



CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA SANTO ANDRÉ
TECNOLOGIA EM ELETRÔNICA AUTOMOTIVA

Paulo Pereira dos Santos

***Estudo do Hidrogênio quanto a utilização como
combustível em motores de combustão interna***

Santo André
2020

Paulo Pereira dos Santos

***Estudo do Hidrogênio quanto a utilização como
combustível em motores de combustão interna***

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a FATEC SANTO ANDRÉ
como requisito parcial para obtenção do
título de Tecnólogo em Eletrônica
Automotiva.*

Orientadora: Profa MSc Suely Midori Aoki

Santo André

2020

S237e

Santos, Paulo Pereira dos
Estudo do hidrogênio quanto a utilização como combustível em
motores de combustão interna / Paulo Pereira dos Santos. -
Santo André, 2020. – 84f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2020.

Orientadora: Prof. MSc Suely Midori Aoki

1. Energia renovável. 2. Veículos elétricos. 3. Hidrogênio. 4.
Estudo. 5. Motores de combustão interna. 6. Motores Ciclo Otto.
7. Tecnologia. 8. Emissão de poluentes. 9. Combustível. I.
Estudo do hidrogênio quanto a utilização como combustível em
motores de combustão interna.

333.79

Paulo Pereira dos Santos

***Estudo do Hidrogênio quanto a utilização como
combustível em motores de combustão interna***

*Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado a FATEC SANTO ANDRÉ
como requisito parcial para obtenção do
título de Tecnólogo em Eletrônica
Automotiva.*

BANCA EXAMINADORA

Local: Fatec Santo André

Horário: 20h20min

Data: 17/07/2020

Profa. MSc. Suely Midori Aoki
Presidente da Banca
Fatec Santo André

Prof. MSc. José dos Santos Garcia Neto
Primeiro membro da Banca
Vidjaya Automação e Tecnologia

Prof. MSc. Fernando Dalbo Garup
Segundo Membro da Banca
Fatec Santo André

SANTO ANDRÉ

2020

Dedico este trabalho aos meus pais pela educação e pelo exemplo de pessoas que são para mim durante toda a minha vida, dedico também a esposa e aos filhos pelo apoio que me foi oferecido durante todo este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a Deus pelo direito a vida que Ele me concedeu.

Quero também deixar um agradecimento especial a minha professora e orientadora MSc. Suely Midori Aoki, pelos ensinamentos, pela dedicação, pela paciência e pelo grande empenho ao nosso trabalho.

Deixo também um agradecimento ao meu professor e parceiros de trabalho, prof. José dos Santos Garcia Neto, Juan Hideo Takara e Eriki Masariko Takara.

Não posso também deixar de agradecer aos meus colegas e parceiros da faculdade e, também, a todos os professores que participaram da minha vida acadêmica.

Meu muito obrigado de coração a todos!

*"Faça o seu melhor na condição que você tem, enquanto
não tiver condições para fazer melhor ainda."*

Mario Sergio Cortella.

RESUMO

É de extrema importância para a sobrevivência das futuras gerações desenvolver uma tecnologia viável que possa fornecer uma fonte de energia limpa e sustentável. No setor automotivo, além das preocupações ambientais, pesquisas e desenvolvimento recentes de redes inteligentes e veículos elétricos mostram que a demanda por eletricidade está em alta. O hidrogênio é visto, desta forma, como uma potencial vetor de energia “limpa”, pois, podendo ser produzido a partir de fontes de energias renováveis: ele não é poluente, visto que sua utilização em células a combustível, gerando eletricidade para fazer funcionar um motor elétrico, ou sua combustão em motores de combustão interna não produz (ou produz muito pouco) subprodutos prejudiciais ao meio ambiente bem como aos seres vivos, além de que, no caso das células a combustível, temos água como resíduo.

Foram estudadas neste trabalho as características químico-físicas do hidrogênio, questões sobre sua utilização com segurança e informações necessárias para a compreensão dos parâmetros envolvidos no processo de combustão em motores de combustão interna.

Um motor de combustão interna de ciclo Otto, estacionário de pequeno porte, foi adaptado para utilizar hidrogênio como combustível e um sistema de injeção eletrônica para este motor foi desenvolvido para injetar o hidrogênio como combustível, permitindo avaliar a sua funcionalidade. Foram empregados componentes como sensores e atuadores amplamente utilizados pela indústria automotiva e, portanto, testados e validados.

Projetou-se também um sistema eletrônico para controlar o sistema, de forma a utilizar gás hidrogênio já envasado em cilindros e disponível comercialmente. A implementação deste sistema será feita num trabalho futuro.

Palavras-chaves: energia renovável, hidrogênio, motor ciclo Otto.

ABSTRACT

It is extremely important for the survival of future generations to develop a viable technology that can provide a clean and sustainable source of energy. In the automotive sector, in addition to environmental concerns, recent research and development of smart grids and electric vehicles shows that demand for electricity is on the rise. Hydrogen is seen, in this way, as a potential vector of "clean" energy, since it can be produced from renewable energy sources: it is not polluting, since its use in fuel cells, generating electricity to make it work an electric motor, or its combustion in internal combustion engines, does not produce (or produces very little) harmful by-products to the environment as well as to living beings, besides, in the case of fuel cells, we have water as waste.

In this work, the chemical-physical characteristics of hydrogen, questions about its safe use and information necessary to understand the parameters involved in the combustion process in internal combustion engines were studied.

A small, stationary Otto cycle internal combustion engine was adapted to use hydrogen as a fuel and an electronic injection system for this engine was developed to inject hydrogen as a fuel, allowing to evaluate its functionality. Components such as sensors and actuators were widely used in the automotive industry and, therefore, tested and validated.

An electronic system was also designed to control the system, in order to use hydrogen gas already filled in cylinders and commercially available. The implementation of this system will be done in a future work.

Key words: renewable energy, hydrogen, Otto cycle engine

LISTA DE TABELAS

Tabela	Descrição	Página
01	Densidade de energia por massa do hidrogênio (HHV e LHV) de diversas fontes	20
02	Densidade de energia volumétrica do hidrogênio (HHV e LHV)	20
03	Densidade de combustíveis no estado gasoso e líquido	21
04	Ponto de Inflamabilidade do Hidrogênio e de alguns combustíveis	25
05	Temperatura de Autoignição de alguns Combustíveis	27
06	Número de Octanagem de alguns Combustíveis	28
07	Valores da taxa de compressão	47
08	Relação estequiométrica de alguns combustíveis	57

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descrição	Página
01	Esquema do ciclo do combustível de hidrogênio	18
02	Densidade de energia por massa de combustíveis (LHV)	19
03	Densidade de energia volumétrica típica de alguns combustíveis (LHV)	21
04	Valores calculados da densidade de energia volumétrica do hidrogênio (em linhas contínuas) em relação aos valores relatados. LH ₂ é o hidrogênio líquido	22
05	Densidade do hidrogênio em função da pressão	22
06	Limites de inflamabilidade do Hidrogênio em função da Temperatura	26
07	Faixas de Inflamabilidade de Combustíveis a Temperatura Ambiente	26
08	Fonte de obtenção do hidrogênio	32
09	Eletrolisador com membrana separadora de Próton.	36
10	Modalidades de armazenamento do hidrogênio	37
11	Esquema de um Tanque de Armazenamento de Gás Comprimido e seus Componentes	37
12	Vasos de Pressão de Baixo Custo para o Armazenamento de Hidrogênio Utilizando Fibras de Carbono de Baixo Custo	38
13	Representação Esquemática de um Vaso Criogênico	39
14	Motor ciclo Otto 4 tempos	44
15	Diagrama PV do Ciclo Otto	45
16	Ciclo Otto real.	45
17	Potência, consumo específico em função de lambda	46
18	Esquema de ligação entre sensores e atuadores	50
19	Central de controle eletrônico	51
20	Central de injeção eletrônica com vista dos componentes internos	51

21	Sensor de rotação indutivo	52
22	Sinal emitido pelo sensor de rotação indutivo	53
23	Ilustração da montagem de um sensor de rotação no bloco do motor	53
24	Esquema de ligação do sensor de rotação indutivo	53
25	Sensor de temperatura tipo NTC	54
26	Sensor MAP	55
27	Corpo de borboleta mecânico (esquerda) e eletrônico (direita)	56
28	Sensor lambda	56
29	Diagrama de funcionamento da sonda lambda	57
30	Sensor de detonação	58
31	Válvula injetora para injeção indireta	59
32	Válvula injetora para injeção direta	59
33	Bobina de ignição múltipla	61
34	Bobina de ignição individual	61
35	Circuito típico do LM1949	61
36	Configuração típica LM1815	62
37	Motor adaptado	65
38	Dispositivo de injeção de hidrogênio (vista explodida)	66
39	Dispositivo de injeção montado	66
40	Diagrama de blocos do motor e da ECU	68
41	Cilindro de hidrogênio com regulador de pressão	68
42	Válvula corta-chama	69
43	Fluxograma do programa principal	71
44	Imagem dos sinais do simulador no osciloscópio	73

SUMÁRIO

1. Introdução	16
2. Objetivo	17
3. Fundamentos teóricos	18
3.1. Hidrogênio como fonte de energia	18
3.2. O Hidrogênio	23
3.2.1. A inflamabilidade do Hidrogênio	24
3.2.2. Ponto de inflamabilidade	25
3.2.3. Faixa de inflamabilidade	25
3.2.4. Temperatura de auto-ignição	27
3.2.5. Número de octanagem	27
3.2.6. Energia de ignição	28
3.2.7. Velocidade de queima	29
3.2.8. Espaço de extinção de chamas (<i>quenching gap</i>)	29
3.2.9. Características da chama	30
3.2.10. Fragilização por hidrogênio.	31
3.3. Produção de Hidrogênio	31
3.3.1. Reforma a vapor de gás natural	32
3.3.2. Gaseificação do carvão	33
3.3.3. Eletrólise da água	34
3.3.4. Solução eletrolítica	35

3.3.5. <i>Produção de hidrogênio por eletrólise</i>	35
3.4. <i>Formas de Armazenamento do Hidrogênio</i>	36
3.4.1. <i>Armazenamento do Hidrogênio no Estado Gasoso</i>	37
3.4.2. <i>Armazenamento do Hidrogênio no Estado Líquido</i>	38
3.4.3. <i>Armazenamento do Hidrogênio em Hidretos Metálicos</i>	39
3.4.4. <i>Armazenamento do Hidrogênio em Sistemas Porosos</i>	40
3.4.5. <i>Outras Formas de Armazenamento do Hidrogênio</i>	40
3.5. <i>Distribuição do Hidrogênio</i>	41
3.6. <i>Combustão</i>	42
3.7. <i>Motores de combustão interna</i>	43
3.7.1. <i>Princípio de funcionamento</i>	44
3.7.2. <i>Relação estequiométrica</i>	46
3.7.3. <i>Taxa de compressão</i>	47
3.7.4. <i>Cilindrada</i>	48
3.7.5. <i>Eficiência do motor</i>	48
3.7.6. <i>Torque</i>	48
3.7.7. <i>Potência</i>	49
3.8. <i>Sistema de Injeção Eletrônica</i>	50
3.8.1. <i>Central de injeção eletrônica</i>	51
3.8.2. <i>Sensores</i>	52
3.8.3. <i>Atuadores</i>	59
3.8.4. <i>Drivers</i>	61

4. Metodologia e Materiais Utilizados	64
5. Projeto	65
5.1. Mecânica	65
5.1.1. O Motor	65
5.1.2. A injeção do hidrogênio	66
5.1.3. O reservatório de hidrogênio	68
5.1.4. A válvula corta-chama	68
5.1.5. Consumo de combustível	69
5.1.6. Frequência e período do motor	70
5.2. Eletrônica	70
5.3. Programa	72
5.3.1. Função principal	72
5.3.2. Função leitura dos dentes da roda fônica	72
6. Conclusão	74
7. Sugestão para trabalhos futuros	75
Referências Bibliográficas	76
Apêndice 1 – Programa de Controle de Injeção de Combustível	79
Apêndice 2 – Fluxograma das Interrupções	82
Apêndice 3 – Diagrama Esquemático da Placa de Controle da Injeção	84

1 Introdução

Um fator importante para a sustentabilidade na obtenção de energia, sendo atualmente uma crescente preocupação em todos os âmbitos da sociedade, é o desenvolvimento de uma tecnologia viável que possa fornecer uma fonte de energia limpa e renovável.

No setor automotivo, além das preocupações ambientais, pesquisas e desenvolvimento recentes em redes inteligentes e veículos elétricos mostram que a demanda por eletricidade está em alta.

O hidrogênio é visto, desta forma, como um potencial vetor de energia “limpa”, pois, podendo ser produzido a partir de fontes de energias renováveis: ele não é poluente, visto que sua utilização em células a combustível, gerando eletricidade para fazer funcionar um motor elétrico, ou sua combustão em motores de combustão interna não produz (ou produz muito pouco) subprodutos prejudiciais ao meio ambiente, bem como aos seres vivos, além de que, no caso das células a combustível, temos água como resíduo.

Neste trabalho, estudou-se as características químico-físicas do hidrogênio, questões sobre sua utilização com segurança e informações necessárias para a compreensão dos parâmetros envolvidos no processo de sua combustão em motores de combustão interna de Ciclo Otto.

Com base nestes estudos, adaptou-se um motor estacionário de pequeno porte para trabalhar com o hidrogênio como combustível e projetou-se uma central eletrônica para controlar o sistema de injeção.

2 Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é estudar a utilização do hidrogênio como combustível para motores de combustão interna de ciclo Otto e obter uma visão geral da viabilidade de seu uso neste tipo de motor.

Objetivos específicos

- Projetar e construir um sistema de injeção eletrônica para um motor de ciclo OTTO estacionário de pequeno porte para injetar hidrogênio como combustível e avaliar a sua funcionalidade, empregando componentes como sensores e atuadores amplamente utilizados pela indústria automotiva e, portanto, testados e validados.
- Projetar uma central eletrônica para controlar o sistema, considerando em utilizar gás hidrogênio já envasado em cilindros e disponível comercialmente.

3 Fundamentos teóricos

3.1 Hidrogênio como Fonte Energética

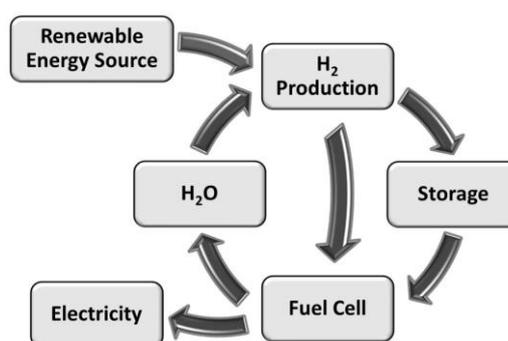
A diminuição das emissões de gases com efeito de estufa tem sido um tema de interesse mundial nas últimas décadas. Os principais contribuintes para o efeito estufa observáveis são as emissões provenientes da combustão de combustíveis fósseis na indústria e no setor de transporte.

É de extrema importância para as futuras gerações desenvolver uma tecnologia viável que possa fornecer uma fonte de energia limpa. Além das preocupações ambientais, pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias para a implementação de veículo menos poluentes e portanto mais eficientes.

O hidrogênio é visto, como uma fonte em potencial de energia “limpa”, pois pode ser produzido a partir de fontes de energia renováveis, isto é energia solar, hidroelétrica, eólica, ele não é poluente e a sua combustão em condição bem controlada não produz (ou produz muito pouco) subprodutos prejudiciais ao meio ambiente bem como aos seres vivos, além de que, a sua queima gera água como resíduo. A figura 1 mostra o ciclo de vida do hidrogênio.

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, porém ele não é encontrado sozinho na natureza e a sua produção exige a aplicação de energia para a sua obtenção, o que as vezes acaba inviabilizando a sua utilização. Vamos citar algumas formas para a produção do hidrogênio. A produção de hidrogênio à base de carbono, que produz quantidades significativas de CO_2 , tem sido foco de estudo para substituição desse tipo de recurso por outras fontes de energia sustentável, como a eólica ou solar.

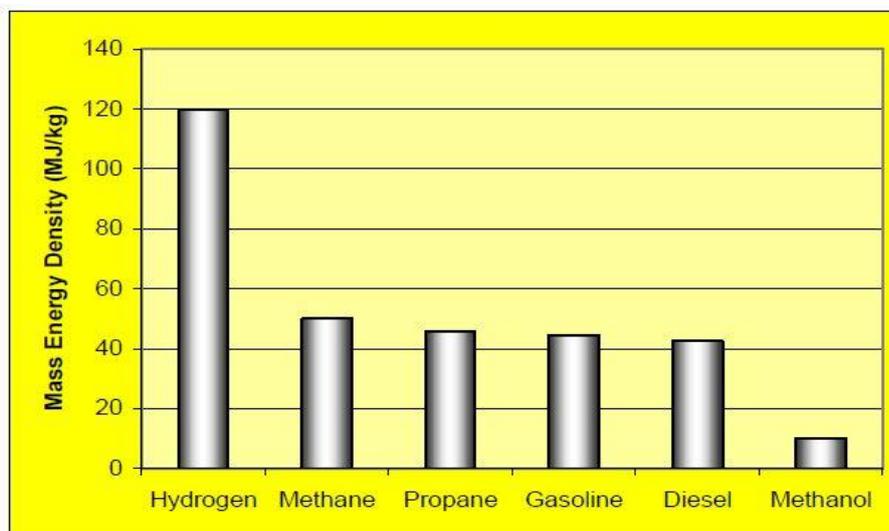
Figura 1 - Esquema do ciclo de vida do hidrogênio



Fonte: [1]

Outro fator que favorece o hidrogênio como fonte energética é que ele possui a maior densidade de energia¹ por massa, quase 2,5 vezes a energia liberada durante a combustão de combustíveis convencionais de hidrocarbonetos (figura 2).

Figura 2 – Densidade de energia por massa de combustíveis (LHV)



Fonte: [2]

A densidade de energia do hidrogênio pode ser calculada com base em princípios termodinâmicos.

Densidade de energia por massa: a energia liberada durante a combustão do hidrogênio, isto é, o calor da formação de H₂O, é dada pelas seguintes equações[2]:



A equação 1 é aplicável quando H₂O é produzido sob uma forma de vapor e pode ser usado para o cálculo do LHV do hidrogênio, enquanto a equação 2 é aplicável quando H₂O é formado como líquido, portanto, este calor de formação pode ser usado para calcular o HHV do hidrogênio.

¹ Quando o hidrogênio reage com o oxigênio, H₂O é formada e a energia é liberada. Esta quantidade de energia quando normalizada com a quantidade de hidrogênio reagida representa a densidade de energia do hidrogênio que se distingue entre o baixo valor de calor (LHV) e o alto valor de calor (HHV). A diferenciação entre HHV e LHV baseia-se no estado dos produtos H₂O da reação. Se H₂O estiver na fase de vapor, a energia normalizada liberada é chamada LHV (ou valor calorífico líquido). Por outro lado, se H₂O estiver na forma de água líquida, então, a energia normalizada liberada é chamada de HHV (ou valor calorífico bruto) e é maior que o LHV em cerca de 10%, considerando também o calor de condensação do vapor de água em líquido. Na maioria das aplicações, como células de combustível de alta temperatura, H₂O é produzida como vapor, portanto, o LHV representa mais precisamente a energia disponível para fazer o trabalho externo. No entanto, em certas aplicações, tais como células de combustível de membrana de troca de prótons (PEM), H₂O é produzida na forma líquida (água), neste caso, o uso do HHV de hidrogênio é mais apropriado.

A densidade de energia do hidrogênio pode ser expressa com base na massa (densidade de energia por massa) ou com base no volume (densidade de energia volumétrica). As densidades de energia por massa e volumétrica do hidrogênio, relatadas por várias fontes, são mostradas na Tabela 1 e na Tabela 2, respectivamente.

