

**MARINHA DO BRASIL**

**CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA  
ESCOLA DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS DA MARINHA MERCANTE**

**AFONSO POMPEU SOROLDONI SALLES**

**CONTROLE ELETRÔNICO DA INJEÇÃO DE MOTORES**

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

**AFONSO POMPEU SOROLDONI SALLES**

**CONTROLE ELETRÔNICO DA INJEÇÃO DE MOTORES**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas do Curso de Formação de Oficiais de Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Orientador : Prof. Júlio César de Jesus, Dr.

Coorientador : Prof. José Barbosa da Silva Filho,  
Eng. Esp.

**RIO DE JANEIRO**

**2014**

S168 Salles, Afonso Pompeu Soroldoni.  
Controle Eletrônico da Injeção de Motores / Afonso Pompeu  
Soroldoni Salles – Rio de Janeiro, 2014.  
45 f. : il.

Orientador: José Barbosa da Silva Filho  
Monografia (graduação) – Escola de Formação de Oficiais da  
Marinha Mercante, 2014.

1. Controle Eletrônico. 2. Injeção Eletrônica. 3. Emissões Marítimas.  
I. Título

CDU 681.5

**AFONSO POMPEU SOROLDONI SALLES**

**COTROLE ELETRÔNICO DA INJEÇÃO DE MOTORES**

Monografia apresentada como exigência para obtenção do título de Bacharel em Ciências Náuticas Náutica/Máquinas da Marinha Mercante, ministrado pelo Centro de Instrução Almirante Graça Aranha.

Data da Aprovação: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

Orientador: Prof. Dr. Júlio César de Jesuz

OSM – Dr. COPPE/UFRJ

---

Assinatura do Orientador

Coorientador: Prof. José Barbosa da Silva Filho

Eng. Esp. UNESA

---

Assinatura do Coorientador

NOTA FINAL: \_\_\_\_\_

Dedico este trabalho para as pessoas que utilizam o seu conhecimento em prol de um mundo  
melhor.

## **AGRADECIMENTOS**

Antes de tudo, agradeço à minha família por todo o apoio dado ao longo do curso, aos meus companheiros de turma pela confiança, ao meu orientador e ao coorientador pela paciência e auxílio durante o desenvolvimento deste trabalho.

## RESUMO

No início do desenvolvimento das máquinas de combustão interna, não existiam os diversos requisitos como nos dias de hoje. A preocupação em relação à poluição era inexistente, e as exigências de eficiência eram baixas. Porém, junto com o aumento da demanda de geração de energia cresce a rigorosidade em relação às emissões e à redução de gastos. Assim, estão sendo desenvolvidas técnicas que possam contribuir com esses fatores, sobretudo com a utilização da eletrônica para controlar as diversas propriedades dos motores. O controle eletrônico da injeção pode funcionar de várias maneiras, em geral com princípio semelhante, e objetiva a obtenção das melhores condições possíveis da injeção através da leitura das variáveis imediatas do motor e consequente identificação das necessidades do mesmo. Ele já está presente nos diversos ramos de aplicação, e apesar da pequena difusão de informação sobre sua utilização para a área marítima os navios apresentam os mesmos problemas e a lógica de aplicação da eletrônica como método de controle da injeção para seus motores é semelhante às demais.

Palavras-chave: Controle Eletrônico da Injeção. Common Rail. Injeção Eletrônica. Emissões de Gases por Motores de Navios.

## **ABSTRACT**

At the beginning of the evolution of the intern combustion engines, there weren't any requirements like nowadays. The worry regarding to pollution didn't exist, and the efficiency requirements were low. Although, the more the demand of energy generation grows the stricter it gets in allusion to emission and spending reduction. Consequently, ways of contributing with it are being developed, mainly with the usage of electronics to control the many engine's properties. The electronic control of injection might work in several ways, in general with suchlike principle, and objectives the acquirement of the best injection conditions trough the measurement of the engine variables at a time and consequent identification of its needs. It's already present in the many application areas, and despite of the small information spread about its application on the maritime area, vessels have the same problems and the implementation logic of electronic as a control method of the injection is similar to the other engines.

Key-words: Electronic Control of Injection. Common Rail. Electronic Fuel Injection. Marine Engines Emissions.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema de controle eletrônico de motor.....                         | 14 |
| Figura 2 – Sistema Common Rail.....   | 16 |
| Figura 3 – Circuito de tratamento de sinal obtido por um sensor de rotação..... | 21 |
| Figura 4 - Sensor de rotação de efeito Hall.....                                | 22 |
| Figura 5 - Sensor de rotação ótico.....   | 23 |
| Figura 6 - Esquema de controle eletrônico de motor.....                         | 25 |
| Figura 7 – Esquema do circuito utilizado no projeto.....                        | 29 |
| Figura 8 – Sinal da roda dentada e sinais dos controladores.....                | 30 |

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 10 |
| <b>1 O AVANÇO NO CONTROLE ELETRÔNICO DA INJEÇÃO</b> .....            | 12 |
| <b>1.1 Primeiras aplicações</b> .....                                | 12 |
| <b>2.OS SISTEMAS ELETRÔNICOS DE INJEÇÃO</b> .....                    | 13 |
| <b>2.1 Tipos de Injeção Eletrônica</b> .....                         | 14 |
| 2.1.1 <i>Unidade Eletrônica de Injeção de Atuador Singular</i> ..... | 15 |
| 2.1.2 <i>Unidade Eletrônica de Injeção de Atuador Duplo</i> .....    | 15 |
| 2.1.3 <i>Unidade Eletrônica de Injeção Hidráulica</i> .....          | 15 |
| 2.1.4 <i>Common Rail</i> .....                                       | 16 |
| <b>3 PRINCIPAIS SENSORES</b> .....                                   | 18 |
| <b>3.1 Sonda Lâmbda</b> .....  | 18 |
| <b>3.2 Sensores de Temperatura</b> .....                             | 18 |
| <b>3.3 Sensor Mássico</b> .....                                      | 18 |
| <b>3.4 Sensor de Pressão no Coletor de Admissão (MAP)</b> .....      | 19 |
| <b>3.5 Sensor de Pressão de Capacitor Variável</b> .....             | 19 |
| <b>3.6 Sensor de Óxido de Nitrogênio (<math>NO_x</math>)</b> .....   | 20 |
| <b>3.7 Sensor de Posição do Eixo de Manivelas</b> .....              | 20 |
| 3.7.1 <i>Sensor Indutivo</i> .....                                   | 21 |
| 3.7.2 <i>Sensor de Efeito Hall</i> .....                             | 21 |
| 3.7.3 <i>Sensor Ótico</i> .....                                      | 22 |
| <b>4 INJETOR: O PRINCIPAL ATUADOR</b> .....                          | 24 |
| <b>4.1 Injetor Eletrohidráulico</b> .....                            | 25 |
| <b>4.2 Injetor Piezoelétrico</b> .....                               | 25 |
| <b>5 EMISSÕES</b> .....  | 27 |
| <b>5.1 Dióxido de Carbono (<math>CO_2</math>)</b> .....              | 27 |

|   |    |
|---|----|
| <b>5.2 Monóxido de Carbono (<math>CO_2</math>)</b> .....    | 27 |
| <b>5.3 Óxidos de Enxofre (<math>SO_x</math>)</b> .....      | 27 |
| <b>5.4 Óxidos de Nitrogênio</b> .....                       | 28 |
| <b>5.5 Partículas Suspensas</b> .....                       | 28 |
| <b>6 EXEMPLO DE PROGRAMAÇÃO DA CENTRAL ELETRÔNICA</b> ..... | 29 |
| <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....                           | 31 |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....                     | 32 |
| <b>APÊNDICE A</b> .....                                     | 33 |
| <b>APÊNDICE B</b> .....                                     | 36 |
| <b>APÊNDICE C</b> .....                                     | 42 |

## INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo e consequente desenvolvimento de novas e mais eficientes tecnologias, vem aumentando cada vez mais a necessidade de produção de energia. Uma das maneiras mais utilizadas para isto, sobretudo para carros, navios e aviões, provém dos motores de combustão interna, cuja obtenção de energia consiste na queima de uma mistura de ar com combustível (combustão).

