Leonardo Lopes Lima

Identificação dos fenômenos de combustão e detonação em um motor
ciclo Otto através da corrente iônica

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Mestre em Ciências

São Paulo
2015

Leonardo Lopes Lima

Identificação dos fenômenos de combustão e detonação em um motor
ciclo Otto através da corrente iônica

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção de título de
Mestre em Ciências

Área de Concentração:
Microeletrônica

Orientador:
Prof. Dr. João Francisco Justo Filho

São Paulo
2015

Catálogo-na-publicação

Lima, Leonardo Lopes

Identificação dos fenômenos de combustão e detonação em um motor ciclo Otto através da corrente iônica / L. L. Lima -- São Paulo, 2014.
105 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Ionização de gases 2.motores de combustão interna 3.Ionização de gases (detonação) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me dar força para superar as dificuldades e mostrar os caminhos nas horas mais difíceis.

À Tatiane Alves Monteiro, minha esposa e companheira, pelo carinho, paciência e incentivo. Obrigado por acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditava.

Aos meus pais, irmãos e familiares que me apoiaram durante toda esta trajetória.

Ao professor e amigo Dr. Armando Antonio Maria Laganá pela confiança e por ser o incentivador do desenvolvimento deste trabalho e ao professor e amigo Dr. João Francisco Justo Filho pela orientação e pela grande ajuda com a revisão do texto.

Aos meus amigos Demerson Moscardini e Bruno Silva Pereira por toda a ajuda que ofereceram nos experimentos realizados em laboratório.

Aos professores da pós-graduação da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pelo convívio e aprendizado.

Aos professores da Fatec Santo André pelo apoio e fornecimento de equipamentos, materiais e espaço necessário para o desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que me acompanharam durante a conclusão dessa etapa da minha vida.

RESUMO

As legislações com restrições nos níveis de emissões de poluentes e a grande concorrência entre as montadoras fomentaram o desenvolvimento de sistemas mais eficientes de gerenciamento de motores a combustão interna. Entretanto, a falta de sensores que identifiquem as propriedades da combustão, e que sejam economicamente viáveis, dificulta o desenvolvimento de novos sistemas. Visando suprir parte dessas limitações, este trabalho propõe o uso do sensor de corrente iônica com duas finalidades: identificação dos fenômenos de combustão e detonação. Para identificação da combustão, atualmente é utilizado o sensor de fase instalado no motor, o que encarece o sistema de gerenciamento. Uma alternativa a este sensor seria utilizar a vela de ignição, já instalada dentro do cilindro do motor, como sensor de ionização da mistura ar/combustível durante a queima. Comparando a área sob a curva do sinal da corrente iônica durante a combustão com a área sob a curva durante a admissão, foi possível verificar que é viável a utilização do sinal da corrente iônica para substituição de uma funcionalidade do sensor de fase. Quanto à identificação do fenômeno da detonação, foi mostrado que o uso do sensor de corrente iônica possibilita a remoção do sensor de detonação. Para isso, foi realizada a correlação entre a energia de uma faixa de frequências dos harmônicos do sinal da corrente iônica com a energia do sinal proveniente do sensor de detonação. Dessa forma, este trabalho mostrou que é possível usar somente as velas de ignição, já presentes no veículo, como sensores. Além disso, os resultados positivos obtidos propiciam oportunidades para novas aplicações e novas pesquisas.

Palavras-chave: corrente iônica; motor a combustão interna; detonação.

ABSTRACT

The laws that restrict pollutant emission levels and the competition among manufacturers fostered the development of more efficient internal combustion engine management systems. However, the lack of sensors to identify the properties of combustion, and which are economically viable, hinders the development of new systems. In order to address such limitations, this investigation proposes using the ionic current sensor with two purposes: identification of combustion and knock phenomena. The combustion identification is currently identified by the camshaft position sensor installed in the motor, which becomes more expensive for the management system. An alternative is using the spark plug, already installed inside the engine cylinder, such as ionization sensor of air/fuel mixture during combustion. Comparing the area under the curve of the ion current signal during combustion to the area under the curve during admission, it was found that it is feasible the use of ionic current signal to replace one feature of the camshaft position sensor. Concerning the identification of the knock phenomenon, it was shown that the use of the ionic current sensor allows the removal of the knock sensor. For this, the correlation between the energy signal in a frequency range of the ionic current harmonic with the energy of the signal from the knock sensor was performed. Therefore, the use of spark plugs as sensors is very promising, in replacement to two existing sensors. Moreover, the positive results provide opportunities for new applications and researches.

Keywords: ion current; internal combustion engine; knock.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Componentes do motor a combustão interna, com ênfase para o virabrequim, eixo de manivelas ou árvore de manivelas.....	21
Figura 2 - Motor de combustão interna ciclo Otto de quatro tempos.....	23
Figura 3 - Cilindros gêmeos 1 e 4 no PMS e cilindros gêmeos 2 e 3 no PMI, demonstração da posição da roda fônica e do eixo de manivelas.	24
Figura 4 - Ponto de ignição ideal (a); Ponto de ignição avançado (b); Ponto de ignição atrasado (c).....	27
Figura 5 - Representação da região da frente de chama estacionária onde ocorre a combustão.....	28
Figura 6 - Câmara de combustão com queima da mistura ar/combustível com frente de chama e detonação dos gases não queimados de combustões anteriores.	30
Figura 7 - Diagrama de pressão indicando: (a) combustão normal; (b) detonação leve e (c) detonação severa.	31
Figura 8 - Pressão na câmara de combustão em função do ângulo de ignição.	35
Figura 9 - Representação do circuito de medida da corrente iônica.	38
Figura 10 - Exemplo da corrente de ionização com suas três fases características.	39
Figura 11 - Sinais sobrepostos da corrente iônica, como a finalidade de identificar a má queima.....	42
Figura 12 - Detecção da falsa má queima e falsa combustão.....	43
Figura 13 - Divisão da vela de ignição com a finalidade de identificar a descarga corona.	44
Figura 14 - Constatação da descarga corona entre as partes internas e a borda de vedação.....	45
Figura 15 - A média dos sinais da corrente iônica para diferentes concentrações dos aditivos. A linha pontilhada cinza é a curva de referência.	47
Figura 16 – Variações no ϕ_{ion} para quatro combustíveis, em que a perturbação da ignição foi removida, medida no motor SAAB. As condições do motor foram 2.000 RPM, $\lambda = 1,0$	49

Figura 17 - Sinais da corrente iônica de quatro diferentes tipos de combustíveis, em que a perturbação da ignição foi removida, medida no motor Ricardo. As condições do motor foram 1.500 RPM, $\lambda = 1.01$, 0% EGR, 5 bar IMEP.	50
Figura 18 - Diagrama do queimador utilizado para estudar a influência da mistura ar/combustível.	51
Figura 19 - Média dos sinais da corrente iônica, adquiridos em um queimador atmosférico para diferentes valores da mistura ar/combustível (λ) e diferentes espaços entre os eletrodos.	52
Figura 20 - Corrente iônica em função da posição angular para uma pressão do coletor de admissão constante de 101.3 kPa com Iso-octano.	53
Figura 21 - Média do sinal da corrente iônica usando Iso-octano como combustível para o motor sobre uma carga variável.	54
Figura 22 <i>Uion</i> , pressão dentro do cilindro e taxa de variação de pressão (valor médio de 100 ciclos), em diferentes pontos de ignição (14, 22, 30 °CA BTDC). O motor é executado sob condição WOT (<i>Wide Open Throttle</i> - Válvula Borboleta Totalmente Aberta) com a velocidade do motor de 3000 rotações/minuto.	55
Figura 23 - Sensor de relutância variável (a); Roda fônica (b); Sinal de saída do sensor (c); Falta proposital de dois dentes (d); Sinal condicionado (e).	58
Figura 24 - Sinal do sensor de fase (azul) em nível alto ou baixo durante a passagem da falta dos dois dentes pela roda fônica, representado pelo sinal da roda fônica (verde).	59
Figura 25 - Representação do circuito de ignição com indicação do ponto em que foi realizada a aquisição do sinal de ignição.	60
Figura 26 - Veículo modelo Polo Sedan ano 2004 instalado sobre o dinamômetro <i>Dynotech 720i</i> durante a realização dos testes.	61
Figura 27 - Diagrama esquemático de medição da corrente iônica, utilizando o diodo de alta tensão reversa.	62
Figura 28 - Circuito de medida da corrente iônica, utilizando o lado da baixa tensão da bobina de ignição.	63
Figura 29 - Circuito para obtenção do sinal da corrente iônica do cilindro 1.	64
Figura 30 - Vela tipo 1: Vela de ignição com a menor área útil do eletrodo.	66
Figura 31 - Vela tipo 2: Vela de ignição com a maior área útil do eletrodo.	66

Figura 32 - Diagrama contendo em azul <i>Aion</i> , e em verde <i>Aion</i> . Os experimentos foram realizados com vela de ignição nova do tipo 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts.....	69
Figura 33 - Histograma contendo <i>Aion</i> e <i>Aion</i> para os experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts.....	70
Figura 34 - Variação da <i>Aion</i> em relação à variação da temperatura, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i> e em azul os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i>	71
Figura 35 - Variação da <i>Aion</i> em relação ao valor de tensão aplicado na vela de ignição, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i> e em azul os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i>	72
Figura 36 - Variação da <i>Aion</i> em relação à variação da área do eletrodo da vela de ignição, experimentos realizados com velas de ignição novas do TIPO I e do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i> e em azul os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i>	73
Figura 37 - Variação da <i>Aion</i> em relação ao tempo de uso da vela de ignição, experimentos realizados com uma vela de ignição nova e outra com 10.000 km de uso, do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i> e em azul os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i>	74
Figura 38 - Variação da <i>Aion</i> em relação à proporção de álcool hidratado na gasolina E0, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2 e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i> e em azul os valores máximo, mínimo e médio para <i>Aion</i>	75
Figura 39 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.....	80

Figura 40 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 1000...	81
Figura 41 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 1000...	82
Figura 42 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.....	83
Figura 43 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.....	84
Figura 44 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela <i>Hanning</i> utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.....	88
Figura 45 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela <i>Hanning</i>	89
Figura 46 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.....	90
Figura 47 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela <i>Hanning</i> utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.....	91
Figura 48 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela <i>Hanning</i>	92
Figura 49 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.....	93
Figura 50 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela <i>Hanning</i> utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.....	94
Figura 51 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela <i>Hanning</i>	95
Figura 52 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.....	96
Figura 53 - Diagrama de dispersão da energia do sinal do sensor de detonação e da energia dos harmônicos na faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz obtido com uma janela <i>Bohman</i>	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Sequência de expansões 1-3-4-2 para um motor quatro tempos com 4 cilindros em linha.....	24
Tabela 2 - Mapa de avanço de ignição, rotação em RPM por pressão no coletor de admissão em quilopascal e resultados em graus representando o avanço de ignição.	37
Tabela 3 - Principais parâmetros do combustível. A última coluna indica em qual dispositivo experimental foi investigado. S - motor SAAB, e B queimador.....	48
Tabela 4 - Número de níveis para cada variável controlável.....	67
Tabela 5 - Funções de ponderação e coeficientes de correlação obtidos.....	97

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA - *Analysis of variance* (Análise da variância).

