

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Curso de Engenharia Elétrica

VINICIUS CAMPOS MARTINS

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE GASES PARA DIMINUIÇÃO
DAS EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES DIESEL**

Itatiba
2012

VINICIUS CAMPOS MARTINS – R.A. 002200800467

SISTEMA DE TRATAMENTO DE GASES PARA DIMINUIÇÃO DAS EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES DIESEL

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, sob a orientação do Prof. André Bakalereskis, como exigência parcial para conclusão do curso de graduação.

Orientador: Prof. André Bakalereskis

Itatiba
2012

VINICIUS CAMPOS MARTINS

**SISTEMA DE TRATAMENTO DE GASES PARA DIMINUIÇÃO
DAS EMISSÕES DE POLUENTES EM MOTORES DIESEL**

Monografia aprovada pelo o Curso de Engenharia elétrica da Universidade São Francisco, como exigência parcial para conclusão do curso de graduação.

Data de aprovação: __/__/____

Banca Examinadora:

Prof. André Bakalereskis (Orientador)

Universidade São Francisco

Prof. João Alex Francisco Vaz (Examinador)

Universidade São Francisco

Eng. Thiago Lima da Silva (Examinador)

Kromberg & Schubert Ltda.

Aos meus pais,
pois sem seus esforços não chegaria até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo e de todos a **Deus**, por sempre guiar e iluminar meu caminho com minha paz e alegria, e por me conceder o privilégio de exercer esta profissão.

Aos meus pais, **Maria** e **Luiz**, que me deram toda a base para me tornar a pessoa que sou hoje. Pelo amor, carinho, esforço, dedicação e tempo depositado em mim, que me faz evoluir e aprender a cada dia.

À minha Irmã **Juliana** e ao meu cunhado, irmão, **Isaque**, por serem os melhores irmãos que alguém poderia ter. Pelo carinho, atenção, risadas e conselhos.

Aos meus amigos, **Italo**, **Murilo** e **Raul**, por todos os momentos de descontração durante este período. Pelas ajudas mutuas nos momentos de dificuldades.

Ao professor **André Bakalereskis**, que desde o início do curso vem nos acompanhado e contribuindo com nossa evolução intelectual. Por todos os momentos de aprendizados. Pela orientação deste trabalho. E principalmente pela amizade adquirida neste tempo.

Aos meus colegas de trabalho, da **Kromberg & Schubert** e também da **Chelb**, que sempre contribuíram muito com a minha evolução profissional e pessoal.

Ao Governo Federal, por proporcionar o programa PROUNI, que sem esta ajuda não ingressaria na Universidade.

A todos os professores que possuem o dom e a grande generosidade de compartilharem seus conhecimentos conosco.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Segmentação das emissões veiculares. - [9]	15
Figura 2 – Evolução dos padrões de emissão dos motores de NOx e PM de acordo com as definições Europeias. - [13]	19
Figura 3 – Padrões necessários para o EURO VI. – [6]	20
Figura 4 – Componentes sistema common rail. – [10]	26
Figura 5 – Principais sensores e atuadores do sistema common rail Bosch. – [10]	27
Figura 6 – Limites de particulados (PM) e NOx exigidos para os ciclos Euro. – [11]	29
Figura 7 – DOC (Diesel Oxidation Catalysts) and DFP (Diesel Particulate Filter). – [12]	31
Figura 8 – Sistema EGR – [11]	31
Figura 9 - Representação esquemática do funcionamento do SCR, com as reações químicas que ocorrem no sistema. – [9]	34
Figura 10 – Representação esquemática da difusão através dos poros de um catalisador. – [9]	35
Figura 11 – Representação esquemática do processo de redução catalítica seletiva. Processo difusivo global. As esferas azuis representam NOx e as esferas alaranjadas representam N2. – [9].	36
Figura 12 – Representação esquemática do processo de redução catalítica seletiva. Mecanismo da reação de redução na superfície do catalisador SCR. – [9]	36
Figura 13 – Layout geral para sistemas SCR. – [11]	38
Figura 14 – Rede de comunicação CAN. – [11]	42
Figura 15 – Dados conforme protocolo CAN J1939. – [11]	44
Figura 16 – Medida das grandezas utilizando-se uréia como reagente - [11]	45
Figura 17 – Medida das grandezas utilizando-se água como reagente - [11]	47
Figura 18 – Comparação dos índices de NOx com a utilização de uréia e água como agente redutor - [11]	48

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação das emissões de um motor de combustão interna operando com gasolina e diesel	13
Tabela 2 - Funcionamento dos motores Ciclo Otto e Diesel	14
Tabela 3 – Correlação entre PROCONVE X EURO	22
Tabela 4 – Limites das emissões para veículos pesados a diesel (g/kWh)	22
Tabela 5 – Especificações para Óleo diesel de referência para ensaios de consumo e emissões.	23

RESUMO

Este trabalho apresentará as tecnologias envolvidas no tratamento de gases de escape de motores diesel, em referência a legislação recém-implementada, o PROCONVE P7 ou EUROV, tendo como objetivo maior a apresentação do sistema SCR (*Selective Catalytic Reduction*), sistema que envolve a injeção de uréia a 32,5% no catalisador operando como um agente redutor de NOx. Enfatizou-se a maneira com que ocorre a comunicação entre o modulo e seus dispositivos de atuação e sensoriamento, para este fim utiliza-se um protocolo de comunicação CAN, onde se encontrou todas as variáveis pertinentes do sistema. Com isso, consegue-se ler todos os valores expressivos e o sistema atuar com referencia aos mesmos, como exemplo, a quantidade de óxidos de nitrogênio antes e depois da injeção de uréia, ou seja, na entrada e na saída do catalisador. A análise destes valores permitiu-se avaliar positivamente a eficácia do sistema conforme sua proposta de redução. De modo comparativo, utilizou-se água ao invés de uréia, onde se conseguiu notar uma mínima redução do nível de poluentes, dados adicionais que servem também como prova da eficácia do sistema apenas com uréia.

Palavras chaves: poluentes. SCR. NOx. redução.

ABSTRACT

This paper will present the technologies involved in the treatment of exhaust gases of diesel engines, in reference to legislation recently implemented, PROCONVE P7 or EURO6, having as the main objective the presentation of the SCR system (Selective Catalytic Reduction), system which involves injecting urea to 32.5% in catalyst operating as a reducing agent for NO_x. Was emphasized the way in which communication occurs between the module and its actuation and sensing devices, for this purpose it uses a protocol of CAN communication, where met all the relevant variables of the system. Thus, it is possible to read all the expressive values and the system function with reference thereto, as an example, the amount of nitrogen oxides before and after the urea injection, ie at the inlet and outlet of the catalyst. The analysis of these values allowed a positively evaluate the effectiveness of the system as its proposed reduction. In order comparative, water was used instead of urea, which could notice a minimal reduction in the level of pollutants, additional data which also serve as proof of effectiveness of the system only with urea.

Key words: pollutants. SCR. NO_x. reduction.

SUMÁRIO

Lista de Ilustrações	5
Lista de Tabelas	6
RESUMO	7
ABSTRACT	8
SUMÁRIO	9
1. – INTRUDUÇÃO	11
2. – REVISÃO BIBLIOGRAFICA	12
2.1 – Fontes moveis de poluentes	12
2.2 – Poluentes	14
2.2.1 – Monóxido de Carbono (CO)	15
2.2.2 – Óxido de Nitrogênio (NOx)	16
2.2.3 – Hidrocarboneto (HC)	16
2.2.4 – Material Particulado (MP)	17
2.3 – Normas para o controle de emissões	18
2.3.1 – Europa	18
2.3.2 – Norma no Brasil	20
2.3.2.1 – PROCONVE - Veículos pesados	21
2.4 – Evolução do óleo diesel	23
2.5 - Evolução Tecnológica	24
2.5.1 – EURO I e II	24
2.5.2 – EURO III	24
2.5.3 – EURO IV	29
2.5.3.1 – Sistema EGR – <i>Exhaust Gas Recirculation</i>	30
2.5.3.2 – Sistema SCR – <i>Selective Catalytic Reduction</i>	32
2.5.3.2.1 – Processo químico do SCR	33
2.5.3.2.2 – Funcionamento do sistema	36
2.5.4 – EURO V	40
3. – METODOLOGIA	41

4. – RESULTADOS	44
CONCLUSÃO	48
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. – INTRUDUÇÃO

Os veículos comerciais pesados atualmente são equipados exclusivamente com motores diesel, devido a sua grande confiabilidade e seu baixo consumo de combustível, duas das características mais procuradas pelos frotistas. Entretanto, com o grande aumento da frota de veículos e um conseqüente aumento na emissão de poluentes obrigou órgãos governamentais regulamentadores do meio ambiente a estabelecer algumas diretrizes de emissões que a montadoras de veículos deveriam seguir.

Nos países desenvolvidos esta preocupação ocorreu mais cedo, criando diferentes padrões com o objetivo de estabelecer limites aceitáveis para emissões de poluentes. Em motores do ciclo diesel têm-se dois padrões principais a serem seguidos: o padrão EPA (*Environmental Protection Agency*) utilizado nos Estados Unidos e o padrão EURO, utilizado na comunidade européia.

No Brasil o padrão adotado como base para as emissões de poluentes é o padrão europeu, que sofreu algumas adequações e passou a ser denominado PROCONVE (Programa de Controle de Poluição de Ar por Veículos Automotores).

O PROCONVE possui diferentes classificações para os veículos, considerando a classificação de veículos pesados na utilização de motores no ciclo diesel, basicamente duas variáveis são controladas, a quantidade de material particulado e o nível de óxidos de nitrogênio. As quantidades limites de emissões são determinadas pelos padrões EURO, e a cada etapa esses limites são reduzidos.

A cada etapa via-se a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias para que não acontecesse uma grande despotencialização dos motores para estes veículos. Podemos ter como exemplo as seguintes tecnologias para a etapa:

- EURO III - Sistema *common rail* - sistema de injeção eletrônico para do ciclo motores diesel

- EURO IV - Sistema EGR (*Exhaust Gas Recirculation* – Recirculação dos gases de exaustão), sistema que utiliza a recirculação dos gases de exaustão para a diminuição dos níveis de NOx no motor e posteriormente a utilização de filtros para a diminuição dos materiais particulados. Sistema SCR (*Selective Catalytic Reduction* – Redução Catalítica Seletiva), que por meio de regulagens no motor acontece a diminuição de materiais

particulados e utiliza o sistema de pós-tratamento de gases adicionando o reagente AdBlue para acontecer a diminuição dos níveis de NOX.

- EURO V – OBD (*On Board Diagnostic*) – Sistema de monitoramento dos gases de escape podendo atuar para a diminuição da potencia do motor no caso do veiculo deixar de atender os níveis exigidos por esta etapa, entre outras utilidades.

2. – REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 – Fontes moveis de poluentes

Desde a revolução industrial, a poluição do ar se tornou uma grande problemática ambiental, onde se iniciaram as queimas de carvão, e posteriormente a queima de combustíveis. Gradativamente este assunto vem tomando espaço no cotidiano, devido a perda da qualidade do ar e conseqüentemente refletindo na saúde e qualidade de vida da população [5].

A qualidade do ar pode ser determinada com o conjunto de fontes de poluição – naturais (Queimadas, ventos, etc.), estacionarias (indústrias) e móveis (veículos automotores) [2]. As fontes poluidoras móveis vem aumentando consideravelmente as concentrações de poluentes atmosféricos nas principais regiões urbanas durante as últimas décadas, tendo em vista o crescimento do numero de veículos nessas regiões.

Através do tubo de escapamento são emitidos os poluentes, provenientes do processo de combustão do motor, entre eles estão: monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio, óxidos de enxofre, ácidos orgânicos e material particulado, que se destaca dos outros, como conseqüências seu tamanho microscópico, às duas propriedades químicas e a sua persistência na atmosfera, causa riscos a saúde publica variando desde simples irritações nos olhos a problemas respiratórios. [5]

De acordo com [5],

os motores de combustão interna que utilizam gasolina apresentam altas taxas de emissões de CO e HC enquanto que os movidos a diesel apresentam baixas taxas de emissão destes poluentes, emitindo no entanto, taxas consideráveis de particulados.

Observa-se na Tabela 1 a comparação das emissões de um motor de combustão interna operando com gasolina e diesel:

Tabela 1 - Comparação das emissões de um motor de combustão interna operando com gasolina e diesel

Combustível	CO (%)	CxHy (ppm)	NOx (ppm)	SOx (ppm)	Particulados (g/m³)
Diesel	0,1	300	4000	200	0,5
Gasolina	10	1000	4000	60	0,01

Fonte: [5]

O óleo diesel é um combustível derivado do petróleo, sua constituição básica é feita por hidrocarbonetos de cadeia longa e, em baixas concentrações, por oxigênio, nitrogênio e enxofre. No Brasil grande parte dos transportes públicos e de cargas, por via rodoviária, é movida por motores diesel, devido a este fato, para suprir o mercado nacional, a Petrobras prioriza em suas refinarias a produção deste combustível, cuja produção corresponde a 34% do volume do petróleo processado pelo Brasil [1].

Os veículos movidos a motor diesel anterior à injeção eletrônica apresentam uma característica particular de emissão de fumaça em função da queima do combustível, o que não acontece nas mesmas quantidades dos motores a gasolina. Uma das principais fontes de poluentes presentes na atmosfera das regiões metropolitanas é a fumaça preta emitida pela queima incompleta do combustível provenientes dos motores diesel. [2]

A gasolina ou álcool, juntamente com o ar ($N_2 + O_2$) é queimado dentro das câmaras de combustão dos motores a Ciclo Otto. Uma centelha (faísca), emitida pela vela de ignição, ocasiona a reação química que se processa entre o combustível e o oxigênio contido no ar para obter a ignição no motor ciclo Otto. No motor a Ciclo Diesel, a ignição se dá quando o combustível é injetado no ar comprimido, este ar, atinge uma temperatura muito elevada suficiente para ocasionar a auto-ignição do combustível, isso acontece devido a uma relação de compressão muito maior do que as encontradas nos motores de ciclo Otto. O motor a Ciclo Diesel é aproximadamente 50% mais eficiente que o motor Otto. O melhor motor a Ciclo Otto gera em torno de 30% de eficiência térmica, porém um bom motor a Ciclo Diesel de caminhão hoje em dia tem uma eficiência de 44 a 46% [5].