Devido ao grande aumento da preocupação com os fatores relacionados à poluição atmosférica, porém, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas que permitam a redução desta poluição por parte dos motores de combustão interna. Um grande passo na evolução destes motores foi a implementação da injeção eletrônica, que realiza a injeção de combustível de acordo com as necessidades imediatas do motor, o que implica no aumento de sua eficiência e na redução da emissão de gases poluentes.

Os motores com injeção mecânica apresentam a enorme desvantagem da sua injeção ser praticamente constante, pois permitem somente a variação da quantidade de combustível que entra nos cilindros em função da posição da cremalheira (podendo ser alterada tanto através de um acelerador quanto por um regulador de velocidade, dependendo do motor). Esta injeção é realizada normalmente através da ativação da bomba injetora pelo eixo de cames, que gira em função do eixo de manivelas. Isso implica que o intervalo de injeção não pode mudar com o motor em funcionamento.

O começo da utilização da eletrônica como solução para as deficiências da injeção mecânica foi um grande avanço tecnológico, que apresenta vantagens que serão discutidas no decorrer do trabalho.

A injeção eletrônica, diferentemente da injeção mecânica, não utiliza o próprio eixo do motor para realizar a injeção, e sim equipamentos que fornecem todas as informações do motor que são necessárias para qualquer cálculo relativo às proporções da mistura e ao sincronismo da injeção.

Existem diversas maneiras de executar este método de injeção, independentemente do porte do motor ou do combustível que ele utiliza, apesar de que, em geral, todos consistem do mesmo pensamento. Ainda assim, cada uma merece atenção singular.

O objetivo deste trabalho é explicar cada parte do funcionamento deste sistema que tanto contribui para os motores atuais, assim como exemplificar como a lógica para sua implementação funciona, utilizando como exemplo microcontroladores atmega328.

# 1 O AVANÇO DO CONTROLE ELETRÔNICO NA INJEÇÃO

A injeção mecânica ainda é encontrada em grande quantidade nos dias de hoje devido à sua grande utilização no passado, porém conforme foram se tornando mais rigorosas as normas ambientais e com a constante necessidade de obter maior rendimento das máquinas cada vez mais se fez necessário a implementação de técnicas que permitissem sanar esses problemas.

## 1.1 Primeiras Aplicações

A base da injeção eletrônica é a utilização de uma válvula solenoide como princípio de funcionamento do injetor, que permite a passagem de combustível quando um pulso elétrico for aplicado na sua bobina. Se a pressão de combustível for constante, o controle da injeção pode ser feito simplesmente pela variação da duração desses pulsos.

Segundo Aird (2001) essa ideia já havia sido desenvolvida por um engenheiro chamado Kennedy, em 1932, e foi aplicada em um motor marítimo em 1933, em uma exibição de motores de barcos, em Nova Iorque.

O que seguiu a evolução foi o chamado eletrojector. Ele começou a ser desenvolvido entre 1951 e 1952, e tinha uma unidade eletrônica que armazenava poucas informações utilizando válvulas a vácuo. Em 1957 o sistema começou a ser disponibilizado para o público

Em 1967 a Bosch obteve a patente do Eletrojector da Bendix, que foi estudado, implicando no lançamento do Jetronic. Esta primeira versão foi chamada de D-Jetronic, para ser diferenciada das mais recentes, conhecidas por K-Jetronic, L-Jetronic e LH-Jetronic.

De acordo com Bennett (2013), em 1985 foram apresentados motores a diesel controlados eletronicamente para ônibus e caminhões pela Detroit Diesel. Foi usada a unidade eletrônica injetora com atuador singular (EUI). Em 2007 começaram a ser adotados os atuadores duplos.

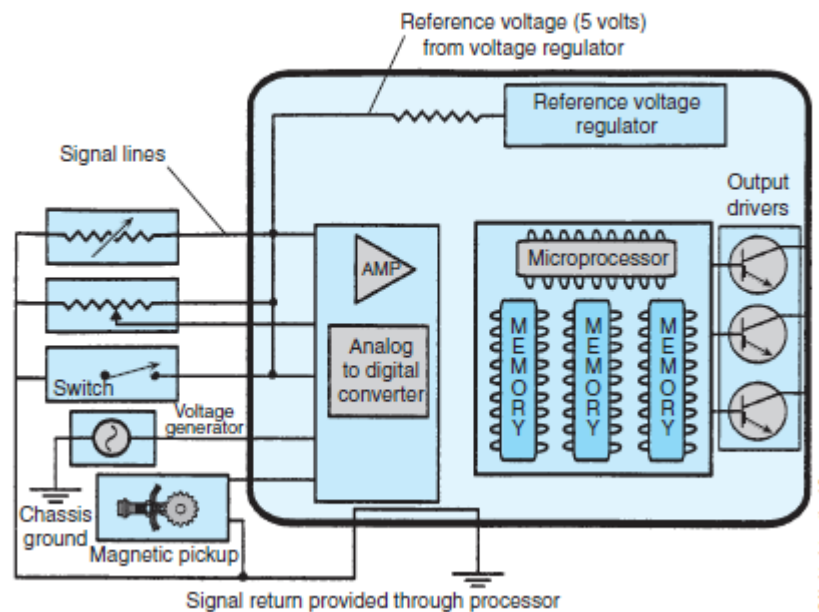
Em 1994 foi apresentado a unidade eletrônica injetora atuada hidraulicamente (HUEI) pela Caterpillar, e no final desta década foi introduzido o *common rail*, criado por Robert Bosch e por Delphi Lucas.

## 2 OS SISTEMAS ELETRÔNICOS DE INJEÇÃO

A injeção eletrônica trabalha de uma maneira que não necessita do motor para a injeção do combustível na câmara de combustão, pois isto é feito, normalmente, através de válvulas solenoides, chamadas de válvulas de injeção. O sistema funciona basicamente através de sensores que fazem a leitura das propriedades imediatas do motor e enviam para a central eletrônica - ECU (do inglês *Electronic Control Unit*) - que realiza os cálculos necessários para o controle do sistema, feito através dos atuadores.

Assim sendo, é possível facilmente regular a injeção através de um controlador eletrônico, programando-o para transmitir pulsos elétricos, através dos sinais recebidos pelos sensores, que irão acionar os atuadores permitindo assim a injeção de combustível.

A figura 1 exemplifica o explicado. Sinais do sistema (*signal lines*) assim como o sinal de um sensor magnético (*magnetic pickup*) é são amplificados, e através de um conversor analógico-digital (*analog to digital converter*) podem ser utilizados. As memórias (*memory*) armazenam estes valores e o microprocessador (*microprocessor*) faz os cálculos necessários e envia os sinais de controle para os dispositivos de saída (*output drivers*), ou atuadores.