APMS - Antes do Ponto Morto Superior.

CA - Gases não queimados de combustões anteriores.

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente.

COPPE - Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia.

DOE - *Design Of Experiments* (Projeto de experimentos).

ECU - *Electronic control unit* (Unidade de controle do motor).

EPUSP - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FATEC - Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo.

MA - Mistura admitida.

MON - *Motor Octane Number* (Método do Motor).

ppm - Parte por milhão.

PMI - Ponto Morto Inferior.

PMS - Ponto Morto Superior.

PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores.

RON - *Research Octane Number* (Método de Pesquisa).

RPM - Rotações por minuto.

TPS - *Throttle position sensor* (Sensor de posição da válvula borboleta).

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LISTA DE SÍMBOLOS

V_U – Velocidade com que a mistura ar/combustível entra na frente de chama.

S_L – Velocidade de oxidação da chama laminar.

V_B – Velocidade com que os gases queimados abandonam a reação de oxidação.

CCQ – Círculo de Controle de Qualidade.

CO_2 – Gás carbônico.

λ – Coeficiente lambda.

C_7H_{16} – Heptano.

C_8H_{18} – Isooctano.

Z_b – Ponto de ignição adiantado.

Z_a – Ponto de ignição correto.

Z_c – Ponto de ignição atrasado.

S_{ion} – Sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

$\bar{S}_{ion}$ – Sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão.

U_{ion} – Sinal invertido da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

$\bar{U}_{ion}$ – Sinal invertido da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão.

P_{ion} – Maior ponto do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

A_{ion} – Área sob a curva do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

$\bar{A}_{ion}$ – Área sob a curva do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão.

kPa – kilo Pascal.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	FUNDAMENTOS DOS MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA.....	21
2.2	PRINCÍPIOS DA COMBUSTÃO EM MOTORES CICLO OTTO	25
2.3	COMBUSTÃO ANORMAL	29
2.4	DETERMINAÇÃO DO PODER ANTIDETONANTE DE UM COMBUSTÍVEL 32	
2.5	PRINCÍPIOS BÁSICOS DA IGNIÇÃO.....	33
2.6	CORRENTE IÔNICA.....	37
3	PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO SINAL DA CORRENTE IÔNICA	41
3.1	ÁREA DO ELETRODO DA VELA DE IGNIÇÃO	41
3.2	TENSÃO APLICADA NA VELA DE IGNIÇÃO.....	45
3.3	ADITIVOS UTILIZADOS	46
3.4	PROPORÇÃO ÁLCOOL GASOLINA	47
3.5	MISTURA AR/COMBUSTÍVEL	50
3.6	ROTAÇÃO DO MOTOR.....	52
3.7	PRESSÃO NO COLETOR DE ADMISSÃO	53
4	SENSORES E PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	56
4.1	SENSOR DE DETONAÇÃO	56
4.2	O SENSOR DE ROTAÇÃO.....	57
4.3	SENSOR DE FASE.....	58
4.4	SINAL DE IGNIÇÃO.....	60
4.5	AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS.....	60

4.6	MOTOR UTILIZADO PARA OS EXPERIMENTOS	61
4.7	CIRCUITO UTILIZADO PARA MEDIR A CORRENTE IÔNICA	62
5	IDENTIFICAÇÃO DO CILINDRO QUE SE ENCONTRA EM COMBUSTÃO UTILIZANDO O SINAL DA CORRENTE IÔNICA	65
5.1	VARIÁVEIS DE MAIOR RELEVÂNCIA	65
5.2	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ENSAIOS	67
5.3	ANÁLISE DOS DADOS.....	68
6	IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO DA DETONAÇÃO UTILIZANDO O SINAL DA CORRENTE IÔNICA.....	77
6.1	INTRODUÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER.....	77
6.2	DENSIDADE ESPECTRAL DE ENERGIA DE UM SINAL NÃO PERIÓDICO 85	
6.3	VARIÁVEIS DE MAIOR RELEVÂNCIA	86
6.4	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ENSAIOS	87
6.5	ANÁLISE DOS DADOS.....	87
7	CONCLUSÃO.....	99
	REFERÊNCIAS.....	101
	ANEXOS	106
	ANEXO A - FONTE DE ALIMENTAÇÃO V_{TESTE}	106
	ANEXO B - CONDICIONADOR DO SINAL DE ROTAÇÃO	106

1 INTRODUÇÃO

A concorrência entre as montadoras, que remonta à era fordista, e as mudanças nas legislações vigentes têm criado novos desafios para os profissionais da indústria automobilística. Como exemplo, é possível citar a intervenção japonesa, que entre os anos 60 e 80 implantou novos conceitos tecnológicos (aprimoramento da automação) e ferramentas administrativas (*Kanban*¹, *just in time*², Círculos de Controle de Qualidade - CCQ³ e manutenção preventiva) à indústria automotiva mundial, fazendo com que os Estados Unidos e a Europa tivessem de reavaliar o seu posicionamento frente à tecnologia e administração na produção de automóveis.

Além das ferramentas administrativas da indústria automobilística japonesa, o interesse por novos conceitos tecnológicos no mercado mundial se deu em função da crise do petróleo (década de 70), que atingiu diretamente os Estados Unidos, que costumeiramente produziam veículos com um perfil grande, luxuoso e de alto consumo de combustível. Já o perfil dos veículos japoneses era compacto e econômico, o que proporcionou sua entrada no mercado americano.

Outro exemplo mais recente da concorrência na indústria automobilística ocorreu na crise financeira em 2008, com o crescimento da indústria coreana com veículos de alta qualidade e custos razoáveis. Essa flexibilidade no mercado automobilístico mostra a necessidade de avanços tecnológicos para a indústria se manter competitiva no mercado.

As mudanças nas legislações também impactam diretamente na tecnologia utilizada pela indústria automobilística. Nos Estados Unidos, o ato de 1966 *National Traffic and Motor Vehicle Safety Act*, aprovado pelo Congresso, forçou os fabricantes a melhorar a segurança para os passageiros, a visibilidade do condutor e a frenagem do carro. Em relação às preocupações com o meio ambiente, em 1965 o

¹ Uma sinalização que indica o fluxo de produção.

² Trata-se da produção por demanda e tem a premissa disponibilizar a matéria-prima na quantidade e no tempo necessário.

³ Conjunto de colaboradores voluntários com o mesmo objetivo em prol de discutir a qualidade de produtos e serviços em suas organizações.

Congresso Americano aprovou o ato *The Vehicle Air Pollution and Control Act* que estabeleceu normas para a poluição causada pelos automóveis. Embasado nestas mudanças foi necessário um melhor controle do motor, que foi obtido com a injeção de combustível diretamente no cilindro, em substituição ao antigo sistema de injeção de combustível utilizando carburadores.

No Brasil, o controle de emissões veiculares foi viabilizado pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), que criou em 1986 o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), com o objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes dos veículos automotores e incentivar o desenvolvimento tecnológico no Brasil.

A emissão de poluentes é vista por uma nova perspectiva: os motores mais eficientes são também os menos poluentes quando se trata da emissão de CO₂. Esta nova perspectiva pode ser percebida na Lei nº 12.715, de 17 de setembro de 2012, que dispõe sobre o Programa de Incentivo à Inovação Tecnológica e Adensamento da Cadeia Produtiva de Veículos Automotores - INOVAR-AUTO e no Decreto nº 7.819, de 2012, que define as metas para eficiência energética para o período de 2013 a 2017.

Para terem direito aos benefícios fiscais do INOVAR-AUTO, que prevê um desconto de até 30% no IPI, as montadoras devem cumprir uma série de contrapartidas, como investimentos em pesquisas, desenvolvimento tecnológico e inovação tecnológica. Estas contrapartidas criam um ambiente favorável à pesquisa com o objetivo claro de aumento da eficiência energética dos motores, e consequentemente a redução das emissões de CO₂. Uma das maneiras de aumentar esta eficiência é usar novas estratégias de controle dos motores a combustão interna.

Um dos pontos fundamentais para criação de novas estratégias de controle é o desenvolvimento de novos sensores. Atualmente, uma grande variedade de sensores está instalada nos veículos, entre eles, o sensor de oxigênio instalado na saída dos gases de exaustão, que possibilita um controle em malha fechada da relação ar/combustível; sensor de detonação piezoelétrico instalado no bloco do motor para um controle em malha fechada da detonação; sensor de fase que indica o cilindro em combustão, e o sensor de pressão absoluta instalado no coletor de admissão MAP (Manifold Absolute Pressure) que tem a função de medir a pressão

da massa de ar admitida, permitindo que a unidade de controle do motor calcule corretamente a massa de combustível a ser injetada. Entretanto, a falta de sensores que identifiquem as características da combustão nos veículos é um dos atuais desafios para indústria automobilística.

Existem três possibilidades de sensores instalados dentro da câmara de combustão para medir a pressão: sensor de efeito piezoelétrico, sensores ópticos e sensor de corrente iônica (ANDERSSON, 2002). O sensor piezoelétrico é baseado no fenômeno que ocorre com o cristal de quartzo quando submetido a uma pressão. Os dispositivos ópticos são baseados na tecnologia de fibra óptica ou em câmeras de vídeo de alta velocidade (ROY, KAWAHARA e TOMITA, 2010). Esses dispositivos podem propiciar resultados bastante precisos, mas devido aos altos custos envolvidos, têm seu uso restrito a pesquisas em laboratório. Por outro lado, o sensor de corrente iônica, que mede a ionização da mistura ar/combustível, ainda tem problemas técnicos que impedem sua utilização comercial, apesar de ser um dispositivo de baixo custo.

Desta forma, é bastante promissor explorar o sensor de corrente iônica, por sua potencialidade em ser incorporado em sistemas comerciais. Por isso, ele vem sendo objeto de estudo de vários trabalhos, e os resultados mostram-se promissores para diversas aplicações pela indústria automobilística, entre elas podem ser destacados:

- a determinação da posição do pico de pressão dentro do cilindro baseada na corrente iônica (HELLRING et al., 1998; SHAMEKHI e GHAFARI, 2005; PANOUSAKIS et al., 2006; BYTTNER e HOLMBERG, 2008; MOUDDEN, SEGHOUANE e BOUBAL, 2002; HELLRING et al., 1998b; e GAO et al., 2012);
- a medida da pressão dentro do cilindro utilizando a vela como sensor da corrente iônica (SAITZKOFF et al., 1997);
- a correlação entre o valor máximo da corrente iônica durante o pós chama e a pressão máxima dentro do cilindro (GAO et al., 2010);
- a identificação do fenômeno da detonação utilizando o sinal da corrente iônica (ROTH, MALACZYNSKI e JOHNSON, 2013; ZHU, HASKARA e

WINKELMAN, 2005; KINOSHITA, SAITO, MOGI e NAKATA, 2000; YAMADA, MATSUBARA e KONDO, 1999; e WANG e ZHOU, 2003);

- o controle da recirculação dos gases de escape (BYTTNER e HOLMBERG, 2008);
- a detecção de má queima baseada no sinal de corrente de iônica (FAN et al., 2012; OHASHI, KOIWA, OKAMURA e UEDA, 1999; MERKISZ, BOGUS e GRZESZCZYK, 2001; e WANG e ZHOU, 2003);
- a determinação da mistura ar/combustível utilizando o sinal da corrente iônica (RIVARA, DICKINSON e SHENTON, 2009; MEHRESHA, SOUDER, FLOWERS, RIEDEL e DIBBLE, 2005; e VRESSNER et al., 2004).
- a determinação do início da combustão em motores com ignição por compressão de carga homogênea (*Homogeneous Charge Compression Ignition* - HCCI) baseada no sinal da corrente iônica (DONG et al., 2015).