Para melhor ilustrar a diferença entre os motores a Ciclo Otto e Diesel, apresenta-se a Tabela 2 para acompanhamento do paralelo do funcionamento dos motores nos quatro ciclos de funcionamento:

Tabela 2 - Funcionamento dos motores Ciclo Otto e Diesel

Ciclos de funcionamento	Ciclo Otto (Gasolina ou Álcool)	Ciclo Diesel
Admissão	Aspiração da mistura Ar-combustível	Aspiração e enchimento dos cilindros apenas com ar
Compressão	Compressão da mistura uma taxa em torno de 9:1 (gasolina) ou 12:1 (álcool)	Compressão do ar puro, numa taxa acima de 20:1
Combustão	Ignição por centelha da vela e explosão da mistura	Injeção de óleo diesel, auto inflamação pelo calor da compressão, combustão à medida em que é injetado
Escapamento	Saída dos gases queimados	Saída dos gases queimados

Fonte: [5]

As frotas de veículos diesel são significativas fontes de emissão de materiais tóxicos (poluentes), muitos estudos científicos correlacionam o desenvolvimento de doenças graves nos seres humanos em meios urbanos, como hipertensão, acidentes vasculares, câncer, cardiopatias e problemas respiratórios, devido a exposição a esses materiais tóxicos. Tais poluentes são divididos em dois, os poluentes primários, que provem das emissões veiculares e os poluentes secundários, que provem da transformação dos poluentes primários quando expostos a condições meteorológicas que propiciam a ocorrência de reações fotoquímicas, como por exemplo, ozônio troposférico e peroxiacetilnitrato (PAN). Globalmente, a partir da queima de combustíveis fósseis, a emissão de dióxido de carbono tem ocasionado o incremento do efeito estufa, considerado como a causa das alterações climáticas verificadas nos últimos 50 anos. [1]

2.2 – Poluentes

Os principais poluentes atmosféricos emitidos por tais veículos são: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO₂), e hidrocarbonetos (HC). O monóxido de carbono, os óxidos de nitrogênio e o material particulado são produtos da combustão em motores a combustão interna. Os hidrocarbonetos são emitidos pelo escapamento dos veículos e, também, pela evaporação dos combustíveis e dos óleos lubrificantes. O dióxido de enxofre está relacionado principalmente à presença de enxofre no combustível. Alguns poluentes, como monóxido de carbono (CO), ozônio (O₃), material particulado (MP), aldeídos (RCHO), óxido nítrico (NO₂) e hidrocarbonetos (HC), como benzeno, 1,3-butadieno, benzopireno, têm efeitos adversos à

saúde humana bem conhecidos e estão relacionados à doenças respiratórias, como asma, à maior incidência de câncer, doenças cardiovasculares, problemas neurológicos e de reprodução. [3]

Na figura 1 abaixo se pode notar a concentração de poluentes emitidos pelos veículos:

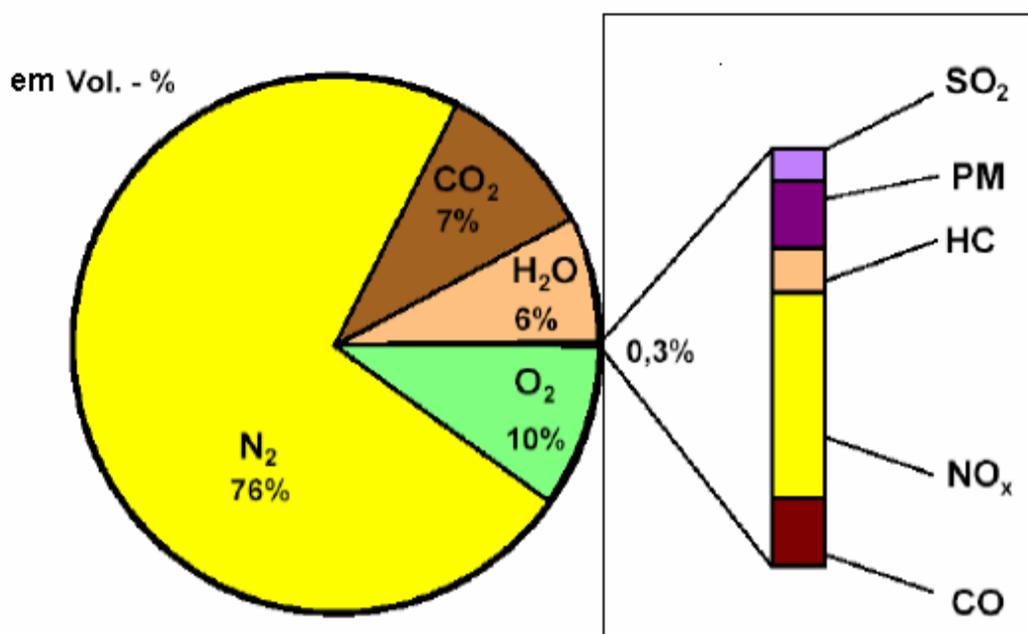


Figura 1 – Segmentação das emissões veiculares. - [9]

2.2.1 – Monóxido de Carbono (CO)

O monóxido de carbono (CO) possui uma molécula de Carbono e uma molécula de Oxigênio. É formado pela combustão incompleta de combustíveis, tanto pela indústria como pelos veículos automotores, conseqüentemente é encontrado principalmente nas cidades. Ele não possui cheiro, não tem cor e não causa irritação, sendo considerado é um dos gases mais tóxicos para os homens e animais. Os maiores causadores deste tipo de poluição são os veículos automotores, pois além de emitirem este gás em maior quantidade do que as indústrias, lançam esse gás na altura do sistema respiratório facilitando a exposição da população. Por isso, o monóxido de carbono é encontrado em altas concentrações nas áreas de intensa circulação de veículos dos grandes centros urbanos.

Entre todos seus males, este poluente pode causar morte por asfixia, infecções de caráter crônico, além de ser particularmente nociva para pessoas anêmicas e com deficiências respiratórias ou circulatórias, pois produz efeitos nocivos no sistema nervoso central, cardiovascular, pulmonar e outros.[4]

2.2.2 – Óxido de Nitrogênio (NOx)

São compostos por 90% de monóxido de nitrogênio (NO) e 10% de dióxido de nitrogênio (NO₂). O NO é uma substância incolor, inodora e insípida que, em dias de radiação intensa, é oxidado, transformando-se em NO₂. Os óxidos de nitrogênio são formados, principalmente nas câmaras de combustão de motores de veículos onde, além do combustível, há nitrogênio e oxigênio em alta temperatura, comumente em motores diesel, que combinado, formam óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e outros óxidos de nitrogênio (NO_x).

Considerados compostos são extremamente reativos. O NO reagindo com o oxigênio (O₂), ozônio (O₃) e hidrocarbonetos (HC) se transforma em NO₂. Entretanto, possuindo luz o NO₂ reage com hidrocarbonetos e oxigênio formando ozônio (O₃). O NO₂ é, portanto, um dos principais produtores do ozônio na troposfera, fração da atmosfera em contato com a crosta terrestre. O dióxido de nitrogênio (NO₂) é altamente tóxico, sua cor é marrom-avermelhada, possui cheiro e gosto desagradáveis e é muito irritante aos olhos e as mucosas nasais, pode provocar enfisema pulmonar e pode se transformar em substâncias cancerígenas no pulmão. Reage com a água presente no ar e forma um dos principais componentes da chuva ácida: o ácido nítrico (HNO₃). Nas reações atmosféricas secundárias, o NO₂ associado a hidrocarbonetos é também responsável pelo surgimento do smog fotoquímico. [4]

2.2.3 – Hidrocarboneto (HC)

A queima incompleta e evaporação dos combustíveis e de alguns outros produtos orgânicos voláteis geram os gases e vapores considerados os hidrocarbonetos. Muitos dos diversos hidrocarbonetos como o benzeno são cancerígenos e mutagênicos, não há uma concentração no ambiente que possa ser considerada totalmente segura. Os

hidrocarbonetos atuam ativamente das reações de formação da “névoa fotoquímica” (conhecida como a nevoa cinzenta no céu das grandes cidades).

2.2.4 – Material Particulado (MP)

Comumente conhecido por fuligem, sua coloração é determinada pela composição química e das características da fonte emissora, é o principal responsável pela cor escura da fumaça que sai do escapamento de alguns automóveis, caminhões e ônibus e também das chaminés das fábricas. [4]

Há diversas fontes emissoras destes poluentes, podendo ser as incomodas “fuligens” emitidas pelos veículos, as fumaças emitidas pelas chaminés de indústrias, ou até mesmo a poeira das ruas, levantada pelo movimento dos veículos e pelo vento. Considera-se dentre as denominações de material particulado (MP) uma classe de poluentes constituída de poeiras, fumaças, e todo tipo de material sólido e líquido que, devido ao seu tamanho pequeno, se mantém suspenso na atmosfera. [4]

A legislação brasileira em 1989 preocupava-se apenas com as "Partículas Totais em Suspensão", ou seja, com todos os tipos e tamanhos de partículas que se mantêm suspensas no ar, partículas menores que 100 μm . Os elementos presentes dentro desse limite apresentado à 23 anos, pode-se encontrar silício, titânio, alumínio, ferro, sódio e cloro, podem ser provenientes de combustões descontroladas, dispersão mecânica do solo ou outros materiais da crosta terrestre. Pólenes e esporos de plantas também estão dentro desta faixa. [4]

Recentemente pesquisas mostraram que partículas mais finas, aquelas com diâmetros menores que 10 μm , penetram mais profundamente no aparelho respiratório e são as que apresentam efetivamente mais riscos à saúde, partículas de dimensões superiores a 10 μm são filtradas pelas vias respiratórias enquanto que aquelas com diâmetros entre 2,5 e 10 μm atingem os brônquios e bronquíolos. Consequentemente, em 1990, a legislação brasileira passou a se preocupar também com estas partículas classificadas como "Partículas Inaláveis", utilizando os padrões da resolução CONAMA nº 3 de 1990. [4]

Somente partículas menores que 2,5 μm afeta os alvéolos pulmonares, importante componente para as trocas gasosas no pulmão, Em seus principais componentes são carbono, chumbo, vanádio, bromo e os óxidos de enxofre e nitrogênio. Partículas destas

dimensões são provenientes da combustão de fontes móveis, como automóveis e também por fontes estacionárias, como incineradores e termoelétricas. [4]

2.3 – Normas para o controle de emissões

Com a grande expansão da frota de veículos nos centros urbanos, houve um consequente aumento na taxa de poluentes despejados na atmosfera. Devido aos grandes malefícios causados pela emissão descontrolada dos mesmos, o prejuízo ao meio ambiente e a diminuição da qualidade de vida das pessoas, a muitos anos iniciou-se pelo mundo a criação de normas para limitar os níveis de emissões de poluentes expelidos pelos automóveis, considerados um dos maiores poluidores do ar do planeta.

Diversos países e continentes adotaram diferentes padrões, normas e prazos para o controle de emissões de poluentes para os veículos automotores.

Basicamente duas variáveis são observadas no ciclo de emissões de um motor diesel, a quantidade de material particulado e o nível de óxidos de nitrogênio e, a quantidade admissível de cada um deles é determinada pelos padrões Euro, onde cada etapa possui limites menores se comparando com a etapa anterior.

2.3.1 – Europa

Na comunidade europeia a legislação para o controle de emissões de poluentes dos gases de escape para os veículos pesados (veículos com massa acima de 3,5 toneladas) foi introduzida em 1988, que foi revisada em 1991 conforme a segunda diretiva, que requereu novos desenvolvimentos para se adequar aos mais severos limites que seriam efetivados em 1992, etapa chamada de EURO I, progredindo para novos limites de emissões na etapa EURO II em 1995. Nessa época a comunidade europeia já discutia novas propostas para o futuro dos limites de emissões dos poluentes, que seria a etapa EURO III [6].

Em 1999 aconteceu na Europa a efetivação da etapa EURO III, que necessitou de uma nova tecnologia, nascendo a injeção eletrônica *common rail*, para que os limites exigidos destas fases fossem garantidos, esses novos limites fizeram com que a emissão de

NOx (óxido de nitrogênio) fosse inversamente proporcional com a potencialização dos propulsores, que diminuiriam em grande escala sem a criação do sistema *common rail*. [6]

A etapa EURO IV veio a ser implementada em 2005, onde os limites de emissões de NOx e de material particulado caíram consideravelmente, surgindo novas tecnologias em conjunto com as anteriores. As que mais se destacaram foram os sistemas EGR – *Exhaust Gas Recirculation* e o sistema SCR – *Selective Catalytic Reduction*. [11]

Para a etapa EURO V, efetivada em 2008 na Europa, apenas os níveis e emissões de NOx foram diminuídos o que levou a aplicação na grande maioria dos veículos pesados o sistema SCR com adição do sistema OBD – *On Board Diagnostic*. [11]

Os limites até a Etapa EURO V podem ser verificados no gráfico da figura 3:

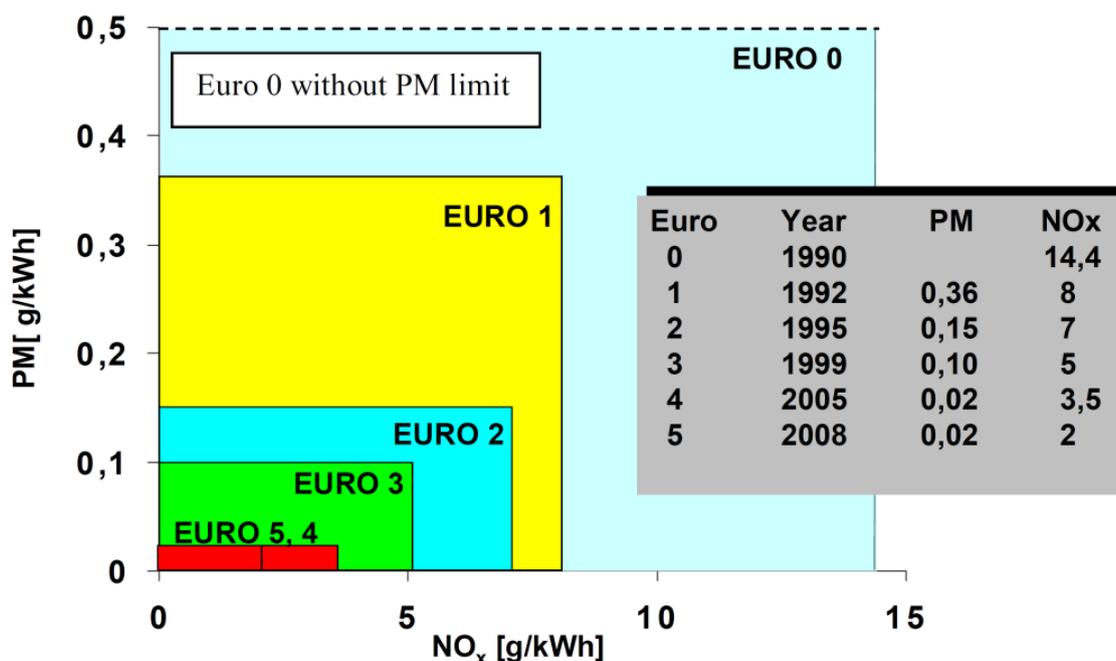


Figura 2 – Evolução dos padrões de emissão dos motores de NOx e PM de acordo com as definições Europeias. - [13]

Neste ano, em 2012, uma nova etapa foi implementada na Europa, a EURO 6, que apresentou uma descida significativa nos níveis de emissões. De fato, as emissões de NOx e de matérias particulados chegam a cair em torno de um quinto comparando com os limites da EURO V. Como pode-se notar no gráfico da figura 3 a seguir:

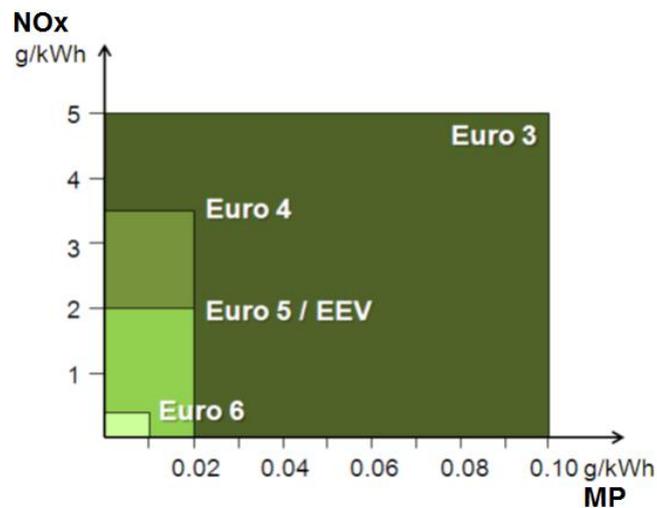


Figura 3 – Padrões necessários para o EURO VI. – [6]

2.3.2 – Norma no Brasil

No Brasil o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA criou o Programa de Controle da Poluição de Ar por Veículos Automotores, mais conhecido como PROCONVE, estabelecendo diretrizes, prazos e padrões legais de emissões aceitáveis para diferentes categorias de veículos automotores, tanto nacionais quanto importados. [7]

O PROCONVE foi baseado nas experiências internacionais, tendo como a principal base a norma EURO, proveniente da Europa, acima explicitada. A principal meta do programa é a redução da contaminação do ar proveniente das fontes moveis, onde se estabeleceu limites máximos de emissões de poluentes para ocasionar significativas reduções, o que induziu os fabricantes a investir no desenvolvimento de novas tecnologias, estabelecendo exigências para as mesmas, cuja a comprovação é feita através de ensaios padronizados. [7]

A norma possui algumas classificações de veículos para estabelecer diferentes limites de emissões, são: [7]

- 1- Veículo leve de passageiros (automóveis)
- 2- Veículo leve comercial (utilitários)
- 3- Veículo Pesado (ônibus e caminhões)
- 4- Veículos de duas rodas e assemelhados (motocicletas e ciclomotores)

2.3.2.1 – PROCONVE - Veículos pesados

Os veículos pesados são os veículos automotores para transporte de carga ou passageiros com massa total máxima maior que 3856 kg, ou massa do veículos em ordem de marcha maior que 2720 kg. [7]

Para os mesmos o controle de emissões gasosas pelo escapamento passou a ser controlado a partir do início de 1993, que gradativamente seus limites foram sendo aumentados por meio de algumas fases, as mesmas mencionadas como “P”, derivado de pesados, sendo introduzidos os limites da fase P-II em 1994, da fase P-III em 1996, da fase P-IV em 2000, da fase P-V em 2006, da fase P-VI em 2009 e da fase P-VII em 2012. [7]

Foram estabelecidas as datas de implementação de cada fase para os motores diesel destinados a veículos pesados, fabricados e comercializados no Brasil, as montadoras tiveram que adequar suas tecnologias para o atendimento desse prazo. A partir de primeiro de março de 1994, no mínimo 80% dos motores produzidos pelas montadoras deveriam atender os limites da Fase II, sendo que os remanescentes deveriam continuar atendendo os limites da Fase I. A partir de primeiro de Janeiro de 1996, 80% dos motores produzidos deveriam atender os limites estabelecidos pela Fase III, os restantes deveriam se manter dentro dos limites da Fase II. Em primeiro de Janeiro de 2000, no mínimo 80% dos motores produzidos a partir desta data deveriam atender os limites da Fase IV, os remanescentes deveriam estar dentro dos limites da Fase III, em 2002 100% dos motores já deveriam atender os limites da Fase IV. A partir de primeiro de janeiro 2006, no mínimo 80% dos motores produzidos deveriam atender os limites da Fase V, e os remanescentes deveriam atender os limites da fase IV. A partir de primeiro de janeiro 2009 todos os motores diesel fabricados deveriam atender os limites da Fase VI. Em primeiro de Janeiro de 2012 todos os motores diesel produzidos devem atender os limites da Fase VII. [7]

O PROCONVE foi baseado na norma europeia EURO, que por sua vez suas fases possuem uma correlação que pode ser verificada na tabela abaixo:

Tabela 3 – Correlação entre PROCONVE X EURO

PROCONVE	EURO
Fase I (P1)	Sem espec.
Fase II (P2)	Euro 0
Fase III (P3)	Euro 1
Fase IV (P4)	Euro 2
Fase V (P5)	Euro 3
Fase VI (P6)	Euro 4
Fase VII (P7)	Euro 5

Fonte [8]

Os principais poluentes que devem ser controlados são, Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Material Particulado (MP). Pode-se ver na Tabela abaixo os limites para atendimento em cada fase:

Tabela 4 – Limites das emissões para veículos pesados a diesel (g/kWh)

PROCONVE	CO	HC	Nox	MP	Vigência	NORMA (CONAMA)	Teor de enxofre
Fase I (P1)	14,00*	3,50*	18,00*	-	1989 a 1993	Res. 18/86	-
Fase II (P2)	11,20	2,45	14,40	0,60	1994 a 1995	Res. 08/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase III (P3)	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 ¹	1996 a 1999	Res. 08/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase IV (P4)	4,00	1,10	7,00	0,15	2000 a 2005	Res. 08/93	3.000 a 10.000 ppm
Fase V (P5)	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 ²	2006 a 2008	Res. 315/02	500 a 2.000 ppm
Fase VI (P6)	1,50	0,46	3,50	0,02	2009 a 2012 ³	Res. 315/02	50 ppm
Fase VII (P7)	1,50	0,46	2,00	0,02	a partir de 2012	Res. 403/08	50 ppm

* Não foram exigidos legalmente

¹ 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW

² motores com cilindrada unitária inferior a 0,75dm³ e rotação à potencia nominal superior a 3.000 RPM

³ não entrará em vigor na data prevista

Fonte [8]

2.4 – Evolução do óleo diesel

Ao decorrer das fases do programa PROCONVE (EURO), o óleo diesel também foi obrigado a evoluir devido às necessidades das novas tecnologias empregadas nos motores de ciclo diesel. A principal mudança que o combustível sofreu foi o nível de enxofre, que na combustão do óleo diesel, a queima do enxofre resulta em ácido sulfúrico, altamente corrosivo, sendo assim, quanto maior o nível de enxofre presente no combustível maior a quantidade de ácido sulfúrico resultante do processo, causando corrosões em dutos de novas tecnologias. [10]

Nota-se as diferenças das especificações do diesel de acordo com a fase do programa PROCONVE na tabela abaixo:

Tabela 5 – Especificações para Óleo diesel de referência para ensaios de consumo e emissões.

Características	Unidades	Fases				
		I e II	III	IV	V	VI e VII
Destilação:						
P.IE.		160-190	-	-	-	-
10%		190-220	-	-	-	-
50%	°C	245-280	min-245	min-245	245-310	245-310
90%		230-360	320-340	320-340	360	360
PFE		máx 390	máx-370	máx-370	máx-370	máx-360
Enxofre total	ppm	3.000 a 10.000	3.000 a 10.000	3.000 a 10.000	500	50
Ponto de fulgor	°C	55	55	55	min 38	min 38
Viscosidade a 37,8°C	cSt	2,5-3,5	2,5-3,5	2,5-3,5	2,5-3,5	2,5-5,0
Cinzas (máximo)	%massa	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
Índice de cetano calc.	-	48-54	48-54	48-54	42	46
Carbono Aromático	%V	15-25	15-25	15-25	15-25	15-25
C.F.P.P. (máximo)	°C	-5	-5	-5	-5	-5
Densidade a 20/4°C	-	0,832 -0,845	0,832 -0,845	0,832 -0,845	0,82 - 0-865	0,82 - 0-85
Corrosidade ao cobre 3h a 50°C (máximo)	-	2	1	1	1	1
Resíduos de carbono dos 10% finais dedest. (máximo)	%massa	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Água e Sedimentos (máx.)	%V	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Cor ATSM (Máximo)	-	3	3	3	3	3
Aspecto	-	Límpido e isento de material em suspensão				

Fonte [7]

2.5 - Evolução Tecnológica

Ao longo do tempo com os limites de emissões se restringindo cada vez mais, para que os veículos pudessem estar dentro das exigências das normas, o investimento em novas tecnologias pelas montadoras foi obrigatório, sendo cada fase da EURO marcada por um novo sistema e descobertas no meio automotivo.

2.5.1 – EURO I e II

Para as etapas EURO I e II para atingir os limites dessas fases, que eram relativamente baixos, conseguiu-se uma redução considerável da quantidade de poluentes com alguns ajustes na bomba injetora utilizando ainda o sistema de injeção mecânico convencional de combustível. [11]

2.5.2 – EURO III

Em 2005 no Brasil, a etapa EURO III ou PROCONVE V foi efetivada, e para que os veículos conseguissem atingir os limites da mesma, foi necessária uma regulagem minuciosa da bomba injetora, porém para atender tais exigências, foi necessária uma despotencialização significativa nos propulsores, o que gerou uma grande discussão no meio técnico, que para algumas aplicações dos veículos seria inviável. Numericamente, com os mesmos motores, com os mesmos volumes da etapa anterior, obtinham-se reduções de potencia na ordem de 20%. [11]

Com base neste fato, foi necessária a criação de uma nova tecnologia sem possuir as perdas de potencias provenientes dos ajustes da bomba injetora. Quando nasceu o sistema *commom rail* de injeção eletrônica, sendo a grande solução adotada para o problema da despotencialização dos motores, que permanece até hoje nas novas etapas do programa de controle de emissões.

Nos sistemas dotados de bomba injetora ocorre uma grande variação na pressão de injeção de combustível, isso ocorre devido a rotação da bomba ser proporcional à rotação do motor, verificando que a bomba injetora é acoplada ao virabrequim do motor,

sendo considerado o grande problema deste sistema. Indo nesta linha de pensamento, altas pressões surgem apenas em altas rotações e em baixas rotações o sistema não consegue gerar pressões suficientemente altas para ter uma injeção de combustível com qualidade, ocorrem injeções com quantidade bem menores de combustível o que dificulta a pulverização do diesel pelo bico injetor, gerando condições de queima não ideal, o que acarreta na formação de maiores quantidades de material particulado. [11]

A diferenciação do sistema *common rail* é a existência de um tubo, chamado rail, o que mantém o combustível pressurizado pronto para injeção, chegando até 1400bar. Independente da rotação do motor, a pressão se mantém praticamente estável, algo impossível com a utilização de uma bomba injetora convencional. [11]

No sistema *common rail*, uma bomba de alta pressão, também acoplada ao virabrequim, mantém estável a pressão do combustível dentro do rail, mesmo em baixas rotações. A pressão interna do motor é monitorada pelo módulo de controle do motor através de um sensor de altas pressões. De acordo com a pressão lida neste sensor, o módulo controla o fluxo de diesel, proveniente da bomba de alta pressão, através de uma válvula eletromecânica, o que faz com que a pressão interna do rail aumente ou diminua de acordo com a abertura desta válvula. Em caso de surgimento de pressão excessivamente altas no rail, existe uma válvula de segurança, que se abre, possibilitando o retorno de combustível ao tanque. Com este sistema pode-se garantir a injeção de combustível sempre em altas pressões, o que garante uma queima mais completa, consequentemente mais eficiente nas câmaras de combustão, reduzindo significativamente a emissão de poluentes, principalmente de material particulado. [11]

Eletro-injetores, que são válvulas eletromagnéticas, controlados pela ECU, fazem a injeção de combustível propriamente dita. A ECU calcula a quantidade de combustível injetada através do tempo de abertura do bico e da pressão interna do rail. A ECU monitora ainda todos os outros sensores do motor (rotação, temperatura, fase e pressão de ar), possibilitando a injeção na quantidade correta e no instante de tempo exato para que ocorra a melhor condição de queima. [11]

A figura 4 a seguir representa os principais componentes do sistema common rail:

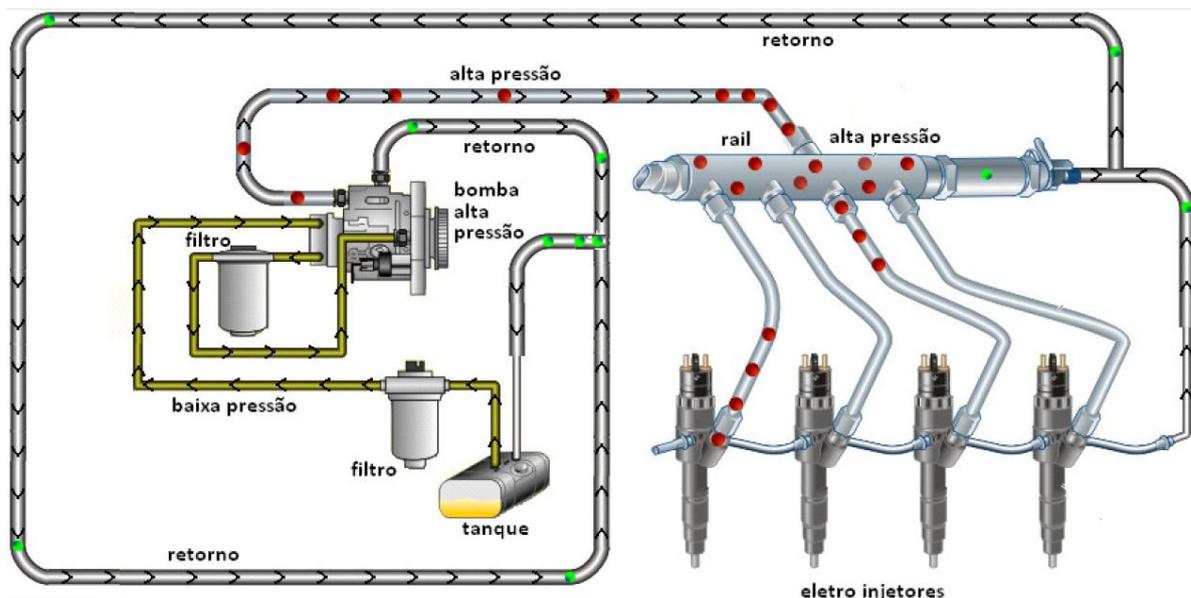
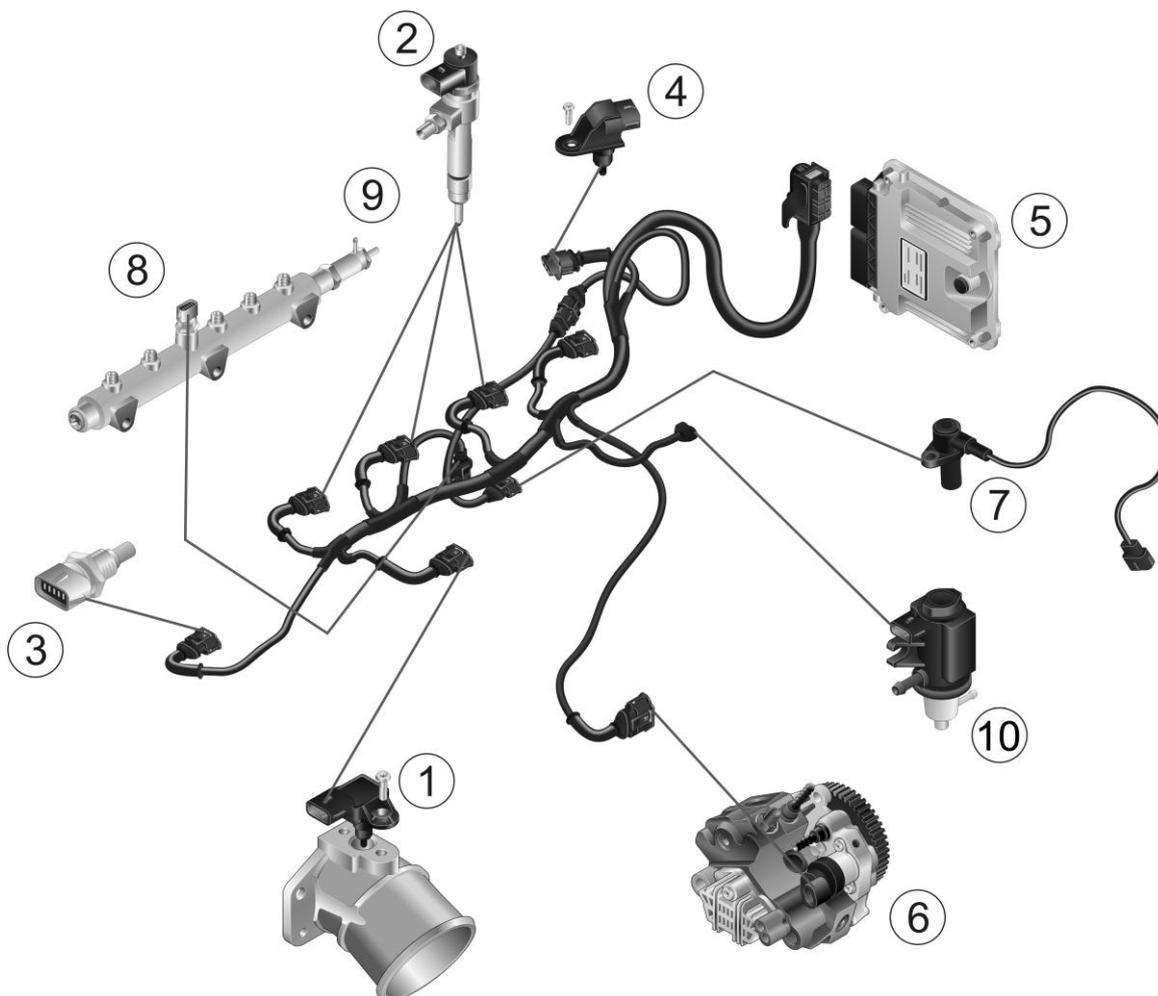


Figura 4 – Componentes sistema common rail. – [10]

Com a utilização do controle eletrônico, surgiram-se novas técnicas para aperfeiçoar o sistema, como por exemplo, a pré-injeção de combustível. Consiste em fazer uma injeção preliminar de combustível, em um instante de tempo anterior ao ponto de injeção principal (no máximo 90° graus de virabrequim antes do ponto morto superior), utilizando um volume reduzido de aproximadamente 1 a 4mm³ do óleo diesel. Isso ocasiona um ambiente mais adequado à injeção principal, pois provoca uma pré-ignição e uma conseqüente pressurização e aquecimento da câmara, o que otimiza ainda mais a queima do combustível. [11]

Com a técnica da pré-injeção, pode-se, devido ao pré-condicionamento da câmara de combustão, reduzir o atraso da injeção principal, o que provoca também a redução do pico depressão de ignição devido à compressão do cilindro pelo pistão. Com isso, é obtida ainda significativa redução no nível de ruído emitido pelo motor. [10]

A seguir podemos notar os principais sensores e atuadores do sistema:



01- Sensor de Pressão e Temperatura do Ar de Admissão
 02- Bico Injetor
 03- Sensor de Temperatura do Líquido de Arrefecimento
 04- Sensor de Posição do Motor (Comando de Válvulas)
 05- ECU

06- Bomba de Alta Pressão
 07- Sensor de Rotação do Motor (Árvore de Manivelas)
 08- Sensor de Pressão do Rail
 09- Válvula Limitadora de Pressão
 10- Modulador do Turbocompressor

Figura 5 – Principais sensores e atuadores do sistema common rail Bosch. – [10]

O ECM é o cérebro do controle eletrônico do sistema Common Rail e tem a função de controlar as operações do motor através de funções pré-programadas na memória. O acesso aos dados disponíveis na ECM é feito através de um conector de diagnóstico.

Está localizado no ECM e tem a função de monitorar a pressão ambiente, indicando a altitude geográfica onde se encontra o veículo. Conforme o sinal enviado pelo sensor, o ECM faz a correção do débito de injeção. [10]

O sensor de rotação da árvore de manivelas é do tipo indutivo e está posicionado na carcaça do volante. O sinal do sensor é responsável pela leitura da rotação do motor e da posição exata dos pistões nos cilindros. A informação é usada pela ECM para cálculo do

ângulo de início de injeção. A roda de pulso é montada na árvore de manivelas, entre o volante e a engrenagem. Uma defasagem na roda de pulso serve como referência para o sensor. Através do sinal são localizadas a rotação do motor e a posição exata da árvore de manivelas. Esta informação é usada pela ECM para controle de sincronismo de injeção.

O sensor de posição do motor está posicionado na tampa de válvulas e tem como objetivo ler o sinal provocado por um ressalto na árvore de comando, sincronizando a injeção através da localização do 1º cilindro que está em combustão e a posição do pistão no cilindro. A informação é utilizada pela ECM para cálculo de sincronismo de injeção. [10]

O sensor de posição do acelerador é um potenciômetro rotativo e o sinal tem como objetivo calcular a rotação em marcha lenta, ângulo de início de injeção e tempo de injeção em aceleração e desaceleração. A movimentação do pedal aciona um contato deslizante que, através de uma trilha de resistência elétrica, gera o sinal de acordo com a situação solicitada.

O ECM, através da variação de tensão no sensor, constata as seguintes posições do pedal:

- Posição Marcha lenta (CT = 0 – 8%): a posição CT controla a marcha lenta e a desaceleração do veículo ou freio-motor;
- Posição Aceleração (PT = 8 – 73%): a posição PT controla uma melhor utilização do mapa de injeção;
- Posição Aceleração Plena (WOT = a partir de 74%): a posição WOT controla a dosagem de combustível com o objetivo de evitar emissão de poluentes devido ao excesso de combustível e a sobrecarga térmica ocasionado pelo torque ou rotação. [10]

O sensor, do tipo NTC (Coeficiente Negativo de Temperatura), informa a temperatura de arrefecimento do motor. O ECM utiliza esses parâmetros para corrigir do valor de injeção de combustível, ângulo de início de injeção e rotação de marcha lenta. [10]

O sensor de pressão e temperatura é um sensor duplo e informa o ECM sobre a temperatura e a pressão do ar admitido para calcular a massa de ar utilizada na combustão através da densidade X volume. Está localizado na curva de admissão. [10]

O modulador é uma válvula eletromagnética com a função de liberar ou bloquear a passagem de vácuo para a válvula waste-gate do turbocompressor. Controlada pela ECM, a válvula ajusta, eletronicamente, a passagem de ar para a admissão do motor. [10]

2.5.3 – EURO IV

A etapa Euro IV, apertou ainda mais os limites permitidos para a emissão de poluentes. Analisando a figura abaixo, observa-se a evolução dos limites permitidos de emissões para o ciclo Euro. [11]

Foram realizados, pelos fabricantes de motores, estudos preliminares utilizando essencialmente o sistema common rail, obtendo resultados não muito favoráveis. Os limites necessários poderiam ser atingidos com a regulagem do sistema, porém ocorreu o mesmo fato traumático da etapa EURO III com a utilização da injeção mecânica, a regulagem causou uma despontencialização drástica nos motores. [11]

Nesses mesmos estudos verificou-se ainda que trabalhando apenas com a calibração da injeção eletrônica do motor, seria possível ocasionar na saída de gases, variações na quantidade de NOx e de particulados, conforme se pode notar no gráfico da figura abaixo, seguindo a curva “trade off”, dessa maneira não havia necessidade da alteração da potencia do motor. Entretanto, quando se melhorava a emissão de um dos poluentes, conseqüentemente se piorava a condição do outro, fazendo com que nunca fosse possível atender as necessidades da etapa EURO IV por completo. [11]

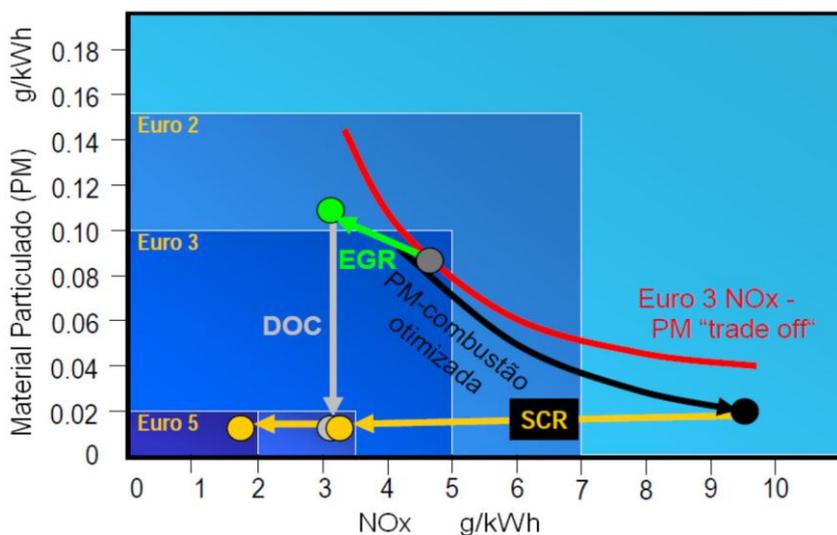


Figura 6 – Limites de particulados (PM) e NOx exigidos para os ciclos Euro. – [11]

Diante deste cenário, mais uma vez surgiu a necessidade da criação de novos sistemas que contribuíssem para o atendimento dos limites desejados. Duas propostas

foram adotadas pelas montadoras: os sistemas EGR – *Exhaust Gas Recirculation* e o sistema SCR – *Selective Catalytic Reduction*. O sistema *common rail* continuo sendo utilizado.

2.5.3.1 – Sistema EGR – *Exhaust Gas Recirculation*

O sistema EGR (Recirculação de Gases de Exaustão) reutiliza parte dos gases de exaustão na mistura diesel + ar durante a combustão, para a redução dos níveis de óxidos de nitrogênio (NOx). Para completar o processo, é utilizado um catalisador de oxidação que minimiza as parcelas de hidrocarbonetos e monóxido de carbono nos gases de exaustão.