**Figura 1:** Esquema de controle eletrônico de motor

**Fonte:** (BENNET, 2013, p.629)



## 2.2 Tipos de Injeção Eletrônica

A lógica de funcionamento para a injeção eletrônica é praticamente a mesma independentemente do tipo do motor, seja ele de pequeno ou grande porte, ciclo otto ou diesel. Ainda assim, para o ciclo diesel existem diferentes tipos de injeção eletrônica, comentados a seguir.

### 2.2.1 Unidade Eletrônica de Injeção de Atuador Singular

Do inglês *Electronic Unit Injector* (EUI). Segundo Bennett (2013), este sistema recebe combustível em baixa pressão da linha de combustível. A pressurização do combustível é feita através de um pistão atuado pelo eixo de cames do motor. Quando a válvula solenoide que controla a passagem de combustível é energizada através de um sinal recebido da ECU, o combustível fica preso em uma câmara e sua pressão cresce devido ao movimento do pistão, e quando esta atinge um valor suficientemente alto para abrir o bico injetor, a injeção inicia. Eram mais populares da década de 90 até 2007, quando começou a ser dada preferência para os EUI de atuador duplo ou para o sistema.

### 2.2.2 Unidade Eletrônica de Injeção de Atuador Duplo

Possui características semelhantes ao sistema anterior, porém também permite o controle do tempo de abertura do bico injetor e da pressão de injeção. Em 2007 começaram a ser produzidos pela Volvo, pela Caterpillar e pela Detroit Diesel (BENNET, 2013).

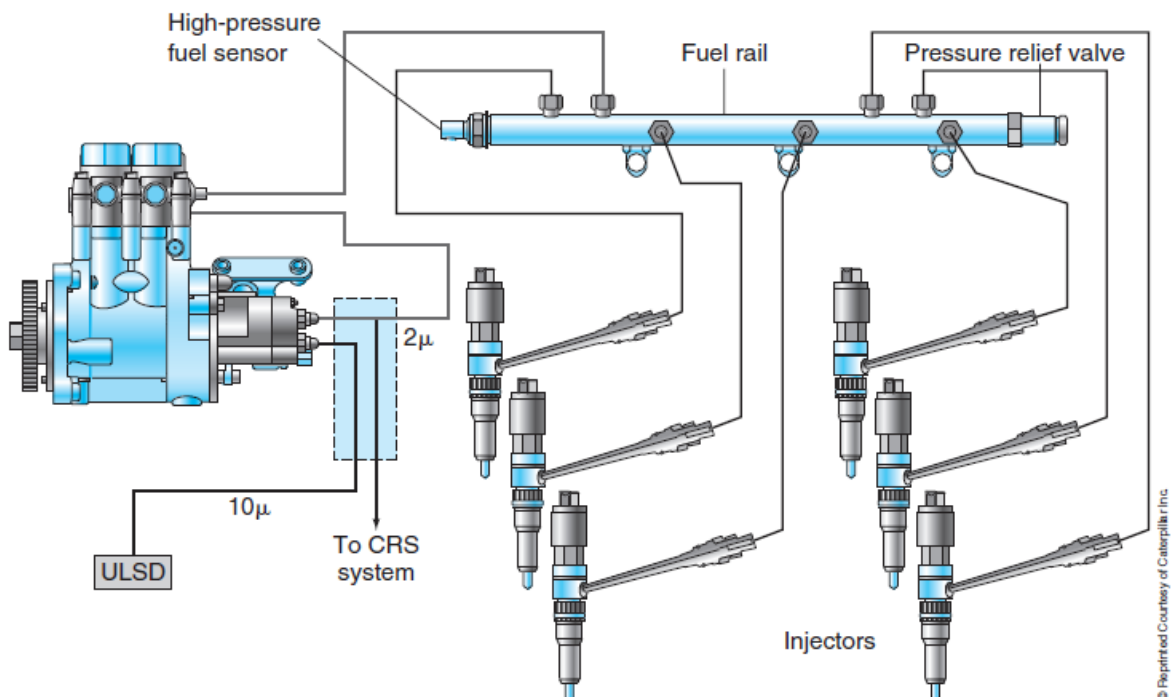
### 2.2.3 Unidade Eletrônica de Injeção Hidráulica

Do inglês *Hydraulic Electronic Unit Injector* (HUEI). Este sistema não tem a limitação de precisar do eixo de cames para a pressurização do combustível, pois utiliza injetores atuados hidráulicamente. Quando a ECU envia o sinal, óleo com alta pressão atua no

pistão da bomba injetora, que então pressuriza o combustível na câmara do injetor. Quando a pressão atinge o valor desejado, a injeção ocorre (BENNETT, 2013).

#### 2.2.4 Common Rail (CR)

Segundo Bennett (2013), o CR é muito superior aos sistemas que o antecedem. Neste sistema o combustível fica, já pressurizado, no *rail*, que é uma linha em comum para todos os injetores. O CR possui funcionamento menos complexo que os anteriores, o que permite controlar a combustão com maior precisão, que por sua vez resulta em melhorias como menor emissão, maior eficiência e redução de ruídos. A figura 2 mostra o esquema de um sistema CR de um motor da Caterpillar. É possível observar que os injetores (*injectors*) são conectados diretamente no rail (*fuel rail*). No rail se encontra um sensor de pressão (*high-pressure fuel sensor*) e um válvula de alívio (*pressure relief valve*).



**Figura 2:** Sistema *Common Rail*

**Fonte:** (BENNETT, 2013, p.544)

Bennett (2013) também afirma que duas inovações que foram cruciais para a implementação deste sistema foram a tecnologia metálica que permite o armazenamento do

combustível altamente pressurizado e os injetores eletrohidráulicos, que possibilitam a abertura e o fechamento dos bicos injetores em alta velocidade. Os injetores piezoelétricos permitem aumentar ainda mais essa velocidade.

Uma das desvantagens desse sistema é a necessidade de algumas partes, como selos, de sustentar as grandes pressões do *rail*. Para suprir essa questão, embora ainda não esteja sendo muito utilizado, foi desenvolvido o sistema de common *rail* amplificado. Este sistema pode manter a pressão no *rail* pela metade da desejada na injeção, pois seu injetor eletrohidráulico tem a capacidade de amplificar a pressão do combustível para mais que o dobro da pressão fornecida.

## **3 PRINCIPAIS SENSORES**

### **3.1 Sonda lambda**

Segundo Aird (2001) é um instrumento acoplado à exaustão do motor que analisa os gases de exaustão para medir o seu teor de oxigênio, possibilitando o conhecimento direto de qual é a relação ar/combustível em qualquer momento dado, ao invés de obrigar o sistema a utilizar uma faixa de valores pré-estabelecidos que antecipam esta relação em uma dada condição de operação.

### **3.2 Sensores de Temperatura**

São os sensores responsáveis por informar a temperatura do ar aspirado pelo motor e da água do sistema de arrefecimento para a Central Eletrônica. Os tipos mais utilizados são NTC (*Negative Temperature Sensor*) e PTC (*Positive Temperature Sensor*), que consistem na variação da resistência elétrica de um elemento transdutor com a variação da temperatura. Nos sensores do tipo NTC, a resistência elétrica diminui com o aumento da temperatura, e nos sensores PTC ocorre o contrário (MILHOR, 2002).

### **3.3 Sensor Mássico**

O sensor mássico converte a quantidade de ar que entra no motor para um sinal de tensão.

Os componentes primários do sensor são um termostato, um fio de platina e um circuito de controle eletrônico.