Este trabalho tem como objetivo geral demonstrar a viabilidade do uso do sensor de corrente iônica como um sensor de baixo custo para combustão em motores ciclo Otto, com as finalidades específicas de substituir a funcionalidade do sensor de fase de identificar o cilindro que se encontra em combustão e identificar o fenômeno da detonação, possibilitando assim a remoção do sensor de detonação.

Para atingir esse objetivo foi realizada uma pesquisa na literatura buscando identificar as variáveis que influenciam no comportamento do sinal da corrente iônica. Após identificar as variáveis de maior influência, foi utilizada a área sob a curva do sinal da corrente iônica para comprovar a ocorrência da combustão. Para identificar o fenômeno da detonação, foram analisados os harmônicos do sinal da corrente iônica durante a ocorrência da detonação.

Após a realização dos experimentos e tratamento dos dados, a investigação mostrou quais as condições em que é possível o uso do sensor de corrente iônica para identificar a combustão, bem como a viabilidade de utilizar o sensor de corrente iônica para a identificação do fenômeno da detonação.

O resultado positivo obtido para a identificação da ocorrência da combustão, além de possibilitar a substituição do sensor de fase, abre oportunidades para novas

aplicações, como a identificação da má queima (*misfire*) e a re-ignição da mistura não queimada totalmente em ciclos anteriores durante o funcionamento do motor. A viabilidade observada na identificação da detonação possibilita em trabalhos futuros a elaboração de algoritmos de controle de avanço de ignição em malha fechada, aumentando a eficiência dos motores a combustão interna.

O trabalho está apresentado da seguinte maneira: o capítulo 2 trata de conceitos teóricos necessários para interpretar o comportamento do sinal da corrente iônica, que é abordado no capítulo 3. O capítulo 3 mostra as variáveis tratadas neste trabalho que afetam o sinal da corrente iônica. O capítulo 4 descreve os princípios e características técnicas dos sensores usados para monitorar as variáveis necessárias. Os capítulos 5 e 6 mostram os resultados obtidos, e o capítulo 7 as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 FUNDAMENTOS DOS MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

O trabalho realizado pelos motores a combustão interna provém da transformação da energia térmica, obtida a partir da queima da mistura ar/combustível em energia mecânica. Durante a queima da mistura, ocorre o aumento da pressão interna da câmara de combustão, impulsionando os pistões que movimentarão o virabrequim, eixo de manivelas ou árvore de manivelas (Figura 1).

Figura 1 - Componentes do motor a combustão interna, com ênfase para o virabrequim, eixo de manivelas ou árvore de manivelas.

Fonte: Autor.

Dentre os motores a combustão interna, destacam-se os movidos a gasolina ou a álcool, que possuem a ignição da mistura realizada por centelha, sendo a vela de ignição, instalada na parte superior do cilindro, a responsável pelo início da combustão nesse tipo de motor. O motor utilizado neste trabalho é classificado como motor de combustão interna de quatro tempos, sendo esses tempos descritos a seguir:

- admissão: ocorre com a válvula de admissão aberta e a válvula de escape fechada, o pistão realiza um movimento descendente do Ponto Morto Superior (PMS) ao Ponto Morto Inferior (PMI), admitindo a mistura ar/combustível (Figura 2a);
- compressão: logo após a admissão, com as válvulas de admissão e escape fechadas, o pistão executa o movimento ascendente do PMI para o PMS, comprimindo a mistura ar/combustível (Figura 2b);
- combustão: após a compressão da mistura, uma centelha provocada pela vela de ignição inicia a queima da mistura ar/combustível, que resultará em um grande aumento na pressão, empurrando o pistão do PMS para PMI (Figura 2c);
- expulsão ou escape: ocorre após a combustão com a válvula de escape aberta. O cilindro move-se do PMI para o PMS, expulsando os gases provenientes da queima da mistura ar/combustível (Figura 2d).

Figura 2 - Motor de combustão interna ciclo Otto de quatro tempos.

Fonte: Autor.

Outra classificação dos motores a combustão interna é a ordem de ignição. Ela é definida como a sequência de explosões que ocorrem nos cilindros, e tem como objetivo o equilíbrio dinâmico e térmico do motor, em que o primeiro diminui as vibrações decorrentes das forças transmitidas para o bloco do motor durante a combustão nos cilindros e o segundo distribui o calor.

O motor utilizado neste trabalho possui a sequência de explosões 1-3-4-2, como mostrado na Tabela 1, que indica ainda a posição angular de cada tempo do motor durante duas voltas. A Figura 3 indica os cilindros 1 e 4 no PMS, e os cilindros 2 e 3 no PMI. Durante o giro do motor, o eixo de manivelas (Figura 3f) movimenta os cilindros de forma que os cilindros gêmeos 1 e 4 ou 2 e 3 estarão sempre na mesma posição, porém em tempos diferentes. Como a determinação da posição angular do eixo de manivelas é feita pela roda fônica (Figura 3e), não é possível diferenciar o tempo em que os cilindros gêmeos se encontram. Em alguns casos, essa diferenciação é feita pelo sensor de fase. Este trabalho explora a possibilidade do uso da corrente iônica para identificar o cilindro que se encontra em combustão.

Tabela 1- Sequência de expansões 1-3-4-2 para um motor quatro tempos com 4 cilindros em linha.

Cilindro	0 - 180 (graus)	180 - 360 (graus)	360 - 540 (graus)	540 - 720 (graus)
1	Combustão	Escape	Admissão	Compressão
2	Escape	Admissão	Compressão	Combustão
3	Compressão	Combustão	Escape	Admissão
4	Admissão	Compressão	Combustão	Escape

Fonte: Autor.

Figura 3 - Cilindros gêmeos 1 e 4 no PMS e cilindros gêmeos 2 e 3 no PMI, demonstração da posição da roda fônica e do eixo de manivelas.

Fonte: Autor.

2.2 PRINCÍPIOS DA COMBUSTÃO EM MOTORES CICLO OTTO

A combustão é uma reação química entre combustível e comburente; que no caso dos motores a combustão interna ocorre entre ar e combustível. Para que ocorra uma combustão completa ou estequiométrica, todo o oxigênio deve ser consumido para oxidar completamente o combustível. A exemplo desta combustão, a reação entre o iso-octano e oxigênio é dada por:

Nesse caso, para que ocorra a queima completa da mistura, ou a transformação de todo o combustível e comburente em dióxido de carbono e água, são necessárias 12,5 moléculas de oxigênio para cada molécula de iso-octano.

Conhecendo a proporção teórica para a queima completa, é possível definir o coeficiente lambda (λ), dado por:

$$\lambda = \frac{\text{mistura ar/combustível admitida nos cilindros}}{\text{mistura estequiométrica}}$$

Utilizando esta identidade, é possível obter três valores diferentes para λ :

- $\lambda > 1$, em que a mistura ar/combustível admitida nos cilindros possui uma quantidade maior de oxigênio do que o necessário para consumir todo combustível. Ela é denominada mistura pobre;
- $\lambda < 1$, o contrário do anterior, a mistura ar/combustível admitida nos cilindros possui uma quantidade menor de oxigênio do que o necessário para consumir todo combustível. Ela é denominada mistura rica;
- $\lambda = 1$, a mistura ar/combustível admitida nos cilindros permite a oxidação de todo o combustível e comburente.

Nos motores de ignição por centelha, a mistura ar/combustível entra nos cilindros através da válvula de admissão e, depois de comprimida, o sistema de ignição provocará a descarga elétrica da vela de ignição. Desenvolve-se, então, uma

frente de chama que se propaga pela mistura até chegar às paredes do cilindro, onde se extingue. No início desta frente de chama, a energia liberada é pequena, o que pode ser identificado pelo pequeno aumento da pressão na câmara de combustão. Entretanto, com o desenvolvimento desta frente de chama, a pressão do cilindro aumenta e, mesmo antes de terminada toda a queima da mistura, atinge o seu valor máximo após o PMS. Depois deste instante de máxima pressão, a pressão começa a diminuir até o fim da combustão, a válvula de escape já está aberta e a pressão interna da câmara de combustão é baixa (HEYWOOD, 2011).

Diversos parâmetros, como a composição da mistura, a fração do volume de mistura queimada e a composição da mistura próxima à vela de ignição no instante da centelha, variam entre diferentes ciclos (BOSCH, 2005). Isso faz com que a evolução da chama seja única em cada ciclo, proporcionando picos de pressão em diferentes instantes. Desta forma, o ponto de ignição deve ser ajustado a cada ciclo, de maneira que o pico de pressão dentro dos cilindros proporcione o maior torque do motor com o menor consumo de combustível.

Para que o pico de pressão ocorra após o PMS a descarga elétrica da vela de ignição deve ocorrer de forma que a combustão inicie antes que a compressão termine. O ponto de ignição sempre ocorre antes do PMS, porém, em relação a este ponto (Figura 4a), existem duas situações:

- avanço da ignição: a centelha da vela de ignição ocorre antes do ponto de ignição (Figura 4b);
- atraso da ignição: o contrário da condição anterior, ou seja, a centelha ocorre depois do ponto de ignição (Figura 4c).

Figura 4 - Ponto de ignição ideal (a); Ponto de ignição avançado (b); Ponto de ignição atrasado (c).

Fonte: Autor.

Um sistema de controle de ignição deve sempre otimizar o instante da ignição, produzindo o melhor resultado no motor. Este instante depende de diversos parâmetros: velocidade de propagação da frente de chama, trajetória da chama por meio da câmara de combustão, condições de operação, propriedades da mistura ar/combustível (HEYWOOD, 2011), dentre outros.

A frente de chama é a região onde ocorre a combustão, podendo ser estacionária ou estar em movimento. No caso do escoamento laminar com frente de chama estacionária, a mistura ar/combustível entra na frente de chama com velocidade V_u e a oxidação ocorre com velocidade de chama laminar S_L , os gases queimados abandonam a reação com velocidade V_s . Esta velocidade é maior, pois a densidade dos gases queimados é menor que a densidade da mistura. A Figura 5 apresenta esta frente de chama com escoamento laminar.

Figura 5 - Representação da região da frente de chama estacionária onde ocorre a combustão.

Fonte: Autor.

A velocidade de chama laminar depende da mistura ar/combustível e, para a maioria dos combustíveis, fica entre 30 e 50 cm/s. Para valores λ próximos da relação estequiométrica, pode-se encontrar a máxima velocidade laminar, que diminui para misturas mais pobres. A velocidade de propagação da frente de chama também depende de outros parâmetros: ela varia proporcionalmente tanto em relação à temperatura inicial da mistura ar/combustível como em relação à pressão (GUIBET, 1999).

Diferentemente de o escoamento laminar com frente de chama estacionária, os motores a combustão interna têm um escoamento turbulento, e a frente de chama está em movimento. Como a velocidade da frente de chama no escoamento turbulento é maior, o tempo necessário para o pistão se mover do instante da ignição até o pico de pressão dentro do cilindro pode ser menor, possibilitando uma maior rotação do motor (GUIBET, 1999).