Tabela 1 – Densidade de energia por massa do hidrogênio (HHV e LHV) de diversas fontes²

<i>HHV (MJ/kg)</i>	<i>LHV (MJ/kg)</i>	<i>Source</i>
141.86	120.0	[8]
141.86	119.93	[4]
142	120.2	[9]
142	120	[10]
141.6	119.6	[11]

Fonte: [2]

Tabela 2 – Densidade de energia volumétrica do hidrogênio (HHV e LHV)

<i>HHV (MJ/m³)</i>	<i>LHV (MJ/m³)</i>	<i>Source</i>	<i>Conditions</i>
<i>Gaseous Hydrogen (GH₂)</i>			
12.75	10.8	[8]	At normal conditions
	10.1	[4]	At 15°C
12.71	10.8	[9]	At normal conditions
11.7	9.9	[10]	At 25°C
<i>Liquid Hydrogen (LH₂)</i>			
10.04*10 ³	8.495*10 ³	[8]	At boiling point
	8.491*10 ³	[4]	At boiling point
10*10 ³		[10]	

Fonte: [2]

Apesar da alta densidade de energia por massa do hidrogênio, sua baixa densidade, ou massa específica, (tabela 3) à temperatura e à pressão ambiente,

² Há uma discrepância nos valores relatados de densidade de energia do hidrogênio de diversas fontes citadas na coluna source das Tabelas 1 e 2. Estas diferenças podem ser resultado do arredondamento ou da medição em diferentes condições. As referências das fontes citadas na coluna source são:

[4] *Hydrogen Properties, Course Manual on Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies Module 1, College of the Desert, Palm Desert, CA, USA, 2001.*

[8] *L-B-Systemtechnik Hydrogen Data web site: <http://www.h2data.de/>.*

[9] *IEA Greenhouse Gas R&D Programme, Hydrogen: Today and Tomorrow, 1999.*

[10] *B. Eliasson and U. Bossel, The Future of hydrogen economy: Bright or bleak? Fuel Cell World, Lucerne, Switzerland, 2002.*

[11] *US Department of Energy, Energy efficiency and Renewable Energy, Hydrogen, Fuel Cells and Hydrogen Infrastructure program, Hydrogen Properties, <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/hydrogen/properties.html>.*

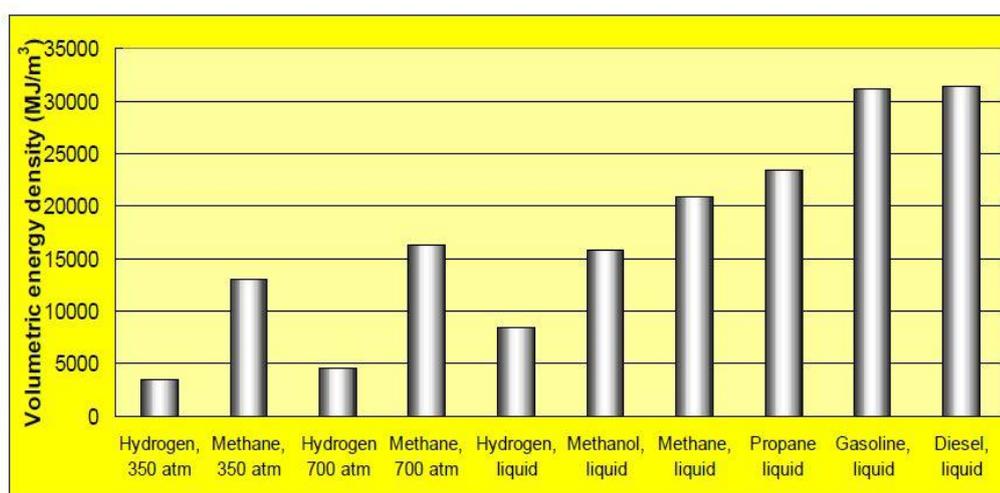
resulta em uma baixa densidade de energia volumétrica (figura 3), em comparação com outros combustíveis a base de hidrocarboneto.

Tabela 3 – Densidade de combustíveis no estado gasoso e líquido

<i>Substance</i>	<i>Gas (vapour) at 20°C, 1 atm</i>		<i>Liquid at boiling point, 1 atm</i>	
	<i>Absolute (kg/m³)</i>	<i>Relative to hydrogen</i>	<i>Absolute (kg/m³)</i>	<i>Relative to hydrogen</i>
<i>Hydrogen</i>	0.09	1.00	70.8	1.0
<i>Methane</i>	0.65	8.13	422.8	6.0
<i>Gasoline</i>	4.4	55.0	700.0	9.9

Fonte: [2]

Figura 3 - Densidade de energia volumétrica típica de alguns combustíveis (LHV)



Fonte: [2]

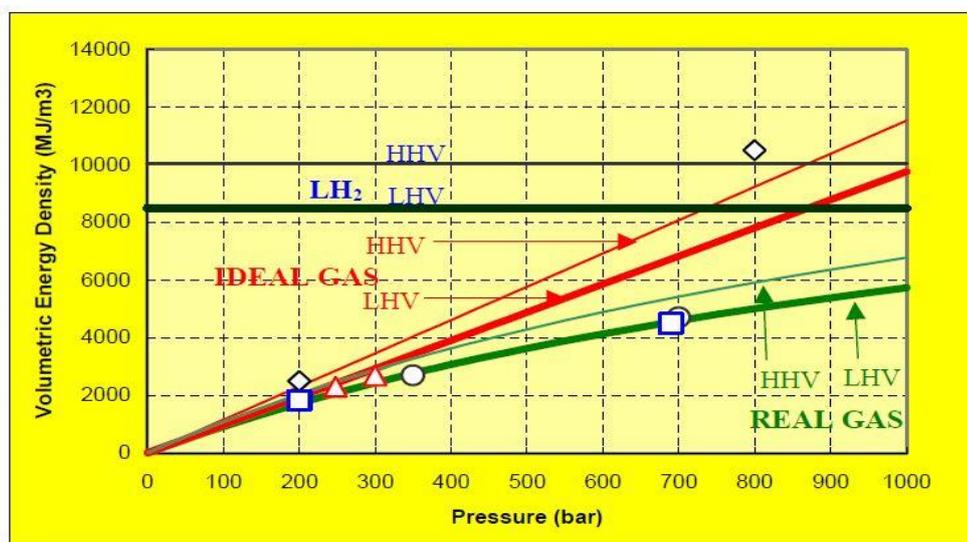
Para colocar esses números em perspectiva, um tanque de gasolina de 50 l é equivalente, em termos energéticos, a um tanque de 460 litros de hidrogênio comprimido a 350 bar, ou a um tanque de 340 litros de hidrogênio comprimido a 700 bar, ou a um tanque de hidrogênio líquido de 185 l [2].

Esta condição exige, portanto, o desenvolvimento de métodos avançados de armazenamento e transporte que tenham potencial para uma maior densidade de energia volumétrica do hidrogênio [3], trabalhando em altas pressões, por exemplo.

Contudo, devemos observar que, embora as discrepâncias entre os valores reportados da densidade de energia volumétrica do hidrogênio a baixas pressões sejam insignificantes (tabelas 1 e 2), os valores em altas pressões podem variar significativamente, conforme relatam Tzimas et al. [2] em seus estudos e cujos

resultados dos cálculos da densidade de energia volumétrica em função da pressão estão mostrados na figura 4:

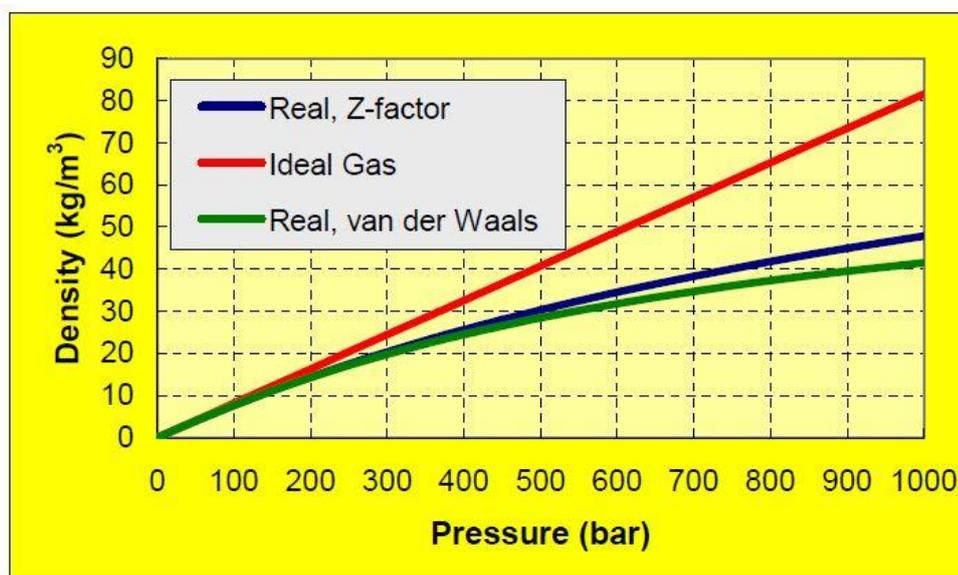
Figura 4 – Valores calculados da densidade de energia volumétrica do hidrogênio (em linhas contínuas) em relação aos valores relatados. LH₂ é o hidrogênio líquido



Fonte: [2]

Esta variação nos valores relatados é o resultado da imprecisão do cálculo da densidade de hidrogênio em pressões mais altas (figura 5), uma vez que a densidade de energia volumétrica é o produto da densidade de hidrogênio com a densidade de energia por massa.

Figura 5 – Densidade do hidrogênio em função da pressão



Fonte: [2]

Em qualquer futura economia baseada em hidrogênio, os principais determinantes econômicos serão principalmente o custo e a segurança do sistema de distribuição e do armazenamento do combustível, da fonte de fabricação até o usuário final. Isso é verdade para qualquer combustível, mas, para o hidrogênio, representam fatores relevantes devido à sua alta difusividade, sua extremamente baixa densidade como gás e líquido, requerendo situações de altas pressões, e a sua ampla faixa de inflamabilidade em relação aos hidrocarbonetos e aos álcoois de baixo peso molecular, quando em situação de pressão atmosférica, tornando críticas seu transporte e armazenamento.

3.2 O Hidrogênio

O elemento mais abundante do universo é o hidrogênio, constituindo 75% de sua massa e 90% de suas moléculas. Dessa maneira, essa forma de energia pode ser vista como uma reserva ilimitada de energia para o planeta.

O primeiro registro histórico do hidrogênio ocorreu por meio da mistura de metais com ácidos, pelo alquimista suíço Paracelsus (1493–1591), o que gerou um “ar explosivo”. Apesar da realização do experimento anterior, não era conhecido que o gás formado era o hidrogênio. Após alguns anos, outro cientista, Robert Boyle (1627–1691), realizou o mesmo experimento, que ficou conhecido como Lei de Boyle ou lei do gás ideal. Mas apenas em 1766 o hidrogênio foi reconhecido como uma substância química única por Henry Cavendish (1731–1810), e somente em 1785 recebeu a denominação de hidrogênio por Antoine Lavoisier (1743 –1794). Além de nomear este elemento químico, Lavoisier provou que a água é composta de hidrogênio e de oxigênio. Como explicitado anteriormente, o hidrogênio apresenta grande potencial energético, e o primeiro cientista a fazer este reconhecimento foi John Haldane (1892–1964), o qual afirmava em palestras que o hidrogênio seria o combustível do futuro, além de ter produzido um tratado científico com argumentos e descrições de seu uso.

Além de ser o elemento químico mais abundante, o hidrogênio é o mais comum e o mais simples, com apenas um número atômico e massa atômica próxima de 1. Ocupa a primeira posição na tabela periódica e é representado pela letra H. Em condições naturais, é um gás inodoro, insípido, incolor e muito mais leve que o ar. No estado líquido, ocupa um volume 700 vezes menor que no estado gasoso e deve estar

à temperatura de -243°C e à pressão atmosférica, além de serem armazenados em um sistema conhecido como criogênico. Em temperatura superior, passa para o estado gasoso e seu armazenamento passa a ser em cilindros de alta pressão. Por ser ativo quimicamente, o hidrogênio está constantemente em busca de outro elemento para se juntar. Quando misturado com oxigênio, dependendo da concentração, torna-se inflamável e mesmo explosivo. Com oxigênio puro, sua queima resulta somente em calor e água. Já a queima com ar, que é constituído de oxigênio e nitrogênio, forma alguns óxidos de nitrogênio, o que o torna menos poluente do que os combustíveis fósseis. Como combustível, o hidrogênio produz cerca de 2,4 vezes mais energia por unidade de massa que o gás natural. Tendo em vista que 1 kWh corresponde a 3600 joules, pode-se observar na tabela 6 a representação desse potencial, quando comparado a outras substâncias [18].

Por apresentar características explosivas, existe grande preocupação com a segurança de utilização do hidrogênio. Entretanto, este gás possui algumas importantes características, que o torna muito bom para uso: (1) Não explode ao ar livre; (2) Não é tóxico, apesar de tornar-se asfíxiante por consumir todo o oxigênio de um ambiente fechado; (3) Não é radioativo; (4) Não é corrosivo; (5) Não contamina a água; (6) Não é cancerígeno; (7) Possui alto coeficiente de difusão e como consequência dilui-se rapidamente no ar; (8) Caso sofra ignição ao ar livre, usualmente queima antes de atingir o valor limite para explosão; (9) Ao se decompor, não resulta em produtos perigosos [18].

3.2.1 A Inflamabilidade do Hidrogênio

São necessários três elementos para um incêndio ou explosão: um combustível, oxigênio (misturado com o combustível em quantidades apropriadas) e uma fonte de ignição. O hidrogênio desempenhando o papel do combustível inflamável que, misturado com o oxigênio sempre que ar entrar num recipiente que o contenha, ou quando este escapar de qualquer *container* para o ar, poderá explodir quando em contato com faíscas, chamas ou calor elevado. Assim, faz-se necessário o conhecimento de propriedades físico-químicas do hidrogênio quanto ao seu poder de inflamabilidade para que a sua utilização em motores torne-se viável e segura.

3.2.2 Ponto de inflamabilidade

Todos os combustíveis queimam apenas em estado gasoso ou vapor. Combustíveis como hidrogênio e metano já são gases nas condições atmosféricas, enquanto outros combustíveis como a gasolina ou o diesel, que são líquidos, devem se converter em um vapor antes de queimarem. A característica que descreve a facilidade com que esses combustíveis podem ser convertidos em vapor é o ponto de inflamabilidade. O ponto de inflamabilidade³ é definido como a temperatura à qual o combustível produz vapores suficientes para formar uma mistura inflamável com o ar na sua superfície. O ponto de inflamabilidade é sempre inferior ao ponto de ebulição. Para os combustíveis que são gases nas condições atmosféricas (como hidrogênio, metano e propano), o ponto de inflamabilidade está muito abaixo da temperatura ambiente e tem pouca relevância, já que o combustível já está totalmente vaporizado. Para os combustíveis que são líquidos em condições atmosféricas (como gasolina ou metanol), o ponto de inflamabilidade atua como um limite de temperatura de inflamabilidade inferior. A tabela 4 mostra os valores típicos de ponto de inflamabilidade de alguns combustíveis:

Tabela 4 – Ponto de Inflamabilidade do Hidrogênio e de alguns combustíveis

Combustível	Ponto de Inflamabilidade
Hidrogênio	< -423 °F (< -253 °C; 20 K)
Metano	-306 °F (-188 °C; 85 K)
Propano	-156 °F (-104 °C; 169 K)
Gasolina	Aproximadamente -45 °F (-43 °C; 230 K)
Metanol	52 °F (11 °C; 284 K)

Fonte: [4]

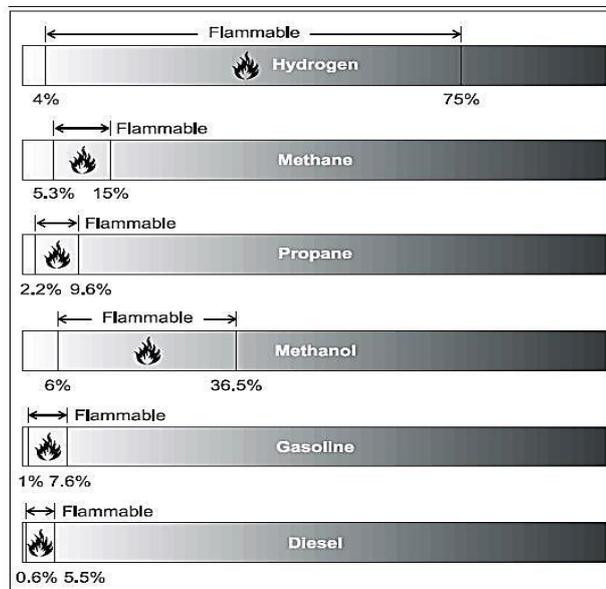
3.2.3 Faixa de inflamabilidade.

A gama de inflamabilidade de um gás é definida em termos de seu limite inferior de inflamabilidade (LFL – *lower flammability limit*) e seu limite superior de inflamabilidade (UFL – *upper flammability limit*), como pode ser visto na figura 6.

³Se a temperatura do combustível estiver abaixo do seu ponto de inflamabilidade, ele não pode produzir vapores suficientes para queimar, pois sua taxa de evaporação é muito baixa. Sempre que um combustível está em ou acima do seu ponto de inflamabilidade, os vapores estão presentes. O ponto de inflamabilidade não é a temperatura a que o combustível explode em chamas; essa é a temperatura de auto-ignição.

Entre os dois limites⁴ é a faixa inflamável em que o gás e o ar estão na proporção certa para queimar quando inflamado.

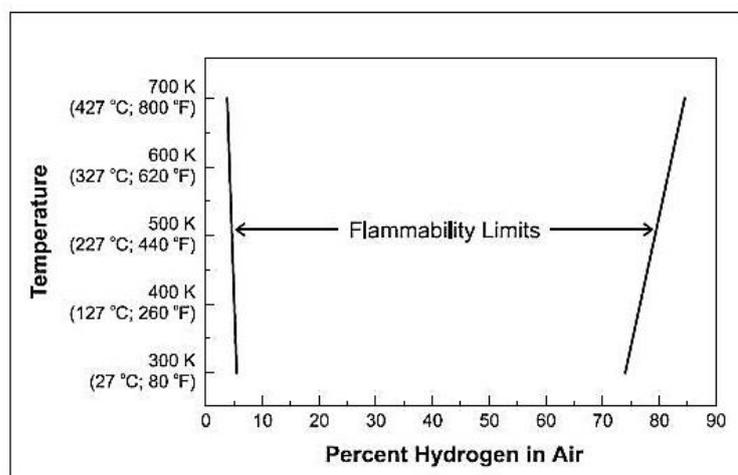
Figura 6 – Limites de inflamabilidade do Hidrogênio em função da Temperatura



Fonte: [4]

O hidrogênio é inflamável na faixa de concentração no ar entre 4 e 75% e é explosivo entre 15 e 59% à temperatura atmosférica padrão. Os limites de inflamabilidade aumentam com a temperatura como ilustrado na figura 7. Assim, mesmo pequenos vazamentos de hidrogênio têm o potencial de queimar ou explodir.

Figura 7 – Faixas de Inflamabilidade de Combustíveis a Temperatura Ambiente



Fonte: [4]

⁴ O LFL de um gás é a menor concentração de gás que suportará uma chama de auto-propagação quando misturada com o ar e inflamada. Abaixo do LFL, não existe combustível suficiente para suportar a combustão; a mistura combustível / ar é muito pobre.

O hidrogênio vazado pode se concentrar em um ambiente fechado, aumentando assim o risco de combustão e explosão. A UFL de um gás é a maior concentração de gás que suportará uma chama de auto-propagação quando misturada com o ar e inflamada. Acima da UFL, não há oxigênio suficiente para suportar a combustão; a mistura de combustível / ar é muito rica.

3.2.4 Temperatura de autoignição

A temperatura de auto-ignição é a temperatura mínima necessária para iniciar a combustão auto-sustentada em uma mistura de combustível comburente na ausência de uma fonte de ignição. Em outras palavras, o combustível é aquecido até que ele se incendeie. Cada combustível possui uma temperatura de ignição única. Para o hidrogênio, a temperatura de auto-ignição é relativamente alta a 1085 °F (585 °C). Isso torna difícil inflamar uma mistura de hidrogênio/ar com base somente no calor sem uma fonte de ignição adicional. As temperaturas de auto-ignição dos combustíveis estão indicadas na tabela 5.

Tabela 5 – Temperatura de Autoignição de alguns Combustíveis

Combustível	Temperatura de Autoignição
Hidrogênio	1085 °F (585 °C)
Metano	1003 °F (540 °C)
Propano	914 °F (490 °C)
Metanol	725 °F (385 °C)
Gasolina	450 to 900 °F (230 to 480 °C)

Fonte: [4]

3.2.5 Número de octanagem

O número de octanagem descreve as propriedades anti-detonantes de um combustível quando usado em um motor de combustão interna. Detonação é uma explosão secundária que ocorre após a ignição do combustível devido ao acúmulo de calor em alguma outra parte da câmara de combustão. Quando a temperatura local excede a temperatura de auto-ignição, ocorre uma detonação.

O desempenho do octano de hidrocarbonetos é usado como um padrão para medir a resistência a detonação e é atribuído um índice de octanagem relativo de 100.

Combustíveis com um índice de octanas superior a 100 têm mais resistência à ignição automática do que a própria octanagem.

O hidrogênio tem um índice de octanagem muito alto e, portanto, é resistente a detonação, mesmo quando queimado em condições muito pobres.