O termostato mede a temperatura de ar de admissão, o fio de platina é mantido à uma temperatura constante em relação ao termostato pelo circuito de controle eletrônico. Um aumento no fluxo de ar fará com que o fio perca calor mais rápido e o circuito irá compensar

aumentando a corrente enviada para ele. O circuito simultaneamente mede esta corrente e cria uma tensão de saída proporcional a ela (DENTON, 2004).

Milhor (2002, p.28) diz que a vantagem da utilização deste tipo de sensor reside no fato de oferecer baixa resistência à passagem do ar pela tubulação de admissão, não possuir elementos mecânicos em movimento e o cálculo da massa de combustível ser direto.

### **3.4 Sensor de pressão no coletor de admissão (MAP)**

Este sensor permite o cálculo da densidade do ar que entra no motor através da medição da variação de pressão no coletor de admissão.

Milhor (2002, p.26) afirma que os tipos frequentemente utilizados são *Strain Gage* ou Capacitivo.

Os sensores do tipo *Strain Gage* são formados por quatro elementos resistivos, os quais formam uma ponte de Wheatstone. Devido à variação da pressão no coletor de admissão, o diafragma de silício é deformado, que implica na alteração dos valores destes resistores. A tensão de saída do sensor varia linearmente com a pressão no coletor (MILHOR, 2002, p.26).

Os sensores de pressão do tipo capacitivos são construídos de maneira que a pressão que se deseja medir varie a distância entre as placas condutoras, fazendo com que sua capacitância varie (MILHOR, 2002, p.27).

### **3.5 Sensor de pressão de capacitância variável**

Segundo Bennett (2013), a maior parte dos motores diesel controlados eletronicamente utilizam este sensor. Ele possui um disco de cerâmica e um disco fixo de metal. A posição do primeiro disco em relação ao segundo varia em função da pressão do óleo, alterando a capacitância do sistema e conseqüentemente o valor da tensão lido pela ECU. Pode ser usado tanto para o óleo lubrificante quanto para o óleo combustível. Um exemplo de utilização é a medição da pressão no *rail*, no sistema *common rail*.

### 3.6 Sensor de Óxido de Nitrogênio ( $NO_x$ )

Estes sensores fazem uma amostragem do gases de descarga e calculam o teor de  $NO_x$  baseado nesta amostra. De acordo com Bennett (2013), este sensor tem seu princípio de funcionamento através de duas câmaras.

A primeira, a câmara de oxidação, tem um par de eletrodos de platina que oxida o gás.

Na segunda, a câmara de amostragem, só o que resta é um pouco de gás oxigênio e gás nitrogênio. O gás oxigênio é removido por eletrodos de platina, de modo que só reste gás nitrogênio, e então o  $NO_x$  é reduzido através de eletrólise em nitrogênio e gás oxigênio. Novamente são utilizados os eletrodos de platina para remover o gás oxigênio, só que desta vez a corrente necessária para realizar esse processo é medida. Sabe-se que esta corrente é diretamente proporcional à quantidade de  $NO_x$ , o que torna possível o cálculo desta quantidade.

### 3.7 Sensores de posição do eixo de manivelas

Além de dados como pressão e temperatura, a posição dos eixos e válvulas também deve ser conhecida. É cômodo utilizar sensores que não tenham contato direto com o motor. Estes podem fazer a leitura da posição tanto pelo eixo de manivelas quanto pelo eixo de cames, contanto que seja mantido em mente que para motores de quatro tempos a rotação do eixo de cames é a metade da rotação do eixo de manivelas. Os sensores mais utilizados são magnéticos (indutivos) ou óticos (RIBBENS, 1998, p. 190).

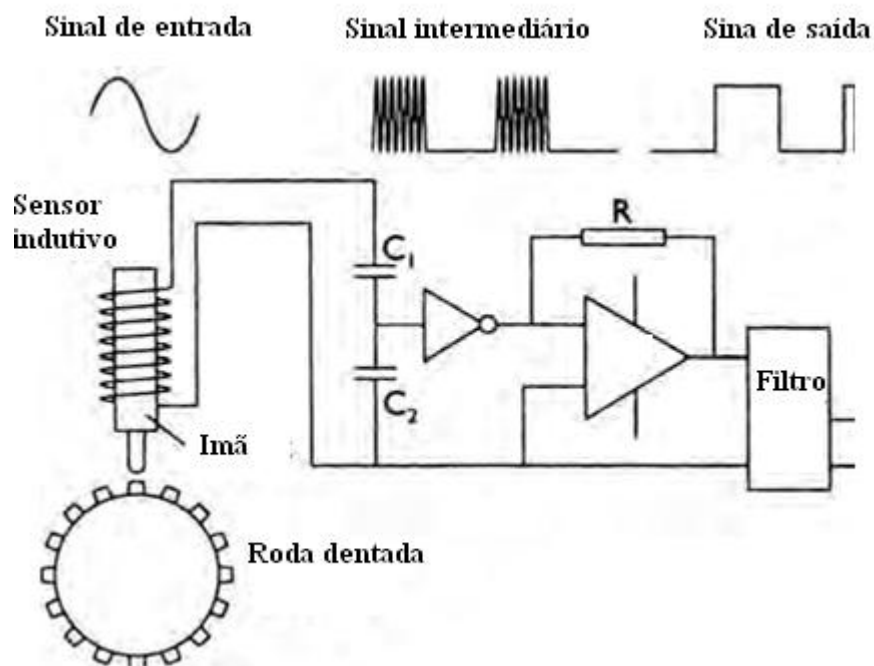
Esta leitura normalmente é feita através de uma roda dentada, ou, no caso dos sensores óticos, de uma roda com furos. Glehn (2001, p.25) exemplifica algumas rodas dentadas utilizadas para a medição em automóveis, como 60-2 dentes, 36-2 dentes, ou 4 dentes. Uma roda com 60-2 dentes, por exemplo, significa que ela tem 58 dentes e um espaçamento correspondente a dois dentes, utilizado para o sincronismo de cada volta da roda.

### 3.7.1 Sensor indutivo

O funcionamento deste sensor é baseado, como indica no nome, no efeito de indução (variação de fluxo magnético implica em uma corrente induzida na bobina). Isto ocorre com variação da distância entre os dentes de uma roda dentada acoplada ao eixo e o sensor.

A tensão de saída se aproxima à uma onda senoidal. A amplitude deste sinal depende da taxa de variação do fluxo. Isto é determinado normalmente pelo projeto original: o número de espiras, a força magnética e o espaço entre o sensor e o componente rotatório (DENTON, 2004).

A imagem abaixo dá um exemplo de circuito para transformar a onda senoidal obtida no sensor em uma onda quadrada, para usos posteriores.



**Figura 3:** Esquema de circuito de tratamento de sinal obtido por sensor de rotação

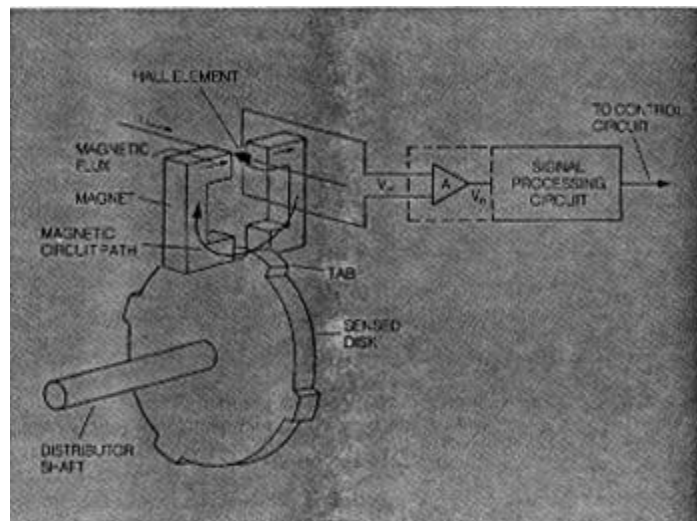
**Fonte:** (DENTON, 2004)

### 3.7.2 Sensor de efeito hall

O efeito hall consiste no surgimento de uma tensão que ocorre perpendicularmente a uma corrente que passa por uma placa condutora é deslocada para um dos lados da mesma, fenômeno gerado por um campo magnético perpendicular à placa.