Enquanto a velocidade da chama laminar depende apenas das propriedades térmicas e químicas da mistura ar/combustível, a velocidade da chama no escoamento turbulento depende de muitas outras propriedades, entre elas pode-se enfatizar:

- as características do escoamento;
- as condições térmicas locais;
- a condição da mistura (homogênea ou estratificada);

- a porcentagem de gases residuais na câmara de combustão;
- a eficiência térmica do motor.

2.3 COMBUSTÃO ANORMAL

Os motores a combustão interna são chamados de motores a explosão. Mesmo sendo uma denominação inadequada, ela leva a refletir sobre a diferença entre combustão e explosão. A primeira é caracterizada pela queima controlada com frente de chama, enquanto que a explosão é caracterizada por uma queima descontrolada sem frente de chama definida, ou seja, uma combustão anormal. Os fenômenos de combustão anormal mais comuns são a detonação e a ignição de superfície. Quando esses eventos ocorrem, um ruído característico é gerado, proveniente da ressonância da câmara de combustão, e é transmitido para o motor. Essa ressonância pode causar uma queda de desempenho ou até um dano maior ao motor.

Durante uma combustão normal, a mistura ar/combustível queima de uma maneira uniforme, enquanto na combustão anormal do tipo detonação uma ignição espontânea de gases de combustões anteriores provocam uma queima descontrolada.

A Figura 6 mostra os gases não queimados de combustões anteriores (CA) e a mistura admitida (MA). Quando ocorre a centelha, inicia-se a queima da mistura admitida com frente de chama, fenômeno chamado de combustão normal. Com o desenvolvimento desta frente de chama e devido ao cilindro nesse instante realizar um movimento ascendente, ocorre um grande aumento de pressão e de temperatura ocasionando a ignição espontânea de CA, combustão anormal do tipo detonação.

Figura 6 - Câmara de combustão com queima da mistura ar/combustível com frente de chama e detonação dos gases não queimados de combustões anteriores.

Fonte: Autor.

Além dos danos causados nos cilindros, a detonação causa uma redução do trabalho realizado pelo motor. Isso se deve ao fato de que, ao invés de ocorrer um aumento de pressão regular no cilindro criando um movimento descendente no pistão, ocorrem vários picos de pressão de maneira não uniforme. Devido à inércia do sistema, esses picos de pressão de pequena duração não são convertidos em trabalho. A energia liberada durante a detonação provoca flutuações de pressão de elevada frequência que podem ser percebidas por um ruído característico da detonação. Assim, a energia que deveria ser transformada em trabalho é dissipada em forma de ondas de choque (HEYWOOD, 2011).

A

Figura 7 mostra um diagrama de pressão em que a detonação ocorre em função do avanço da ignição. Na parte (a) da figura, a ignição ocorre em -28° . Antes do Ponto Morto Superior (APMS) e não há detonação. Na parte (b) a ignição ocorre em -30°

APMS e a detonação possui uma intensidade menor do que a observada na parte (c), em que é possível observar os picos de pressão de pequena duração que não serão convertidos em trabalho.

Figura 7 - Diagrama de pressão indicando: (a) combustão normal; (b) detonação leve e (c) detonação severa.

Fonte: (Heywood, 2011).

A ocorrência de um número muito elevado de detonações durante toda a vida útil do motor pode causar deformações na câmara de combustão.

Durante o funcionamento do motor, estas deformações causam o aparecimento de pontos quentes dentro da câmara de combustão que levam ao aquecimento anormal das válvulas, velas, ou qualquer outro ponto com temperatura muito elevada.

Estes pontos de elevadas temperaturas provocam uma combustão anormal do tipo ignição de superfície. Desta forma é possível afirmar que a ignição de superfície é um evento consequente de um número muito grande de detonações.

2.4 DETERMINAÇÃO DO PODER ANTIDETONANTE DE UM COMBUSTÍVEL

A octanagem ou índice de resistência a detonação indica o poder antidetonante dos combustíveis usados em motores a combustão interna. Trata-se da capacidade dos combustíveis de resistir à ignição espontânea ou ignição do combustível sem a necessidade de uma centelha.

A escala utilizada para determinar o número de octanas é baseada no normal heptano (n-heptano) C_7H_{16} , com valor zero, e no de isooctano (trimetilo pentano) C_8H_{18} cujo valor atribuído é igual 100. Com essa escala, é possível estabelecer uma relação percentual para os combustíveis. Por exemplo, uma gasolina de octanagem 90 apresenta resistência de detonação equivalente a uma mistura de 90% de isooctano e 10% de n-heptano. Como o isooctano não é o combustível que apresenta a maior resistência à detonação, é possível obter valores superiores a 100 para a octanagem.

Aditivos como o tetraetilchumbo e o tetrametilchumbo são usados para regular a octanagem, porém devido a sua toxicidade, em alguns países são substituídos por álcool etílico, como ocorre no Brasil.

Para determinar o teor de octanagem são usados dois procedimentos: o Método de Pesquisa *Research Octane Number* (RON) e o Método do Motor *Motor Octane Number* (MON). O método de MON é realizado com o motor a plena carga e em alta rotação, enquanto o método RON é realizado em baixa rotação (BOSCH, 2005).

No Brasil, o índice usado para medir a resistência à detonação do combustível é o Índice Antidetonante (IAD) dado por:

$$IAD = (MON + RON)/2$$

A influência destes aditivos no sinal da corrente iônica será discutida com mais detalhes na seção 3.3 deste trabalho.

2.5 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA IGNIÇÃO

O sistema de ignição é formado por velas, bobinas e cabos de ignição. A vela de ignição, inserida dentro da câmara de combustão, contém uma das partes mais importantes para a formação da centelha, o eletrodo. A vela de ignição deve ser fabricada de forma a suportar altas tensões de ignição, altas temperaturas dentro da câmara de combustão e corrosão química. A bobina de ignição é um transformador com o primário ligado à bateria do carro por um *driver* da unidade de controle do motor (UCM) e o secundário ligado à vela de ignição, por meio dos cabos de vela. Tais cabos possuem resistência a altas temperaturas, alta isolamento e supressão de interferências eletromagnéticas produzidas pela alta tensão necessária para criar a centelha nos eletrodos da vela de ignição.

A centelha dentro da câmara de combustão ocorre quando uma tensão suficientemente elevada rompe o dielétrico entre os eletrodos da vela de ignição, sendo que o valor desta tensão dependerá de:

- distância dos eletrodos da vela de ignição;
- densidade da mistura ar/combustível;
- ponto de ignição.

Para garantir a queima da mistura em todas as condições de funcionamento do motor, é necessário que o sistema de ignição forneça uma quantidade suficiente de energia para a vela de ignição. Para uma mistura ar/ combustível na faixa estequiométrica, por exemplo, é necessária uma energia de 0,2 milíjoule, enquanto que são necessários 3 milíjoule para a ignição de misturas mais ricas ou mais pobres. Além da mistura ar/ combustível, a energia da faísca vai depender da concepção do motor, injeção no coletor de admissão ou injeção direta de combustível. Devido a estes pontos, no funcionamento real do motor, a energia da faísca do sistema de ignição deverá estar numa faixa de 30 a 100 milíjoule, disponibilizando, assim, uma quantidade suficiente de energia para que a mistura ar/ combustível queime totalmente em qualquer condição que o motor esteja operando (BOSCH, 2005).

O tempo de carga da bobina de ignição influencia nos níveis de tensão e de energia disponíveis na vela de ignição. Portanto, foi fixado o tempo de carga suficiente para todas as condições de operação do motor. Este tempo de carga foi obtido por experimentos realizados com a UCM original do fabricante.

A função da ignição nos motores a combustão interna é iniciar a queima da mistura ar/combustível. Entretanto, encontrar o ponto exato onde se deve iniciar esta queima não é uma tarefa simples, pois uma ignição errada pode levar a problemas como:

- falhas na combustão;
- danos, ou até mesmo, destruição do catalisador;
- emissão de poluentes em níveis indesejáveis;
- consumo de combustível elevado;
- diminuição na potência do motor.

Para determinar o ponto exato da ignição ou o ponto onde se deve iniciar a centelha, o PMS é usado como referência. A Figura 8 mostra a pressão na câmara de combustão para PMS a 0° . Os pontos de ignição adiantados são os que possuem um valor angular maior, assim o ponto Z_b está mais adiantado em relação ao ponto Z_a , e os pontos de ignição atrasados são os pontos de menor valor angular, assim o ponto Z_c está mais atrasado em relação ao ponto Z_a . O ponto mais adiantando possível é definido pelo limite da detonação, e o ponto mais atrasado, pela máxima temperatura dos gases de escape. O torque, as emissões de gases de escape e o consumo de combustível são também influenciados pelo ponto de ignição.

Figura 8 - Pressão na câmara de combustão em função do ângulo de ignição.

Fonte: (Bosch, 2005).

Para manter a ignição no ponto ideal, os sistemas de ignição eletrônica possuem, gravados em sua memória, mapas de avanço de ignição, que são obtidos em dinamômetros e levam em consideração a rotação e a carga a que está submetido o motor. A variação do tempo que a mistura ar/ combustível leva para queimar é relativamente pequena se comparada à variação de velocidade dos pistões quando ocorre um aumento na rotação do motor. Desta forma, quanto maior a rotação do motor, mais antecipada deve ser a centelha, para que o pico de pressão de cilindro ocorra no ponto ideal.

A potência produzida pelo motor, o consumo de combustível e a emissão de gás de escape são parâmetros diretamente ligados ao ponto de ignição, uma vez que adiantar a ignição aumenta a potência e reduz o consumo de combustível. O ato de adiantar a ignição encontra o seu limite na emissão de hidrocarbonetos e também na detonação que poderá causar severos danos ao motor. Portanto, uma estratégia do controle eletrônico da ignição seria manter o ponto de ignição em uma região

segura, longe do ponto de ocorrência da detonação. Entretanto, esta distância segura resultaria em um comprometimento no consumo de combustível e um baixo torque. Para encontrar um ponto ideal, é necessário usar uma técnica de regulação da detonação, o que permitiria aumentar a compressão do motor, melhorando simultaneamente o consumo de combustível e o torque. Para esta técnica, é necessário usar um sistema completo de regulação que possui os seguintes sistemas:

- sensor de detonação;
- sistema de avaliação do sinal;
- sistema de reconhecimento da detonação;
- regulação do ângulo de ignição.

Quando a detonação é detectada pelo sistema de controle, é realizado um atraso na ignição. Quando este fenômeno cessa, a ignição é adiantada até um valor seguro. Desta maneira, é possível manter a operação do motor em um limite cujos benefícios foram mencionados anteriormente. O uso do sensor de detonação possibilita o controle do atraso da ignição individualmente para cada cilindro e possibilita também a utilização de combustíveis com baixa resistência a detonação.

Sendo os mapas de avanço de ignição segredos industriais, o grupo EPUSP/FATEC desenvolveu uma metodologia para extrair informações do mapa de avanço de ignição presente na eletrônica de controle do veículo usado para este trabalho. Com o veículo em funcionamento, foi medida a posição angular em graus do início da centelha do cilindro 1, considerando o PMS deste cilindro como referência (zero grau), a rotação do motor em RPM, e a pressão do coletor de admissão em quilopascal. Com estas informações, foi criado o mapa de avanço de ignição, utilizado neste trabalho, apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Mapa de avanço de ignição, rotação em RPM por pressão no coletor de admissão em quilopascal e resultados em graus representando o avanço de ignição.