Em um primeiro momento força-se a recirculação de cerca de 20 a 30 % dos gases originários do escape, os quais passam por um tipo de catalisador para serem refrigerados e posteriormente reconduzidos para o sistema de admissão de ar. Como este gás é rico em CO₂ ocorre uma alteração na relação combustível/ar do motor, ocasionando um redução na temperatura de combustão. Devido ao fato da emissão de NOx estar diretamente relacionada às grandes temperaturas durante o processo de queima, com a redução desta temperatura ocorre conseqüentemente a redução dos índices deste poluente. [11]

Por outro lado, enquanto ocorre a redução da temperatura nas câmaras de combustão do motor, reduz-se também a qualidade da queima do combustível, causando um aumento da quantidade dos materiais não queimados, chamados de materiais particulados. Este processo faz com que os gases provenientes das câmaras de combustão sejam notados no ponto em verde do gráfico da figura 6. Neste ponto os limites de NOx para a etapa EURO IV estão sendo atendidos, entretanto, os limites de materiais particulados está acima do limite obrigatório, levando o motor para a região da etapa EURO II. [11]

Para que o sistema atendesse os limites estipulados para os particulados, utilizou-se um catalisador de oxidação e um filtro para que o mesmo não expelido no meio. Este filtro é chamado de DFP (*Diesel Particulate Filter*) e o catalisador de DOC (*Diesel Oxidation Catalysts*), fazendo com que os gases atinjam o ponto cinza claro do gráfico da figura 6, Assim ficando dentro dos limites da etapa EURO IV. [11]

A medida em que o filtro DFP satura sua concentração, através dos comandos do sistema eletrônico, a abertura da válvula EGR é controlado e altera a quantidade percentual dos gases que estão sendo recirculados para admissão, aliado a um adiantamento ou atraso do ponto de injeção, para ocasionar um aumento na temperatura de combustão e

consequentemente um aumento considerável na temperatura dos gases de escape, provocando a limpeza do filtro e sua consequente regeneração. [11]

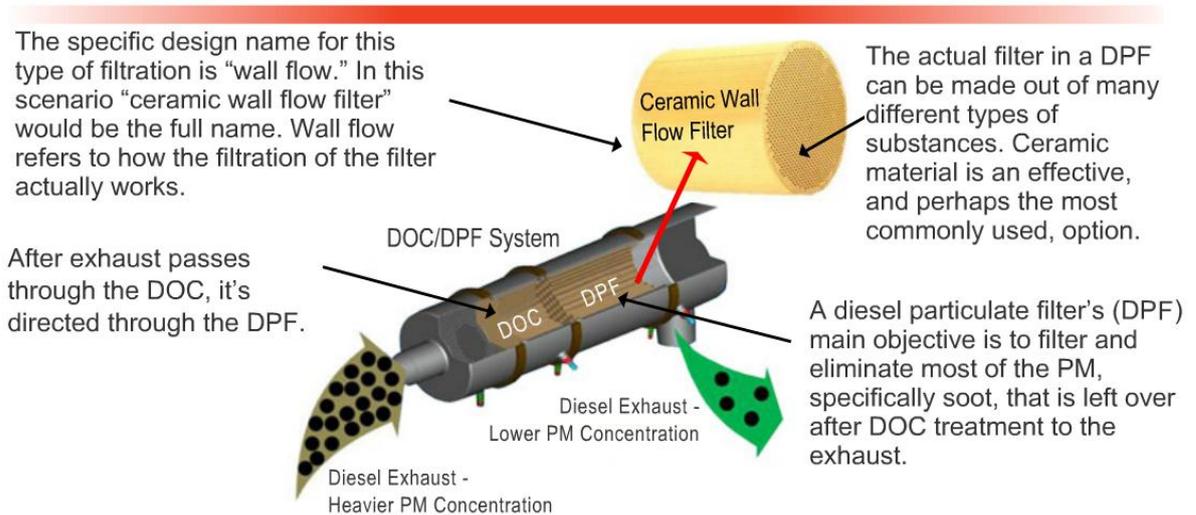


Figura 7 – DOC (Diesel Oxidation Catalysts) and DFP (Diesel Particulate Filter). – [12]

A figura 8 representa o esquema funcional do sistema EGR e seus componentes constituintes:

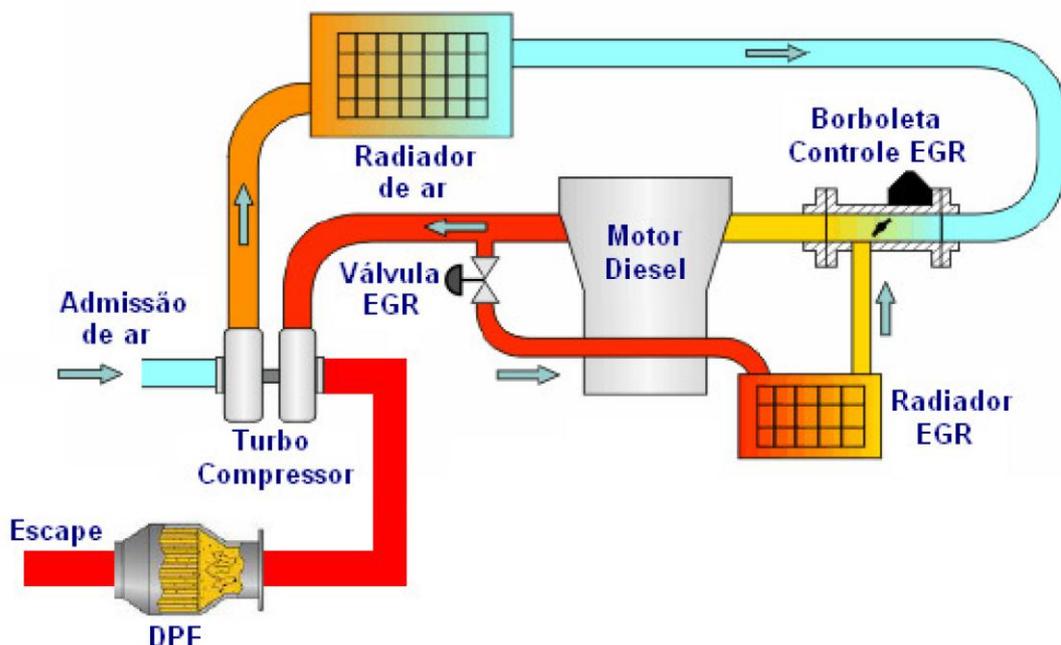


Figura 8 – Sistema EGR – [11]

Os gases que provem da combustão estão em altas temperaturas que são refrigerados antes de serem reconduzidos para ao sistema de admissão. Para tal, utiliza-se resfriadores de ar/água (trocadores de calor) em aço inox, devido ao fato deste ser mais resistente aos efeitos agressivos do ácido sulfúrico resultante da queima de enxofre. Fazendo com que a utilização do sistema EGR, possua severas restrições á utilização de combustíveis com elevados teores de enxofre. Por isso, motores com sistema EGR, obrigatoriamente trabalham com diesel S50 (50 ppm de enxofre) ou S10 (10 ppm), sob pena de redução drástica da durabilidade de seus componentes. [11]

A concentração de enxofre no diesel foi um serio problema observado pelas montadoras na definição de qual sistema a ser implementado em seus veículos, vistos que a própria ANP (Agencia nacional de Petróleo) não garantiu o fornecimento deste combustível em níveis nacionais para o ano de 2009, o que foi o principal fator que contribuiu com o adiamento da entrada em vigor da legislação que exigia a norma EURO IV para aquele ano, que não veio a ser implementado. Por decisão governamental, os limites de emissões de poluentes evoluiriam diretamente para a etapa EURO V pulando a EURO IV em 2012, ano em que a ANP garantiu o fornecimento do Diesel comercialmente. Atualmente existe um cronograma para a adequação de alguns postos de abastecimento em pontos esquemáticos em diversas cidades para utilização do diesel S50, ainda havendo na grande maioria dos postos das grandes cidades o chamado diesel metropolitano que apresenta 500 ppm de enxofre, e em regiões mais distantes do país ainda se utiliza o diesel que apresenta níveis de 2000 ppm a 6000 ppm, sendo fato de grande preocupação do meio automotivo. [11]

2.5.3.2 – Sistema SCR – *Selective Catalytic Reduction*

O sistema de SCR (*Selective Catalytic Reduction* - Redução Catalítica Seletiva), que reduz o NOx a nitrogênio elementar (N₂) pela reação química entre o NOx e a amônia, na presença de oxigênio (O₂), realizada no catalisador. A amônia é o único composto químico capaz de reduzir o NOx a N₂ pela remoção do oxigênio da sua molécula.

Historicamente o processo de SCR foi desenvolvido pela Engelhard Corporation, nos Estados Unidos, e patentado em 1957. A primeira aplicação prática ocorreu no Japão na década de 70. Desde essa época o SCR tem sido empregado basicamente em aplicações de motores diesel marítimos e em motores estacionários (usina termoelétricas e geradores) na Europa e nos Estados Unidos. [9]

2.5.3.2.1 – Processo químico do SCR

O sistema SCR proposto para utilização em veículos automotores de ciclo diesel possui a necessidade da utilização de uma solução aquosa de uréia de 32,5% em massa (AUS 32 – *aqueous urea solution*), chamado comercialmente de AdBlue. A uréia (sólida) é utilizada no processo de fabricação do AdBlue preferencialmente à amônia (gás), devido a sua facilidade de manuseio, ausência de toxicidade, segurança e facilidade na preparação da solução na concentração correta, que no caso da amônia isso não ocorre, pelo fato deste componentes ser tóxico e de difícil manuseio e preparação. [9]

O processo de SCR consiste em injetar certa quantidade controlada da solução de uréia diretamente na corrente de exaustão do motor, antes do catalisador. Devido à alta temperatura dos gases de exaustão, durante a atomização ocorre a decomposição térmica (*termólise*¹) da uréia, seguida de uma hidrólise do subproduto da primeira reação (HNCO - ácido isocianico) com o vapor de água que está presente nos gases de exaustão (evaporado da solução e/ou produzido pela combustão) [9], conforme abaixo:



A figura 9 abaixo apresenta um esquemático do funcionamento do sistema SCR e do processo de formação da Amônia:

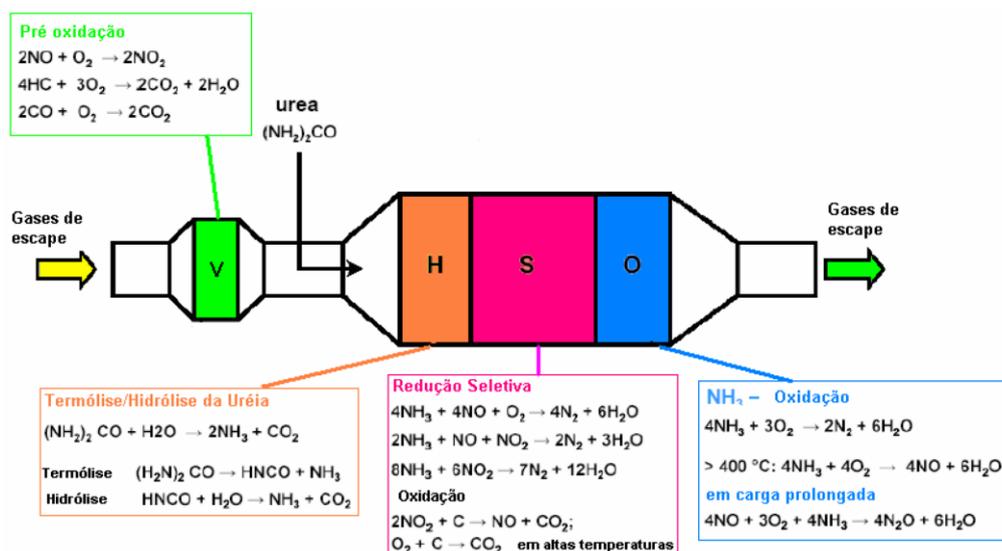


Figura 9 - Representação esquemática do funcionamento do SCR, com as reações químicas que ocorrem no sistema. – [9]

A amônia (NH₃), produzida pelas duas reações citadas acima, reage o NO_x presente nos gases de exaustão do motor, onde ocorre a redução do NO_x o nitrogênio elementar (N₂), denominado como redução seletiva. O processo é chamado de seletivo porque a remoção do oxigênio ocorre apenas nas moléculas de NO_x não removendo o oxigênio de nenhum outro composto oxigenado. [9]

As principais desvantagens do emprego do SCR são a necessidade de um tanque extra para o agente redutor (AdBlue) e a baixa atividade na remoção de NO_x a baixas temperaturas (< 300°C) devido a necessidade de calor para a liberação de amônia e as principais vantagens são a alta seletividade e alta efetividade na remoção de NO_x a altas temperaturas (> 300°C) conforme processo citado acima. [9]

A principal reação que ocorre em um catalisador SCR pode ser vista abaixo, a mesma acontece devido aos óxidos de nitrogênio da exaustão de um motor diesel serem compostos basicamente por óxido nítrico (NO): [9]



Essa reação implica em uma proporção estequiométrica 1:1 entre a amônia e o óxido nítrico, com o consumo de certa quantidade de oxigênio. Essa reação não é relevante e muito lenta caso não haja a presença do oxigênio no processo. [9]

Já a mistura de óxido nítrico e óxido nítrico (NO + NO₂) reage de modo muito mais rápido com a amônia comparando-se com a reação padrão. Sendo assim, faz-se o uso de um catalisador fortemente oxidante antes do ponto de injeção de uréia para oxidar parte do NO a NO₂ (2NO + O₂ → 2NO₂). Resultando na reação a seguir: [9]



Em situações em que as temperaturas ficam abaixo de 300°C, a reação rápida do SCR é muito mais rápida que a reação padrão. [9]

Os catalisadores empregados no sistema SCR são baseados em misturas de óxidos de metais de transição cataliticamente ativos, como o dióxido de titânio (TiO₂), trióxido de tungstênio (WO₃) e pentóxido de vanádio (V₂O₅). [9]

A atividade dos centros ativos do catalisador e das dimensões dos poros do suporte cerâmico que sustenta o catalisador é que determina a capacidade do sistema SCR em reduzir o NOx a nitrogênio. [9]

O tamanho do poro influencia na taxa de difusão dos gases de exaustão no interior dos poros do catalisador. [9] Uma representação esquemática da difusão dos gases e da amônia no interior dos poros pode ser vista na figura 10 abaixo:

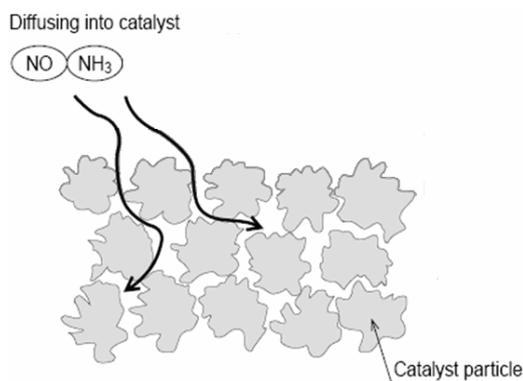


Figura 10 – Representação esquemática da difusão através dos poros de um catalisador. – [9]

Nas duas figuras que se vê a seguir, representam o mecanismo de reação envolvido no processo SCR. Na primeira verifica-se o processo global de difusão e transporte dos gases envolvidos no processo e na segunda o mecanismo de reação de redução do NOx na superfície do catalisador SCR.

