Turbocharged and Aftercooled Engine". Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science & Engineering, v. 31, 2nd ed., p.142 - 150. Rio de Janeiro, 2009.
- [15] M. A. Elliot, R. F. Davis. "Dual-Fuel Combustion in Diesel Engines. Industrial and Engineering Chemistry", v. 43, p. 2854-2864. New York, 1954.

22nd International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2013)
November 3-7, 2013, Ribeirão Preto, SP, Brazil

- [16] E. P. Felix. “Análise de confiabilidade de sistemas eletrônicos complexos baseada em ensaios acelerados de vida”. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [17] J. B. Heywood. “*Internal Combustion Engine Fundamentals*”. 2nd Ed.. New York: McGraw-Hill, Inc, 1988.
- [18] A. Kardec, J. Nascif. “*Manutenção Função Estratégica*”. 2nd Ed. Rio De Janeiro: Qualitymark. 2001.
- [19] V. Knop, S. Jay, “*Latest Developments in Gasoline Auto-Ignition Modelling Applied to an Optical CAI Engine*”. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, v. 61, p. 121-137. New York. 2006.
- [20] J. R. Lafraia. “*Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*”. Rio de Janeiro: Qualitymark. 2001.
- [21] L. F. Lastres. “*Desenvolvimento de Sistema de Conversão para Utilização de Gás Natural em Motores Diesel Superalimentados*”. CENPES/Petrobras. Rio de Janeiro. 1998.
- [22] L. F. Lastres. “*Sistema Dual Fuel: Experiência da Petrobras*”. Apresentação do CENPES/ PETROBRAS no seminário ônibus Vans Automóveis. Rio de Janeiro. 2001.
- [23] R. Leitch, “*Reliability Analysis for Engineering*”. New York: Oxford Press. 1995.
- [24] Y. H. Li, W. Z. Shao, J. Zhang. “*Fuzzy Grey Fault Tree Analysis on Diesel Engine Reliability*.” In: Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2010), Ieee conference publications, Yantai, China, p. 1263 – 1267, 2010.
- [25] J. Liu, y. Li, G. Li, Z. Zhu, H. He, S. Liu. “*Effect of Pilot Diesel Quantity and Fuel Delivery Advance Angle on the Performance and Emission Characteristics of a Methanol-Fueled Diesel Engine*”. Energy Fuels, v. 24, p. 1611 - 1616. 2010. Xian, China, 2010.
- [26] E. E. Lora, M. A. Nascimento. “*Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação*”. 1st ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2004.
- [27] A. Makartchouk. “*Diesel Engine Engineering: Thermodynamics, Dynamics, Design, and Control*”. New York: Marcel Dekker Inc. 2002.
- [28] C. S. Mizuno. Aperfeiçoamento de um produto através da confiabilidade como instrumento de valor. 2007. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [29] M. Modarres. What Every Engineer Should Know About Reliability and Risk. New York: Marcel Dekker. 1993.
- [30] M. Modarres, M. Kaminsky, V. Krivtsov. “*Reliability Engineering and Risk Analysis: A practical guide*”. 2nd Ed. New York: CRC Press. 2010.
- [31] M. J. Moran, H. N. Shapiro. “*Princípios de Termodinâmica para Engenharia*”. Rio de Janeiro: LTC. 2009.
- [32] M. Moran, H. Shapiro, D. Dewitt, B. Munson,. “*Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos*”. 1st Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009.
- [33] J. R. S. Moreira. “*Tópicos Seleccionados de Aplicações da Termodinâmica*”. Notas de Aula, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2011.