Os índices de octanagem de combustíveis estão indicados na tabela 6.

Tabela 6 – Número de Octanagem de alguns Combustíveis

Combustível	Número de Octanagem
Hidrogênio	130+ (queima pobre)
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Diesel	30

Fonte: [4]

3.2.6 Energia de ignição

A energia de ignição é a quantidade de energia externa que deve ser aplicada para inflamar uma mistura de combustíveis. A energia de uma fonte externa deve ser maior do que a temperatura de auto-ignição e ter uma duração suficiente para aquecer o vapor de combustível até a temperatura de ignição. Fontes comuns de ignição são chamas e faíscas.

Embora o hidrogênio tenha uma temperatura de auto-ignição mais alta do que o metano, o propano ou a gasolina, sua energia de ignição a $1,9 \times 10^{-8}$ Btu (0,02 mJ) é aproximadamente uma ordem de magnitude inferior e, portanto, é mais facilmente inflamável. Mesmo uma faísca invisível ou descarga de eletricidade estática de um corpo humano (em condições secas) pode ter energia suficiente para causar ignição. No entanto, é importante perceber que a energia de ignição para todos esses combustíveis é muito baixa, de modo que as condições que inflamarão um combustível geralmente inflamarão qualquer um dos outros.

O hidrogênio tem a propriedade adicional de baixa eletro condutividade, de modo que o fluxo ou agitação de hidrogênio ou líquido pode gerar cargas eletrostáticas que resultam em faíscas. Por esta razão, todo o equipamento de transporte de

hidrogênio deve ser completamente aterrado. As misturas inflamáveis de hidrogênio e ar podem ser facilmente inflamadas.

3.2.7 Velocidade de Queima

A velocidade de queima é a velocidade a que uma chama viaja através de uma mistura de gás combustível e indica a gravidade de uma explosão, uma vez que as altas velocidades de queima têm uma maior tendência para suportar a transição da deflagração para a detonação em túneis ou tubos longos. A velocidade da chama é a soma da velocidade de queima e da velocidade de deslocamento da mistura de gás não queimada.

A velocidade de queima varia com a concentração de gás e cai em ambas as extremidades da faixa de inflamabilidade. Abaixo da LFL e acima da UFL, a velocidade de gravação é zero.

A velocidade de queima do hidrogênio a 8,7 – 10,7 ft/s (2,65 – 3,25 m/s) é quase uma ordem de grandeza maior do que a do metano ou da gasolina (em condições estequiométricas). Assim, os incêndios de hidrogênio queimam rapidamente e, como resultado, tendem a ser relativamente curtos.

3.2.8 Espaço de extinção de chamas (quenching gap)

O espaço de extinção (ou distância de extinção) descreve as propriedades de extinção de chamas de um combustível quando usado em um motor de combustão interna. Refere-se à distância da parede do cilindro que a chama extingue devido a perdas de calor.

O espaço de extinção do hidrogênio (0,025 polegadas ou 0,064 cm) é aproximadamente 3 vezes menor que o de outros combustíveis, como gasolina. Assim, as chamas de hidrogênio viajam mais perto da parede do cilindro antes que elas se extinguem, tornando-as mais difíceis de extinguir do que as chamas de gasolina. Esta menor distância de extinção também pode aumentar a tendência para a contrafacção, uma vez que a chama de uma mistura hidrogênio-ar pode mais facilmente passar por uma válvula de admissão quase fechada do que a chama de uma mistura de hidrocarboneto-ar.

3.2.9 Características da chama

As chamas de hidrogênio são muito azuis e quase invisíveis à luz do dia devido à ausência de fuligem. A visibilidade é reforçada pela presença de umidade ou impurezas (como o enxofre) no ar. As chamas de hidrogênio são melhor visíveis no escuro ou sob luz moderada. Um fogo de hidrogênio pode ser indiretamente visível através de "ondulações de calor" e radiação térmica, especialmente em grandes incêndios. Em muitos casos, as chamas de um fogo de hidrogênio podem inflamar materiais circundantes que produzem fumaça e fuligem durante a combustão.

Os incêndios de hidrogênio só podem existir na região de um vazamento onde hidrogênio puro mistura com o ar em concentrações suficientes. Para vazamentos turbulentos, o ar atinge a linha central do jato de vazamento dentro de cerca de cinco diâmetros do furo de vazamento e o hidrogênio é diluído para quase a composição do ar dentro de aproximadamente 500 a 1000 diâmetros. Esta rápida diluição implica que, se o vazamento turbulento ocorre em ambiente aberto, a zona de inflamabilidade seria relativamente próxima do vazamento. Portanto, quando o jato é acionado, o comprimento da chama é inferior a 500 diâmetros do furo (por exemplo, para um vazamento de 0,039 polegadas ou 1 mm de diâmetro, o comprimento da chama será inferior a 19,7 polegadas ou 0,5 m).

Em muitos aspectos, os incêndios de hidrogênio são mais seguros do que os incêndios à gasolina. O gás hidrogênio aumenta rapidamente devido à sua alta dinamização e difusividade. Conseqüentemente, os incêndios de hidrogênio são verticais e altamente localizados. Quando um cilindro de hidrogênio do carro se rompe e é inflamado, o fogo queima para fora do carro e o interior não fica muito quente.

A gasolina forma uma piscina, se espalha lateralmente e os vapores formam uma nuvem persistente, de modo que os incêndios à gasolina são amplos e abrangem uma área ampla. Quando um tanque de gasolina do carro se rompe e é inflamado, o fogo envolve o carro em questão de segundos e faz com que a temperatura de todo o veículo aumente dramaticamente. Em alguns casos, o calor elevado pode liberar compostos inflamáveis do estofamento do veículo, levando a uma explosão secundária.

O hidrogênio queima com maior vigor do que a gasolina, mas, por um período mais curto. Piscinas de hidrogênio líquido queimam muito rapidamente a uma velocidade de 0,098 a 0,197 pés/ min (3 a 6 cm/min) em comparação com 0,0098 a

0,00656 pés/min (0,3 a 1,2 cm/min) para o metano líquido e 0,00656 a 0,0295 pés/min (0,2 a 0,9 cm/min) para piscinas de linha de gás.

O hidrogênio emite produtos de combustão não tóxicos quando queimados. Incêndios a base de gasolina geram fumaça tóxica.

3.2.10 *Fragilização por hidrogênio.*

A constante exposição de materiais, principalmente aço de alta resistência, ao hidrogênio causa um fenômeno conhecido como fragilização por hidrogênio, podendo levar a vazamentos ou falhas catastróficas em componentes metálicos e não metálicos.

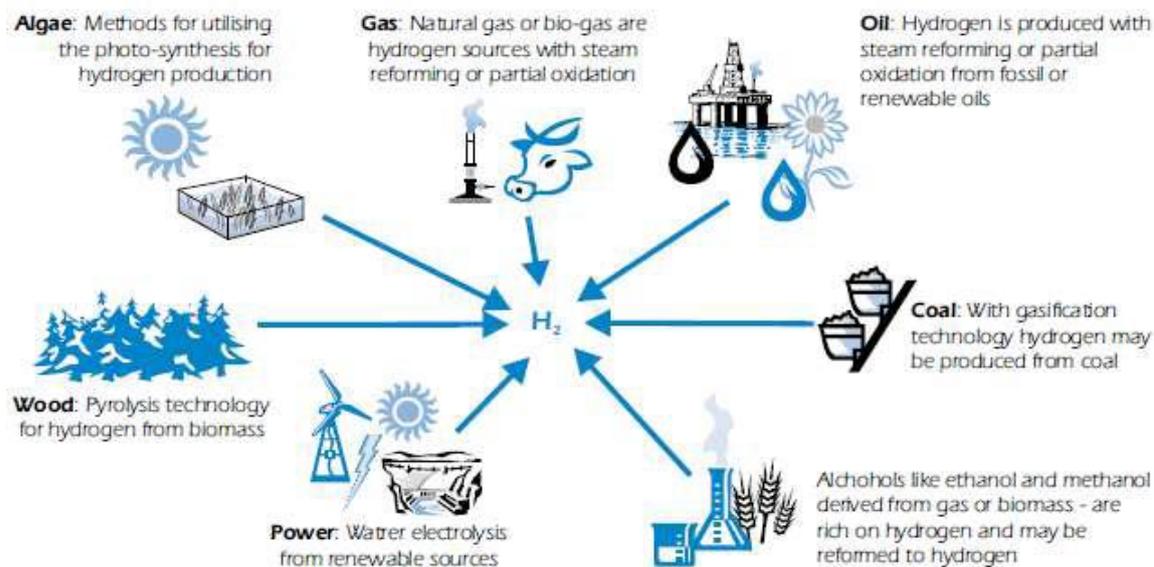
Fatores que influenciam a taxa e a gravidade da fragilização por hidrogênio são: concentração de hidrogênio, pressão de hidrogênio, temperatura, qualidade de hidrogênio, tipo de impureza, nível de estresse, taxa de estresse, composição de metal, resistência à tração em metal, tamanho de grão, microestrutura e histórico do tratamento térmico. O teor de umidade no gás hidrogênio pode levar à fragilização metálica através da aceleração da formação de fissuras de fadiga.

3.3 *Produção de Hidrogênio*

Embora o hidrogênio seja o elemento mais abundante no universo, não há gás natural de hidrogênio para ser utilizado de forma eficaz na Terra. Ele existe combinado com outros elementos, o que significa que pode ser produzido de uma variedade de elementos contendo compostos de hidrogênio. O gás hidrogênio não é um combustível primário no mesmo sentido que o gás natural, o petróleo e o carvão. Em vez disso, o hidrogênio é um portador de energia, um vetor energético, como a eletricidade. É uma forma secundária de energia, produzida usando outras fontes de energia primária, como gás natural, carvão, e outros recursos renováveis. A Figura 8 mostra algumas das matérias-primas e processos para produzir hidrogênio. Existe uma variedade de tecnologias e processos que podem ser usadas, cada uma delas está em um estágio diferente de desenvolvimento e oferece oportunidades únicas, benefícios e desafios. Fatores como disponibilidade local de matéria-prima, maturidade da tecnologia, aplicações e demanda de mercado, questões políticas e custos que influenciarão a escolha para produção de hidrogênio. A seguir vamos

demonstrar algumas formas de obtenção do hidrogênio, existem várias fontes e neste trabalho iremos demonstrar algumas delas.

Figura 8: Fontes para obtenção do hidrogênio.



Fonte: [18].

Como vimos na figura 8 podemos obter hidrogênio, de gás natural, biomassa, algas, carvão, etanol, petróleo e energia elétrica promovendo a eletrolise da água, e outras fontes, entre elas vamos citar algumas.

3.3.1 Reforma a vapor de gás natural

O gás natural é uma importante fonte de hidrogênio e existem três técnicas principais utilizadas para produzir hidrogênio a partir desses combustíveis fósseis, composto basicamente de hidrocarbonetos: reforma do gás natural, oxidação parcial (POX) e reforma auto térmica (ATR). O processo de reforma de gás natural tem a maior experiência industrial, embora seja o de maior emissões de poluentes atmosféricos. Consiste em produzir uma corrente de gás composta principalmente de hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. A reforma endotérmica de vapor de hidrocarbonetos requer uma fonte de calor externo, em comparação com POX e ATR tem uma temperatura operacional mais baixa. A reforma a vapor não requer oxigênio e produz o gás reformado com uma alta relação H_2 / CO (3: 1). A oxidação parcial converte hidrocarbonetos em hidrogênio fornecendo calor por uma combustão controlada. O processo ocorre em altas temperaturas com a formação de uma baixa relação H_2 / CO (1: 1 a 2: 1). POX tem sido proposto para uso na produção de hidrogênio para células de combustível de automóveis e outras aplicações. A

reforma auto térmica tem uma experiência comercial limitada. Utiliza a oxidação parcial para fornecer o calor e reforma de vapor para aumentar a produção de hidrogênio, resultando em um processo termicamente neutro. O ATR é tipicamente conduzido a uma pressão mais baixa do que a reforma do POX. Como o POX é exotérmico e ATR incorpora o POX, estes processos não precisam de uma fonte de calor externa para o reator. Contudo, eles exigem uma unidade de separação de oxigênio cara e complexa [18].

3.3.2 Gaseificação de Carvão

A produção de hidrogênio a partir do carvão é realizada por dois métodos: o processo “Syngas” [1] e Processo de aceitação de CO₂. No processo “Syngas” o carvão reage com o vapor a 31 bar e 800-900°C, os produtos gasosos são CO, CO₂ e H₂. O gás CO₂ é removido do gás final por lavagem com monoetanolamina ou hidróxido de potássio. O gás final possui entre 97-98% de pureza.

O processo alternativo, chamado de processo aceitador de CO₂, envolve a cal, que é introduzida com carvão quando reage com o vapor. O gás de CO₂ produzido é removido pela cal como carbonato de cálcio. Com o CO₂ removido, a reação de mudança ocorre no reator principal, e isso elimina a necessidade de um reator de mudança externa e a lavagem para remover CO₂.

O dióxido de carbono é um grande problema em toda a produção de hidrogênio a partir de combustíveis fósseis. A quantidade de CO₂ gerada varia com respeito ao conteúdo de hidrogênio da matéria-prima. Para obter uma produção sustentável (emissão zero) produção de hidrogênio, o CO₂ deve ser capturado e armazenado. Este processo é conhecido como descarbonização.

Há vários desafios no uso de fontes fósseis para produzir hidrogênio a baixo custo e com pouca emissão de gases de efeito estufa. Estudos adicionais de pesquisa e desenvolvimento são necessários para:

- Desenvolver tecnologias de captura, utilização e armazenamento de carbono que garantam o mínimo de dióxido de carbono seja liberado no processo de produção do hidrogênio.
- Desenvolver novas tecnologias que possam substituir o processo criogênico usado atualmente para separar oxigênio necessário do ar.

3.3.3 Eletrólise da água.

A eletrólise é, de modo geral, um procedimento químico promovido pela aplicação de uma corrente elétrica em dois eletrodos submersos em uma solução eletrolítica. Passou a ser utilizada a partir da verificação de que substâncias iônicas têm a capacidade de carregar corrente elétrica em soluções aquosas. É um processo baseado na descarga de íons, em que há perda de carga por parte de cátions e ânions. Alguns experimentos foram feitos pelo físico-químico Michael Faraday (1791-1867), o qual concluiu que quando uma corrente elétrica (eletrólise) percorre uma solução de um determinado metal, os íons desse metal se sedimentam no fundo do reservatório. Outra conclusão obtida foi que a massa de um elemento transformado ou formado por eletrólise é diretamente proporcional à quantidade de carga elétrica do sistema. Desse modo, quanto maior a intensidade da corrente elétrica liberada na eletrólise, maior será a quantidade de massa do produto. A eletrólise da água ocorre quando a corrente elétrica passa por solução aquosa, ou seja, em solução constituída por um sal, um ácido ou uma base, diluído em água, os quais se ionizam ou sofrem dissociação iônica, formando íons livres. Os íons presentes na água podem interferir no processo da eletrólise, pois eles podem se sedimentar nos eletrodos, caso a sua propensão for maior do que a dos íons da substância dissolvida. Por outro lado, em sua forma pura (destilada), a água é má condutora de eletricidade, não sendo possível efetuar sua decomposição eletrolítica, o que ocorre porque a auto ionização da água é insuficiente para que haja condução de corrente elétrica [24]. Por esta razão, para promover uma eletrólise do cátion e do ânion da água, é necessário que algum soluto com íons mais reativos que os da água seja dissolvido na solução.

A eletrólise pode ser de dois tipos: (1) eletrólise ígnea e (2) eletrólise aquosa. O primeiro tipo está relacionado com a passagem de corrente elétrica em substância iônica liquefeita, ou seja, fundida, ocorrendo em temperaturas elevadas, em torno de 800°C, de acordo com a substância. Por isso recebe o nome de “ígnea”, que no latim, *ígneus*, significa inflamado, ardente. O segundo tipo ocorre por reação química, causada pela passagem de corrente elétrica via solução de um eletrólito dissolvido em água, a baixas temperaturas, entre 45 a 100°C [18].

3.3.4 Solução Eletrolítica

O eletrólito é todo elemento que compreenda íons livres e que tornem a substância eletricamente condutiva. A solução iônica é o eletrólito mais comum, embora existam também eletrólitos fundidos e eletrólitos sólidos. Geralmente, os eletrólitos se encontram como soluções de ácidos, bases ou sais. Adicionalmente, em situações de alta temperatura ou de baixa pressão, alguns gases podem atuar como eletrólitos. Quando um sal é inserido em um solvente, como a água por exemplo, comumente são formadas soluções de eletrólitos, pois os componentes individuais se dissociam por meio de interações termodinâmicas entre as moléculas de solvente e soluto. Este processo é conhecido como solvatação. Uma solução de eletrólitos é dita concentrada quando existe alta concentração de íons, ou diluída quando existe uma baixa concentração. Caso grande parte do soluto se dissolver, formando íons livres, o eletrólito é forte, mas se a maioria não se dissolver, o eletrólito é fraco [18].

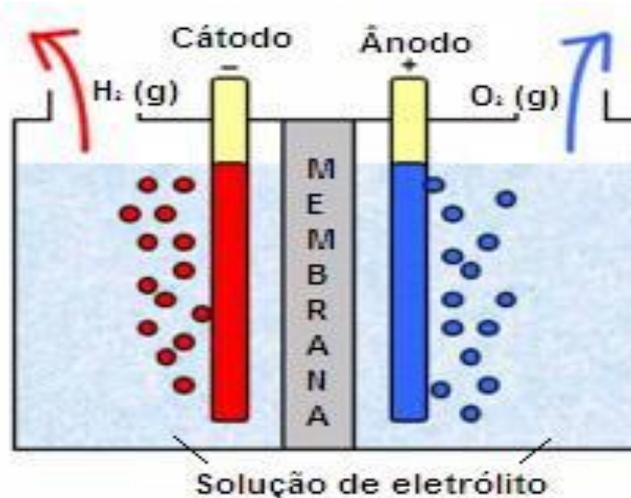
3.3.5 Produção de Hidrogênio por Eletrólise

Para a produção de hidrogênio por eletrólise, deve-se dissolver um composto iônico em água, fazendo com que seus íons estejam dispersos e livres no líquido. Depois, aplica-se uma descarga elétrica entre um par de eletrodos inertes, submersos no líquido. O cátodo é o eletrodo de carga negativa e o ânodo é o eletrodo de carga positiva. Eletrodos de carga positiva atraem íons de carga negativa, e eletrodos de carga negativa atraem íons de carga positiva. Dessa forma, os cátions se deslocam no sentido do cátodo e os ânions se deslocam em direção ao ânodo [22].

A fim de segregar íons e conduzi-los para seus respectivos eletrodos, é necessária a presença de uma fonte externa de energia elétrica. No caso da formação de hidrogênio, os cátions formados H^+ e K^+ serão atraídos pelo cátodo, e os ânions OH^- da água e da base serão atraídos pelo ânodo. Como resultado, obtém-se o gás hidrogênio (H_2) e o gás oxigênio (O_2), que podem ser visualizados por meio das bolhas ao redor dos respectivos eletrodos. Enquanto isso, os demais íons K^+ e OH^- se juntarão, formando moléculas de Hidróxido de Potássio KOH [22]. Existe uma forma bastante eficiente para separar os gases hidrogênio e oxigênio formado na reação. Instalando uma membrana separadora de prótons entre os eletrodos positivo e negativo, é possível obter hidrogênio com elevado grau de pureza junto ao eletrodo

negativo e o no eletrodo positivo obtêm oxigênio. A figura 5 demonstra o processo de eletrolise com membrana separadora de próton.

Figura 9: Eletrolisador com membrana separadora de Próton



Fonte [29].