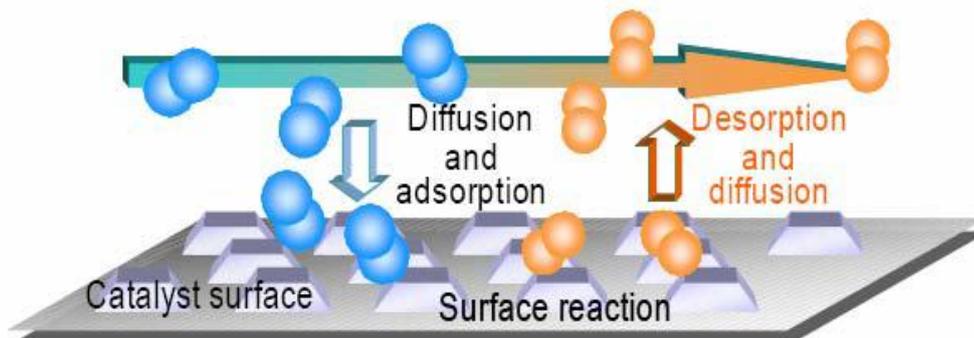


Figura 11 – Representação esquemática do processo de redução catalítica seletiva. Processo difusivo global. As esferas azuis representam NOx e as esferas alaranjadas representam N2. – [9]

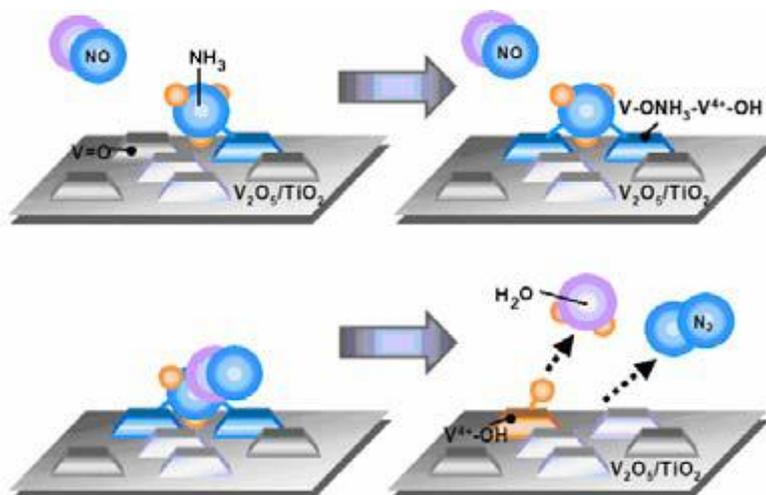


Figura 12 – Representação esquemática do processo de redução catalítica seletiva. Mecanismo da reação de redução na superfície do catalisador SCR. – [9]

2.5.3.2.2 – Funcionamento do sistema

O sistema SCR também pode ser dividido em duas fases, mas diferentemente do EGR o foco das mesmas é diferente. Na primeira parte do processo realizaram-se ajustes na calibração do sistema *common rail*, adequando os níveis de particulados dentro dos limites permitidos pela etapa EURO IV. Ao contrário do EGR que atua inicialmente na diminuição do NOx, de modo que essa calibração desloca as emissões do motor para o ponto oposto da curva da figura 6, posicionando-o no ponto preto. Nota-se que neste ponto a emissão de NOx ultrapassa os limites fazendo com que o motor fique classificado na região de emissões da EURO I.

A segunda fase do processo consiste em tratar os gases resultantes da combustão, o qual é realizado através de uma reação química dentro do catalisador, chamado de EGP – *Exhaust Gas Processor*, ou simplesmente, um sistema de pós-tratamento de gases, utilizando o AdBlue (uréia a 32,5% em massa) para este processo, necessitando de um reservatório adicional para o reagente.

Uma bomba pressurizada conduz o AdBlue da linha de injeção até o bico injetor de uréia. Há duas condições para que aconteça a injeção de uréia, uma delas é que a

temperatura do EGP deve atingir um valor médio acima de 250°C, isso ocorre, pois a uréia pulverizada depende essencialmente de calor para transforma-se em amônia, a qual reage efetivamente com o NOx. A segunda condição é o motor atingir no mínimo 70°C, existe uma margem legal que até que o motor atinja essa temperatura a emissão de NOx é ignorada, isso acontece, pois a formação de NOx está diretamente relacionada a altas temperaturas de combustão. [11]

Há uma grande preocupação quanto à utilização de toda a amônia gerada neste processo, sendo totalmente convertida em nitrogênio e não sendo liberada na atmosfera, tendo em vista que a mesma é altamente nociva à saúde. A partir deste fato, o processo de reação química deve ser precisamente controlado. Este controle é realizado pela DCU (*Dosing Control Unit*), através de sensores de temperatura localizados na entrada e na saída do EGP, juntamente com uma calibração refinada da injeção de uréia, injetado exatamente a quantidade correta de acordo com a condição daquele instante de operação, com a leitura dos sensores de temperatura e também do ciclo de trabalho do motor. [11]

Um grande dificultador do sistema SCR é a necessidade de um grande espaço físico para instalação de todos os seus componentes. O EGP mesmo substituindo o silencioso dos veículos ainda possui dimensões maiores, além de seu tubo de entrada possuir um trecho reto e no mínimo 400mm após injeção da uréia, para garantir uma mistura eficiente com os gases antes da entrada do EGP. [11]

A unidade dosadora de uréia é um dos componentes adicionais do sistema SCR. Nela estão presentes diversos componentes que são: bomba pressurizadora de uréia, sensores de temperatura, válvulas de reversão e também resistências de aquecimento. A necessidade de controlar a temperatura da uréia ocorre, pois a solução congela-se em temperaturas inferiores a -5°C. Para isso utilizam-se aquecedores, feitos por meio de resistências elétricas ou por recirculação de líquido refrigerante do motor através de serpentinas, que elevam a temperatura interna do módulo dosador, das linhas de circulação de uréia e do reservatório do reagente. Além do sistema de aquecimento utiliza-se a válvula de reversão que realiza a inversão do sentido da injeção, deixando todas as linhas e o módulo dosador sem a presença da uréia, evitando que o reagente congele em condições com o veículo desligado. [11]

Outro componente adicional que deve ser considerado é o reservatório de uréia. O cálculo para o dimensionamento do mesmo deve levar em consideração a autonomia do veículos, visando um consumo de cerca de 3 a 4% do volume consumido de combustível. Normalmente é considerado um volume de uréia que garanta a autonomia do veículo equivalente a 5 tanques de combustível. [11]

O diesel recomendado para ser utilizado para neste sistema é o S50 (50 ppm de enxofre), porém não é algo mandatário, sendo possível a utilização do diesel metropolitano

S500, isso pode ocasionar uma saturação do EGP com enxofre, causando uma perda de eficiência na reação química para diminuição do NOx que o mesmo é destinado. Havendo essa contaminação, da mesma forma que o filtro DPF no sistema EGR, expondo o veículo a uma rodagem de potencia por algumas horas, que eleva a temperatura de trabalho do motor, fazendo a regeneração do EGP. [11]

O grande problema apresentado pelo SCR na etapa EURO IV é a questão da regulamentação do uso da uréia, visto que não existia nenhum dispositivo que fizesse o monitoramento, garantindo o abastecimento do veículo com o reagente. Sendo assim o condutor poderia utilizar água pura para abastecê-lo ou até mesmo não abastecer o reservatório, causando o não atendimento do veículo a legislação, e o veículo sendo utilizado normalmente, ficando a cargo de órgãos competentes a fiscalização deste fator. Problema que veio a ser resolvido na etapa EURO V. [11]

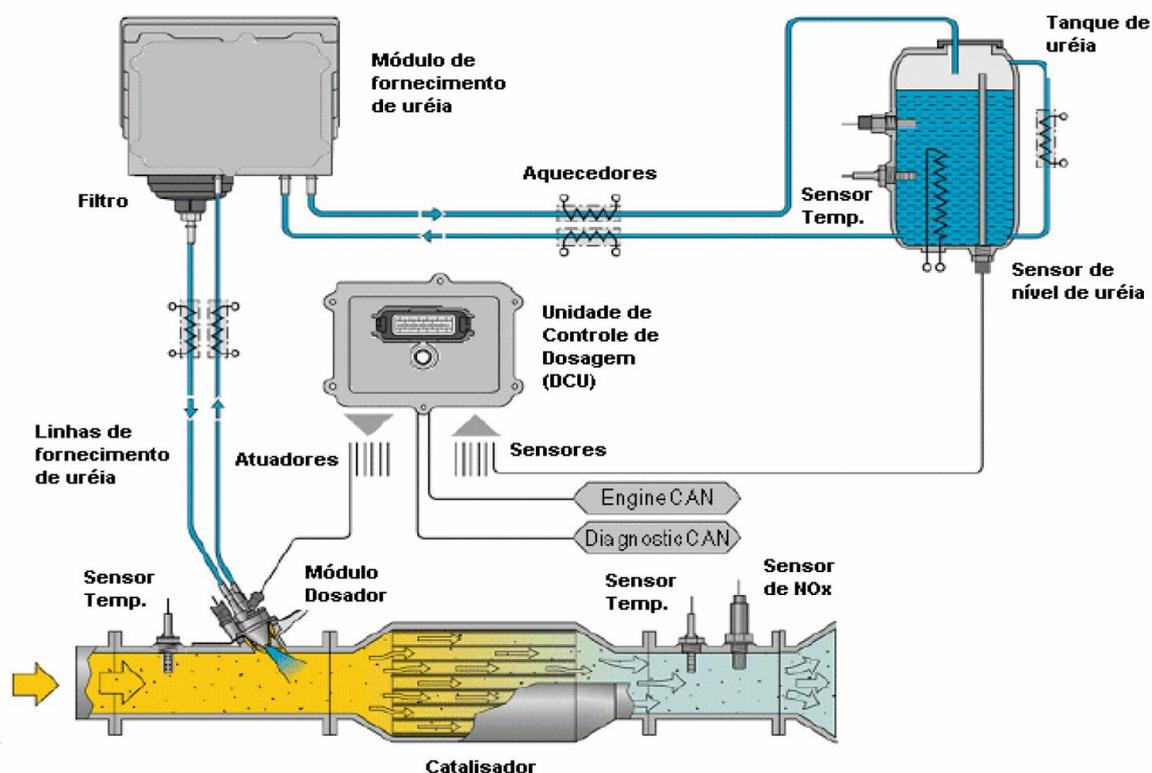


Figura 13 – Layout geral para sistemas SCR. – [11]

Pode-se citar os principais sensores do sistema conforme se verificar na figura 13:

- Sensores de pressão de uréia: Determinam as pressões nas linhas hidráulicas do sistema, Também utilizado como estratégia para verificar possíveis vazamentos nas linhas, assim comprometendo a correta operação do sistema SCR. [9]

- Sensores de temperatura: Existem dois tipos de sensores de temperatura. Os primeiros fornecem os dados das temperaturas dos gases de exaustão, informações necessárias para controlar a injeção de uréia e para monitorar a temperatura no núcleo do conversor catalítico e do modulo dosador. Os outros sensores são responsáveis por medir a temperatura do tanque de uréia, das linhas hidráulicas e do modulo de fornecimento de uréia, informando a DCU, que se necessário atua nas resistências para o aquecimento do sistema, evitando que a uréia contida nos mesmos congele. [9]

- Sensor de nível de uréia: mede a quantidade da solução de uréia existente no tanque, alertando para a necessidade de abastecimento. [9]

- Sensor de NOx: a instalação deste sensor independe da tecnologia empregada para o controle de emissões do NOx, possui a função de monitorar a eficiência de conversão do catalisador. Pode trabalhar como parte de um circuito de controle do sistema de emissões, com intuito de fazer ajustes em tempo real e otimizar a conversão do NOx, os sensores podem ser instalados antes e depois do catalisador, fornecendo assim, um circuito de controle do sistema de emissões para a DCU, que por sua vez, pode então realizar ajustes para melhorar a eficácia de conversão de NOx. O sensor envia sinais de saída em volts que são diretamente proporcionais a concentração, em PPM, de NOx. [9]

Além dos sensores, são imprescindíveis a utilização dos atuadores no sistema, são:

- Modulo dosador – constituído basicamente pelo injetor que tem a finalidade de dosar a uréia no escape. É controlado através de pulsos elétricos, ligados diretamente à DCU por um chicote elétrico, que determina o tempo de abertura e fechamento do injetor. [9]

- Bomba de uréia – localiza-se no modulo de fornecimento de uréia, sendo responsável por bombear a uréia do tanque de armazenamento, pressurizá-la e bombeá-la até o modulo dosados para injeção. Também é utilizada para o esvaziamento das linhas hidráulicas ao se desligar o veiculo, realizando o trabalho inverso ao primeiro, sendo uma tarefa importante para evitar em dias com situações de baixas temperatura que a uréia congele e rompa as linhas de fornecimento na utilização do veiculo. [9]

- Aquecedores das linhas hidráulicas: quando a DCU identifica uma situação de baixas temperaturas, indicada pelos sensores de temperatura, ela controla os aquecedores das linhas hidráulicas para descongelar ou manter a solução de uréia em estado liquido nas linhas de fornecimento. [9]

2.5.4 – EURO V

Na etapa EUROV, também chamada no Brasil de PROCONVE P7, os limites emissões de particulados se manteve, focando apenas na diminuição de NOx, conforme se pode notar na figura 7, isso fez com que as montadoras dos veículos utilizassem sistemas mistos ou mais apurados para chegar aos níveis de emissões desejados.