Segundo Glehn (2001, p.31) a corrente é gerada por uma tensão que deverá ser necessariamente fornecida à placa, o campo magnético por um ímã permanente e a tensão gerada pelo efeito varia com o bloqueio ou passagem do campo magnético.

Como é possível verificar na figura abaixo, por exemplo, cada vez que um dente da roda dentada (*Sensed Disk*) passa entre o ímã (*magnet*) o campo magnético (*magnetic flux*) é bloqueado alterando assim o valor da saída, lida pelo elemento Hall (*Hall Element*), amplificada e enviada para um circuito de processamento (*signal processing circuit*).



**Figura 4:** Sensor de rotação de efeito Hall

**Fonte:** (RIBBENS, 1998, p.202)

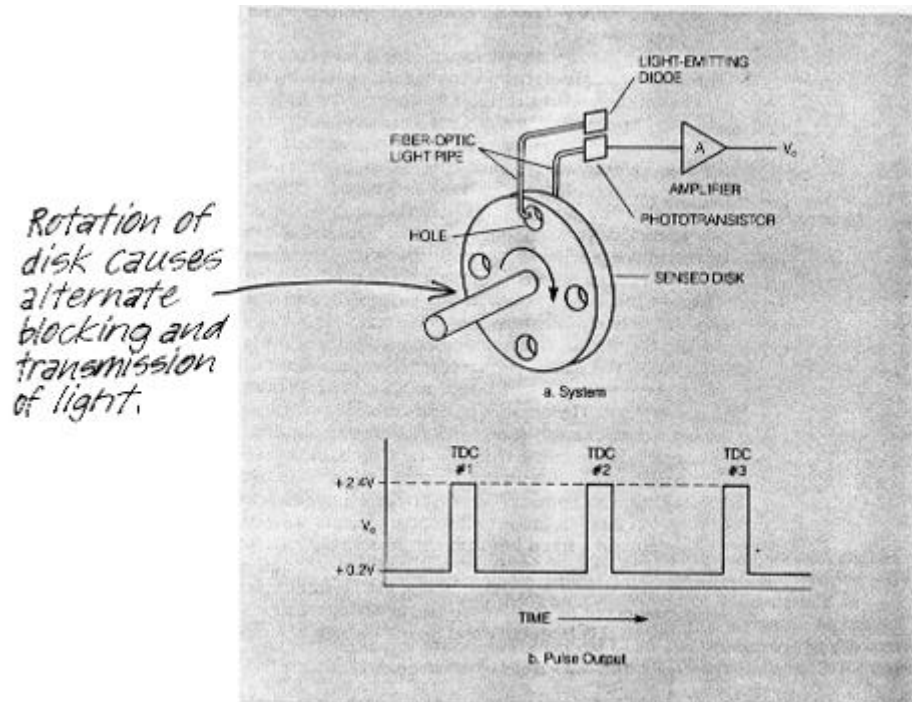
### 3.7.3 Sensor ótico

Para fazer a leitura da posição com este sensor também é utilizada uma roda acoplada ao eixo, porém diferentemente da roda utilizada para os sensores magnéticos, este utiliza uma roda com furos.

Em ambos os lados do disco existem cabos de fibra ótica, onde um transmite a luz de um diodo emissor de luz (*LED*) e o outro recebe esta luz quando os furos do disco permitem



sua passagem, já que normalmente o disco sólido bloquearia. Um foto transistor (*phototransistor*) é acoplado a um amplificador (*amplifier*) e quando recebe um pulso de luz ocasiona a obtenção de um sinal de tensão na saída, conforme a figura abaixo (RIBBENS, 1998).



**Figura 5:** Sensor de rotação ótico

**Fonte:** (RIBBENS, 1998, p.205)

## 4 INJETOR: O PRINCIPAL ATUADOR

“Define-se atuadores como sendo todos os componentes do sistema de controle responsável por gerar uma ação sobre a planta, a partir de um sinal de controle” (MILHOR, 2002, p. 34).

Após as leituras feitas pelos sensores, a central eletrônica irá controlar os atuadores para efetuar a injeção de combustível e aplicar correções necessárias, principalmente variação na quantidade de óleo e temperatura do ar de admissão. Este capítulo trata dos injetores, que são imprescindíveis em qualquer motor.

O injetor de combustível é o principal atuador do sistema, pois através dele a ECU controla a quantidade de combustível injetada no motor. O injetor libera a passagem de combustível com a alimentação da bobina da válvula solenoide, que cria um campo magnético que irá forçar o recuo do pistão de ferro.

Segundo Denton (2004,), uma forma de relacionar as variáveis é :

$$i = VR(1 - e^{-Rt/L})$$

Onde:

I = Corrente da bobina (A);

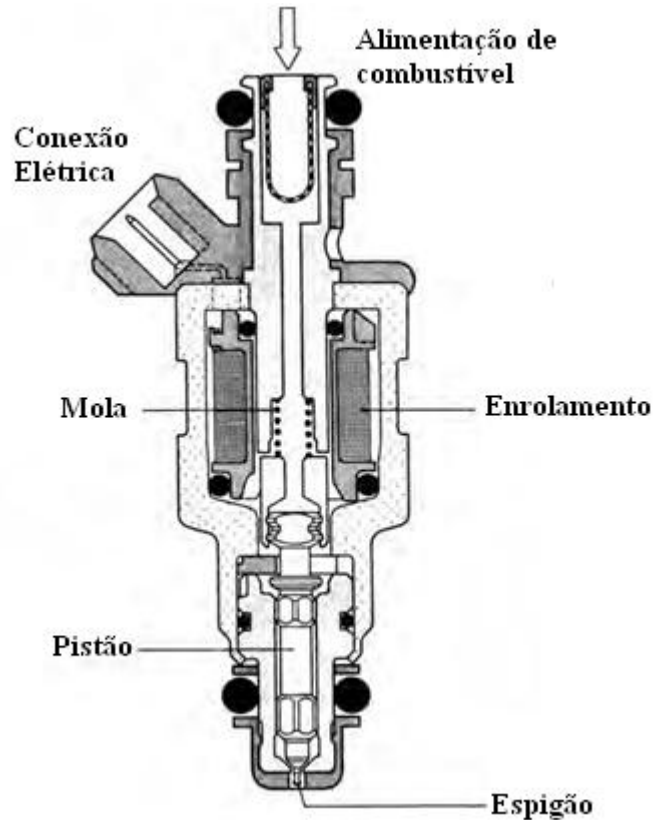
V = Tensão da bobina (V);

R = Resistência da bobina ( $\Omega$ );

L = Indutância da bobina (H);

T = Tempo de circulação da corrente.

Denton (2004) ainda afirma que pode ser usada uma resistência em série ao injetor, o que permite o uso de menor indutância e resistência e implica no aumento da velocidade de reação.