Reações do Hidrogênio:

CÁTODO ÂNODO

Migração de íons K^+ e H^+ OH^+ da água e OH^- da base

Facilidade de descarga $H^+ > K^+ OH^-$

Semi-reação $4H_2O(L) + 4e^- = 2H_2(g) + 4OH^-(aq) = 2H_2O(L) + O_2(g) + 4e^-$

Permanece na solução $K^+ OH^-$

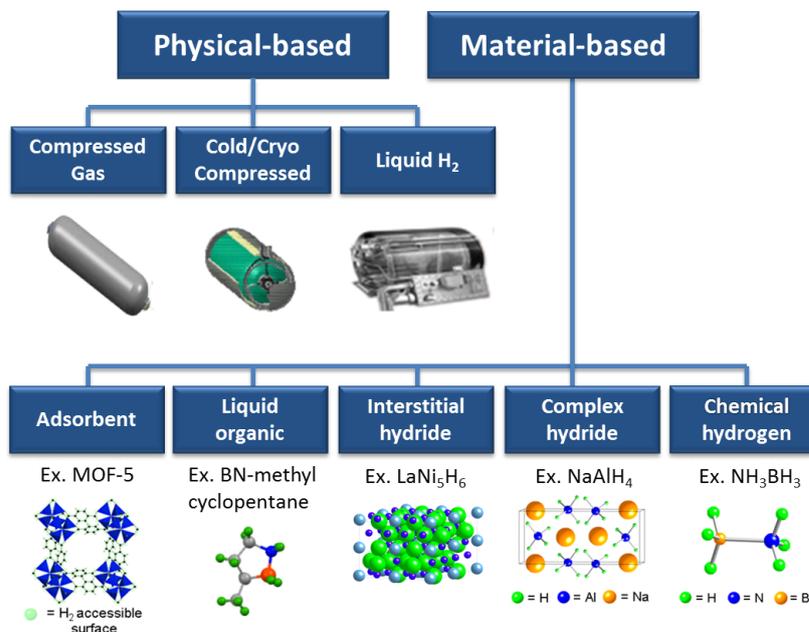
3.4 Formas de Armazenamento do Hidrogênio

De modo geral, o hidrogênio pode ser transportado como um gás pressurizado ou um líquido criogênico ou sólido congelado criogenicamente; podendo ser também combinado numa matriz de liga metálica sólida absorvente da molécula de hidrogênio ou estar adsorvido sobre ou em um substrato ou, ainda, ser transportado por um precursor químico tal como lítio, metal de sódio ou hidretos químicos.

O armazenamento de hidrogênio como gás normalmente requer tanques de alta pressão (pressão de tanque de 350 – 700 bar ou 5000 – 10000 psi); como líquido requer temperaturas criogênicas porque o ponto de ebulição do hidrogênio a pressão de 1 atm é de $-252,8^\circ C$; também pode ser armazenado nas superfícies de sólidos (por adsorção) ou dentro de sólidos (por absorção).

A figura 10 mostra um esquema da organização das modalidades de armazenamento do hidrogênio:

Figura 10 – Modalidades de armazenamento do hidrogênio



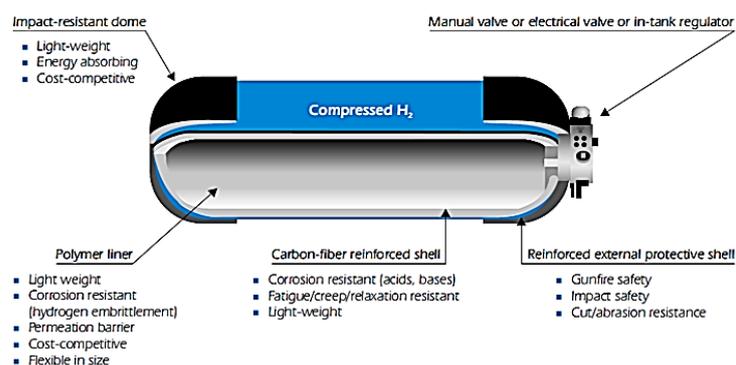
Fonte: [3]

3.4.1 Armazenamento do Hidrogênio no Estado Gasoso

Esta é atualmente uma das tecnologias de armazenamento mais simples, mais comuns e eficientes em uso [2]. O hidrogênio de alta pressão é armazenado em tanques de paredes grossas feito de materiais de alta resistência para garantir a durabilidade.

O mais avançado sistema de armazenamento leve para o caso de gás comprimido consiste num vaso que é um tanque composto com um forro metálico sem carga (Tipo III) ou plástico (Tipo IV) envolto com filamento impregnado com resina (figura 11).

Figura 11 – Esquema de um Tanque de Armazenamento de Gás Comprimido e seus Componentes

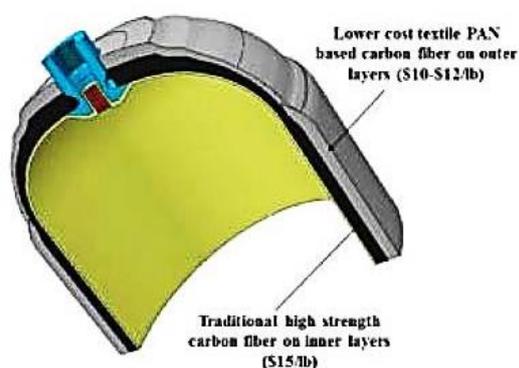


Fonte: [2]

Esses vasos de pressão são os que atraem o maior interesse da comunidade científica. Sua estrutura é baseada em dois componentes fundamentais: o forro, essencialmente uma barreira para permeação de hidrogênio e a estrutura compósita que garante a integridade mecânica do tanque.

As pesquisas estão direcionadas para o desenvolvimento de novas metodologias e materiais com foco em tanques de hidrogênio gasoso de alta pressão da classe Tipo III, geralmente utilizados até 700 bar, de forma cilíndrica feitas de fibra de carbono de baixo custo, com revestimento de metal interno ou de alumínio [12] [13] (figura 12).

Figura 12 – Vasos de Pressão de Baixo Custo para o Armazenamento de Hidrogênio Utilizando Fibra de Carbono de Baixo Custo



Fonte: [14]

3.4.2 Armazenamento do Hidrogênio no Estado Líquido

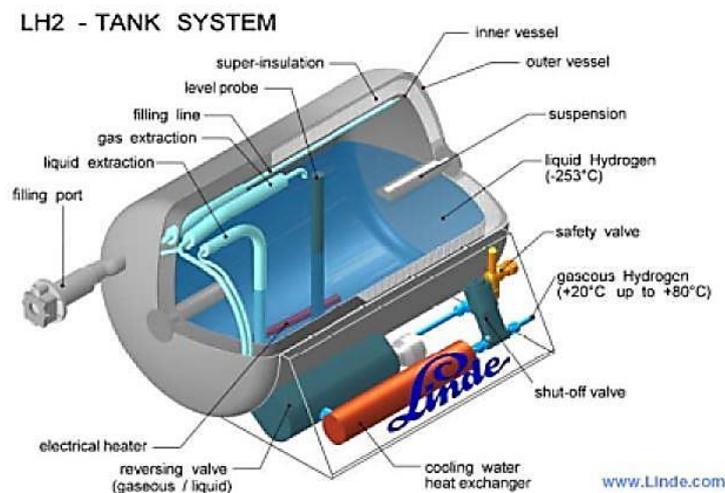
O hidrogênio em forma líquida tem uma densidade de energia consideravelmente maior do que em sua forma gasosa, tornando-se um meio de armazenamento atraente. Em termos de aplicação, hidrogênio líquido e sua tecnologia já foram usadas na corrida espacial (Space Shuttle, Ariane), e também em aeronaves militares.

Esta tecnologia de armazenamento de hidrogênio é bastante eficaz, mas, apresenta desvantagens, principalmente quanto a energia necessária para liquefazer o gás e o controle rigoroso necessário quanto à estabilidade da temperatura do recipiente para evitar qualquer risco de sobre pressão.

Os vasos criogênicos utilizados para armazenar hidrogênio líquido (ou vasos criostáticos) são recipientes metálicos de parede dupla com isolamento intercalado entre as paredes. Para minimizar, se não eliminar perdas térmicas, efeitos de radiação

térmica, convecção e condução devem ser levados em consideração no projeto desses vasos (figura 13).

Figura 13 – Representação Esquemática de um Vaso Criogênico



Fonte: [15]

3.4.3 Armazenamento do Hidrogênio em Hidretos Metálicos

Um hidreto metálico é definido como um composto monofásico entre um hospedeiro metálico e o hidrogênio.

Os hidretos metálicos são baseados em ligas metálicas e agem como uma esponjas absorvente de hidrogênio gasoso. Através de uma reação química, compostos metálicos sólidos de hidrogênio são formados, sob pressão, e calor é liberado. Por outro lado, o hidrogênio é liberado quando o calor é aplicado aos materiais, por exemplo, pelo aquecimento do tanque e pela redução da pressão. A molécula de hidrogênio é primeiramente absorvida na superfície e depois dissociada como átomos de hidrogênio individuais fortemente ligados. Os metais são ligados para otimizar o peso do sistema e a temperatura a que o hidrogênio pode ser recuperado. Quando o hidrogênio precisa ser usado, é liberado do hidreto sob certas condições de temperatura e pressão. Este processo pode ser repetido muitas vezes sem perda de capacidade de armazenamento.

3.4.4 Armazenamento do Hidrogênio em Sistemas Porosos

Os sistemas porosos, comparados aos meios gasosos e líquidos, oferecem a vantagem do armazenamento de hidrogênio a baixa pressão, maior segurança, flexibilidade de projeto e eficiência de armazenamento volumétrico razoável.

3.4.5 Outras Formas de Armazenamento do Hidrogênio

Materiais de armazenamento de hidrogênio[16], incluindo novos hidretos metálicos, nanotubos de carbono, estruturas metálicas orgânicas e sistemas orgânicos baseados em ciclos reversíveis de hidrogenação-desidrogenação são alvos de pesquisas quando se torna necessário verificar a capacidade de armazenamento de hidrogênio e temperatura necessária para seu armazenamento e liberação.

Além disso, outras formas de armazenamento também encontram-se em pesquisa, tais como:

- I- Microesferas de vidro: são pequenas esferas de vidro oco que podem ser usadas para armazenamento seguro de hidrogênio. As esferas de vidro quando são aquecidas tem a permeabilidade das paredes aumentada. Em seguida, são preenchidas por imersão em gás hidrogênio a alta pressão. Depois, as esferas são arrefecidas até a temperatura ambiente e o hidrogênio fica preso dentro das bolas de vidro. O aumento subsequente da temperatura libera o hidrogênio dessas esferas.
- II- Suspensões de hidreto: são uma mistura bombeável de partículas finas de hidreto metálico sólido e um líquido (geralmente um óleo mineral). O hidrogênio armazenado como um hidreto metálico em suspensão com um veículo orgânico (hidretos de cálcio e lítio) pode ser de alta pureza. Pode ser liberado do complexo de metal através de reações químicas enquanto o transportador orgânico é recuperado e reciclado.
- III- Nanotubos de nitreto de boro: são aproximadamente equivalentes aos nanotubos de carbono em termos de vantagens, mas, são baseados em nitreto de boro em vez de carbono. Atualmente, estão sendo investigados para verificar sua alta capacidade de armazenamento de hidrogênio e entender melhor os mecanismos de adsorção/dessorção relacionados.
- IV- Materiais amorfos em massa (BAMs): são novos materiais metálicos promissores com base em sistemas de liga de componentes múltiplos, e. BAM baseados em Ti-Al-Fe (máximo 6wt. %). Eles são vagamente embalados com

defeitos porosos (orifícios intersticiais para armazenamento de hidrogênio) de tamanho e distribuição controlados, em fase líquida super-arrefecida. Eles parecem ter cinética de sorção rápida, resistência à fragilização e desintegração e também podem ter a possibilidade de produção em massa de baixo custo.

- V- Carbono amorfo hidrogenado: são compostos de esponjas estiradas de "gaiolas"/nanotubos capazes de armazenar 6-7wt. % de hidrogênio, são bastante estáveis a 300°C com um potencial de alto teor de hidrogênio e suposto potencial de liberação rápida de hidrogênio entre 200-300°C. A reversibilidade e a compreensão de sua cinética de sorção e sua respectiva estrutura ainda são questões abertas.
- VI- Meios de armazenamento químico (metanol, amônia, etc.): o hidrogênio é frequentemente encontrado em compostos químicos estáveis e pode então ser liberado por uma reação cuja natureza exata depende do tipo de composto de armazenamento. Neste caso, o hidrogênio é produzido sob demanda por várias técnicas, como *cracking* de amônia, oxidação parcial, *cracking* de metanol e não há necessidade de armazenamento.
- VII- Híbridos: a comunidade de pesquisa de hidrogênio também está considerando a opção de combinar soluções de armazenamento para criar sistemas que são conhecidos como "híbridos" (por exemplo: hidretos / sistemas híbridos porosos / hidretos de alta pressão). O objetivo é explorar plenamente as principais vantagens oferecidas por algumas dessas opções de armazenamento, ao mesmo tempo aliviar uma série de problemas e inconvenientes associados a elas.

3.5 Distribuição do Hidrogênio

Qualquer análise da distribuição, transporte e armazenamento de hidrogênio deve também abranger o estudo da produção centralizada em locais distantes dos pontos de usuários (estes podem incluir grandes instalações da estação central ou plantas de médio porte para mercados regionais) e da produção distribuída que exige, após a produção, armazenamento na instalação no local de consumo. No Brasil ainda não existe uma infraestrutura adequada para a distribuição do hidrogênio.

3.6 Combustão

As reações de combustão são aquelas que ocorrem na presença de um combustível, que é qualquer material inflamável, e de um comburente, que é um material gasoso contendo gás oxigênio, O_2 , geralmente o ar. É preciso também que haja uma fonte de ignição para dar início à reação, que pode ser uma chama ou uma faísca. Uma grande variedade de compostos pode sofrer combustão, os mais usuais são os hidrocarbonetos, isto é, compostos orgânicos que contêm somente átomos de carbono e hidrogênio.

Quando os combustíveis são hidrocarbonetos, há duas possibilidades de combustões, completas ou incompletas, ambas são exotérmicas, ou seja, liberam calor para o meio ambiente. O calor é usado para gerar energia e, por isso, é o principal “produto” desejado nas combustões. Além disso, toda combustão também é uma reação de oxirredução, pois, o comburente, O_2 , sempre será o agente oxidante, sofrendo redução (seu Nox diminui) e o combustível é o agente redutor, sofre oxidação e seu Nox aumenta.

Reações nas combustões completas e incompletas:

- Combustões completas: Os produtos formados sempre são dióxido de carbono (gás carbônico), CO_2 , e água, H_2O . Há a ruptura da cadeia carbônica e a oxidação de todos os átomos de carbono presentes nas moléculas.

Os derivados do petróleo, como a gasolina, são consumidos na maioria das vezes por meio de combustão para produzir energia. Visto que esse tipo de reação libera grande quantidade de CO_2 , a concentração desse gás tem aumentado cada vez mais na atmosfera, agravando o problema do efeito estufa e do aquecimento global.

- Combustões incompletas: Elas ocorrem quando não há oxigênio suficiente ou quando há um grande número de átomos de carbono no combustível, consumindo grande quantidade de oxigênio com muita rapidez.

Existem duas possibilidades de produtos para serem formados, dependendo da quantidade de oxigênio disponível: monóxido de carbono (CO), gás carbônico (CO_2), e água (H_2O) ou carbono fuligem (C) e água (H_2O).

As reações incompletas geralmente são indesejadas, pois o CO é altamente tóxico e pode causar a morte de pessoas em garagens mal ventiladas. É por isso que o motor do carro deve estar sempre bem regulado para não produzir reações

incompletas. Elas geram também material particulado que é a fuligem ou aquela fumaça preta que está presente na atmosfera das grandes cidades. No entanto, industrialmente, a fuligem na forma de negro-de-fumo, um carvão finamente dividido, é desejado, pois, ele é usado na fabricação da borracha de pneus e na produção de tintas, graxas de sapato, entre outros produtos.

3.7 Motores de Combustão Interna

Os motores de combustão interna (MCI) são máquinas que possuem peças fixas e móveis, sincronizadas entre si, que transformam a energia química do combustível em energia calorífica produzindo trabalho, isto é energia mecânica. O primeiro motor, criado por J.J.E Lenoir, surgiu por volta de 1860 e apresentava potência em torno de 4,5 kW e uma eficiência mecânica de apenas de 5% [20].

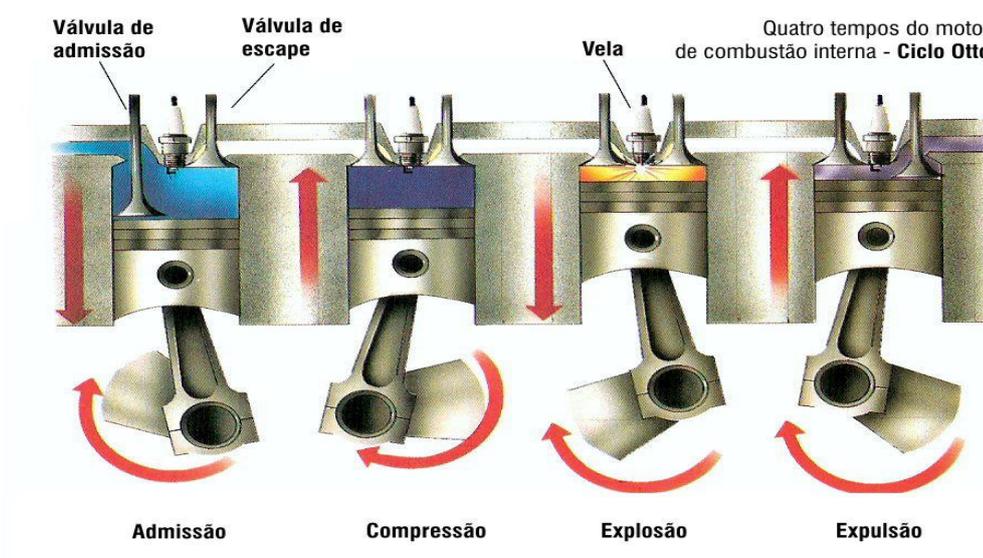
O esforço para alcançar MCIs mais eficientes nos dias atuais não é apenas uma imposição do ponto de vista econômico e tecnológico, é também do ponto de vista sustentável para atender à preocupação ambiental. Por isso, os índices de emissões veiculares são regulamentados em muitos países, determinando-se que fabricantes de veículos cumpram os limites normatizados de emissões, a fim de conseguirem licença para comercialização veicular [18].

Pode-se citar algumas tecnologias atualmente utilizadas no aumento do desempenho e eficiência de motores, tais como sistemas de otimização do rendimento por meio da variação no sincronismo de válvulas de admissão e escapamento, sistemas de admissão com sobrealimentação e com geometria variável, associados a sistemas eletrônicos de gerenciamento e controle. Estas tecnologias potencializam a combustão em vários processos do motor [18].

Existem vários tipos de motor de combustão interna, por exemplo ciclo diesel, atkinson, wenkel, entre outros, que não vamos entrar em detalhes, pois, vamos trabalhar com um motor de ciclo Otto. Em um motor existem alguns sistemas complementares e importantes para seu bom funcionamento, são eles: sistema de arrefecimento, sistema de alimentação, sistema de lubrificação, sistema elétrico e outros dos quais necessitam de um trabalho a parte para o seu devido entendimento.

A Figura 14 ilustra uma vista parcial de um motor de ciclo otto e 4 tempos.

Figura 14 – Motor Ciclo Otto 4 tempos



Fonte: Abekwar

Disponível em: <https://abekwar.files.wordpress.com/2013/04/motor-1.jpg>.

Acessado em: 05/09/2019

3.7.1 Princípio de funcionamento.

De uma forma geral, o motor de ciclo Otto opera essencialmente com três parâmetros básicos para gerar torque de combustão, sendo eles: a massa de ar, a massa de combustível e a centelha elétrica da vela de ignição no momento correto, conforme o ciclo de operação do motor. Os motores operam em quatro ciclos em diferentes etapas que ocorrem pelo deslocamento repetitivo do pistão. Tais máquinas são classificadas como motores de quatro tempos, sendo eles: admissão, compressão, combustão e exaustão, como ilustra a figura 14.

Um ciclo completo de um motor de combustão interna do tipo Otto corresponde a uma revolução de 720° da árvore de manivelas. Conforme a Figura 14, para um único cilindro do sistema, o ciclo Otto começa pela etapa de admissão. Nessa etapa, a válvula de exaustão retorna a sua posição inicial através da força de retorno da mola e permanece fechada e a válvula de admissão é deslocada de seu alojamento inicial pelo comando de válvulas, permitindo que a mistura carburante seja aspirada para dentro do cilindro, através do deslocamento do êmbolo desde o Ponto Morto Superior (PMS) até o Ponto Morto Inferior (PMI) do cilindro. Na etapa de compressão, a válvula de admissão retorna à sua posição inicial, através da força de retorno da mola da válvula, vedando totalmente a câmara de combustão. Com ambas as válvulas

fechadas, e o deslocamento do êmbolo desde o PMI até o PMS comprime a mistura carburante com objetivo de aumentar significativamente a pressão dentro do cilindro. Este ciclo aumenta a economia, a eficiência e o rendimento da próxima etapa.

Na combustão, a vela de ignição lança uma centelha elétrica que reage com a mistura carburante já previamente comprimida. Nesse instante, ocorre um aumento abrupto da pressão dentro da câmara de combustão, impulsionando o êmbolo do PMS para o PMI. Finalmente, a última etapa do ciclo é denominada exaustão. Nessa etapa, a válvula de exaustão é deslocada de seu alojamento inicial pelo comando de válvulas permitindo que os gases, que são o produto da combustão, sejam expelidos da câmara de combustão pelo êmbolo que se desloca do PMI para o PMS.