- [34] F. L. Moutella. “*Simulação Numérica de Motores Bi-Combustível Diesel - Gás Natural*”. 2009. 71 p. Dissertação (Mestrado) - Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- [35] MWM Internacional. “*Manual de Operação e Treinamento Maxx Force 3.0/ 4.0/ 6.0*”. Manual Técnico, São Paulo. 2010.
- [36] O. M. I. Nwafor. “*Knock characteristics of dual-fuel combustion in diesel*”. Sadhana, v. 27, 3ª Edição, p. 375 - 382. Índia, 2002.
- [37] E. F. Obert. “*Motores de Combustão Interna*”. 2nd Ed. Editora Globo. Porto Alegre, 1971.
- [38] V. Pimenta, L. H. Verginelli. “*Kit Diesel Gás - Dephi Sistemas. FMEA Kit disel gás de terceira geração*”. Cotia, 2010. Não publicado.
- [39] M. Rausand, A. Hoyland, “*System Reliability Theory; Models, statistical*”. New Jersey: Wiley. 2004.
- [40] R. Rolnik, D. Klintowitz. “*Mobilidade na cidade de São Paulo*”. Estudos Avançados, v. 25, p. 73-88. São Paulo, 2011.
- [41] I. Sachs. “*Questão Energética - Da civilização do petróleo a uma nova civilização verde*”. Estudos Avançados, v. 19, p. 195 – 214. São Paulo, 2005.
- [42] Z. Sahin, O. Durgan. “*Prediction of the Effects of Ethanol-Diesel Fuel Blends on Diesel Engine Performance Characteristics, Combustion, Exhaust Emissions, and Cost*”. Energy & Fuels, v. 23, p. 1707 – 1717, 2009.
- [43] L. F. Sampaio. “*Sistemas de Alimentação do Motor Diesel*”. Estudos Avançados, v. 21 p. 103 - 110. São Paulo, 2010.
- [44] R. Song, J. Liu, L. Wang, L. Shenghua. “*Performance and Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Methanol*”. Energy & Fuels, v.3 6th ed, p. 3883 - 3888. 2008.
- [45] R. E. Sonntag, C. Borgnakke. “*Introdução à Termodinâmica para a Engenharia*”. 2nd Ed.. Rio de Janeiro: LTC. 2011.
- [46] G. F. M. Souza. “*Análise de Confiabilidade em Projetos Mecânicos*”. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Apostila. São Paulo, 2003.
- [47] N. Souza. “*Tecnologia flex ganha versão diesel – álcool*”. Brasil Econômico, 4 fev, 2010. p. 6-7.
- [48] C. F. Taylor. “*Análise dos motores de combustão interna*”. São Paulo: Edgard Blucher. 1988.
- [49] A. Tsolakis, J. J. Hernandez, A. Megaritis, M. Crampton. “*Dual Fuel Diesel Engine Operation Using H2: Effect on Particulate Emissions*”. Energy & Fuels, v. 19, p. 418- 425. 2005.
- [50] A. Tsolakis, R. Torbati, A. Megaritis, A. Abu-Jrai. “*Low-Load Dual-Fuel Compression Ignition (CI) Engine Operation with an On-Board Reformer and a Diesel Oxidation Catalyst: Effects on Engine Performance and Emissions*”. Energy & Fuels, v. 24, p. 302-308. 2009.
- [51] União Européia. “*Redução das emissões poluentes dos veículos ligeiros. Europa: O Portal da União Européia*”. 2010. disponível em <http://europa.eu/legislation_summaries/environment/air_pollution/128186_pt.htm>. Acesso em 23 de outubro de 2011.
- [52] United States of America. “*RLAC: The Reliability Information Analysis Center*”. 2010. Disponível em <<http://www.theriac.org>>. Acesso em 9 de setembro de 2011.
- [53] United States of America, Department of Defense. “*MIL-HDBK-217F: Military Standard*”. Washington, DC, 1991.
- [54] G. Van Wylen, C. Borgnakke, R. Sonntag, “*Fundamentos da Termodinâmica Clássica*”. 7th Ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2009.
- [55] M. R. Veiga. “*Desenvolvimento de um gerador eletrônico para motores tricombustíveis*”. 2010. 138 p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

7. RESPONSIBILITY NOTICE

The author(s) is (are) the only responsible for the printed material included in this paper.