Rot. (2) / PCA										
(1)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
500	-6°	-6°	-7°	-7°	-7°	-7°	-7°	-7°	-7°	-7°
700	-9°	-9°	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°	-10°
1300	-10°	-10°	-13°	-13°	-13°	-13°	-13°	-13°	-11°	-10°
2000	-15°	-15°	-15°	-15°	-15°	-15°	-15°	-15°	-14°	-13°
3000	-22°	-21°	-20°	-19°	-16°	-16°	-16°	-16°	-16°	-16°
4000	-29°	-27°	-24°	-21°	-18°	-18°	-18°	-18°	-18°	-18°
5000	-31°	-29°	-27°	-24°	-19°	-19°	-19°	-19°	-19°	-19°
6000	-31°	-29°	-27°	-24°	-19°	-19°	-19°	-19°	-19°	-19°

(1) PCA - Pressão no coletor de admissão - kPa.

(2) Rotação - RPM.

Fonte: autor⁴.

2.6 CORRENTE IÔNICA

As chamas provenientes da combustão possuem condutividade elétrica e podem ser afetadas por um campo elétrico. A queima de hidrocarbonetos gera íons que, quando submetidos a um campo elétrico, se movem criando uma pequena corrente, chamada de corrente iônica.

Conforme discutido na seção 2.2, em uma combustão ideal, as moléculas dos hidrocarbonetos reagem com o oxigênio e geram dióxido de carbono e água. Entretanto, antes que essa transformação aconteça, diversos processos sequenciais ocorrem, envolvendo muitas espécies químicas intermediárias.

⁴ Mapa de avanço de ignição desenvolvido em conjunto com o grupo EPUSP/FATEC

As investigações sobre essas espécies químicas intermediárias que dão origem à corrente iônica, não são recentes. CALCOTE, (1957), CALCOTE (1963) e FIALKOV (1992) realizaram estudos da corrente iônica usando uma chama em estado de equilíbrio. Como esses resultados não podem ser transportados para as combustões que ocorrem nos cilindros dos motores ciclo Otto, nos quais as altas pressões e temperaturas encontradas durante a combustão fazem com que a ionização térmica desempenhe um papel relevante, novos estudos sobre a formação corrente iônica em motores a combustão interna vêm sendo realizados. Entretanto, para estes casos, os mecanismos cinéticos químicos ainda não são completamente conhecidos (ANDERSSON, 2002; REINMANN et al., 1998). Esta incerteza não tem impedido o uso da corrente iônica como ferramenta de pesquisas empíricas.

A realização prática de um sensor iônico em motores a combustão interna é obtida com a utilização da vela de ignição. A

Figura 9 mostra a vela de ignição utilizada como sensor iônico, a fonte de tensão necessária para criação do campo elétrico na câmara de combustão (*Battery*), os eletrodos da vela de ignição inseridos dentro da câmara de combustão (*Electrodes*), as cargas livres presentes na câmara de combustão na região da mistura já queimada (e^-), a propagação da frente de chama (*Flame front*) e o resistor utilizado para obter o sinal da corrente iônica.

Figura 9 - Representação do circuito de medida da corrente iônica.

Fonte: (Andersson, 2002).

A Figura 10 mostra uma curva típica do sinal da corrente iônica e sua divisão, em que a fase de ignição (*Ignition Phase*) começa com a carga da bobina e termina com o fim da faísca. A fase frente de chama (*Flame-Front*) aparece durante o deslocamento da frente de chama no eletrodo da vela de ignição, e a fase pós chama (*Post-Flame*) reflete os gases queimados atrás da frente de chama (ANDERSSON, 2002).

Figura 10 - Exemplo da corrente de ionização com suas três fases características.

Fonte: (Andersson, 2002).

O segundo pico, fase pós chama, também conhecido como pico térmico, recebeu esse nome devido a uma abordagem que sugere que a ionização térmica do óxido nítrico seja a fonte de carga livre na câmara de combustão, devido à alta correlação entre a posição deste segundo pico com a pressão dentro do cilindro do motor (ANDERSSON, 2002; GAO et al., 2015).

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram tratadas características importantes, tanto do sinal da corrente iônica como do sensor usado para obter este sinal. Abaixo, são apresentadas as definições dos sinais que foram abordados neste trabalho:

S_{ion} , sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão, trata-se da corrente elétrica representada pela letra "I" na Figura 9.

$\bar{S}_{ion}$, sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão.

U_{ion} , sinal invertido da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão, trata-se da queda de tensão sobre o resistor R da

Figura 9.

$\bar{U}_{ion}$, sinal invertido da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão, trata-se da queda de tensão sobre o resistor R da

Figura 9.

P_{ion} , maior ponto do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

$A_{ion} = \int_{t_0}^{t_f} S_{ion} \cdot dt$, trata-se da área sob a curva do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em combustão.

$\bar{A}_{ion} = \int_{t_0}^{t_f} S_{ion} \cdot dt$, trata-se da área sob a curva do sinal da corrente iônica quando o cilindro se encontra em admissão.

A partir destas definições, a curva apresentada na Figura 10 trata-se de S_{ion} , o sinal presente na Figura 11, representado como *combustion*, trata-se do U_{ion} , e o sinal presente na Figura 12 trata-se também de U_{ion} .

3 PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NO SINAL DA CORRENTE IÔNICA

Este capítulo aborda a influência que o sinal da corrente iônica sofre devido à variação da área do eletrodo da vela de ignição, da tensão aplicada na vela de ignição, dos aditivos utilizados nos combustíveis, da proporção álcool/gasolina e da relação ar/combustível.

3.1 ÁREA DO ELETRODO DA VELA DE IGNIÇÃO

Doi et al. (2012) especificam as características necessárias de uma vela de ignição para que a detecção da má queima (*misfire*) de combustível seja possível, usando o U_{ion} . Para realizar esta detecção de maneira precisa durante toda a vida útil da vela de ignição, os autores afirmam que é necessário que o eletrodo da vela possua uma área de superfície mínima de $11,8 \text{ mm}^2$, considerando a degradação da vela durante o uso. Esta investigação ainda identificou a causa do ruído e uma maneira de inibi-lo.

A Figura 11 evidencia os dois sinais esperados, o U_{ion} (*Combustion*) e o sinal da corrente iônica quando ocorre uma má queima de combustível (*Misfire*). É possível verificar o início da carga da bobina de ignição e o instante em que se inicia a descarga da vela de ignição (onda quadrada superior). Pode-se, também, visualizar a janela de detecção (*Detection area*), usada para identificar ambos os sinais.

Figura 11 - Sinais sobrepostos da corrente iônica, como a finalidade de identificar a má queima.

Fonte: (Doi, Nakamura, Hanashi e Hashizume, 2012).

A Figura 12 apresenta duas situações que são adversas aos sinais esperados. A primeira situação indica a ocorrência de uma má queima que não correu, e na segunda a existência de um ruído conduz a concluir que ocorreu uma combustão normal, que na verdade não ocorreu.

Na Figura 12, o quadro 1 (*false misfire detection*) indica, por meio da curva pontilhada, a amplitude do sinal esperado para o U_{ion} , e, na curva contínua, a amplitude mínima do sinal da corrente iônica invertida durante uma combustão (U_{ion_min}). Caso o U_{ion} apresente uma amplitude menor que U_{ion_min} , será considerado que ocorreu uma má queima. Os autores afirmam que a causa para a diferença entre os sinais se deve à pequena área do eletrodo da vela de ignição. O quadro 2 da mesma figura mostra o problema gerado pelo ruído em que, neste caso, o sinal proveniente da vela de ignição, ou seja, o ruído (linha contínua no gráfico) possui uma amplitude do sinal maior que o esperado (linha pontilhada no gráfico).

Figura 12 - Detecção da falsa má queima e falsa combustão.

Fonte: (Doi, Nakamura, Hanashi e Hashizume, 2012).

Doi et al. (2012) propõem uma margem de segurança entre o sinal (U_{ion}) e o ruído ($U_{ion_máQueima}$).

$$U_{ion}/U_{ion_máQueima} > 2$$

Onde $U_{ion_máQueima}$ é o sinal da corrente iônica invertido durante a combustão, porém com a ocorrência da má queima. Esta condição permite verificar a ocorrência de uma queima ou não, dentro de uma margem de segurança satisfatória.

Entretanto, esses autores não esclarecem como foram quantificados U_{ion} , $U_{ion_máQueima}$ e U_{ion_min} . Por outro lado, o trabalho de (MERKISZ, BOGUS e GRZESZCZYK, 2001) mostra que pode ser realizada a identificação da má queima usando A_{ion} e também P_{ion} .

Outro ponto relevante se refere ao tempo de vida útil da vela de ignição (Doi et al., 2012). Verificou-se que o sinal da corrente iônica diminui com o uso do motor. Isto é atribuído a dois fatores: a redução da área superficial causada pelo desgaste do eletrodo e a adesão de partículas no centro do eletrodo. O desgaste do eletrodo não pode ser evitado, por causa da descarga da vela e da oxidação em uma atmosfera de alta temperatura, durante o funcionamento do motor. A adesão de partículas no centro do eletrodo também não pode ser evitada, pois ocorre devido ao

combustível utilizado e seu aditivo não serem totalmente queimados durante algumas combustões incompletas.

Os autores (Doi et al., 2012) apresentam duas possibilidades para explicar o ruído gerado em U_{ion} : a primeira seria o ruído ocorrer devido à centelha usada para a ignição da mistura, e a segunda seria a descarga corona. Os autores não investigaram a primeira possibilidade por acreditarem que um problema ocorrido na fase de ignição do sinal da corrente iônica não poderia afetar as fases de frente de chama e pós chama do sinal.

A possibilidade explorada pelos autores foi a alta tensão aplicada na vela para a ignição da mistura carregar eletricamente todo o isolador da vela. Os autores dividiram a vela de ignição em três partes para identificar a origem da maior fonte geradora de descarga corona: o perfil corrugado e o isolador formam a parte (A), partes internas e a borda de vedação formam a parte (B), e o nariz do isolador forma a parte (C), mostrados na Figura 13.

Observando o estado do isolador durante o momento de detecção da corrente iônica, depois da descarga da vela de ignição, os autores evidenciaram frequentes descargas coronas, entre a borda de vedação e o isolador, especialmente na posição (B), Figura 14. Assim, concluíram que o movimento de carga elétrica pela descarga corona, que ocorria entre a borda de vedação e o isolador, principalmente na posição (B), foi o principal fator de geração do ruído.

Figura 13 - Divisão da vela de ignição com a finalidade de identificar a descarga corona.

Fonte: (Doi, Nakamura, Hanashi e Hashizume, 2012).

Figura 14 - Constatação da descarga corona entre as partes internas e a borda de vedação.

Fonte: (Doi, Nakamura, Hanashi e Hashizume, 2012).

Doi et al. (2012) propõem um circuito RC para a simulação da descarga corona na vela de ignição, e também técnicas para construção de uma vela de ignição que não apresente o problema do efeito corona.