Na maioria dos motores ciclo Otto, a mistura carburante é formada no coletor de admissão entre as válvulas borboleta e a de admissão. Já em motores mais modernos, esta mistura é formada dentro da própria câmara de combustão. O ciclo termodinâmico teórico que descreve o processo deste motor passou a ser denominado de ciclo de Otto (Figuras 15 e 16), que é constituído basicamente de quatro processos:

- AB - Processo de Compressão Adiabática;
- BC - Processo de Aquecimento Isovolumétrico;
- CD - Processo de Expansão Adiabática;
- DA - Processo de Rejeição Isovolumétrico de Calor.

Figura 15: Diagrama PV do Ciclo Otto

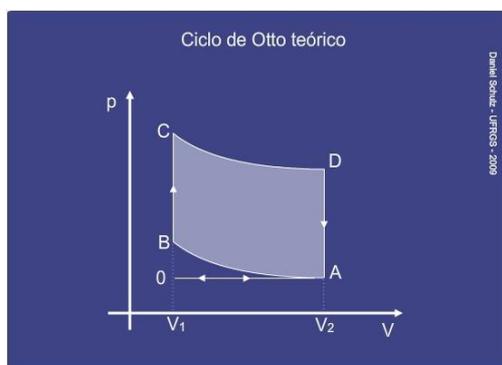
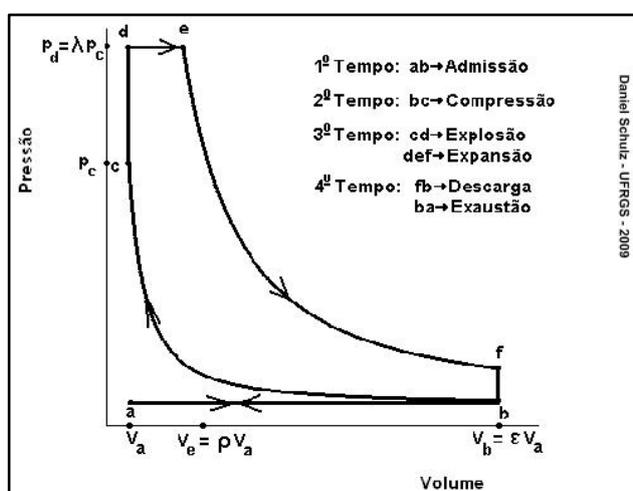


Figura 16 – Ciclo de Otto real



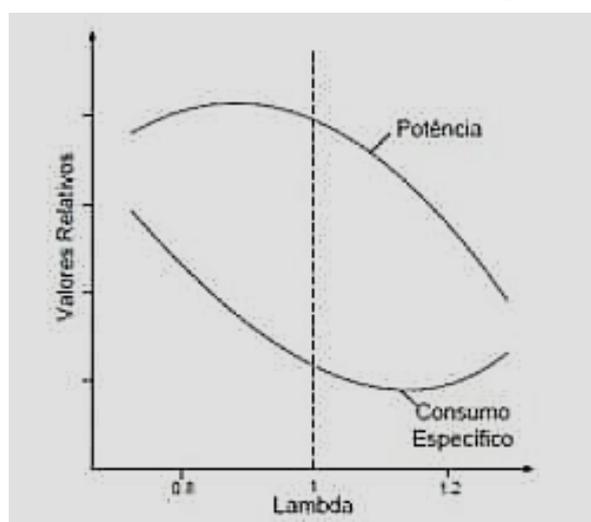
3.7.2 Relação Estequiométrica

A relação entre o ar atmosférico e o combustível admitido para dentro da câmara de combustão denomina-se mistura carburante. Esta mistura deve ser a mais homogênea possível. A presença de outros elementos no ar atmosférico além do oxigênio, principalmente nitrogênio, dificulta a reação química da gasolina na combustão. A relação ar/combustível admitida pelo motor não é constante e depende de diversos fatores. Quando a mistura carburante admitida resulta em uma combustão perfeita, ou seja, todo o hidrogênio e carbono presente no combustível são convertidos em dióxido de carbono e água, esta mistura passa a ser denominada uma mistura estequiométrica. A relação entre a mistura carburante empregada e mistura carburante estequiométrica é definida pelo coeficiente de ar *lambda* (λ), conforme a equação abaixo.

$$\lambda = \frac{\text{mistura real}}{\text{mistura estequimétrica}}$$

Desta forma, quando o coeficiente *lambda* (λ) for menor que 1.0 a mistura carburante está rica ou com deficiência de ar, quando λ for igual a 1.0 a mistura carburante está estequiométrica, quando λ for maior que 1.0 a mistura carburante está pobre ou com excesso de ar. O *lambda* é muito importante para o funcionamento do motor, pois afeta diretamente o consumo de combustível, a emissão de poluentes e o desempenho do motor, conforme ilustrado na Figura 17, que considera o avanço de ignição, a rotação e a posição da válvula borboleta constantes.

Figura 17 - Potência, consumo específico em função de Lambda.



Fonte [22]

A Figura 17 demonstra que a potência máxima do motor é alcançada com λ aproximadamente igual a 0,85 e que o consumo específico de combustível, assim como as emissões de poluentes, possui um melhor rendimento com λ aproximadamente igual a 1. A condição estequiométrica se situa na região intermediária, proporcionando um bom desempenho com baixo consumo. Uma mistura carburante estequiométrica, só ocorreria em uma situação hipotética, ou seja, em um motor “ideal”. Em um motor real, diversos fatores ocasionam uma queima incompleta, como, por exemplo, a presença de impurezas no combustível, a presença de outros elementos além do oxigênio e o tempo reduzido para a reação entre o combustível e o oxigênio do ar.

3.7.3 Taxa de Compressão

A taxa de compressão TC é obtida pela relação entre a cilindrada parcial (que é o volume admitido por um cilindro a cada ciclo) e o volume da câmara de combustão (que é o espaço onde ocorre a combustão da mistura ar/combustível no motor), de acordo com a seguinte equação:

Equação da taxa de compressão.

$$TC = \frac{V + v}{v}$$

Onde:

- TC Taxa de compressão
- V Volume unitários do cilindro
- v Volume da câmara de combustão.

Cada combustível possui um valor da taxa de compressão diferente como mostrado na tabela 7 abaixo.

Tabela 7: Valores de taxa de compressão

Combustível	Taxa de Compressão
Gasolina	9:1
Etanol	12:1
Diesel	17:1
GNV	16:1
Hidrogênio	15:1

Fonte: [24]

3.7.4 Cilindrada

Compreende o volume total deslocado pelo pistão em seu curso entre o ponto morto inferior (PMI) e o ponto morto superior (PMS), multiplicado pelo número de cilindros do motor. E indicada em centímetros cúbicos (cm³) ou litros e tem a seguinte fórmula.

Equação da cilindrada.

$$C = \pi * r^2 * c * n$$

Onde:

- r raio do cilindro em centímetros.
- c curso do pistão em centímetros.
- n número de cilindros.

3.7.5 Eficiência do Motor

A capacidade do motor é representada pela potência, geralmente em HP ou CV, a qual determina a quantidade de trabalho realizada por unidade de tempo. Já o rendimento é representado pela relação entre a potência produzida e a potência calorífica fornecida pelo combustível utilizado. Isto quer dizer que o rendimento de forma simplificada é a eficiência de transformação de calor em trabalho [24].

3.7.6 Torque

O torque é definido como uma força de rotação, que pode ou não resultar em movimento. Um exemplo prático é quando usamos uma chave para apertar ou soltar os parafusos. Este movimento realizado sobre o parafuso é o torque. O torque é uma grandeza vetorial bastante utilizada no dimensionamento de diversos equipamentos, como, por exemplo, os motores de combustão interna. Os motores de combustão interna possuem a capacidade de converter a energia do combustível em rotação do eixo virabrequim, a uma determinada velocidade de rotação e um determinado torque, de acordo com sua potência. Torque e potência não são a mesma coisa, mas são grandezas complementares. A potência gerada por um motor é diretamente proporcional ao torque que ele gera a uma determinada velocidade de rotação. Ou seja, para uma mesma velocidade de rotação, quanto maior for a potência, maior será o torque fornecido.

Equação do torque.

$$T = F * D$$

Onde:

T é torque expressa em newton/metros.

F é força expressa em newton.

D é distância expressa em metros.

3.7.7 Potência

A potência é a quantidade de trabalho (ou energia de uma força) efetuado por unidade de tempo, o que equivale à velocidade de mudança de energia num sistema ou ao tempo desprendido para realizar um trabalho. Portanto, a potência é igual à energia total utilizada dividida pelo tempo.

Por outro lado, a potência mecânica é o trabalho que realiza um motor ou uma máquina num determinado período de tempo. Em outras palavras, trata-se da potência transmitida através da ação de forças físicas de contato ou elementos mecânicos, nomeadamente alavancas e engrenagens. Além da potência mecânica temos também a potência elétrica, a potência do som das quais não iremos tratar neste trabalho. No que diz respeito às unidades de potência, reconhecem-se quatro grandes sistemas, mas em motores de combustão utiliza-se o watt e os seus múltiplos (quilowatt, megawatt, etc.) do sistema internacional.

Equação da potência

$$P = \frac{F * d}{t}$$

Onde:

P é potência expressa em watts.

F é força expressa em newton.

d é distância expressa em metros.

t é tempo expresso em segundos.

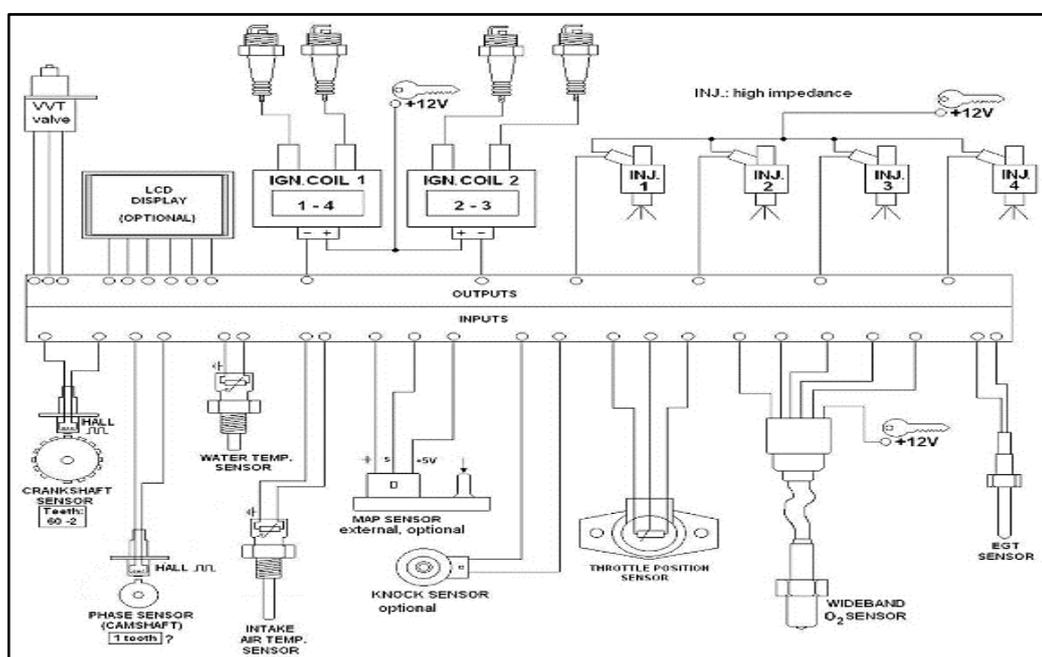
3.8 Sistema de Injeção Eletrônica

Nos dias atuais, é impossível pensar em motores de combustão interna sem um sistema de injeção eletrônica. A injeção eletrônica na verdade é um sistema complexo e composto por diversos sensores, atuadores e softwares que monitoram e atuam no funcionamento de um motor de combustão interna, seja ele movido a gasolina, gás natural, etanol ou diesel.

O sistema de injeção eletrônica surgiu no início do século XX e foi massificado em meados dos anos 1980. Esse novo sistema de injeção implantado pela indústria automobilística e consolidado nos dias de hoje trouxe inúmeras melhorias aos automóveis, tornando-os mais econômicos, mais eficientes, menos poluentes, entre outros benefícios, sendo que a redução de poluentes foi um dos principais motivos para o desenvolvimento dos sistemas de injeção eletrônica, para atender as legislações ambientais vigentes no mundo.

O gerenciamento eletrônico trouxe uma maior precisão no controle do tempo de injeção, controlando, assim, a quantidade de combustível injetado e o tempo de ignição, buscando a melhor queima do combustível. Para que o sistema funcione corretamente, ele depende das informações fornecidas por diversos sensores instalados no motor que farão atuadores funcionarem. A figura 18 mostra o esquema de ligação entre ambos.

Figura 18 – Esquema de ligação entre sensores e atuadores.



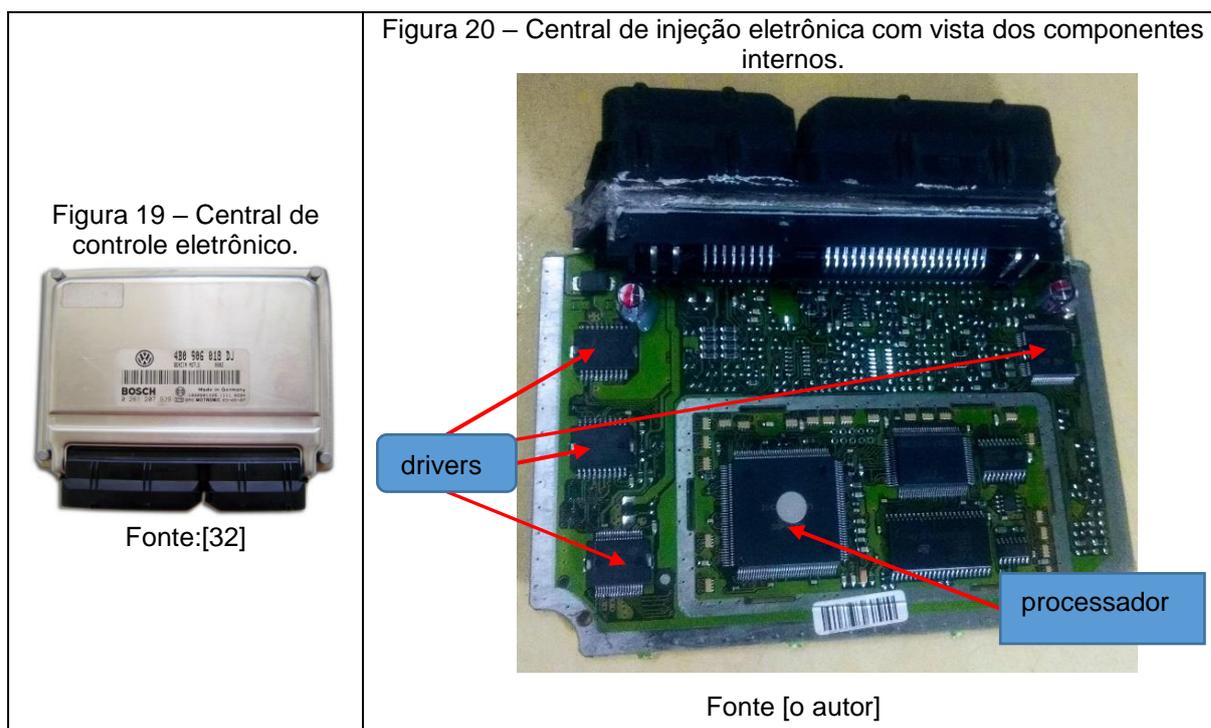
Fonte: [30]

Os principais sensores que compõe o sistema de injeção eletrônica são: sensor de rotação, sensor de temperatura do ar e do liquido de arrefecimento, sensor de pressão absoluta (MAP), sensor de posição da borboleta de aceleração, sensor do pedal do acelerador, sensor lambda, sensor de fluxo de ar, sensor de detonação, entre outros.

Os principais atuadores são: eletro-injetor, bonina de ignição, válvula borboleta, eletroválvulas dos variadores de avanço, comando de válvulas, válvula EGR, válvula de purga do *canister*, etc.

3.8.1 Central de injeção eletrônica (ECU)

O sistema de injeção possui um componente principal denominado por central de injeção eletrônica (ECU), é uma caixa normalmente metálica, onde está acondicionado diversos componentes eletrônicos utilizados pelo sistema, entre eles, resistores, diodos, capacitores, microprocessador, memórias, transistores, reguladores de tensão, drivers para atuadores, entre outros com as mais diversas funções dentro do projeto de injeção. A sua carcaça possui também a função de dissipar o calor produzidos por seus componentes internos, e proteger os mesmos de vibrações, umidade, impactos, poeira e outros.



Na figura 20 podemos ver em detalhes os componentes eletrônicos que compõe um central de injeção eletrônica, os vários drives e o processador principal.

3.8.2 Sensores.

Os sensores são componentes desenvolvidos para informar a central de injeção as grandezas físicas que estão envolvidas no funcionamento de um motor, por exemplo, temperatura, pressão, gases, velocidade angular, que são grandezas físicas e precisam ser colhidas do motor e informadas a central de injeção eletrônica, através de sinais elétricos conhecidos pelo sistema.

Os sensores fornecem, em sua maioria, informações sobre velocidade e posição angular das árvores de manivela e comando de válvulas, de temperatura do ar, do óleo, do líquido de arrefecimento, da pressão atmosférica, do fluxo de ar admitido, da presença de oxigênio nos gases de escape, das vibrações provocadas pelas combustões entre outros. Os sinais são enviados normalmente em frequência ou tensão. Alguns sinais são enviados de forma analógicas, e precisam ser convertidos em sinais digitais, pois atualmente todas as centrais eletrônicas são digitais.

Sensor de Rotação.

Os motores atuais possuem normalmente dois sensores de rotação, um na árvore de manivelas e outro na árvore do comando de válvulas. Existem alguns tipos de sensores de rotação, e os principais utilizados pela indústria automotiva, são os do tipo indutivo (figura 21) e do tipo Hall.

Figura 21 – Sensor de rotação indutivo.

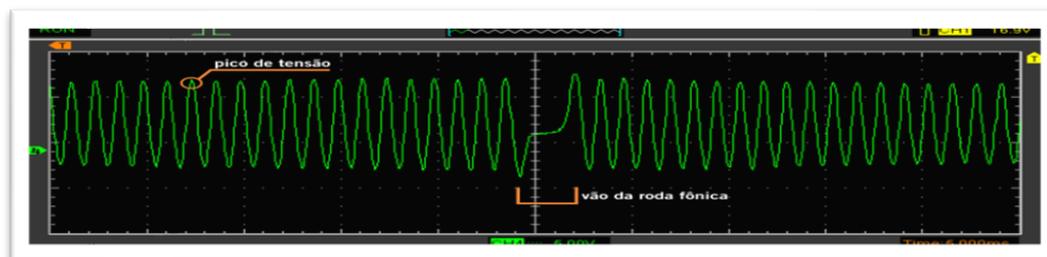


Fonte [o autor]

Os sensores de rotação, são um dos mais importantes componentes para o funcionamento do motor e têm a função de informar a central eletrônica, a velocidade e a posição angular instantânea do motor.

Os sensores do tipo indutivos fornecem um sinal em tensão, de forma analógica (figura 22), já os sensores do tipo Hall fornecem um sinal em forma de onda quadrada, já digital, de posse dessas informações a central tem a capacidade de controlar o momento correto para injetar o combustível e disparar a centelha de ignição.

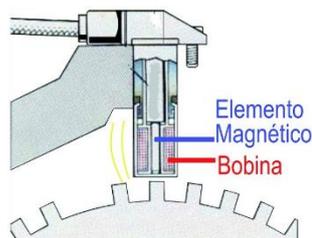
Figura 22 – Sinal emitido pelo sensor de rotação indutivo.



Fonte [34]

O sensor de rotação do tipo indutivo é um componente constituído de um ímã permanente e uma bobina enrolada em um núcleo de ferro (figura 23), em repouso ele não fornece nenhum sinal.