Essa nova etapa passou a exigir que o próprio sistema fosse capaz de diminuir a potencia do motor caso o mesmo não atingisse os limites estipulados de emissões. Diante disso, mais um novo sistema foi incluído às tecnologias, o OBD (*On Board Diagnostic*), basicamente é um sistema de monitoramento dos gases de escape, capaz de realimentar o sistema geral com informação sobre o desempenho do veículo, assim possuindo uma malha fechada, que se necessário fornece informações para causar a despotencialização exigida pela legislação. [11]

O sistema EGR, por si só, seria possível sua utilização, porém aconteceria uma despotencialização e o consumo de combustível aumentaria. Uma das alternativas seria a utilização de sistemas mistos, que seria a inclusão de um módulo SCR na saída dos gases ou a migração total para o sistema SCR. Nos veículos que mantiveram a utilização do EGR, o filtro DPF, que realiza a retenção do material particulado, passou a contar com sensores de restrição, para apontar a saturação do filtro e forçar a sua regeneração nos momentos necessários. [11]

Nos sistemas exclusivamente com a tecnologia SCR, para o atendimento da nova etapa, foi necessário apenas uma aprimoração na injeção de uréia, aumentando-se a quantidade de uréia injetada na tubulação de escape do motor, com isso consegue-se neutralizar uma quantidade maior de NOx. Porém com uma maior quantidade de uréia, maior será a quantidade de amônia devido a reação química do processo, a amônia em elevadas concentrações satura a reação química com as moléculas de NOx e tende a ser expelida na atmosfera, causando riscos às pessoas. Para evitar que a amônia seja expelida foi acrescentado no EGP um novo elemento filtrante na sua etapa de saída, que é capaz de neutralizar este excesso de amônia, que levou a um aumento no dimensional do EGP e também de seu peso. [11]

Com a inclusão do OBD, o sistema de pós-tratamento passou a contar com um sensor capaz de medir a concentração de NOx dos gases de escape. Dependendo do valor lido por este sensor, o sistema pode injetar certa quantidade de uréia com o intuito de corrigir os níveis de emissões de acordo com o desejado, por outro lado, em casos de emissões muito maiores, normalmente por falta do AdBlue, o sensor comunica o ocorrido ao

modulo do motor que gera uma drástica despotencialização, obrigando o condutor do veiculo a procurar uma assistência técnica para corrigir o problema, ou simplesmente abastecer o veiculo com AdBlue. Essa comunicação entre os módulos faz com que não seja possível conduzir o veiculo sem a presença do reagente ou com o abastecimento de outra substancia que não gera a queda das emissões de NOx. [11].

Este sensor de gases de escape pode ser considerado um modulo eletrônico a parte da arquitetura elétrica do veiculo, o mesmo se comunica via protocolo de comunicação CAN com os demais módulos do motor e do sistema de pós-tratamento do SCR.

3. – METODOLOGIA

Será realizada a avaliação da comunicação entre os módulos de um veiculo, possuindo um motor destinado ao EURO V, dotado do sistema SCR, pós-tratamento de gases, a fim que observar as mensagens que circulam na rede, utilizando-as para realizar um estudo do comportamento do sistema e suas respostas de acordo com as variações provenientes de diversas utilizações do veiculo.

A partir deste estudo, será possível transpor os dados a um gráfico, com essas diversas situações de operação do veiculo, como por exemplo, a quantidade de uréia injetada pelo sistema em situações normais, ou em situações atípicas, na utilização do veiculo com o reservatório do reagente abastecido com água, comparando as situações.

O veiculo utilizado para realizar as medições e estudos propostos foi um caminhão Agrale CA 10000, nas configurações abaixo:

- Motor avançado, MWM série 4.12 de 4,8 litros.
- Potencia nominal de 165CV@2200RPM
- Carregado em seu PBT de 10 toneladas
- Sistema SCR de malha fechada

Dotado dos principais seguintes módulos que compõe a arquitetura elétrica deste veiculo:

- ECU – (*Engine Control Unit*): responsável pelo gerenciamento da injeção eletrônica de combustível e a leitura dos sensores do motor, como temperatura do óleo, pressão da injeção, entre outros.
- DCU (*Dosing Control Unit*): Responsável pelo gerenciamento do sistema de pós-tratamento dos gases de escape, dosagem de uréia e controle da temperatura do sistema.

- Sensor de NOx: Realiza a medição da quantidade de NOx nos gases de escape, após a saída do EGP
- Cluster (painel de instrumentos) – exibe as informações pertinentes ao veículo para o condutor
- Tacógrafo: registra os dados de velocidade do veículo, de acordo com a rotação do alternador e os publica na rede CAN sendo os dados distribuídos à ECM que fornece informação ao Cluster.
- Rastreador: fornece a localização global do veículo e transmite os dados para a central de controle.

Todos esses módulos possuem suas próprias conexões aos sensores dos quais recebem sinais e aos seus atuadores que fornecem os comandos necessários e suas respectivas alimentações elétricas. Além disso, são interconectados por uma espécie de rede, linha CAN, comunicando-se entre si de acordo com o protocolo J1939, proveniente da norma SAE J1939

A figura 14 abaixo exemplifica as ligações entre os módulos:

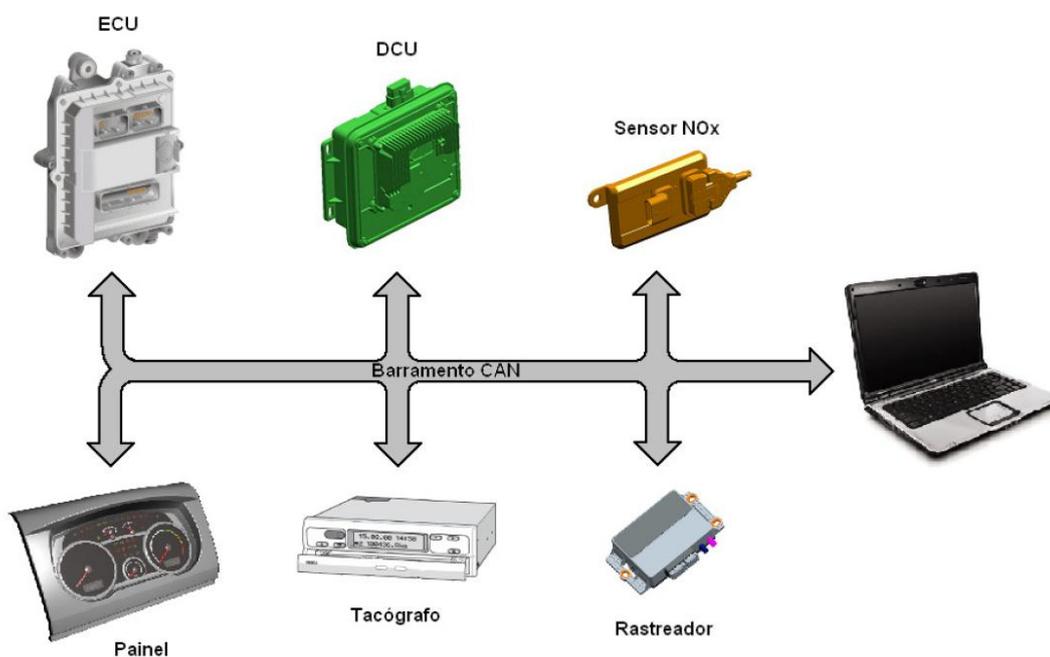


Figura 14 – Rede de comunicação CAN. – [11]

Têm-se três módulos, são dedicados exclusivamente para o funcionamento do motor e do sistema de pós-tratamento de gases, que são a ECU, a DCU e o sensor de NOx, onde foi focada a análise e extração de dados. Através de dispositivos computacionais, foi realizada a aquisição das informações provenientes da linha CAN, de onde foram observados os parâmetros pertinentes ao sistema de controle de emissões. Para isso foi utilizada a placa de aquisição *Peak System*, que converte a linguagem J1939 em informações que possam ser reconhecidas pelo computador, que por meio do software *P-CAN Explore* foi realizada a leitura e extração dos dados para início dos estudos.

Nota-se na figura 15 um pequeno trecho dos dados adquiridos pelo software, que apresenta a forma com que são disponibilizados os dados pelo programa. O tempo de aquisição foi de 53ms, para as primeiras 15 linhas a partir do início da aquisição.

As mensagens são disponibilizadas constantemente pelos módulos, com taxas de repetição entre 10ms a 1s, que dependem da importância da informação e da velocidade com que há variação no componente fornecedor de dados. Considerando os fatos, uma aquisição de 10 minutos, gerar aproximadamente 150.000 mensagens para análise.

É disponibilizado em cada linha o seu identificador (ID), que é a identificação do componente lido, e seu conteúdo expresso em um conjunto de 8 bytes, trazendo a leitura dos dados do componente no instante de tempo em que essa mensagem é publicada.

A linha 14 em destaque, por exemplo, possui o identificador 0CF0233D, que segundo a norma, as informações proveniente dos bytes 1 e 2, são as informações da quantidade de uréia injetada naquele instante de tempo. Neste caso o byte 1 e 2, trazem os valores “38” e “00” ,respectivamente. Os valores são expressos em hexadecimal, como o segundo byte é o mais significativo, têm-se o valor 0038, fazendo a conversão do valor para base decimal e aplicando a escala de correção definida pela norma, tem-se naquele momento uma taxa de injeção de uréia de 16,8 g/h.

Este procedimento de identificação da mensagem e conversão do conteúdo, de acordo com as definições da norma SAE J1939, deve ser efetuado para cada informação desejada. Para facilitar todo este processo, os dados extraídos do software foram exportados para uma planilha do Excel, onde foi possível filtrar apenas as informações desejadas e gerar os gráficos em função do tempo.

Message Number	Time	Offset (ms)	Bus	Type	ID (hex)	Reserved	Data	Length	Code	Data Bytes (hex)	...
1)	0.137	1	RX	0CF00A00	00	8	FF FF 46 14	FF FF	FF FF	FF FF	
2)	5.058	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 88	32 00	F3 88		
3)	5.785	1	RX	18FEF500	00	8	B8 FF FF A0	38 FF	FF FF		
4)	14.034	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 98	32 00	F3 88		
5)	14.604	1	RX	0CF00300	00	8	C1 1B 0F FF	FF FF	FF FF		
6)	15.393	1	RX	0CFE6CEE	00	8	58 3F FF C0	00 FE	CC 36		
7)	23.789	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 A0	32 00	F3 88		
8)	33.678	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 98	32 00	F3 88		
9)	38.276	1	RX	18FEF200	00	8	11 00 39 7A	00 00	FF FF		
10)	43.225	1	RX	18F00F52	00	8	C8 19 44 DD	55 1F	1F 1F		
11)	43.779	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 90	32 00	F3 88		
12)	44.346	1	RX	0CF00A00	00	8	FF FF 46 14	FF FF	FF FF		
13)	45.872	1	RX	18FEF117	00	8	F3 FF FF FF	FF FF	FF FF		
14)	48.334	1	RX	0CF0233D	00	8	38 00 FF FF	FF 50	FF FF		
15)	53.767	1	RX	0CF00400	00	8	F9 88 88 90	32 00	F3 88		

Figura 15 – Dados conforme protocolo CAN J1939. – [11]

4. – RESULTADOS

A figura 16 apresenta o gráfico onde se pode notar as leituras feitas durante a aquisição de dados em um trecho de subida (eixo y) ao longo do tempo (eixo x). Para deixar as escalas das grandezas compatíveis entre si e facilitar a visualização do gráfico, as variáveis de NOx foram multiplicadas por 100 e a posição percentual do pedal do acelerador foi multiplicada por 10.

Deve-se salientar que o veículo a partir do qual foram aqisitados os dados apresentada uma calibração de injeção na qual estavam desabilitados os monitores de OBD. Para veículos destinados à produção, no caso de emissões de NOx nos níveis fora dos limites especificados, deve acontecer a despotencialização imediata do motor.

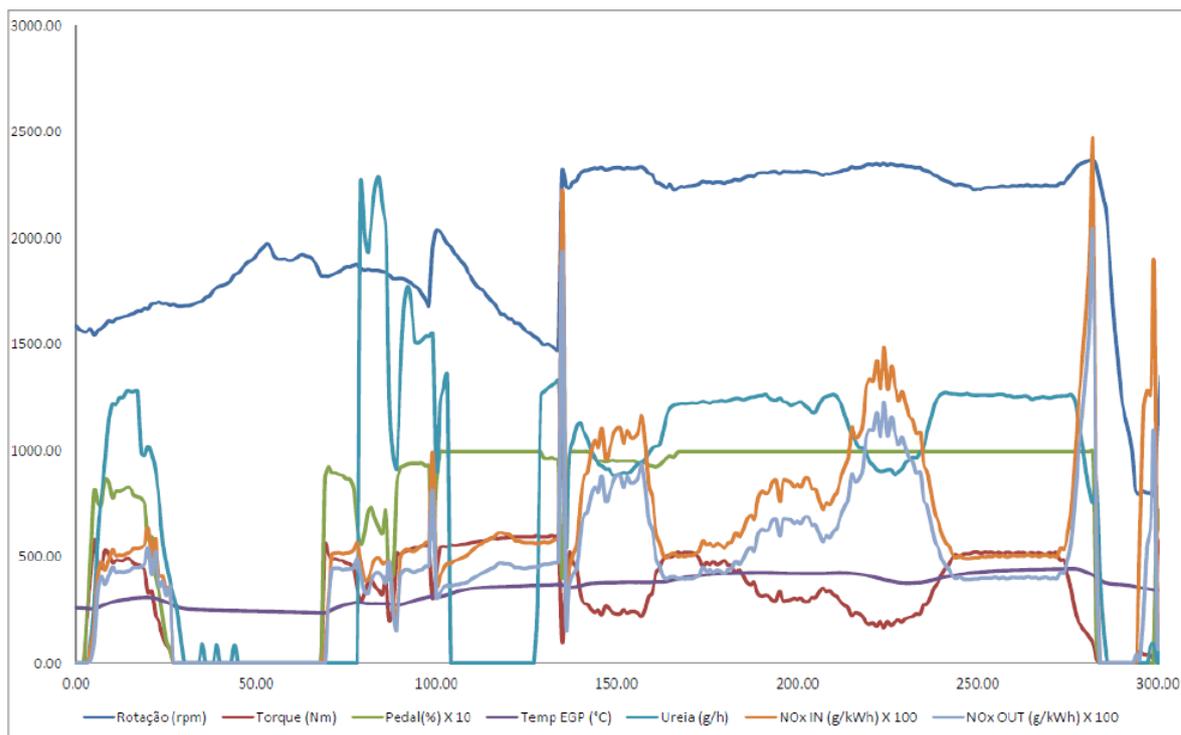


Figura 16 – Medida das grandezas utilizando-se uréia como reagente - [11]

Adotando uma sequência para análise do gráfico apresentado, primeiramente nota-se a curva de rotação do motor (rpm), na região inicial do gráfico. Nela, pode-se observar os pontos de transição abrupta, onde indicam as trocas de marcha. Nestes pontos, ocorrem grandes variações nas condições de trabalho do motor pelo fato de pedal do acelerador ser liberado e o torque entregue pelo motor cair aproximadamente à zero. Na região inicial do gráfico, o veículo ainda está encontrando a condição ideal de trabalho, onde se apresenta uma grande variação nas grandezas.