**Figura 6:** Injetor de Combustível

Fonte: (DENTON, 2004)

#### 4.1 Injetor Eletrohidráulico

Segundo Bennett (2013) este tipo de injetor foi introduzido na década de 90 e foi utilizado pela primeira vez no sistema *Common Rail*. Neste injetor uma válvula atuadora controlada pela ECU abre ou fecha um orifício que faz a ligação com a parte hidráulica, responsável pelo aumento da pressão do combustível.

#### 4.2 Injetor Piezoelétrico

Assim como o injetor eletrohidráulico, este injetor também tem o aumento da pressão por meios hidráulicos. A grande diferença é que este injetor não utiliza a válvula solenoide, e sim centenas de cristal piezo conglomerados, que tem a capacidade de executar a injeção em

maior velocidade. Estes cristais tem a capacidade de mudar rapidamente de forma quando submetidos à eletricidade, expandindo ou contraindo, o que faz com que eles operem melhor que as válvulas solenoides, apesar de serem normalmente um pouco maiores. Isto faz com que seja possível dividir o combustível de um ciclo em sete menores injeções, que contribuiu para a economia, redução de emissões e redução de ruído para os motores diesel mais modernos (BENNETT, 2013).

## 5 EMISSÕES

Atualmente existem instituições responsáveis por fiscalizar as emissões de gases nocivos à atmosfera, em todos os ramos. Diversos compostos químicos resultam da combustão, em geral com sua quantidade em função do tipo de combustível utilizado na queima. É válido conhecer algumas características dos principais compostos, levando em consideração que o controle eletrônico dos motores pode auxiliar na medição destes compostos nos gases de exaustão e que leitura da emissão dessas substâncias pode servir como ferramenta para a detecção de defeitos ou indicar algum fator que requisite alteração na injeção.

### 5.1 Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )

O  $\text{CO}_2$  é um composto incolor, caracterizado por reter a energia emitida pelo sol em forma de radiação solar, ou seja, é um dos principais contribuintes para o efeito estufa.

Segundo Jayaram (2010), as estimativas anuais da emissão de  $\text{CO}_2$  por navios até 2010 eram de aproximadamente 1046 Tg (teragramas ou  $10^{12}$ g), o que equivale a cerca de 3.3% das emissões globais deste composto.

### 5.2 Monóxido de Carbono (CO)

Este composto é obtido através da combustão incompleta, ou seja, quando ocorre falta de oxigênio na mistura. É inflamável, incolor, inodoro e altamente tóxico.

### 5.3 Óxidos de Enxofre ( $\text{SO}_x$ )

De acordo com Bennett (2013) e Milhor (2002), resultam da oxidação do enxofre, que está presente, em pequenas quantidades, nos combustíveis de veículos automotivos. Porém,

segundo Jayaram (2010), navios normalmente utilizam óleos pesados de alta viscosidade, com teor de enxofre de até 4.5%, que implica na emissão de 4,7 a 6,5 Tg de óxidos de enxofre anual, que representa aproximadamente entre 5% e 7% da emissão global anual, até 2010.

## 5.4 Óxidos de Nitrogênio

O nitrogênio é a substância química com maior quantidade em massa no ar. Apesar do nitrogênio ser um gás considerado inerte à temperatura ambiente, segundo Bennett (2013) nas condições de pressão e temperatura dos cilindros dos motores, ocorre a formação de seus óxidos devido ao processo de oxidação.

Navios emitem de 5 a 6.9 Tg de  $\text{NO}_x$  e nitrogênio por ano, que corresponde a cerca de 15% da emissão global de  $\text{NO}_x$  (JAYARAM, 2010).

Jayaram (2010) ainda afirma que essas emissões podem ser controladas por métodos primários ou secundários. Os primários incluem atraso da injeção, adaptação do bico injetor, recirculação dos gases de exaustão, emulsificação do combustível com água ou injeção direta de água da câmara de combustão podem reduzir as emissões de  $\text{NO}_x$  de 10% a 50%. Os métodos secundários, como redução catalítica, envolvem o tratamento dos gases de exaustão e podem alcançar reduções maiores que 95%.

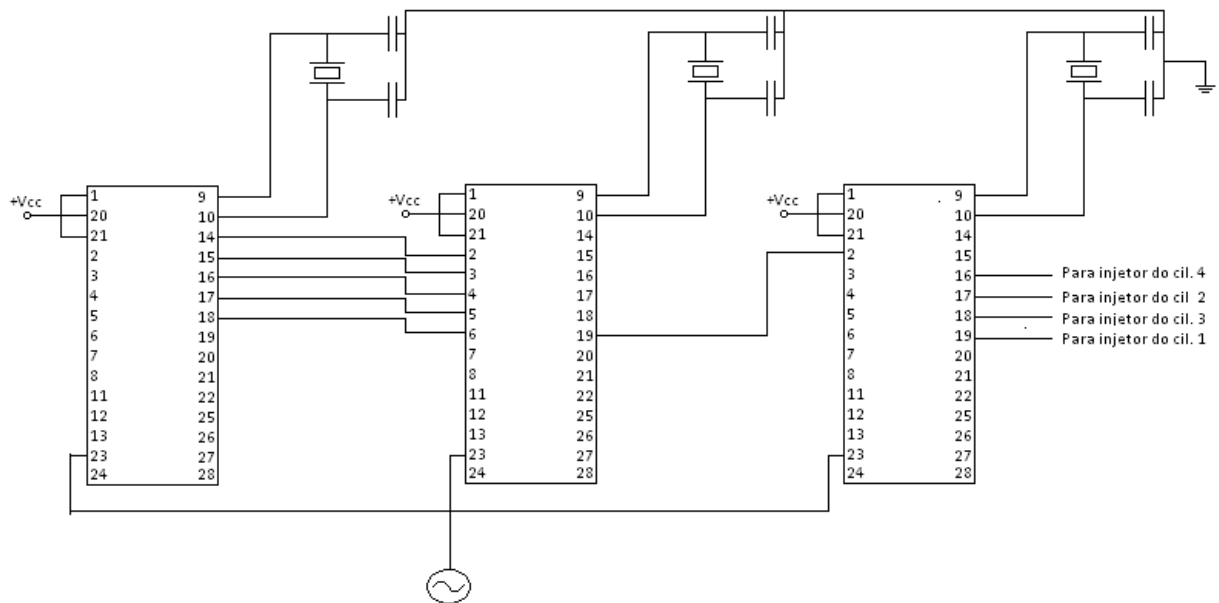
## 5.5 Partículas Suspensas

Essas emissões são formadas por enxofre, cinzas e combustível ou óleo lubrificante que não foi queimado ou parcialmente queimado. Segundo Bennett (2013), as partículas microscópicas são prejudiciais ao sistema respiratório, assim como as maiores.

Até 2010 as emissões médias por navios anuais estimadas eram entre 1.2 Tg e 1.6 Tg (JAYARAM, 2010).

## 6 EXEMPLO DE PROGRAMAÇÃO DA CENTRAL ELETRÔNICA

Como já citado anteriormente, com a utilização inteligente dos dados obtidos pelos sensores é possível controlar a injeção de combustível através dos atuadores. O objetivo deste capítulo é exemplificar uma possibilidade de ligação destes dois dispositivos utilizando microcontroladores eletrônicos para fazer a leitura de um sensor de posição e então controlar um injetor de combustível em uma dada rotação constante, através da utilização da linguagem C++ de uma maneira simples e de fácil entendimento. Para fins de simplicidade, foram utilizados três microcontroladores atmega328, cada qual com sua função, especificadas a seguir. A imagem abaixo apresenta a disposição do circuito utilizado para a realização do projeto.