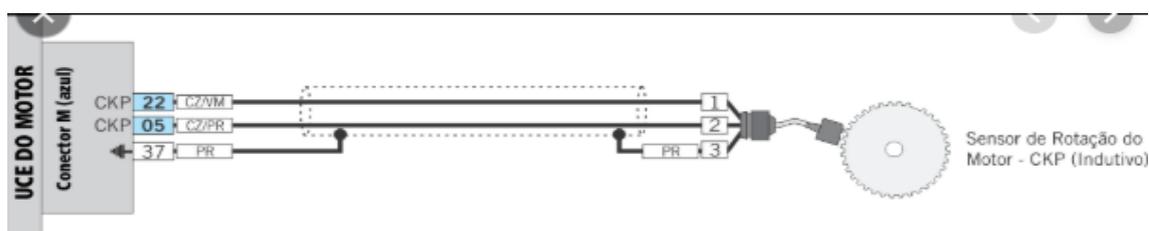
Figura 23 – Ilustração da montagem de um sensor de rotação no bloco do motor



Fonte [35]

O sensor de rotação é instalado de forma fixa no bloco do motor, a uma distância controlada sobre uma roda dentada, também chamada de roda fônica, a qual possui picos e vales que em movimento gera uma distorção no campo magnético do sensor que, por consequência, produz uma corrente alternada que é enviada ao módulo de controle eletrônico do motor (figura 24).

Figura 24 – Esquema de ligação do sensor de rotação indutivo.



Fonte [34]

Essa corrente gerada pelo sensor sofre alteração tanto em amplitude como em frequência com as variações de velocidade impostas pelo motor. O sinal de rotação é enviado para central eletrônica e passa por um circuito condicionador sinal afim de filtrar ruídos eletromagnéticos, promover o casamento de impedância necessário e transformar o sinal de analógico para digital. Sem o sinal de pelo menos um dos sensores de rotação o motor não entra em funcionamento.

Sensores de temperatura

Os sensores de temperatura também são de grande importância para o sistema de injeção eletrônica, tanto o sensor de temperatura do líquido de arrefecimento quanto o de temperatura do ar admitido, ambos normalmente são do tipo NTC (figura 25), isto é, coeficiente negativo de temperatura.

Figura 25 – Sensor de temperatura tipo NTC



Fonte:[36]

Os sensores de temperatura trabalham semelhante a um potenciômetro, eles normalmente possuem dois terminais onde em um deles é aplicada uma tensão de referência e no outro se obtém o valor de tensão resultante.

Sensores de temperatura do tipo NTC funciona da seguinte forma: quando exposto a fonte de calor, em que se deseja obter o valor da temperatura, seja ela ar, água, óleo, etc., e quanto mais quente vai se tornando o meio a ser medido, menor será a resistência interna do sensor, portanto o valor de tensão recebida pelo sistema será maior.

Os sinais gerados pelos sensores de temperatura, são analógicos e passam por um condicionador de sinal, para a devida adequação de impedância e é enviado para o conversor AD da central de injeção eletrônica.

Sensor de pressão absoluta (MAP)

O sensor de pressão absoluta (MAP), visto na figura 26, tem a função de informar ao sistema de injeção eletrônica a pressão interna do coletor de admissão, normalmente são sensores do tipo *strain gauge*, internamente eles possuem componentes que se deformam com a ação da pressão. O sensor recebe uma tensão fixa de referência, e seu retorno, em tensão diminui com a diminuição da pressão.

Figura 26 – Sensor MAP.



Fonte: [o autor]

Nos motores atuais os sensores MAP possuem acoplado a carcaça o sensor de temperatura do ar admitido. Portanto são dois sinais em um único componente, pressão absoluta e de temperatura do ar admitido. A ECU recebe o sinal do sensor de pressão absoluta, juntamente com os sinais do sensor de temperatura do ar, do sensor de rotação e com de posição da borboleta de aceleração e calcula a quantidade instantânea de ar que está entrando no motor. Com base neste cálculo, a unidade de controle eletrônico, controla o fluxo de combustível a ser injetado no motor para obter a melhor combustão possível, melhorando a eficiência energética e as emissões de poluentes.

Sensor de posição da borboleta.

Os sensores de posição da borboleta normalmente são potenciômetros, isto é, são resistência elétrica regulável e ajustável, atualmente existem sensores de posição de borboleta que utilizam outras tecnologias.

Os potenciômetros possuem um eixo que ao girar arrasta uma haste que esta solidaria ao eixo e apoiada sobre uma pista constituída de um material condutor, normalmente grafite, possuem também três terminais. Recebem uma tensão de referência nos em dois dos terminais, tendo a saída de seu sinal pelo terminal central, nesta configuração ele trabalha como um divisor de tensão. Fica instalado no corpo de borboleta do motor.

Os corpos de borboleta podem ser eletrônicos ou mecânicos (figura 27), a diferença entre o corpo eletrônico e o mecânico basicamente é o controle. No corpo de borboleta eletrônico o controle se dá pela ECU e nos corpos de borboletas mecânicos o controle acontece através do cabo de acelerador. Temos sensores que funcionam de forma semelhante nos pedais do acelerador, quando o veículo utiliza corpo de borboleta eletrônico, o que atualmente está em todos os veículos.

Figura 27 - Corpo de borboleta: mecânico (esquerda) e eletrônico (direita).



Fonte [O autor]

Esses sensores têm a função de informar a posição e a variação instantânea de uma borboleta que faz a dosagem do ar admitido pelo motor. Junto ao corpo de borboleta eletrônico também existe um motor de passo que atua na abertura e fechamento da borboleta, de modo a fornecer mais ou menos ar ao motor. O motor de passo também é controlado pela ECU através de um driver de potência específico.

Sensor (sonda) lambda

O sensor lambda (figura 28), também é conhecido por sensor EGO, sensor de oxigênio e outros, sua função principal é efetuar a leitura da quantidade de oxigênio presente nos gases de escape e informar o valor obtido a central de injeção eletrônica, de posse do valor desse sinal a central de injeção eletrônica faz o controle fino da quantidade de combustível injetada no motor.

Figura 28 – Sensor lambda.



Fonte [29]

Existem diversos tipos de sonda lambda, convencional, planar, banda larga, cada uma se aplica a um projeto de injeção.

A sonda é constituída de um material ativo chamado oxido zircônio,(porém existe sonda lambda produzidas com outros materiais ativos) este material quando submetido a uma temperatura superior a 350°C, e exposto ao oxigênio, ele reage produzindo tensão, que varia entre 50mv, a 950mv dependendo da quantidade de oxigênio contida nos de gases de escape do motor, o sensor utiliza ar atmosférico para referência. O sensor envia um sinal a unidade de gerenciamento da Injeção eletrônica (ECU) que junto com outros sinais também recebidos pela central, calcula a quantidade de combustível a ser injetada no motor de acordo com a condição de funcionamento do mesmo, assim é possível obter um melhor desempenho, maior economia de combustível e melhores índices de emissões de poluentes.

A sonda lambda tem papel fundamental no controle da injeção de combustível, é através do seu sinal que a central reconhece se a mistura esta rica, pobre ou estequiométrica (tabela 8).

Tabela 8 - Relação estequiométrica de alguns combustíveis.

Combustível	AIR/FUEL
Gasolina Pura	14,7:1
Etanol	9,0:1
Gasolina Comum	13,2:1
Diesel	15,2:1
Metanol	6,4:1
Hidrogênio	34,0:1

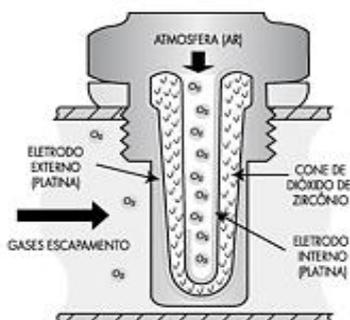
Fonte: [37]

A figura 29 mostra o esquema de funcionamento do sensor lambda nas condições de mistura rica e pobre.

Figura 29 - Diagrama de funcionamento da sonda lambda.

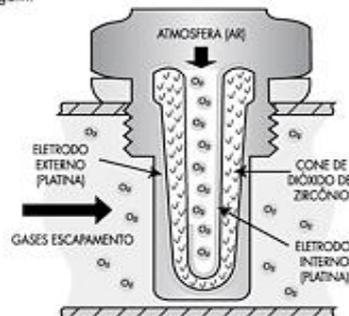
MISTURA RICA

Se o motor está trabalhando com a mistura **RICA**, pouco oxigênio estará presente no cano de escape, pois terá sido consumido para queimar o excesso de combustível. Assim, poucos íons se agruparão no eletrodo externo e a voltagem gerada será relativamente alta.



MISTURA POBRE

Numa situação contrária, mistura **POBRE**, mais oxigênio estará presente (não há combustível suficiente para queimá-lo todo) o que se traduz em mais íons no eletrodo externo, causando menor potencial elétrico ou menor voltagem.



SINAL DE SAÍDA 0 a 1.1 volts. (0 a 1100 mV)

MISTURA RICA $\lambda < 1$ mais de 0.45 volts. (450 mV) = Excesso de combustível.

MISTURA POBRE $\lambda > 1$ menos de 0.45 volts. (450 mV) = Excesso de oxigênio.

Fonte: [37]

Os veículos atuais possuem duas sondas, uma antes e outra após o catalizador, com isso monitora-se a eficiência do catalizador.

Os sensores lambda atuais possuem um sistema de aquecimento através de uma resistência elétrica, com isso além de aumentar a vida útil do sensor, coloca-se o sensor em funcionamento em um tempo menor, pois não precisa aguardar os gases de escape do motor atingirem a temperatura de trabalho do sensor.

É através do sinal do sensor lambda que a central de injeção eletrônica reconhece qual combustível está no tanque do veículo. De posse deste sinal central eletrônica identifica o combustível e utiliza um mapa de injeção adequado para cada situação, trazendo assim a condição da utilização de mais de um tipo de combustível pelo mesmo motor. Essa tecnologia é utilizada em motores *Flex*.

Sensor de detonação.

A detonação é uma forma de combustão descontrolada que provoca perda de eficiência e pode causar danos mecânicos ao motor.

Figura 30 – Sensor de detonação.



Fonte: [38]

Basicamente o sensor de detonação (figura 30) é um componente capaz de transformar vibrações mecânicas em um sinal elétrico, ele é composto por uma massa metálica e um sensor piezoelétrico que ao vibrar gera um sinal elétrico. Este sinal é interpretado pela central eletrônica que atua no avanço de ignição permitindo que o motor trabalhe o mais próximo do ideal. Esses sensores possuem uma faixa bastante ampla de trabalho, entre 5 e 15 kHz. Podem ser aplicados a vários tipos de motores e a sua frequência de detonação é determinada durante o processo de calibração do motor. Este componente se encontra fixado na parede externa do bloco do motor.

3.8.3 Atuadores.

Os atuadores são componentes em sua maioria eletroeletrônicos que executam os comandos enviados pela central de injeção eletrônica.

Nos sistemas de injeção eletrônica modernos existem muitos desses componentes com as mais diversas funções, que vão um simples comando para ligar um *led* indicador de avarias no sistema, até comandos muito complexos como o controle da válvula borboleta.

Os principais atuadores de um sistema de injeção eletrônica são: válvulas injetoras, bobina de ignição, válvula borboleta, válvula de purga do *canister*, lâmpada indicadora de anomalias, válvula EGR, eletroválvula de controle do variador de avanço da árvore do comando, bomba de combustível etc. Muitos desses atuadores são controlados por um sinal PWM (modulação da largura do pulso) outros possuem estratégias de atuação bem complexas exigindo o emprego de drivers específicos para o seu bom funcionamento exemplo disso são as válvulas injetoras.

Válvulas injetoras

As válvulas injetoras, também conhecidas na linguagem popular por bico injetor, tem a finalidade de injetar o combustível no motor de forma adequada a fim de buscar a melhor eficiência e o melhor rendimento.

Existem diversos sistema de injeção eletrônica de combustível, injeção indireta (figura 31), injeção direta (figura 32), mono ponto, multipontos e para atender aos mais variados tipos de sistema, existe uma ampla gama de válvulas injetoras. Basicamente temos injetores de baixa impedância, de alta impedância, de alta vazão, baixa vazão, para injeção direta, indireta, enfim para atender os mais variados sistemas e tipos de motor. Todos são controlados pela central de injeção eletrônica, utilizando-se de drivers e softwares específico para cada sistema.

Figura 31 – Válvula injetora para injeção indireta.



Fonte: [O autor]

Figura 32 – Válvula injetora para injeção direta.



Fonte: [O autor]

É um componente de extrema importância para o sistema, pois todo combustível de que o motor precisa para o seu funcionamento deve passar por ele, devem fornecer um *spray* adequado, não pode apresentar vazamentos ou travamentos e possuir uma vida útil bastante longa.

Eles são instalados em um tubo distribuidor de combustível, este tubo recebe o combustível vindo do tanque a uma pressão controlada e constante e com uma vazão que possa atender o funcionamento do motor.

A válvula injetora é composta por uma bobina elétrica que ao receber corrente ela recolhe uma agulha mecânica, que por sua vez tampa os orifícios de passagem do combustível. A agulha fica pressionada contra a sua sede através de uma mola calibrada. Quando a agulha esta recolhida o combustível é injetado na corrente de ar que passa pelo duto de admissão e fica pronto para ser admitido pelo motor, isso em um sistema de injeção indireta.

O tempo de injeção é basicamente o tempo em que o injetor permanece aberto permitindo a passagem do combustível e é variável pois depende do momento de trabalho do motor. As válvulas injetoras são dimensionadas em função do projeto do motor, visando atender as características do mesmo quanto a potência, economia, eficiência, etc.

Bobina de ignição

A bobina de ignição é o componente responsável pela produção uma centelha elétrica de alta tensão que é descarregada na vela de ignição a fim de inflamar a mistura de ar combustível contida no cilindro do motor.

É também um componente importante para o bom funcionamento do motor, pois, quando apresenta falhas o motor perde rendimento chegando até mesmo parar de funcionar.

A bobina de ignição tem a função de transformar a tensão de 12v do sistema elétrico de um veículo em alta tensão, passando dos 30Kv. Essa alta tensão se torna necessária para que a centelha elétrica gerada consiga romper o dielétrico dos eletrodos da vela de ignição dentro do cilindro do motor numa condição totalmente adversa, onde temos uma mistura de ar e combustível sob alta pressão.

Atualmente as montadoras de automóveis empregam diversos tipos de bobinas, podendo ser múltiplas (figura 33) ou individual (figura 34) para cada cilindro do motor. A central de injeção eletrônica faz o cálculo do tempo de carga da bobina afim de obter a alta tensão desejada, e do ponto de ignição para que a centelha seja disparada adequadamente.



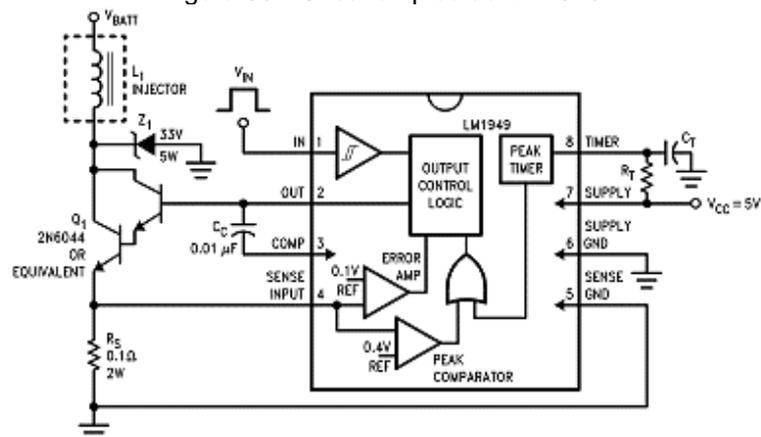
As bobinas de ignição possuem um enrolamento primário de baixa tensão e um enrolamento secundário onde acontece a transformação para alta tensão, a central de injeção promove o chaveamento do primário e ao desligar a tensão é induzida no secundário surgindo assim a alta tensão. Há a necessidade também de um driver de potência para efetuar o chaveamento da bobina; em algumas bobinas o driver fica incorporado na própria peça e em outros casos o driver fica acondicionado na central de injeção eletrônica.

3.8.4 Drivers

Driver de controle da válvula injetora LM1949

O principal componente do driver de acionamento da válvula injetora escolhido para ser utilizado no projeto deste trabalho é o circuito integrado LM1949, cujo circuito típico é ilustrado pela figura 35.

Figura 35 - Circuito típico do LM1949.



Fonte: [datasheet Lm1949]

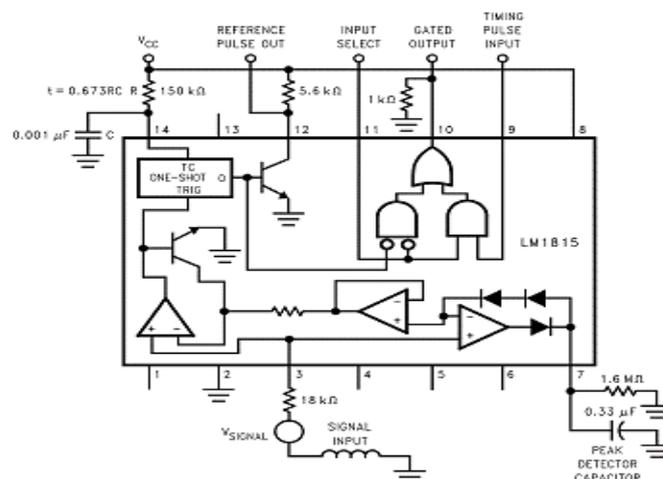
É este CI que recebe um pulso proveniente do microcontrolador e promove o acionamento da válvula injetora, dentro de uma estratégia já programada para a injeção eletrônica.

O LM1949 controla um transistor externo do tipo NPN *darlington* que aciona a válvula injetora que, para abrir, necessita de uma alta corrente. A corrente necessária para abrir a válvula injetora deve ser algo em torno de quatro vezes maior de que a corrente para o mantê-la aberta, portanto, o LM1949 ao detectar a corrente real da válvula injetora satura o transistor até que a corrente seja quatro vezes maior que a corrente de retenção, isso garante a abertura da válvula injetora. A corrente é então automaticamente reduzida ao nível de retenção suficiente para a duração do pulso de entrada. O CI opera alimentado por uma fonte de tensão de 5 V podendo operar com tensões inferiores de até 3 V. O LM1949 recebe o sinal de entrada, na forma de uma onda quadrada com um ciclo de trabalho variável e ou frequência variável, aplicado ao pino 1 do CI. A frequência de entrada é proporcional à rotação do motor, e o ciclo de trabalho é proporcional à carga do motor.

Condicionador do sinal de rotação LM1815

No projeto do sistema de controle da injeção, foi escolhido o CI LM1815, cuja figura 36 ilustra um circuito típico, como condicionador do sinal gerado pelo sensor de rotação, pois, este é um sensor indutivo que gera uma tensão alternada que varia tanto em amplitude com em frequência, por isso a necessidade de utilizar um componente específico para esta tarefa. O CI transforma o sinal analógico em um sinal de onda quadrada, um sinal digital, reconhecido pelo microcontrolador.

Figura 36 - Configuração típica LM1815.



Fonte: [datasheet LM1815]

O LM1815 recebe o sinal do sensor de rotação através do seu pino 3 processa este sinal e envia para a central de injeção eletrônica através do pino 12. O CI possui um detector de pico no pino 7, este com a função de captar pequenas variações de rotação, ele trabalha com tensões que podem variar de 100mVpp até 120Vpp. A tensão de trabalho do CI pode variar de 2 a 12V. Existe também a possibilidade de algumas outras configurações de trabalho do CI, que no momento não vem ao caso no nosso projeto.

4 Metodologia e Materiais Utilizados

Os estudos teóricos sobre o hidrogênio e suas características químico-físicas foram feitos com base em livros e artigos de revistas especializados no assunto. Uma síntese dos aspectos mais importantes, relevantes para este trabalho, foi feita e apresentada no capítulo 3 sobre a fundamentação teórica (subcapítulos 3.1 ao 3.5).

Quanto à parte prática referente à adaptação do motor de combustão interna (ciclo Otto) para uso do hidrogênio como combustível e ao projeto do sistema de controle eletrônico da injeção deste tipo de combustível, serão descritos, juntamente com os materiais utilizados, no capítulo a seguir, divididos em três partes: mecânica, eletrônica e *software*.

O projeto do protótipo do sistema de controle eletrônico da injeção de hidrogênio no motor permitirá sua confecção utilizando-se os materiais escolhidos e descritos anteriormente no capítulo 3.8.