Com a suspeita de que o ruído provocado pelo efeito corona não tenha um valor significativo, neste trabalho foi comparada a A_{ion} com a $\bar{A}_{ion}$, com velas de ignição de uso comercial.

A presença deste ruído não deverá fazer com que a $\bar{A}_{ion}$ apresente uma amplitude maior que a A_{ion} , viabilizando a identificação do fenômeno da combustão com o uso do sinal da corrente iônica e descartando a necessidade da construção de um novo modelo de vela de ignição.

3.2 TENSÃO APLICADA NA VELA DE IGNIÇÃO

O nível de tensão contínua aplicada na vela de ignição foi levado em consideração neste trabalho, pois não há consenso na literatura que indique um valor ideal. Os autores Bray e Collings (1991) utilizaram uma fonte de 200 Volts para obter o U_{ion} . Já em Docquier e Candel (2002), observa-se uma amplitude muito maior com níveis de tensão podendo variar de 100 a 1200 Volts. Devido a esta falta

de consenso, neste trabalho foram realizados testes com três níveis de tensões diferentes 50, 150 e 300 Volts.

3.3 ADITIVOS UTILIZADOS

A introdução da gasolina sem chumbo no mercado brasileiro, em 1989, ocorreu devido a aspectos ambientais e também ao fato dos catalisadores de três vias não serem eficientes na redução de constituintes do chumbo. Assim, novos aditivos que, além de aumentarem a octanagem da gasolina, limpam e lubrificam os assentos das válvulas para um bom funcionamento do motor, estão sendo usados (REINMANN et al., 1998). Esses aditivos contêm diversos metais, tais como Sódio (Na) e Potássio (K). A presença de metais alcalinos dentro do cilindro do motor afeta as propriedades elétricas da chama e, conseqüentemente, a corrente iônica. A Figura 15 mostra sinais da corrente iônica com 25 a 400% da concentração recomendada pelo aditivo, sendo que, nesse caso 100% é igual a 12 ppm de Sódio (Na) no combustível que equivale a 0,36 ppm da mistura estequiométrica (REINMANN et al., 1998).

Figura 15 - A média dos sinais da corrente iônica para diferentes concentrações dos aditivos. A linha pontilhada cinza é a curva de referência.

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

De acordo com a Figura 15, há um aumento na corrente iônica com o aumento da concentração de Na. Entretanto, fica claro que este aumento não é linear, e os autores afirmam que um aumento de 100% na concentração de Na implica em um pico térmico três vezes maior da corrente iônica (segundo pico). Com um aumento na concentração de 200%, o aumento do segundo pico é consideravelmente menor.

3.4 PROPORÇÃO ÁLCOOL GASOLINA

Reinmann et al. (1998) comentam as diferenças nas características da queima do metanol e do etanol em relação à gasolina. Devido ao baixo poder calórico desses compostos em relação à gasolina (Tabela 3), e o alto valor de octanagem, (Tabela 3), pode-se esperar uma diferença no sinal da corrente iônica.

Além desses elementos, a Figura 16 mostra como quatro combustíveis diferentes afetam o S_{ion} , e a Tabela 3 mostra os principais parâmetros dos combustíveis utilizados.

Tabela 3 - Principais parâmetros do combustível. A última coluna indica em qual dispositivo experimental foi investigado. S - motor SAAB, e B queimador.

combustível	H_{low} (MJ/kg)	RON	C/H	Equipamento
isooctano	44,3	100	0,44	S, B
cal-phase II	39,3	95	0,51	B
gasolina	44	95	0,53	S
tolueno	40,6	120	0,88	S, B
etanol	26,9	107	0,33	S, B
metanol	20	106	0,25	B

Fonte: (Adaptada de Reinmann et al., 1998).

Nos casos do isooctano, tolueno e gasolina, é possível observar que a principal mudança ocorre na amplitude do sinal, e o formato é mantido praticamente inalterado. Entretanto, no caso do etanol, além da mudança na amplitude, há uma grande mudança no formato do sinal da corrente iônica.

Figura 16 – Variações no S_{ion} para quatro combustíveis, em que a perturbação da ignição foi removida, medida no motor SAAB. As condições do motor foram 2.000 RPM, $\lambda = 1,0$

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

Em contraste ao que foi discutido anteriormente, a Figura 17 mostra que o combustível *cal-phase II* (gasolina padrão Fase II californiana) tem um baixo teor de combustível aromático. Entretanto, este combustível resulta numa corrente iônica mais próxima do isooctano. Os dois sinais da corrente iônica do isooctano e tolueno parecem representar as fronteiras dentro das quais ocorrerão todas as correntes iônicas dos diferentes tipos de gasolina. A posição exata desta área pré-definida será dependente das diferentes concentrações de constituintes (REINMANN et al., 1998).

Figura 17 - Sinais da corrente iônica de quatro diferentes tipos de combustíveis, em que a perturbação da ignição foi removida, medida no motor Ricardo. As condições do motor foram 1.500 RPM, $\lambda = 1.01$, 0% EGR, 5 bar IMEP.

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

3.5 MISTURA AR/COMBUSTÍVEL

Outro parâmetro que influencia o sinal da corrente iônica é a mistura ar/combustível. Reinmann et al. (1998) utilizaram um queimador, cujo diagrama é mostrado na Figura 18, para estudar a influência da mistura ar/combustível sobre o processo de ionização química, no qual as condições experimentais podem ser controladas de maneira mais cuidadosa do que as realizadas nos motores a combustão interna. Para isso, a aquisição do sinal da corrente iônica foi executada considerando vários valores de λ .

Figura 18 - Diagrama do queimador utilizado para estudar a influência da mistura ar/combustível.

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

De acordo com a Figura 19, os maiores sinais da corrente iônica foram obtidos em $\lambda = 0,91$. Entretanto, os autores advertem que a temperatura da mistura (380 K) antes da combustão é inferior às obtidas no motor. Para o caso do motor, os valores máximos obtidos ocorrem em $\lambda = 0,85$ (REINMANN et al., 1998).

Figura 19 - Média dos sinais da corrente iônica, adquiridos em um queimador atmosférico para diferentes valores da mistura ar/combustível (λ) e diferentes espaços entre os eletrodos.

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

Gao et al. (2012) também citam em seu trabalho que o sinal da corrente iônica é facilmente afetado pela mistura ar/combustível. Entretanto não indicam como os experimentos afetaram o sinal da corrente iônica.

3.6 ROTAÇÃO DO MOTOR

Um dos parâmetros de maior influência sobre o sinal da corrente iônica é a rotação do motor. A Figura 20 mostra um aumento significativo da corrente iônica, quando a rotação passa de 1500 para 4500 RPM.

Figura 20 - Corrente iônica em função da posição angular para uma pressão do coletor de admissão constante de 101.3 kPa com Iso-octano.

Fonte: (Reinmann et al., 1998).

3.7 PRESSÃO NO COLETOR DE ADMISSÃO

A Figura 21 mostra como o S_{ion} é afetado devido a variação da pressão no coletor de admissão. É possível observar que com o aumento da pressão, o segundo pico também aumenta, o que comprova a afirmação da seção 2.6 de que existe uma forte relação entre o segundo pico da corrente iônica e o pico de pressão dentro do cilindro. A figura mostra ainda que o aumento na pressão do coletor de admissão não representa um aumento no primeiro pico, o que também confirma a discussão da seção 2.6, que apresenta o primeiro pico relacionado com a combustão próxima da vela de ignição.

Figura 21 - Média do sinal da corrente iônica usando Iso-octano como combustível para o motor sobre uma carga variável.

Fonte: (Reinmann et al., 1998)

Gao et al. (2015) mostram o mesmo fenômeno, porém apresentam os resultados utilizando um número maior de variáveis, conforme a Figura 22. Os resultados foram apresentados para três avanços de ignição diferentes, 14, 22 e 30 °CA BTDC (CA BTDC - *Crank Angle - Before Top Dead Center*). Na parte inferior da figura, é possível observar que o valor máximo do U_{ion} ocorre no $\theta_{ig} = 22$ °CA BTDC. Os autores afirmam que esse é o melhor ponto de ignição, pois trata-se do melhor torque do motor e, conseqüentemente, da maior taxa de variação de pressão ($dp/d\phi$ - parte superior da figura), queima mais rápida da mistura e maior aumento da temperatura dentro do cilindro.

Figura 22 - U_{ion} , pressão dentro do cilindro e taxa de variação de pressão (valor médio de 100 ciclos), em diferentes pontos de ignição (14, 22, 30 °CA BTDC). O motor é executado sob condição WOT (*Wide Open Throttle* - Válvula Borboleta Totalmente Aberta) com a velocidade do motor de 3000 rotações/minuto.

Fonte: (Gao et al., 2012)

Portanto, para a identificação do cilindro que se encontra em combustão, tratado na seção 5, a carga do motor é uma variável relevante. Como um dos propósitos do trabalho é comparar A_{ion} com $\bar{A}_{ion}$, os experimentos foram realizados em uma condição que A_{ion} possua o menor valor, pois o valor de $\bar{A}_{ion}$ é praticamente nulo. Dessa forma os testes no veículo foram realizados com o motor isento de carga mecânica, pois com o aumento da carga a amplitude do S_{ion} também aumenta.

4 SENSORES E PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Este capítulo descreve o motor usado no trabalho e os princípios e características técnicas de seus sensores de detonação, rotação e fase. Adicionalmente, explica a metodologia utilizada para a aquisição dos sinais de ignição e da corrente iônica, assim como o tratamento dos dados obtidos.

4.1 SENSOR DE DETONAÇÃO

Os sistemas de medida da detonação podem ser divididos em dois grupos, os de medida direta ou indireta. A medida direta é realizada por sensores de pressão, instalados no interior da câmara de combustão. Nesse caso, é necessária a instalação de um sensor em cada cilindro. A maior limitação desses sensores é em relação ao seu alto custo, o que restringe o seu uso apenas em laboratório. A medida indireta é realizada usando sensores instalados no bloco do motor, que realizam a medida por meio das vibrações transmitidas pelo motor. Nesse segundo caso, apesar de possuírem um custo menor, os sinais provenientes dos sensores apresentam uma qualidade inferior, pois estão submetidos à outras fontes de ruídos.

O sinal de detonação proveniente do sensor de medida indireta é caracterizado pela oscilação de alta frequência e capturado por um sensor piezoelétrico de aceleração. Esse sensor tem como função transformar essa oscilação de alta frequência em sinal elétrico.

Os sensores de medida indireta podem ser divididos em dois grupos: o ressonante e o não ressonante (ou de banda larga). O sensor do primeiro tipo é fabricado de forma que sua frequência de ressonância seja a mesma que a frequência de vibração do motor quando ocorre o fenômeno da detonação, fazendo com que ocorra uma amplificação do sinal de detonação. Cada motor manifesta a detonação em uma frequência própria, o que exige um sensor com frequência de ressonância diferente para cada tipo de motor. Por outro lado, o sensor não ressonante possui a mesma resposta em frequência para todas as faixas de

frequências do sinal de detonação, abrangendo uma grande variedade de motores, mas solicitando uma maior capacidade de processamento da ECU para identificar a detonação.