**Figura 7:** Esquema do circuito utilizado no projeto

**Fonte:** Autoria própria

A fonte da figura é o sinal de saída de uma roda dentada de 60-2 dentes, que gira na frequência de 150Hz. Este sinal pode ser visto na figura 8.

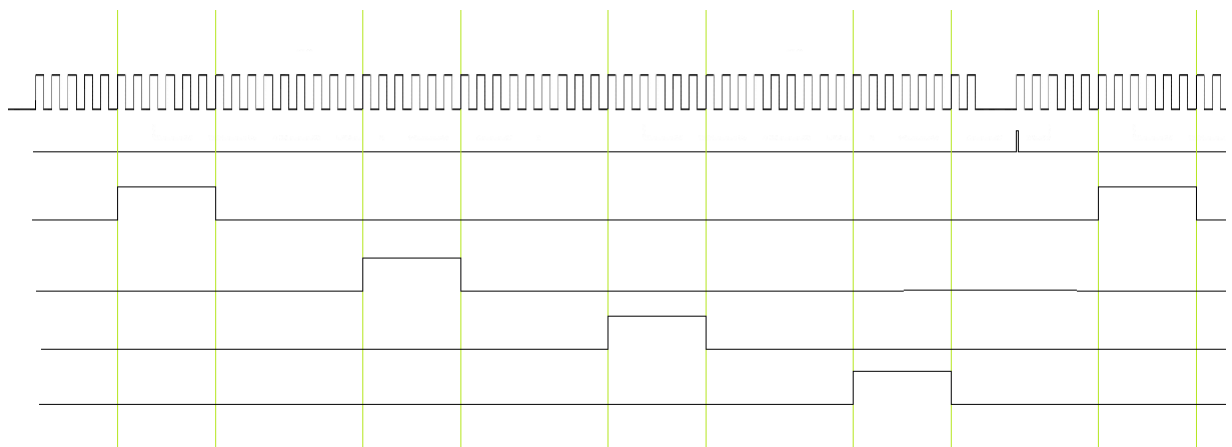
O primeiro tem objetivo de receber o sinal de um sensor de posição do eixo, e contar o número de dentes da roda dentada que passam pelo sensor em um determinado período de tempo. Feito isso, para evitar qualquer tipo de perda de tempo gerada pela transmissão serial possibilitada pelo controlador, ele ainda transforma o número de dentes para a base binária

permitindo a transmissão paralela deste número, através de 5 portas do microcontrolador. O código utilizado se encontra no apêndice A.

O segundo, após transformar o número binário em decimal novamente, calcula a frequência com que os dentes passam pelo sensor com a simples divisão do número de dentes obtido no código anterior pelo tempo. Após isso ele detecta o indicador de zero graus da roda, que corresponde aos dois dentes faltando, e gera um sinal de sincronismo. O código se encontra no apêndice B.

Finalmente, o terceiro controlador, cujo código pode ser visto no apêndice C, recebe o sinal do sensor e o sinal de sincronismo do controlador anterior, o que permite o conhecimento da posição do eixo e portando a geração de um sinal com largura de pulso modulada (PWM) que irá ativar os respectivos injetores de combustível.

Neste exemplo estão sendo gerados sinais para um motor de dois tempos com quatro cilindros, conseqüentemente cada injeção ocorre noventa graus defasada da anterior. Para obter o intervalo de injeção é necessário estudar as características do motor e levar em considerações os fatores pontuais como a carga e o rendimento do motor. Como este não é o foco do trabalho, foi arbitrado o intervalo de trinta graus para a injeção do exemplo dado. Na imagem abaixo podem ser observados o sinal da roda dentada, o sinal de fase obtido pelo segundo controlador e os sinais dos cilindros 1, 3, 2 e 4, respectivamente.



**Figura 6:** Sinais da roda dentada e sinais dos injetores

**Fonte:** Autoria própria



## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho objetivou demonstrar as diversas vantagens que podem ser obtidas através da aplicação da eletrônica nos motores de combustão interna. Isso é vantajoso - tanto para a preservação do meio ambiente através da redução da emissão dos gases poluentes quanto para a obtenção de melhores performances por estes motores - de modo que a tendência nos dias de hoje é aumentar cada vez mais a utilização deste método.

A emissão de gases nocivos ao meio ambiente é um problema que merece atenção. Foram dados exemplos numéricos de emissões de navios de alguns desses gases, que podem ter sua quantidade reduzida através de técnicas que podem ser postas em prática pelo controle eletrônico dos motores.

Também foi demonstrado que implementação é relativamente simples. São necessários conhecimentos medianos de controladores eletrônicos e do funcionamento geral de um motor de combustão interna, visto que serão utilizados os sensores e os atuadores da mesma para o controle do motor.

O conhecimento dos elementos do sistema é essencial para o projeto e para a manutenção. Isso justifica a apresentação de diversos sensores e de alguns atuadores, assim como a lógica de funcionamento dos diversos tipos de sistemas.

O controle eletrônico dos motores é um assunto em crescimento atualmente, porém só é de conhecimento geral a utilização deles para veículos automotivos, enquanto ele já está sendo aplicado nos mais diversos ramos, incluindo na área marítima. Este trabalho contribuiu também para essa conscientização, de maneira que os profissionais se preparem para o futuro que os espera.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIRD, Forbes. **Bosch fuel injection systems**. 1. ed. New York: HPBooks, 2001.
- BENNET, Sean. **Medium/heavy duty truck engines, fuel & computerized management systems**. 4. ed. New York: Delmar, 2013.
- DENTON, Tom. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. 3. ed. London: Elsevier, 2004.
- GLEHN, Fábio Ribeiro von. **Curso de injeção eletrônica**. 4. ed. Goiânia, jun 2001. 31. p.
- JAYARAM, Varalakshmi. **Analytical framework to evaluate emission control systems for marine engines**. 2010. Tese (Ph.D.)-UC Riverside, University of California, California. 2010.
- MILHOR, Carlos Eduardo. **Sistema de desenvolvimento para controle eletrônico dos motores de combustão interna ciclo otto**. 2002. Dissertação (Mestrado)-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- RIBBENS, W. B. **Understanding automotive electronics**. 5. ed. [S.I.]: Butterworth-Heinemann, 1998.