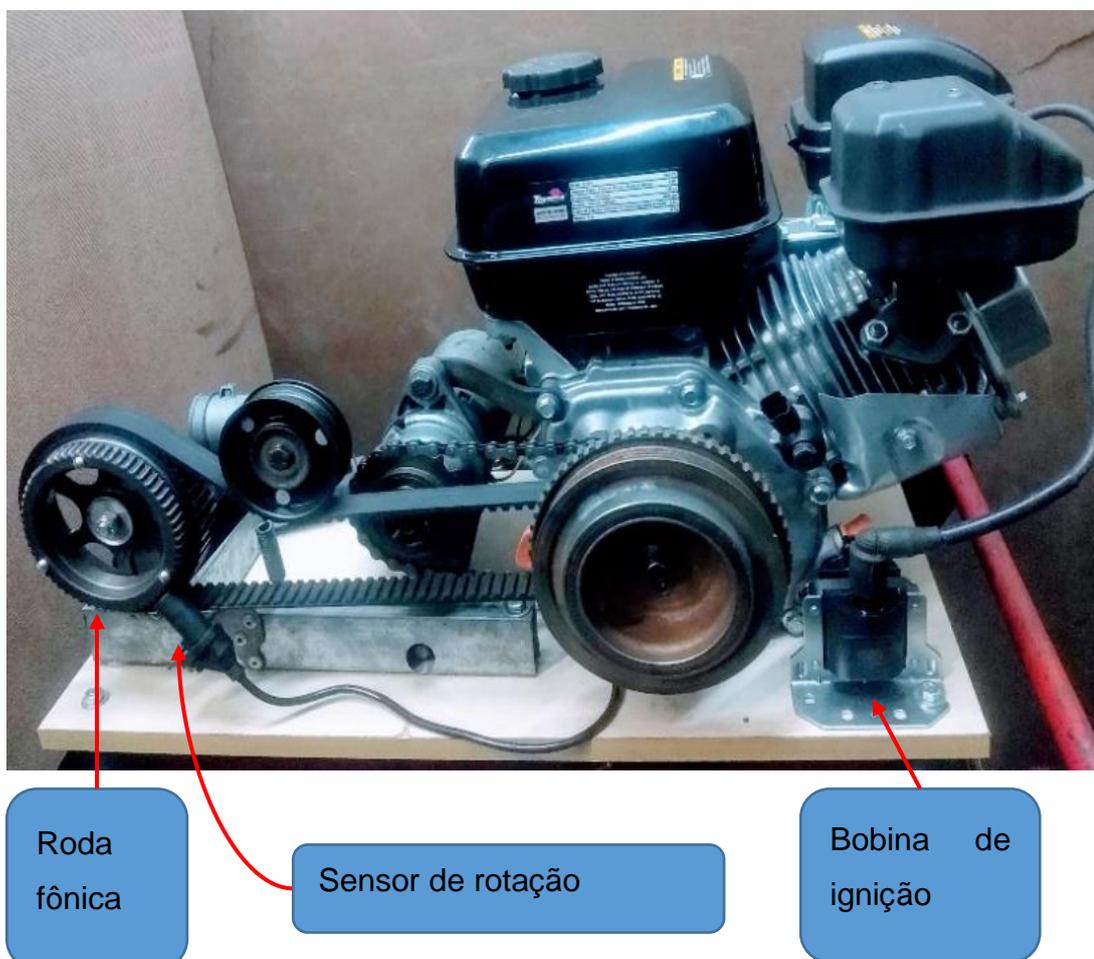
5 Projeto

5.1 Mecânica

5.1.1 O Motor

A figura 37 ilustra o motor utilizado no trabalho com as alterações necessárias para aplicação do sistema de injeção eletrônica de combustível hidrogênio: adaptação de uma roda fônica ao eixo do motor e instalação de um sensor indutivo para medir a quantidade de rotação do motor. Foi instalada uma bobina de ignição neste motor.

Figura 37 – Motor adaptado.

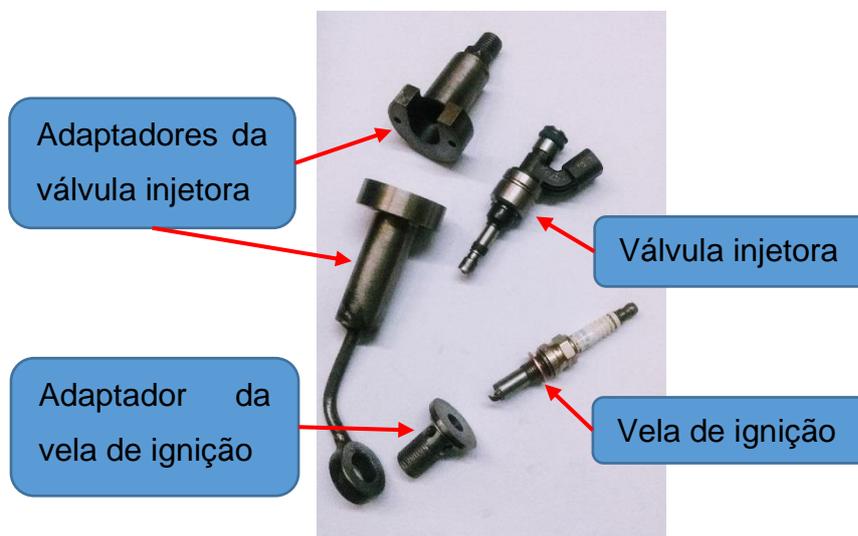


Fonte [o autor]

5.1.2 A injeção do hidrogênio

O dispositivo de injeção de combustível é mostrado nas figuras 38 e 39, em vista explodida e montado, respectivamente. Por este componente o hidrogênio chegará ao cilindro do motor: o hidrogênio entra pela parte superior, passa pela válvula injetora, percorre pela tubulação e adentra o cilindro junto a vela de ignição.

Figura 38 - Dispositivo de injeção do hidrogênio (vista explodida).



Fonte [o autor]

Figura 39 – Dispositivo de injeção montado.



Fonte [o autor]

O combustível, no caso hidrogênio, será injetado diretamente na câmara de combustão do motor através de uma válvula injetora de combustível utilizada pela montadora GM nos motores 2.4 Ecotec do veículo Captiva com injeção direta.

O gás hidrogênio será injetado no momento em que o motor iniciar a fase de compressão da mistura, pois, com esse método conseguiremos fazer o combustível adentrar o cilindro do motor sem precisar de uma elevada pressão, já que no interior

da câmara de combustão a pressão é bastante elevada no momento final da compressão.

Isso promove um significativo aumento na segurança do processo de utilização do hidrogênio como combustível em motores de combustão interna, já que o combustível não vai ficar exposto ao ambiente.

O motor adaptado utilizado foi um motor estacionário de 6Hp, da marca Toyama, monocilíndrico, movido originalmente a gasolina.

Para atender ao projeto do sistema de controle eletrônico da injeção de combustível, será adicionado ao motor sensores e atuadores, conforme descrito nos subcapítulos anteriores 3.8.2 e 3.8.3, respectivamente.

O sistema de injeção adotado no projeto é simples: controla a bobina de ignição e a válvula injetora. O sistema eletrônico recebe o sinal da rotação que é fornecido por um conjunto de sensor de rotação indutivo e uma roda fônica 60 menos 2 dentes. A partir do sinal de rotação, a central eletrônica terá condições controlar a válvula injetora e a bobina de ignição.

O sistema eletrônico necessário para o funcionamento do motor necessitará também de uma placa de circuito impresso que acondicionará os componentes eletrônicos dos condicionadores de sinais, do driver para controle da bobina e do driver para controle da válvula injetora.

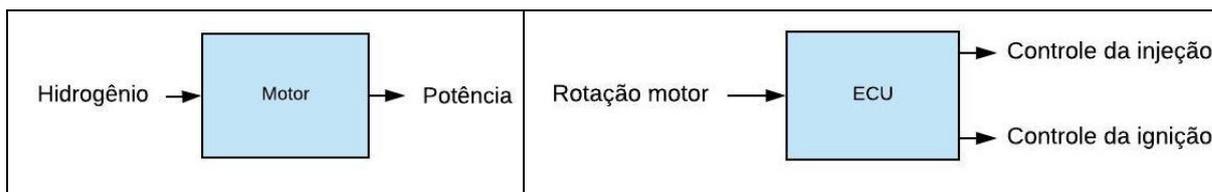
O combustível será injetado diretamente na câmara de combustão junto a vela de ignição a uma pressão constante de 3 bar, para isto, foi desenvolvido o dispositivo exibido na figura 39, na qual uma válvula injetora é acondicionada e proporcionará a injeção do combustível dentro da câmara.

A injeção do combustível acontecerá no momento em que o pistão encontra-se no seu ponto morto inferior, começando a se deslocar para ponto morto superior pois neste momento a pressão no interior do cilindro ainda é baixa, quando o pistão começar a se deslocar em direção ao ponto morto superior naturalmente a pressão começa a aumentar e precisaríamos de um valor de pressão maior para conseguirmos colocar o combustível no interior do cilindro.

O aumento de pressão implicaria em risco a segurança o que talvez inviabilizasse o projeto.

O sistema de controle, baseado no sinal de rotação, irá fazer o controle do tempo de injeção e do tempo de ignição para que o motor funcione de forma adequada, conforme esquematiza o diagrama exibido na figura 40.

Figura 40 – Diagramas de blocos do motor e da ECU.



Fonte: o autor

5.1.3 O Reservatório de Hidrogênio

Na figura 41, temos um dos meios pelo qual o hidrogênio é fornecido, em cilindro de aço, normalmente pintados em amarelo, com pressão de 200 bar e com diferentes capacidades de armazenamento.

Figura 41 – Cilindro de hidrogênio com regulador de pressão.



Fonte: [33]

O regulador de pressão possui dois manômetros, sendo o mais próximo do cilindro que informa a pressão no interior dele, possui uma escala um pouco superior a 200 bar; o outro manômetro informa a pressão na linha de combustível e pode ser ajustada de acordo com a necessidade do projeto, podendo ser ajustado para uma pressão de saída de 0 até 15 bar.

5.1.4 A Válvula Corta-Chama

Esta válvula (figura 42) tem por finalidade extinguir qualquer chama que possa adentrar a tubulação de combustível, evitando a explosão do cilindro de hidrogênio, é

um componente de segurança e deve ser instalada na saída de combustível junta ao regulador de pressão.

A pressão de trabalho para o hidrogênio é de até 5 bar.

Figura 42 – Válvula corta-chama



Fonte: [o autor]

5.1.5 Consumo de combustível

O motor utilizado no projeto possui um consumo de combustível de 1,8 l por hora em potência máxima segundo o fabricante.

Com este consumo indicado podemos afirmar que a queima desta quantidade de gasolina nos fornece aproximadamente 53,6 MJ de energia, pois:

Energia da gasolina = 40546 J/g Densidade da gasolina 735 g/l

1,8 l de gasolina = 1323 g que corresponde ao consumo do motor.

1323 g de gasolina x 40546 J/g = 56642358 J ou 53,6 MJ de energia

Com hidrogênio, o consumo será estimado com base no seu poder calorífico:

Energia do hidrogênio = 120862 J/g Densidade do hidrogênio 0,09 g/l

53,6 MJ / 120862 J = 443,8 g de hidrogênio

Assim, temos que, para a mesma quantidade de energia gasta pelo motor na especificação do fabricante (1,8 l/h de gasolina em potência máxima equivale a 53,6 MJ de energia), seria necessária uma massa de 1323 g de gasolina e 443,8 g de hidrogênio.

5.1.6 Frequência e Período do motor.

O motor do nosso projeto tem a sua frequência de rotação máxima determinada pelo fabricante de 3000 rpm e em marcha lenta de 1000 rpm. Transformando essas frequências de rotações por minuto para rotações por segundo, temos:

$$3000 \text{ rpm} = 50 \text{ rps}$$

$$1000 \text{ rpm} = 16,7 \text{ rps}$$

Transformando a frequências em período, temos que:

$$50 \text{ rps} \text{ equivalem a um período de } 0,020 \text{ s}$$

$$16,7 \text{ rps} \text{ equivalem a um período de } 0,059 \text{ s}$$

O desenvolvimento do sistema eletrônico de injeção utiliza-se desses tempos para efetuar o controle da válvula injetora e da bobina de ignição.

5.2 Eletrônica.

O projeto do sistema de controle eletrônico da injeção foi baseado em um microcontrolador PIC 18f4550 com vários recursos: três interrupções externas, quatro módulos de *timers*, 13 canais a/d de 10 bits, 2 módulos de captura, compara, PWM, (CPP), comunicação via USB, porta paralela, entre outros, características estas que atendem ao nosso projeto. Temos também alguns circuitos para condicionamento de sinais, principalmente os do sensor de rotação e os drivers para acionamentos da válvula injetora e da bobina de ignição.

O funcionamento do sistema acontece da seguinte forma: o microcontrolador recebe o sinal da rotação do motor através de uma de suas portas I/O e com este sinal ele é capaz de executar as tarefas: leitura da rotação, contagem do número de dentes da roda fônica, encontrar o dente que falta na roda para determinar o sincronismo e determina também o tempo duração do pulso de cada dente. Essas informações são muito importantes, pois, determinam o sincronismo do motor.

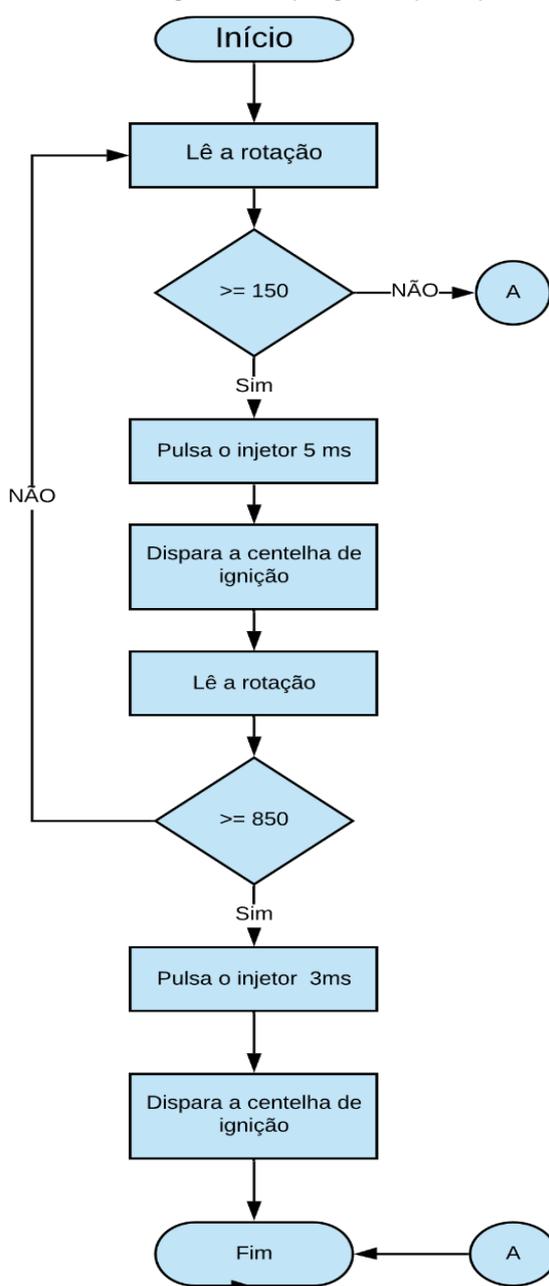
A partir desse sincronismo, o programa, detalhado a seguir, calcula o tempo de injeção e o da ignição para o correto funcionamento do motor.

5.3 Programa

O programa foi desenvolvido em um ambiente de programação MPLABX e compilado com XC8, ambos da Microchip, empresa também produtora do microcontrolador PIC utilizado.

Foram criadas várias funções ou tarefas (*tasks*) dentro de uma função principal que as chamará no momento da utilização de cada uma delas. A figura 43 exibe o fluxograma da função principal.

Figura 43 – Fluxograma do programa principal



Fonte: [o autor]

As funções chamadas na função principal são:

- Função de leitura da rotação do motor (leitura pelo sensor indutivo);
- Função de contagem dos dentes da roda fônica;
- Função que encontra a falha na roda fônica;
- Função para contagem do tempo de cada dente;
- Função para calcular o tempo de injeção;
- Função para calcular o tempo de ignição.

As interrupções do microcontrolador foram configuradas para uma base de tempo de 1ms através de seus registradores *timers*.

5.3.1 Função principal.

Na função principal, além de todas as configurações operacionais do microcontrolador, como é mostrado no fluxograma da figura 43, ocorre a execução da função que lê a rotação e compara com um valor previamente determinado para que se inicie a injeção do hidrogênio. Esse valor deverá ser maior que 150 rpm, pois, com uma rotação menor que este valor, o motor não funciona de forma satisfatória e a injeção do combustível não acontecerá.

O tempo de injeção nesta fase deve proporcionar uma mistura rica em combustível para facilitar o início do funcionamento do motor.

Após o início de funcionamento do motor e o aumento da sua rotação o tempo de injeção deve ser controlado buscando o melhor funcionamento do motor.

Esses valores de tempo de injeção são determinados pela observação dos valores praticados pela indústria automotiva atual, sendo que deverão ser estudados no futuro para a validação desses parâmetros.

5.3.2 Função leitura dos dentes da roda fônica.

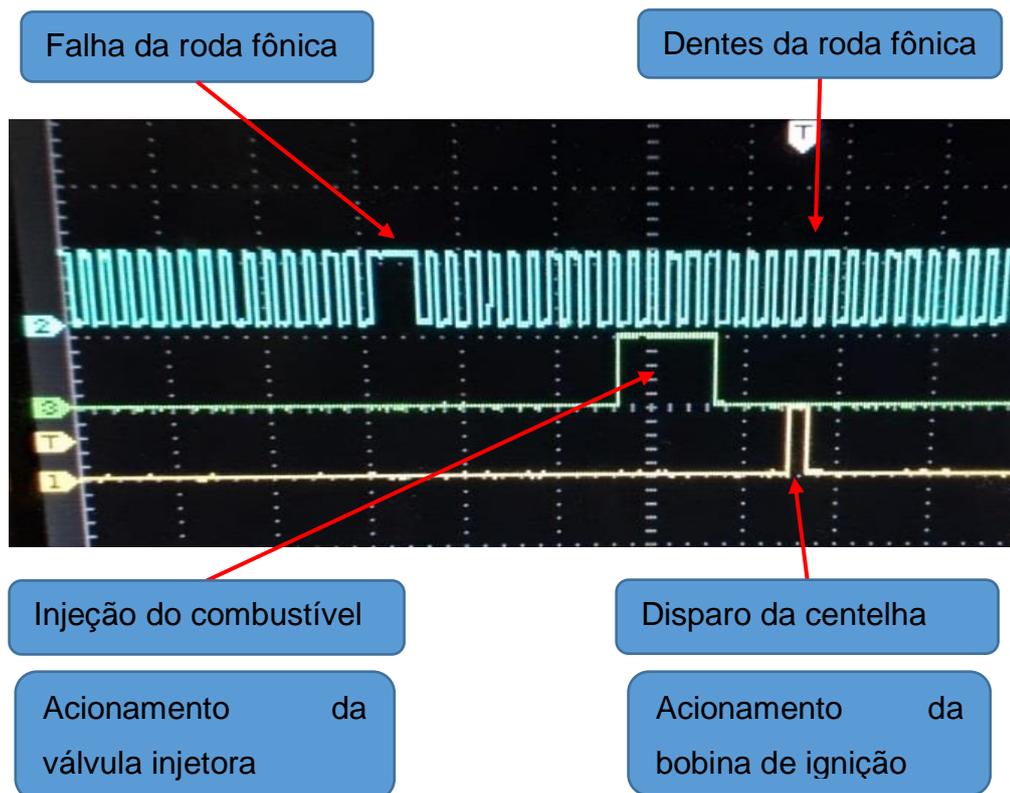
Esta função é responsável pela leitura dos dentes da roda fônica, a fim de se conseguir determinar a posição do dente faltante e contar os outros dentes.

Com estas informações é possível determinar o sincronismo do motor e o momento exato para que se possa acionar a válvula injetora e a bobina de ignição. Isso é feito da seguinte forma: compara-se o tempo de cada dente, e quando encontra um tempo de dente com valor próximo ao dobro do valor obtido anteriormente, indica que a falha foi encontrada, neste momento adota-se o próximo dente como sendo o primeiro e passa a contar os próximos dentes em sequência.

Esta lógica fornece a posição angular da árvore de manivelas do motor, permitindo, assim, a injeção do combustível no momento correto e o controle da ignição.

Foi construído um protótipo para teste da obtenção destes parâmetros de sincronização e utilizando um osciloscópio visualizou-se os sinais indicadores da falha da roda fônica (dente faltante) e da sequência de dentes, bem como, visualizou-se também o sinal para o acionamento da válvula injetora de combustível e do acionamento da bobina de ignição. A figura 44 exibe a tela do osciloscópio com os sinais citados.

Figura 44 - Imagem dos sinais do simulador no osciloscópio.



Fonte: [o autor]

6 Conclusão

Implementamos o programa para controle da válvula injetora e do sistema de ignição, tendo sido testado em um pequeno protótipo com um motor elétrico acionado eletricamente, acoplado a uma roda fônica, cujos resultados qualitativos mostraram o correto funcionamento desta parte do sistema de controle da injeção.