4.2 O SENSOR DE ROTAÇÃO

O sensor, usado neste trabalho para medir a posição angular e a rotação do motor, é chamado de sensor de relutância variável e seu funcionamento se baseia no princípio da indução magnética. Nesse caso, quando o dente da roda fônica (Figura 23b) está alinhado com o sensor de relutância variável (Figura 23a) ocorre uma redução do entreferro, o que provoca uma redução da relutância e, conseqüentemente, um aumento do fluxo do circuito magnético. Por outro lado, quando o espaço entre os dentes está alinhado com o sensor, há um aumento da relutância. Desta forma, o giro da roda fônica cria uma variação da relutância do circuito, e como o sensor é composto por um ímã permanente e um núcleo ferromagnético envolvido por uma bobina, uma tensão alternada induzida formará o sinal de saída deste sensor (Figura 23c).

Uma vez que a saída deste sensor possui um nível de tensão variável como função da rotação do motor, foi utilizado o circuito integrado LM1815 da Texas Instruments® (Anexo B) para o condicionamento deste sinal. A Figura 23e mostra o sinal de saída condicionado. A roda fônica está conectada ao eixo de manivelas e é constituída de uma roda dentada com total de 58 dentes e uma falha (Figura 23d) correspondente ao espaço de 2 dentes. É importante ressaltar a falta proposital de dois dentes, pois quando o décimo quarto dente, contado a partir da falha da roda fônica, passa pelo sensor de relutância variável, o cilindro 1 se encontra no PMS.

Figura 23 - Sensor de relutância variável (a); Roda fônica (b); Sinal de saída do sensor (c); Falta proposital de dois dentes (d); Sinal condicionado (e).

Fonte: Autor.

4.3 SENSOR DE FASE

Conforme discutido na seção 2.1, não é possível diferenciar qual dos cilindros se encontra em combustão usando apenas o sensor de relutância variável fixado na roda fônica. Assim, é comum o uso de um sensor de relutância variável, fixado no eixo do comando de válvulas, que recebe o nome de sensor de fase.

Na Figura 24, o sinal da roda fônica, identificado pela cor verde, apresenta pequenos espaços em branco que delimitam cada volta. É possível observar que durante a passagem de uma volta para outra (espaços em branco), o sinal do sensor de fase, representado pela cor azul, alterna-se de nível alto para nível baixo. Portanto, assim como a roda fônica, o eixo do comando de válvulas e os cilindros

estão todos conectados mecanicamente, sendo possível identificar a volta em que os cilindros 1 e 3 ou 2 e 4 estarão em combustão:

- volta 1: no início desta volta, o sinal do sensor de fase encontra-se em nível alto e durante esta volta os cilindros 2 e 4 estarão em combustão;
- volta 2: inicia-se com o sinal do sensor de fase em nível baixo e durante esta volta os cilindros 1 e 3 estarão em combustão.

Figura 24 - Sinal do sensor de fase (azul) em nível alto ou baixo durante a passagem da falta dos dois dentes pela roda fônica, representado pelo sinal da roda fônica (verde).

Fonte: Autor.

4.4 SINAL DE IGNIÇÃO

A aquisição do sinal de ignição foi realizada diretamente no respectivo pino de saída do microcontrolador da própria ECU, sem o uso de nenhum tipo de condicionamento do sinal, conforme a Figura 25.

Figura 25 - Representação do circuito de ignição com indicação do ponto em que foi realizada a aquisição do sinal de ignição.

Fonte: Autor.

4.5 AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

A aquisição de sinais foi realizada em um computador, usando um conversor analógico /digital da *NATIONAL INSTRUMENTS® High-speed M Series Multifuntion Data Acquisition – 16bit* com um tempo de amostragem de 5 microssegundos. O software utilizado para a aquisição de dados foi o *Diadem* da *NATIONAL INSTRUMENTS®* e para o tratamento dos dados o *MATLAB®* da *MATHWORKS®*.

4.6 MOTOR UTILIZADO PARA OS EXPERIMENTOS

Devido a disponibilidade em laboratório, os experimentos foram realizados em um motor Volkswagen 2.0L, instalado em um veículo modelo Polo Sedan ano 2004. Adicionalmente, o veículo foi posicionado sobre um dinamômetro *Dynotech 720i*, conforme a Figura 26.

Figura 26 - Veículo modelo Polo Sedan ano 2004 instalado sobre o dinamômetro *Dynotech 720i* durante a realização dos testes.

Fonte: Autor.

4.7 CIRCUITO UTILIZADO PARA MEDIR A CORRENTE IÔNICA

A vela de ignição pode ser usada como sensor da corrente iônica. A grande vantagem do uso desta configuração nos os motores de ignição por centelha é o fato do sensor já estar instalado no veículo original de fábrica. Uma das maneiras de criar um campo elétrico nos eletrodos da vela é aplicando uma tensão contínua, como mostrado na Figura 27. Nesse caso, o equipamento de medição é posicionado no lado da alta tensão da bobina de ignição. Assim, para esta técnica ter sucesso, deve ser adicionado um diodo de alta tensão para proteger o circuito de medição do pulso de ignição usado para criar a faísca no motor (ERIKSSON, 1995).

Figura 27 - Diagrama esquemático de medição da corrente iônica, utilizando o diodo de alta tensão reversa.

Fonte: (Eriksson, 1995).

Esse diodo de alta tensão leva um determinado tempo para alcançar a tensão de medição, pois, devido à capacitância parasita do diodo, durante o pulso de alta tensão da ignição a carga armazenada deve ser descarregada. Assim, para fazer medição, uma parte do sinal da corrente iônica pode ser perdida (ERIKSSON, 1995).

Uma forma de medir o sinal da corrente iônica, evitando o uso do diodo de alta tensão, é aplicar uma diferença de potencial no secundário da bobina de ignição. A Figura 28 mostra o circuito para realizar a medida usando esta técnica.

Figura 28 - Circuito de medida da corrente iônica, utilizando o lado da baixa tensão da bobina de ignição.

Fonte: (Manual Delphi).

Na Figura 28, o primário da bobina de ignição é carregado pela bateria, em que um *driver* instalado nessa bobina de ignição, representado pela chave aberta. Quando esta chave passa do estado ligado para o desligado, o secundário da bobina de ignição provoca uma centelha na vela de ignição, parte da energia utilizada pela centelha carrega o capacitor C1 por meio do diodo Zener D2 e, após o término da centelha, o capacitor é descarregado por meio dos resistores R1 e R4. Assim, o sinal da corrente iônica é proporcional à queda de tensão sobre o resistor R1.

A Figura 29 indica o circuito utilizado para medir a corrente iônica no cilindro 1. O esquema elétrico da fonte de alimentação V_{TESTE} utilizada encontra-se no anexo A.

Figura 29 - Circuito para obtenção do sinal da corrente iônica do cilindro 1.

Fonte: Autor.

5 IDENTIFICAÇÃO DO CILINDRO QUE SE ENCONTRA EM COMBUSTÃO UTILIZANDO O SINAL DA CORRENTE IÔNICA

O motor utilizado neste trabalho possui a sequência de explosões 1-3-4-2, como mostra a Tabela 1, que indica ainda a posição angular de cada tempo do motor durante um ciclo completo (duas voltas). A Figura 3 mostra os cilindros 1 e 4 no PMS, e os cilindros 2 e 3 no PMI. Durante o giro do motor, o eixo de manivelas (Figura 3f) movimenta os cilindros, de forma que os cilindros gêmeos 1 e 4 ou 2 e 3 estarão sempre na mesma posição. Porém um dos cilindros gêmeos estará em admissão e o outro em combustão, e para o outro par, um estará em compressão e o outro em escape. Como a determinação da posição angular do eixo de manivelas é feita pela roda fônica (Figura 3e), não é possível diferenciar, entre cilindros gêmeos, aquele que se encontra em combustão. Em alguns casos, esta diferenciação é feita por um sensor de fase. Este trabalho propõe o uso da corrente iônica para identificar o cilindro que se encontra em combustão, substituindo esta funcionalidade atribuída atualmente ao sensor de fase.

5.1 VARIÁVEIS DE MAIOR RELEVÂNCIA

A área do eletrodo da vela de ignição influencia a A_{ion} , conforme discutido na seção 3.1. Por essa área ser influenciada pelo tempo de uso e pelo tipo de vela de ignição, neste trabalho foram utilizadas velas de ignição com diferentes tempos de uso, e também foram utilizados dois tipos de velas de ignição, vela do TIPO 1 com menor área útil do eletrodo (Figura 30) e vela do TIPO 2 com maior área útil do eletrodo (Figura 31).

Figura 30 - Vela tipo 1: Vela de ignição com a menor área útil do eletrodo.

Fonte: Autor.

Figura 31 - Vela tipo 2: Vela de ignição com a maior área útil do eletrodo.

Fonte: Autor.

Para a tensão aplicada na vela de ignição, seção 3.2, foram utilizados 3 níveis diferentes 50, 150 e 300 Volts. Para a proporção álcool/gasolina, uma vez que o motor do veículo de teste não é bicomcombustível, optou-se por adicionar álcool hidratado à gasolina E0 até a proporção de 15%. Partindo das variáveis citadas nesta seção, foi possível elaborar a Tabela 4, que apresenta uma designação para cada variável, indica o intervalo de variação e sua respectiva unidade.

Alguns sinais foram coletados, porém não foram considerados como variáveis manipuladas. O sinal do sensor de oxigênio teve como objetivo verificar se a mistura ar/combustível ficou próxima da estequiométrica durante todos os experimentos, uma vez que essa mistura tem grande influência sobre o sinal da corrente iônica. O sinal de carga da bobina de ignição fez parte da coleta de dados com a finalidade de identificar o instante inicial da ignição da mistura. O sinal de rotação do motor, obtido

pelo sensor de relutância variável, teve como finalidade determinar a posição angular do eixo de manivelas.

A identificação do cilindro que se encontra em combustão foi realizada na partida do motor, quando ocorre uma menor rotação e, conseqüentemente, um menor nível do sinal da corrente iônica (seção 3.6). A temperatura do líquido de arrefecimento, pressão do coletor de admissão e umidade do ar foram variáveis apenas registradas na planilha de coleta de dados. A Tabela 4 indica as variáveis que serão controladas em cada experimento e os seus níveis.

Tabela 4 - Número de níveis para cada variável controlável.

Fator	Número de níveis	Níveis	Unidade
estado da vela de ignição	2	0 - 10.000	Quilômetros (1)
tipo da vela de ignição	2	Tipo 1 - Tipo 2	
tensão aplicada na vela de ignição	3	50 - 150 - 300	Volts
quantidade de álcool (2)	3	0 - 15	Percentual

(1) rodados pelo automóvel teste.

(2) Quantidade de álcool hidratado adicionado à gasolina E0.

Fonte: Autor.

5.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ENSAIOS

Para controle da vida útil da vela de ignição, foram instaladas velas novas em um veículo de uso comercial e quando este veículo atingiu o número de quilômetros previstos (10.000 quilômetros de acordo com as instruções do fabricante), as velas de ignição foram removidas para realização dos testes em laboratório. Esse mesmo procedimento foi executado para as velas do tipo 1 (Figura 30) e do tipo 2 (Figura 31) por possuírem diferentes áreas de eletrodos.

Foram realizados pequenos ajustes na fonte de tensão, mostrada no anexo A, para obter os níveis de tensão adequados, conforme a Tabela 4. Para os

experimentos com proporções álcool/gasolina diferentes, a cada descarte da mistura, o carro ficou ligado por um tempo suficiente para que toda a mistura existente na tubulação fosse expelida.