O veículo entra em uma condição mais estável apenas depois de 140 segundos de aquisição de dados, nesta condição observa-se um comportamento mais contínuo das grandezas envolvidas.

Nesta região mais estável, nota-se a quantidade de NOx na entrada do EGP entre 6 e 10 g/kWh, o que extrapola os limites estabelecidos pela etapa EURO-V classificando o motor como EURO-I. Observa-se ainda que esta quantidade varie de forma inversamente proporcional ao comportamento do torque entregue pelo motor. Matematicamente, a unidade utilizada no denominador para quantidade de NOx (g/kWh), é expressa em potência, que está diretamente relacionada ao torque entregue pelo motor. Assim, em uma região de rotação constante, quando o torque aumenta, aumenta também a potência, fazendo com que o valor de NOx em g/kWh seja reduzido e vice-versa.

Analisando a quantidade de NOx na saída do EGP permite verificar efetivamente a ação do reagente, onde ocorre uma redução significativa no índice deste poluente após a injeção de uréia., levando o motor a um ponto de emissão de aproximadamente 2 g/kWh de NOx (limite estabelecido para a norma EURO-V conforme figura 6). Em alguns pontos específicos do gráfico, este limite é excedido, porém são instantes de tempo muito pequenos que ocorrem nos transitórios do motor.

Para análise da quantidade de uréia injetada, deve-se observar o efeito da sua variação no comportamento dos níveis de NOx na saída do EGP. Deve-se notar que a definição da quantidade de uréia injetada não é determinada pelo índice de NOx na entrada do EGP, visto que este sensor não faz parte da arquitetura original do veículo, sendo instalado apenas para a verificação funcional. Na verdade, o valor da injeção é estimado a partir de mapas obtidos experimentalmente e que se encontram gravados nos módulos de controle do motor e pós-tratamento.

Com aproximadamente 50 segundos e também aos 30 segundos de aquisição, observa-se que a quantidade de injeção de uréia cai a zero, pelo fato da quantidade de NOx gerado pelo motor também estar em zero.

Estes momentos onde a presença do NOx é baixa ocorre pelo fato de não estar havendo injeção de combustível no motor, e conseqüentemente não estar ocorrendo explosões nas câmaras de combustão. São situações em que o condutor do veículo não está pressionando o acelerador do veículo (o que também pode ser verificado no gráfico). Em motores de ciclo diesel com injeção eletrônica, nas situações em que o pedal do acelerador está em zero e o motor está sendo girado pela inércia do veículo em movimento (veículo engrenado), não ocorre qualquer injeção de combustível.

A figura 17 demonstra uma nova aquisição de dados na mesma condição de subida, porém utilizando água ao invés de uréia como reagente redutor de NOx.

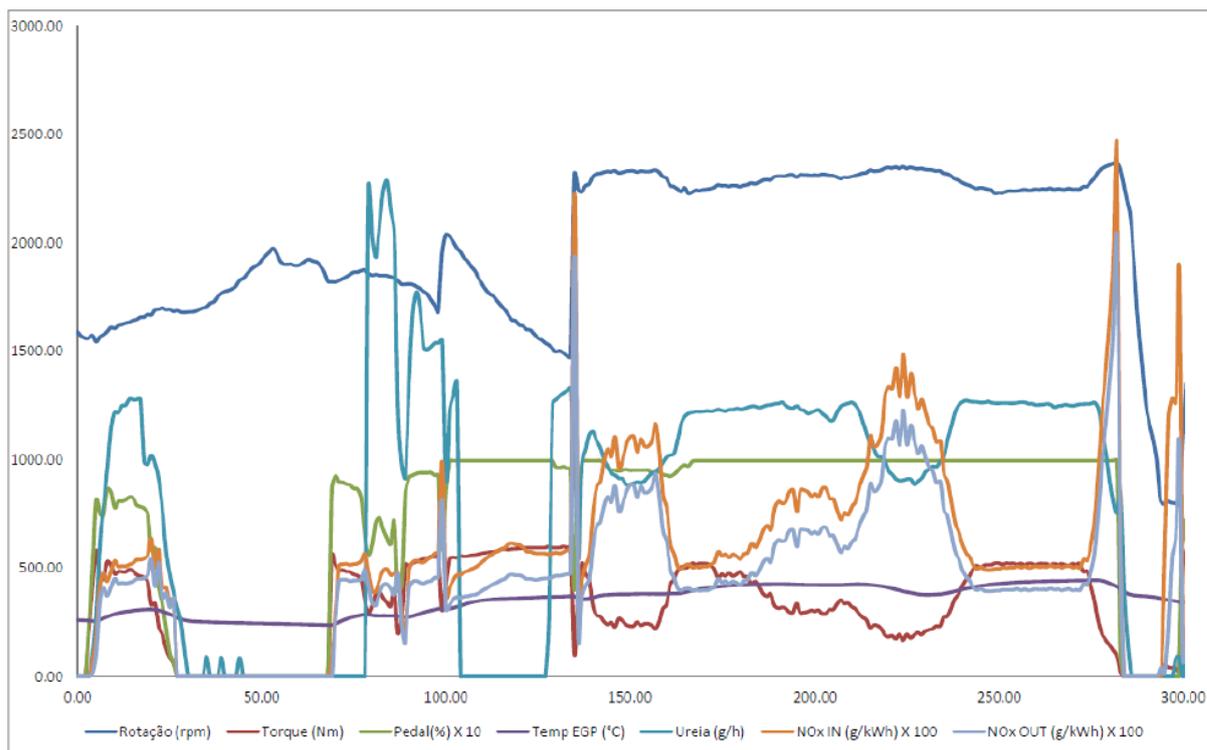


Figura 17 – Medida das grandezas utilizando-se água como reagente - [11]

Neste gráfico a primeira análise que deve ser feita é verificar os valores de NOx extraídos na saída do EGP. Comparando os valores entre a medição da entrada e da saída do EGP, percebe-se que estão bem próximos, o que comprova que a reação química que visa reduzir a quantidade destes gases não está ocorrendo com eficiência.

Na prática, para a realização deste teste, o reservatório de uréia foi esvaziado através de um dreno localizado em sua lateral, próximo ao fundo do tanque, o que impossibilitou a drenagem completa do líquido, restando aproximadamente 1 litro de reagente. Foram adicionados 15 litros de água pura, o reduziu a concentração de uréia na solução em aproximadamente em 2%. É esta uréia remanescente que provocou uma pequena redução nos níveis emitidos de NO_x entre a entrada e a saída do EGP.

Outro ponto que deve ser focado se dá após 170 segundos de aquisição, quando o motor atingiu uma condição estável de operação, nota-se que houve um acréscimo na quantidade de uréia injetada comparando com o gráfico anterior. Isso reflete a tentativa do sistema em regularizar seu dado de entrada (quantidade de reagente) com a intenção de atingir os índices de emissões especificados, a partir da leitura observada pelo sensor de gases da saída.

Abaixo na figura 18, demonstra exclusivamente os dados relativos aos índices de NOx obtidos a partir das mesmas aquisições dos gráficos das figuras 16 e 17, excluindo as

demais variáveis, com objetivo de comparar os gráficos apenas tendo em vista o efeito da reação de redução dos óxidos de nitrogênio com a utilização da uréia com as especificações comercial (AdBlue) e também com água.

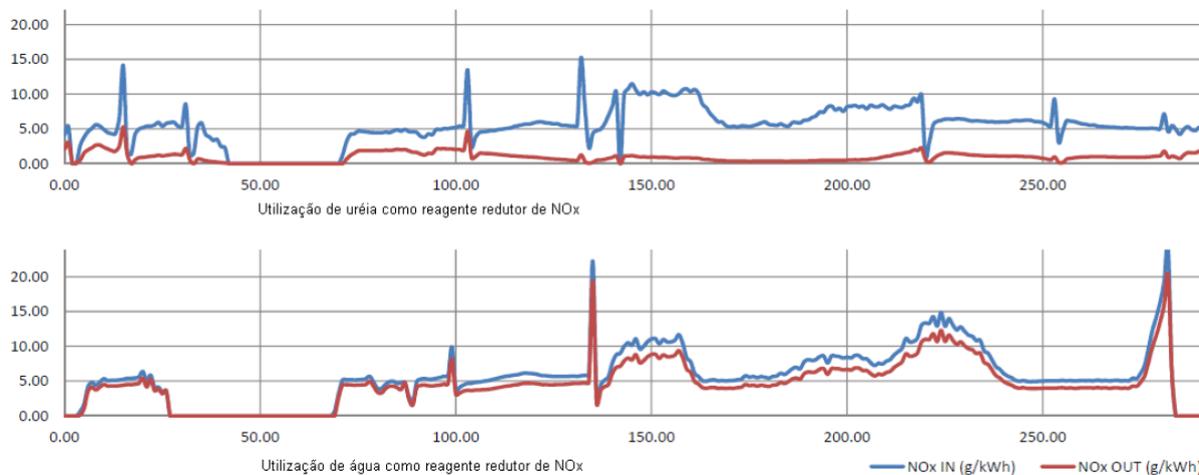


Figura 18 – Comparação dos índices de NO_x com a utilização de uréia e água como agente redutor - [11]

CONCLUSÃO

Tornou-se uma obrigação para todos a preocupação com o endurecimento da legislação ambiental, fato que já vem ocorrendo em diversos países e setores. Os envolvidos com a indústria automobilística receberam a difícil tarefa de enquadrar as emissões dos gases dos sistemas de exaustão dos veículos automotores à legislação ambiental, gerando assim, a necessidade da criação e desenvolvimento de novos dispositivos.

O sistema de pós-tratamento de gases, chamado de SCR, apresenta grande vantagem em termos de redução dos teores de óxidos de nitrogênio emitidos ao empregar uréia numa concentração de 32,5% como agente redutor.

Permitiu-se verificar a eficácia deste sistema por meio da análise das variações de todos os parâmetros apresentados. Apesar da não utilização de métodos computacionais adequados para o manuseio dos dados aquiridos, foi possível observar o comportamento das grandezas envolvidas no sistema de pós-tratamento.

A análise dos dados afirma a necessidade da utilização da solução de uréia na concentração correta como reagente redutor dos óxidos de nitrogênio, sob pena do não atendimento dos limites estabelecidos para emissões, provocando a despotencialização do motor assim como as sanções e penalidades cabíveis determinadas na legislação vigente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] KOZERSK, G. R.; HESS, S.C. **Estimativa dos poluentes emitidos pelos ônibus e micro-ônibus de Campo Grande/MS, empregando como combustível diesel, biodiesel ou gás natural**. Campo Grande: Eng. Sanit. Ambient., v.11, n.2, abr./jun. 2006 <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v11n2/30470.pdf>>, acesso em: 27 mar. 2012.

[2] SILVA, Jose Flavio. **Combustão diesel automotivo e suas alternativas**. Campinas: Universidade estadual de Campinas, 2005, 32f. <www.ftftp.fem.unicamp.br/publM338Diesel.pdf>, acesso em: 29 mar. 2012.

[3] UEDA, A.C.; TOMAS, E. **Inventario de emissão de fontes veiculares da região metropolitana de Campinas, São Paulo**. Campinas: Quim. Nova, v. 34, No. 5, Jun. 2011 <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v34n9/v34n9a03.pdf>>, acesso em: 31 mar. 2012.

[4] DISTRITO FEDERAL, Instituto do meio ambiente dos recursos hídricos do Distrito Federal. Brasília ambiental. **Principais poluentes atmosféricos**. Distrito Federal: 2010. <www.sedhab.df.gov.br/sites300037900002594.pdf>, acesso em: 29 mar. 2012

[5] SILVA, Ederwanda Barbosa Lage. **Estudo sobre a qualidade do ar no cidade de Juiz de Fora**: Contribuição dos veículos automotores. 2008, 58f. Projeto de TCC - Curso de especialização em Análise Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008.

[6] NORDSTROM, Erik. **Estreia mundial: Scania Euro 6 – primeiros motores prontos para lançamento no mercado**. Suécia: 31 mar. 2011

[7] INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS RENOVAVEIS. **Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores PROCONVE/PROMO**. Ed. 2. Brasília: 2004, v.1 e 2.

[8] LAREIRA, Vinicius. **A Fase P-7 do PROCONVE e os seus impactos no setor de transporte**. Rio de Janeiro: Nov. 2010.

[9] FLEXA, Arsenio. Et al. **SCR – Selective Catalytic Reduction – Para atender legislações IV E V: linhas aquecidas para dosagem de uréia**. São Paulo: maio 2007.

[10] BOSCH. **Sistema de Injeção de pressão modulada *Common Rail*** – Apostila técnica Bosch – Ed. 2001;

[11] PILETTI, Adriano; MENEGOTTO, Wiliam. **Análise funcional de um sistema de pós-tratamento de gases de escape SCR em um veículo EUROV**. Caxias do Sul: 2011.

[12] DOOSAN INFRACORE. **STADE IIIB TIER4INTERIM**, Belgium: jun. 2011.

[13] EUROPA, Association des Constructeurs Européens d'Automobiles - **Selective Catalytic Reduction (Final Report): The most promising technology to comply with the imminent Euro IV and Euro V emission standards for HD engines**. Europe: 2003.