Durante o desenvolvimento final deste trabalho, nos deparamos com a pandemia causado pelo vírus Corona que assolou o planeta, colocando a todos em distanciamento social, nos impedindo de efetuar os testes práticos necessários para a análise da viabilidade do uso do hidrogênio como combustível do motor de combustão interna que adaptamos para esta finalidade.

Apesar de não termos realizado os testes finais com o motor adaptado para a finalidade deste trabalho, ao longo de sua execução, este trabalho contribuiu para organizar e consolidar os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, tanto na área da mecânica para adaptação do motor, quanto na implementação do programa para obter os parâmetros de sincronização do acionamento da injeção de combustível e da ignição.

As pesquisas teóricas sobre o hidrogênio permitiram entrar em contato com uma outra área de conhecimento adicional àqueles apresentados no curso, incentivando-nos a prosseguir os estudos para integrar conhecimentos que permitam um retorno à sociedade da educação recebida nesta instituição.

7 Sugestão para trabalhos futuros

Para um melhor desenvolvimento de um sistema de injeção, se faz necessário adotar outros sensores ao motor para que se tenha um controle efetivo da mistura ar combustível e das emissões de poluentes.

Uma sugestão para trabalhos futuros seria a implementação dos novos sensores e atuadores ao motor e o desenvolvimento de um novo programa para controle do sistema de injeção, considerando a adição destes elementos.

Referências Bibliográficas

- [1] R. Todorovic, "Hydrogen Storage Technologies for Transportation Application," *J. Undergrad. Res.*, vol. 1, no. 5, pp. 1–5, 2015.
- [2] E. Tzimas, C. Filiou, S. D. Peteves, and J. Veyret, *Hydrogen Storage : State-of-the-Art and Future Perspective*. 2003.
- [3] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, "Hydrogen Storage," *US Department of Energy*, 2017. [Online]. Available: <https://energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage>. [Accessed: 20-Oct-2017].
- [4] "Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies - Module 1." College of the Desert, 2001.
- [5] R. Drnevich, "Hydrogen Delivery, Liquefaction & Compression." Strategic Initiatives for Hydrogen Delivery Workshop, Tonawanda, NY, p. 20, 2003.
- [6] A. Eastop, T. D., McConkey, *Applied Thermodynamics for Engineering Technologists*, 5th ed. London - UK: Pearson Prentice Hall, 1993.
- [7] R. H. Zemansky, Mark W. and Dittman, *Heat and Thermodynamics*, 7th ed. USA: McGraw-Hill, 1993.
- [8] A. Züttel, "Materials for hydrogen storage," *Mater. Today*, no. September, pp. 24–33, 2003.
- [9] W. A. Amos, "Costs of Storing and Transporting Hydrogen," *Other Inf. PBD 27 Jan 1999; PBD 27 Jan 1999; PBD 27 Jan 1999*, no. November, p. Medium: ED; Size: vp., 1999.
- [10] M. SYED, "An economic analysis of three hydrogen liquefaction systems," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 23, no. 7, pp. 565–576, 1998.
- [11] A. Züttel, "Hydrogen storage methods," *Naturwissenschaften*, vol. 91, no. 4, pp. 157–172, 2004.
- [12] B. D. James and C. Houchins, "700 bar Type IV H2 Pressure Vessel Cost Projections," no. August. Department of Energy Physical-Based Hydrogen Storage Workshop, Southfield, MI, USA, 2016.
- [13] C. D. D. Warren, "Carbon Fiber Precursors and Conversion All Fibers are Not the Same." Oak Ridge National Laboratory and US Department of Energy,

- Tennessee, USA, 2009.
- [14] B. R. Udri, "700 Bar COPV Manufacturing - IACMI 24 August 2016," no. August. Oak Ridge National Laboratory and US Department of Energy, Tennessee, USA, 2016.
- [15] Linde, "Liquid Hydrogen." [Online]. Available: www.linde.com. [Accessed: 31-Oct-2017].
- [16] L. M. Kustov, A. L. Tarasov, J. Sung, and D. Y. Godovsky, "Hydrogen storage materials," *Mendeleev Commun.*, vol. 24, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [17] S. S. Murthy, "Report on Hydrogen Storage and Applications Other Than," New Delhi, India, 2016.
- [18] Daniel Argenta da Rosa, "Análise Teórica e Experimental do Desempenho de um Motor Ciclo Otto Alimentado a GNV e Testes com Hidrogênio como Combustível Auxiliar", FTEC de Caxias do Sul, 2015.
- [19] Maxwell A. Wilson, "Development of hydrogen direct injection for conversion of internal combustion engines". University of Nevada Las Vegas. 2010.
- [20] PULKRABEK, W. W. "Engineering Fundamentals of the Internal combustion Engine". 2ª Edição. Platteville: Prentice-Hall, 2003.
- [21] SANTOS, F. M. S. M; SANTOS, F. A. C. M. "O combustível "hidrogênio"". Educação, Ciência e Tecnologia, nº 31. 2005.
- [22] SARDELLA, A. "Curso Completo de Química". 2º Edição. São Paulo: Editora Ática, 1999.
- [23] SCHULZ, D. "Ciclo de Otto". 2000. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_otto.htm. Acesso em: 13 abr. 2015.
- [24] SENRA, F. O.; LIMA, K. A. M; ABREU, R. A. "Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto". 2014. 211f. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia), Curso de Engenharia Mecânica – Automação e Sistemas, Universidade São Francisco (USF), Itatiba, 2014.
- [25] SOUZA, S. N. M. "Aproveitamento de Energia Hidroelétrica Secundária para a Produção de Hidrogênio Eletrolítico". 1998. 211f. Tese (Doutorado em

planejamento de sistemas 78 Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, 1998.

- [26] ALCÂNTARA DIAS, B. M. “Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto”. São Paulo. 2015. 269p. (Mestrado) Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
- [27] Felipe Sanches Guerra, Luís. “Eletrólise da água para produção de gás de síntese”. Lisboa 2015. (Mestrado) ISEL.
- [28] Dayana D'Arc de Fátima Palhares. “Produção de Hidrogênio por Eletrólise Alcalina da Água e Energia Solar”. Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Química. 2016.
- [29] NGKNTK cerâmica e velas de ignição. <http://www.ngkntk.com.br/automotivo/>
- [30] <https://st2.ning.com/topology/rest/1.0/file/get/1939621274?profile=original>
- [31] <https://autos.culturamix.com/mecanica/problemas-no-modulo-de-injecao>
- [32] <http://www.kalyto.com.br/conserto-modulos/>.
- [33] <https://www.equipagas.com.br/>
- [34] <https://www.doutorie.com.br/blog/sensor-magnetico-indutivo-ou-de-relutancia-variavel-principio-de-funcionamento/>
- [35] <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/tecnicas/classes-de-sensores-automotivos-e-o-reconhecimento-de-falhas-em-sensores-pelo-modulo-do-motor>
- [36] <https://www.umec.com.br/>
- [37] <https://www.mte-thomson.com.br/sensor-de-oxigenio-sonda-lambda/>
- [38] <https://autos.culturamix.com/mecanica/o-que-e-sensor-de-detonacao>.

Apêndice 1 – Programa de Controle da Injeção de Combustível

Desenvolvimento do software.

```

#include <18f4550.h> //microcontrolador que foi utilizado
#include "Base_lib.h"
#include "usb_bootloader.h"
#include <usb_cdc.h>

#define PIN_ON      output_high
#define PIN_OFF     output_low
#define LED_VERDE   PIN_D0
#define LED_AMARELO PIN_B7
#define LED_VERMELHO PIN_D1
#define POTENCIOMETRO PIN_A1

//=====
int32 count_numero_dentes = 0; //Contador de numero de dentes

//PARA ACHAR DENTE ZERO
int32 count_estouro_timer = 0; //quantas vezes estourei o timer
//tempo decorrido = count_estouro_timer * 87.81824 + count do timer atual * 0.00134
//0.00134 = tempo em ms (milisegundo) que é o intervalo de tempo somar +1 no timer
//87.81824 = tempo em ms para encher o timer
//((get_timer1() * 0.00134) + count_estouro_timer * 87.81824;
//valor int do timer no momento * valor que cada incremento vale + quantas vezes estourou timer * valor
em tempo do timer quando ta cheio

int1 bool_encontrar_zero = 1; // 1- precisa ou 2- nao precisa
int1 bool_qual_tempo = 0; //0 para primeiro intervalo de tempo
float intervalo_tempo_0 = 0;
float intervalo_tempo_1 = 0;

int16 dente_onde_abrir_o_combustivel = 1;
int16 dente_onde_estourar_a_centelha = 10;
int16 adc_valor_recebido_potenciometro = 0; //valor que recebo na entrada analogica
int16 adc_valor_max_entrada = 1023; //valor maximo entrada analogica
int16 incremento_de_dentes = 0; //0 - 10
int16 aux_valor_anterior_incremento = 0;

int1 centelha = 0;

//=====
//INTERRUPÇÕES

//interrupção externa (leu um dente)
#int_ext
void fnc_ext_int_passou_por_um_dente(void)
{
    count_numero_dentes++;

    //=====
    //rotina para encontrar o zero da roda-fônica

    if (bool_encontrar_zero == 1)
    {
        //0.00134 = tempo em ms (milisegundo) que é o intervalo de tempo somar +1 no timer
        //87.81824 = tempo em ms para "encher" o timer
        //((get_timer1() * 0.00134) + count_estouro_timer * 87.81824;
        //valor int do timer no momento * valor que cada incremento vale + quantas vezes
estourou timer * valor em tempo do timer quando ta cheio

        if (bool_qual_tempo == 0)
        {
            //passa por aqui apenas no primeiro dente

```

```

        intervalo_tempo_0 = (get_timer1() * 0.00134) + count_estouro_timer * 87.81824;
        bool_qual_tempo = 1;

        //reinicio o timer
        set_timer1(0);
        count_estouro_timer = 0;
    }
    else
    {
        intervalo_tempo_1 = (get_timer1() * 0.00134) + count_estouro_timer * 87.81824;

        if (intervalo_tempo_1 >= 2 * intervalo_tempo_0)
        {
            //AQUI EU ENCONTREI O ZERO
            set_timer1(0);
            count_estouro_timer = 0;
            count_numero_dentes = 0;
            bool_encontrar_zero = 0; //não precisa encontrar mais o zero, pq achou
        }
        else
        {
            //enquanto nao achou o zero
            intervalo_tempo_0 = intervalo_tempo_1;

            set_timer1(0);
            count_estouro_timer = 0;
        }
    }
}
//end rotina para encontrar o zero da roda-fônica
//-----
else //se já encontrou o zero da roda-fônica
{
    if (count_numero_dentes == dente_onde_abrir_o_combustivel)
    { //ABRE COMBUSTÍVEL
        PIN_ON(LED_VERDE);
        PIN_ON(PIN_A3);
    }
    if (count_numero_dentes == dente_onde_abrir_o_combustivel + 5)
    { //FECHA COMBUSTÍVEL
        PIN_OFF(PIN_A3);
        PIN_OFF(LED_VERDE);
    }
    if (count_numero_dentes == dente_onde_estourar_a_centelha)
    { //CENTELHA
        PIN_ON(PIN_A2);
        centelha = 1;
    }
    if (count_numero_dentes == 58)
    { //VOLTA COMPLETA
        OUTPUT_TOGGLE(LED_AMARELO);
        count_numero_dentes = 0;
    }
}
//=====
}

//interrupção timer (quando estoura timer1)
#int_timer1
void fnc_timer_int_estoura_timer1(void) //quando estouro o TIMER
{
    disable_interrupts(INT_TIMER1);

    count_estouro_timer++;

    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    set_timer1(0); //

```

agora

```

}

//=====================================================

void main(void)
{
    //INICIA USB
    usb_init();

    //ad config
    setup_adc(ADC_CLOCK_INTERNAL);
    setup_adc_ports(AN0);
    set_adc_channel(0);

    //CONFIGURO INTERRUPTÕES EXTERNAS
    enable_interrupts(GLOBAL);
    enable_interrupts(INT_EXT); //(Dou o enable)
    ext_int_edge(0, H_TO_L); //borda descida

    //CONFIGURO TIMER 1
    enable_interrupts(INT_TIMER1);
    setup_timer_1 ( T1_INTERNAL | T1_DIV_BY_8 );
    set_timer1(0);

    //////////////////////////////////////

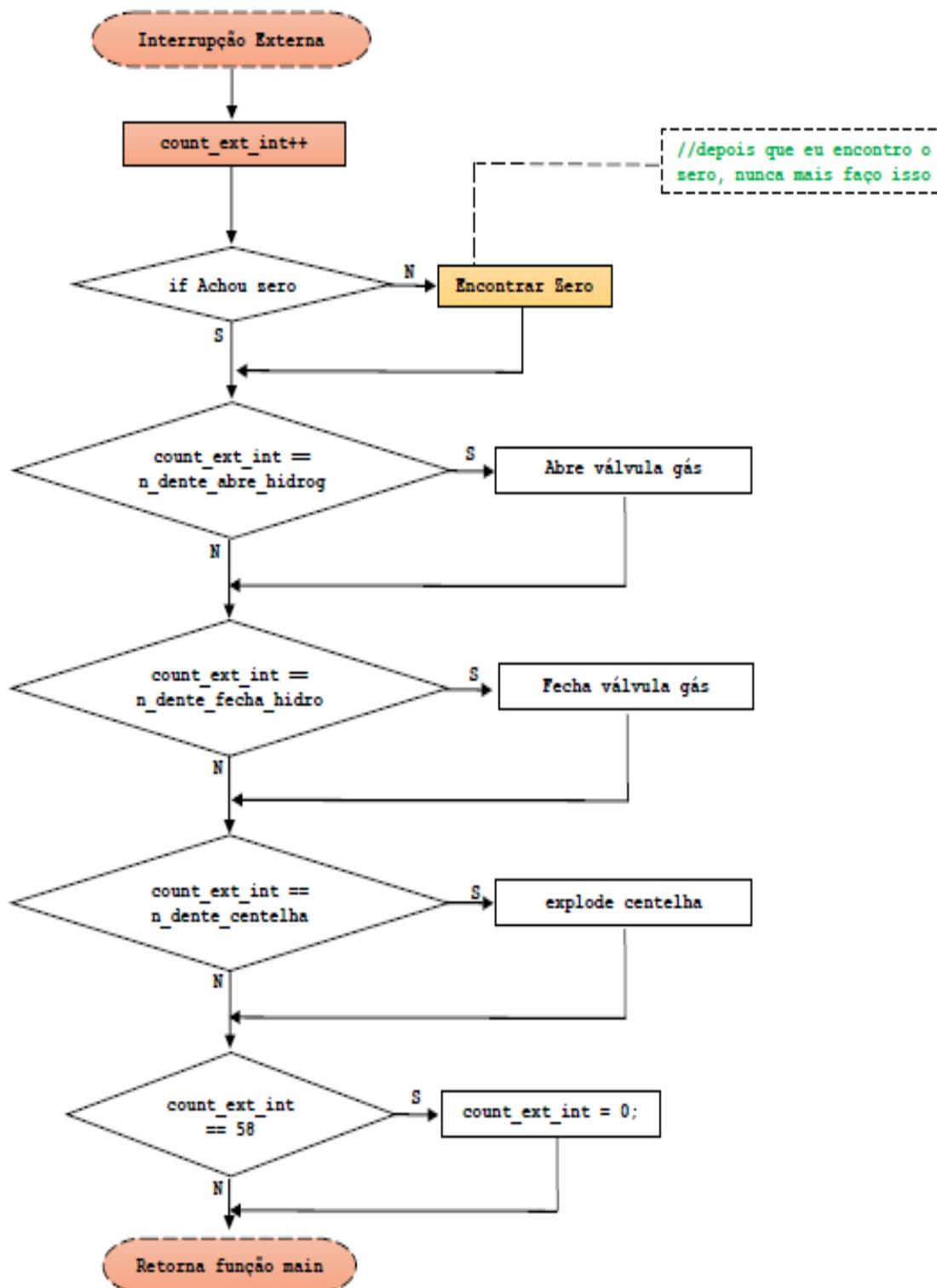
    while(TRUE)
    {
        if (centelha == 1)
        {
            //centelha foi ligada, tem que desligar
            OUTPUT_TOGGLE(LED_VERMELHO);
            centelha = 0; //define como desligada
            delay_ms(5); //tempo para desligar
            PIN_OFF(PIN_A2); //"desliga" centelha
        }
        //=====================================================================
        //SINAL ANALÓGICO POTENCIÔMETRO PARA DESLOCAR DENTE ONDE OCORRE
        LIBERAÇÃO
        // DO COMBUSTÍVEL E CENTELHA
        digital
        adc_valor_recebido_potenciometro = read_adc(); //le valor analogico e converte para
        incremento_de_dentes = adc_valor_recebido_potenciometro / 100; //ele ja arredonda
        anterior
        if (aux_valor_anterior_incremento != incremento_de_dentes) //Se o valor for diferente do
        {
            dente_onde_abrir_o_combustivel = 1 + incremento_de_dentes;
            dente_onde_estourar_a_centelha = 10 + incremento_de_dentes;
            aux_valor_anterior_incremento = incremento_de_dentes;

            if(usb_enumerated())//verifica se usb ta conectada
            {
                //exibe valores
                printf(usb_cdc_putc, "Valor Int Potenciometro: %Lu \r \n",
                adc_valor_recebido_potenciometro);
                printf(usb_cdc_putc, "Valor incremento: %Lu \r \n",
                incremento_de_dentes);
                printf(usb_cdc_putc, "DENTE ONDE ABRIR O COMBUSTIVEL: %Lu \r
                \n", dente_onde_abrir_o_combustivel);
                printf(usb_cdc_putc, "DENTE ONDE ESTOURAR A CENTELHA: %Lu
                \r \n\n", dente_onde_estourar_a_centelha);
                printf(usb_cdc_putc,
                "===== \r \n\n");
            }
        }
    }
}

```

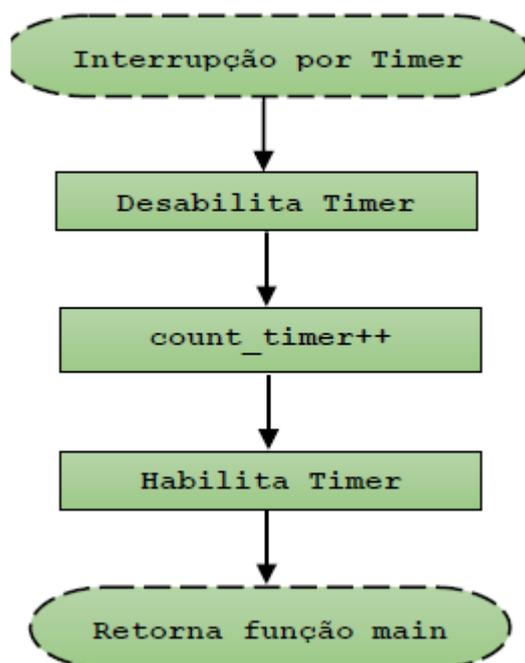
Apêndice 2 – Fluxograma das interrupções

Interrupções externas

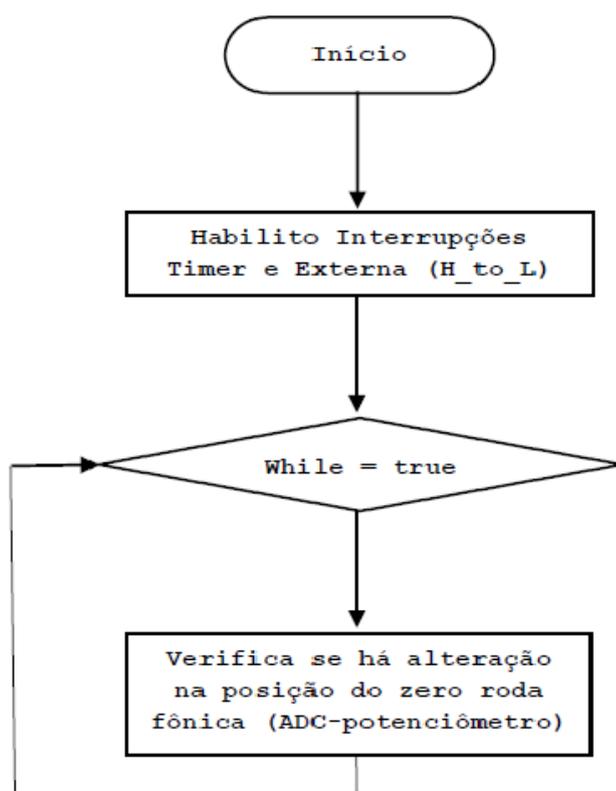


Interrupções por Timer

INTERRUPÇÕES



Fluxograma Principal das Interrupções



Apêndice 3 – Diagrama esquemático da placa de controle da injeção