## APÊNDICE A - Código do primeiro microcontrolador

```
int PSPin = A0;
```

```
int pinA = 8;
```

```
int pinB = 9;
```

```
int pinC = 10;
```

```
int pinD = 11;
```

```
int pinE = 12;
```

```
int DurationTime = 125;
```

```
void setup() {
```

```
    pinMode(PSPin, INPUT);
```

```
    pinMode(pinA, OUTPUT);
```

```
    pinMode(pinB, OUTPUT);
```

```
    pinMode(pinC, OUTPUT);
```

```
    pinMode(pinD, OUTPUT);
```

```
    pinMode(pinE, OUTPUT);
```

```
}
```

```
int TeethCounter() {
```

```
    int i = 0;
```

```
    unsigned long StartTime = millis();
```

```
    unsigned long PrvTime = StartTime ;
```

```

while ( PrvTime - StartTime < (unsigned long) DurationTime ) {

    if ( digitalRead(PSPin) == HIGH ) {

        i=i+1;

        while ( digitalRead(PSPin) == HIGH);

    }

    PrvTime = millis();

}

return i;

}

void loop() {

    int ADconv [32][6] = { {LOW, LOW, LOW, LOW, LOW, 0}, {LOW, LOW, LOW,
LOW, HIGH, 1}, {LOW, LOW, LOW, HIGH, LOW, 2}, {LOW, LOW, LOW, HIGH,
HIGH, 3},{LOW, LOW, HIGH, LOW, LOW, 4}, {LOW, LOW, HIGH, LOW, HIGH, 5},
{LOW, LOW ,HIGH, HIGH, LOW, 6}, {LOW, LOW, HIGH, HIGH, HIGH, 7}, {LOW,
HIGH, LOW, LOW, LOW, 8},    {LOW, HIGH, LOW, LOW, HIGH, 9}, {LOW, HIGH,
LOW, HIGH, LOW, 10}, {LOW, HIGH, LOW, HIGH, HIGH, 11}, {LOW, HIGH, HIGH,
LOW, LOW, 12}, {LOW, HIGH, HIGH, LOW, HIGH, 13},

{LOW, HIGH, HIGH, HIGH, LOW, 14}, {LOW, HIGH, HIGH, HIGH, HIGH, 15}, {HIGH,
LOW, LOW, LOW, LOW, 16}, {HIGH, LOW, LOW, LOW, HIGH, 17}, {HIGH, LOW,
LOW, HIGH, LOW, 18}, {HIGH, LOW, LOW, HIGH, HIGH, 19},

{HIGH, LOW, HIGH, LOW, LOW, 20}, {HIGH, LOW, HIGH, LOW, HIGH, 21}, {HIGH,
LOW ,HIGH, HIGH, LOW, 22}, {HIGH, LOW, HIGH, HIGH, HIGH, 23}, {HIGH, HIGH,
LOW, LOW, LOW, 24},{HIGH, HIGH, LOW, LOW, HIGH, 25}, {HIGH, HIGH, LOW,
HIGH, LOW, 26}, {HIGH, HIGH, LOW, HIGH, HIGH, 27}, {HIGH, HIGH, HIGH, LOW,
LOW, 28}, {HIGH, HIGH, HIGH, LOW, HIGH, 29},

{HIGH, HIGH, HIGH, HIGH, LOW, 30}, {HIGH, HIGH, HIGH, HIGH, HIGH, 31}

};

```

```
int p = TeethCounter();  
  
for (int n = 0; n<33; n++) {  
  
    if ( p == ADconv [n][5]) {  
  
        digitalWrite(pinA, ADconv[n][0]);  
  
        digitalWrite(pinB, ADconv[n][1]);  
  
        digitalWrite(pinC, ADconv[n][2]);  
  
        digitalWrite(pinD, ADconv[n][3]);  
  
        digitalWrite(pinE, ADconv[n][4]);  
  
    }  
  
}  
  
}
```

## APÊNDICE B - Código do segundo microcontrolador

```
int PSPin = A0;
```

```
int pwmPin = 13;
```

```
int DurationTime = 125;
```

```
int pinAi = 0;
```

```
int pinBi = 1;
```

```
int pinCi = 2;
```

```
int pinDi = 3;
```

```
int pinEi = 4;
```

```
void setup() {
```

```
    pinMode(PSPin, INPUT);
```

```
    pinMode(pinAi, INPUT);
```

```
    pinMode(pinBi, INPUT);
```

```
    pinMode(pinCi, INPUT);
```

```
    pinMode(pinDi, INPUT);
```

```
    pinMode(pinEi, INPUT);
```

```
    pinMode(pwmPin, OUTPUT);
```

```
}
```

```
int DAconv() {
```

```
    int n = 0;
```



```
        n= 24; } } } }  
  
else {  
  
    if (digitalRead(pinCi) == HIGH) {  
  
        if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
  
            if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                n = 23; }  
  
            else {  
  
                n= 22; } }  
  
            else {  
  
                if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                    n = 21; }  
  
                else {  
  
                    n= 20; } } }  
  
            else {  
  
                if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
  
                    if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                        n = 19; }  
  
                    else {  
  
                        n= 18; } }  
  
                    else {  
  
                        if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                            n = 17; }  
  
                        else {
```



```
        n= 16; } } } } }  
  
else {  
  
    if (digitalRead(pinBi) == HIGH) {  
  
        if (digitalRead(pinCi) == HIGH) {  
  
            if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
  
                if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                    n = 15; }  
  
                else {  
  
                    n= 14; } }  
  
            else {  
  
                if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                    n = 13; }  
  
                else {  
  
                    n= 12; } } }  
  
            else {  
  
                if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
  
                    if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                        n = 11; }  
  
                    else {  
  
                        n= 10; } }  
  
                else {  
  
                    if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
  
                        n = 9; }  
  
                    }  
  
                }  
  
            }  
  
        }  
  
    }  
  
}
```

```
        else {  
            n= 8; } } }  
else {  
    if (digitalRead(pinCi) == HIGH) {  
        if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
            if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
                n = 7; }  
            else {  
                n= 6; } }  
        else {  
            if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
                n = 5; }  
            else {  
                n= 4; } } }  
    else {  
        if (digitalRead(pinDi) == HIGH) {  
            if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
                n = 3; }  
            else {  
                n= 2; } }  
        else {  
            if (digitalRead(pinEi) == HIGH) {  
                n = 1; }  
        }  
    }  
}
```

```

        else {
            n= 0; } } } }

    return n;
}

bool CycleStart()
{
    int number = DAconv();

    if ( pulseIn(PSPin, LOW) > (unsigned long) DurationTime*1000 / (unsigned long)
number )

        return true;

    else

        return false;

}

void loop() {

    if ( CycleStart() == true )    {

        digitalWrite(pwmPin, HIGH);

        delay(1);

        digitalWrite(pwmPin, LOW);

    }

    else

        digitalWrite(pwmPin, LOW);

}

```

## APÊNDICE C - Código do terceiro microcontrolador

```
int PSPin = A0;

int cyclePin = 0;

int injPinA = 13;

int injPinB = 12;

int injPinC = 11;

int injPinD = 10;

int degree = 0;

int laststat = LOW;

int laststatB = LOW;

void setup() {

    pinMode(PSPin, INPUT);

    pinMode(cyclePin, INPUT);

    pinMode(injPinA, OUTPUT);

    pinMode(injPinB, OUTPUT);

    pinMode(injPinC, OUTPUT);

    pinMode(injPinD, OUTPUT);

}

int position() {

    if ( digitalRead(PSPin) == HIGH ) {

        if ( laststat == LOW ) {
```

```

        degree = degree+6;

        laststat = HIGH;

    }

}

if ( digitalRead(cyclePin) == HIGH ) {

    if ( laststatB == LOW )    {

        degree = 6;    // retorna HIGH no primeiro dente, de 6°

        laststatB = HIGH;

    }

}

if ( digitalRead(cyclePin) == LOW ) {

    laststatB = LOW;

}

if ( digitalRead(PSPin) == LOW ) {

    laststat = LOW;

}

return degree;

}

void loop()

{

    int var = position();

    if ( var >= 36 && var <= 66)

        digitalWrite(injPinA, HIGH);

```

```
else
digitalWrite(injPinA, LOW);

if ( var >= 126 && var <= 156)

digitalWrite(injPinB, HIGH);

else
digitalWrite(injPinB, LOW);

if ( var >= 216 && var <= 246)

digitalWrite(injPinC, HIGH);

else
digitalWrite(injPinC, LOW);

if ( var >= 306 && var <= 336)

digitalWrite(injPinD, HIGH);

else
digitalWrite(injPinD, LOW);

}
```