5.3 ANÁLISE DOS DADOS

Após a coleta dos dados, foram elaborados algoritmos no Matlab[®] que, utilizando como referência a falha do sinal da roda fônica, separaram o sinal da corrente iônica por voltas. Após obtido S_{ion} separado por voltas, foi calculada a A_{ion} e a $\bar{A}_{ion}$, e assim verificado se ocorreu sobreposição das áreas para, desta forma, analisar a viabilidade de identificar o cilindro que se encontra em combustão utilizando o sinal da corrente iônica.

A Figura 32 mostra o valor obtido para A_{ion} e $\bar{A}_{ion}$ em um experimento realizado com uma vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de álcool etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em um total de 1221 voltas.

Figura 32 - Diagrama contendo em azul A_{ion} , e em verde $\bar{A}_{ion}$. Os experimentos foram realizados com vela de ignição nova do tipo 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts.

Fonte: Autor.

A Figura 33 mostra, em dois histogramas distintos, os dados apresentados na Figura 32. O histograma do lado direito contém os percentuais das áreas sob a curva do sinal da corrente iônica durante a combustão, e o do lado esquerdo as áreas sem combustão. Para uma melhor comparação entre os experimentos, optou-se por indicar nos diagramas apenas os valores máximo, mínimo e a média das áreas obtidas, como mostrado abaixo dos histogramas da Figura 33.

Para este experimento os valores obtidos foram:

- com combustão - Valor médio das áreas 0.0073 / Desvio padrão 0.0022 / Área máxima obtida 0.0166 / Área mínima obtida 0.0023;
- sem combustão - Valor médio das áreas 0.00076 / Desvio padrão 0.000076 / Área máxima obtida 0.0010 / Área mínima obtida 0.00042.

Figura 33 - Histograma contendo A_{ion} e $\bar{A}_{ion}$ para os experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts.

Fonte: Autor.

Foram realizados testes preliminares com intuito de verificar como a variação da temperatura do líquido de arrefecimento afeta a A_{ion} .

A Figura 34 mostra a redução de A_{ion} com o aumento da temperatura. Como os piores casos para identificação do cilindro que se encontra em combustão ocorrem para os menores valores de A_{ion} , todos os testes foram realizados com o motor em temperatura do líquido de arrefecimento entre 70 e 80°C.

Figura 34 - Variação da A_{ion} em relação à variação da temperatura, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para A_{ion} e em azul os valores máximo, mínimo e médio para $\bar{A}_{ion}$.

Fonte: Autor.

A Figura 35 mostra como a redução da tensão aplicada na vela de ignição afeta a A_{ion} . É possível observar que com uma tensão de 50 Volts ocorre uma sobreposição praticamente total de A_{ion} sobre $\bar{A}_{ion}$. Para uma tensão de 150 Volts a sobreposição é parcial, e para 300 volts não ocorreu nenhuma sobreposição.

Figura 35 - Variação da A_{ion} em relação ao valor de tensão aplicado na vela de ignição, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para A_{ion} e em azul os valores máximo, mínimo e médio para $\bar{A}_{ion}$.

Fonte: Autor.

A Figura 36 mostra como a redução da área do eletrodo da vela de ignição afeta a A_{ion} .

Figura 36 - Variação da A_{ion} em relação à variação da área do eletrodo da vela de ignição, experimentos realizados com velas de ignição novas do TIPO I e do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para A_{ion} e em azul os valores máximo, mínimo e médio para $\bar{A}_{ion}$.

Fonte: Autor.

É possível observar que nas velas de ignição que possuem menor área de eletrodo, vela de ignição do TIPO 1, os valores máximo, mínimo e médio foram sempre menores que os das velas de maior área, vela de ignição do TIPO 2.

A Figura 37 mostra como o tempo de uso da vela de ignição afeta a A_{ion} .

Figura 37 - Variação da A_{ion} em relação ao tempo de uso da vela de ignição, experimentos realizados com uma vela de ignição nova e outra com 10.000 km de uso, do TIPO 2, 25% de etanol anidro na gasolina e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para A_{ion} e em azul os valores máximo, mínimo e médio para $\bar{A}_{ion}$.

Fonte: Autor.

Para o tempo de uso das velas de ignição não foi possível observar variações significativas nos valores médios das áreas, e também não apresentaram sobreposições de A_{ion} sobre $\bar{A}_{ion}$. São resultados importantes, pois garantem a possibilidade de uso do S_{ion} para identificação do cilindro que se encontra em combustão durante toda a vida útil da vela de ignição.

A Figura 38 mostra como a variação da proporção de álcool hidratado na gasolina E0 afeta a A_{ion} .

Figura 38 - Variação da A_{ion} em relação à proporção de álcool hidratado na gasolina E0, experimentos realizados com vela de ignição nova do TIPO 2 e tensão aplicada na vela de 300 Volts, em vermelho os valores máximo, mínimo e médio para A_{ion} e em azul os valores máximo, mínimo e médio para $\bar{A}_{ion}$.

Fonte: Autor.

Para a proporção de álcool hidratado na gasolina E0, é possível observar uma redução dos valores máximos e da média para a condição de 15%. Nesse caso, os valores obtidos são diferentes dos esperados.

Conforme discutido na seção 3.4, era esperado um aumento na área sob a curva do sinal da corrente iônica com a adição do álcool hidratado, fato que não ocorreu. Um dos motivos para essa redução pode ser atribuída ao fato do álcool hidratado possuir água em sua composição, o que reduziria a temperatura da combustão, e como discutido na seção 2.6, o segundo pico da corrente iônica sofre uma grande influência da ionização térmica.

Assim, este trabalho mostra que não é possível extrapolar os resultados obtidos do etanol usado por Reinmann et al. (1998) para o álcool hidratado utilizado no Brasil. Estes resultados mostram que para uso do S_{ion} para identificação do cilindro em combustão em veículos bicom bustíveis, são necessários novos experimentos, pois a adição de percentuais mais elevados de álcool hidratado na gasolina pode provocar sobreposições de A_{ion} sobre $\bar{A}_{ion}$.

6 IDENTIFICAÇÃO DO FENÔMENO DA DETONAÇÃO UTILIZANDO O SINAL DA CORRENTE IÔNICA

Esta seção aborda o uso do S_{ion} para identificar a ocorrência da detonação. Para isso, foram realizados dez experimentos e correlacionada a energia dos sinais do sensor de detonação com uma faixa do espectro de frequência da corrente iônica obtida por meio da análise de Fourier.

6.1 INTRODUÇÃO À TRANSFORMADA DE FOURIER

A análise de Fourier (séries e transformadas) pode ser dividida em quatro representações, duas para os sinais periódicos e duas para os sinais não periódicos. Os sinais periódicos de tempo contínuo são representados pela Série de Fourier (FS) e os sinais periódicos de tempo discreto pela Série de Fourier de tempo discreto (DTFS) ou também chamada de transformada discreta de Fourier (DFT). Os sinais não periódicos de tempo contínuo são representados pela Transformada de Fourier (FT) e os sinais não periódicos de tempo discreto pela transformada de Fourier de tempo discreto (DTFT), (HAYKIN e VEEN, 2003; PROAKIS e MANOLAKIS, 1996).

Os sinais analisados neste trabalho são não periódicos de tempo discreto e, portanto, a representação adequada seria utilizando a DTFT. Porém, será mostrado que é possível realizar o tratamento dos sinais utilizando a DFT.

A representação da DTFS de um sinal de tempo discreto $x[n]$ é dada por

$$x[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (1)$$

e os coeficientes de $X[k]$ da DTFS são representados por

$$X(w_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (2)$$

Representando um sinal de tempo discreto como $x[n]$, sua DTFT é definida como:

$$X(jw) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-jwn} \quad (3)$$

e a transformada inversa de Fourier de tempo discreto como:

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(w) e^{jwn} dw \quad (4)$$

Para o cálculo da DTFT é necessária uma sequência finita para n , isto é feito usando uma janela retangular, assim a equação (3) torna-se:

$$X(w) = \sum_{n=0}^{L-1} x[n] e^{-jwn} \quad (5)$$

onde L é o comprimento da sequência modificada.

Essa é frequentemente uma aproximação útil do espectro da sequência não modificada, equação (3). Há um aumento da perda de resolução da transformada modificada pela equação (5) com o aumento de L .

É comum calcular $X(w)$ com um número (N) de frequências diferentes do valor de L , uniformemente espaçadas ao longo do eixo w , ou seja:

$$w_k = \frac{2\pi}{N} k \text{ para } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

Neste caso, a equação 5 torna-se:

$$X(w_k) = \sum_{n=0}^{L-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (7)$$

quando $N \geq L$ a equação pode ser reescrita como:

$$X(w_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{k}{N}n} \quad (8)$$

se for definido $x[n] = 0$ para $n \geq L$.

Com estas mudanças, a equação (3) torna-se a DFT, o que demonstra a afirmação feita anteriormente, que a DFT pode ser considerada um caso particular da DTFT.

Um ponto importante no tratamento dos dados diz respeito ao comprimento de N . O algoritmo utilizado para cálculo da DFT (chamado transformada rápida de Fourier ou simplesmente FFT), pode ser executado mais rápido se o valor de N for uma potência de 2. Porém o aumento de N causa distorções no espectro do sinal, como poderá ser visto na discussão a seguir.

Como exemplo das distorções causadas no espectro do sinal, a parte superior da Figura 39 mostra um sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100. Como o valor de N é exatamente o mesmo número de amostras do sinal, o espectro obtido é exatamente o valor teórico esperado. Para esse exemplo o espaçamento entre as frequências é de 1 Hz.

Figura 39 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.

Fonte: Autor.

A Figura 40 mostra o mesmo sinal senoidal $x[n]$ da Figura 39, porém com um valor de N igual a 1000. Nesse caso, a frequência em que se encontram as raízes e o valor máximo obtido ainda estão corretos. Porém, distorções ocorrem no espectro do sinal, conforme detalhes na Figura 41.

Figura 40 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 1000.

Fonte: Autor.

Figura 41 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 1000.

Fonte: Autor.

A Figura 41 apresenta o mesmo sinal obtido na Figura 40, porém um corte no eixo de frequências foi realizado para visualização com mais detalhes das distorções ocorridas devido ao aumento de N . Como o tempo de execução do algoritmo não é relevante para este trabalho, pois os dados não são tratados em tempo real, optou-se por usar uma janela do mesmo tamanho do sinal.

Outro problema encontrado no uso da FFT se refere ao instante inicial e final do sinal a ser analisado. Em sinais obtidos por aquisição de dados, nem sempre é simples identificar o instante exato em que inicia e termina o sinal a ser tratado. A Figura 42 mostra alterações que ocorrem nos espectros de frequência de um sinal senoidal devido a esse tipo de problema.

Figura 42 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.

Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 42, ocorreu uma redução na amplitude dos harmônicos nas faixas de frequências esperadas do sinal, -10 e +10 Hertz, e apareceram harmônicos não desejados próximos às frequências esperadas. Este efeito é atenuado utilizando funções de ponderação das amostras ou janelas (*windows*) que atenuam as raiais laterais do espectro calculado, melhorando a identificação das frequências, porém, reduzem a amplitude das frequências desejadas.

Existem muitos tipos de janelas e cada uma produz um efeito particular sobre o espectro do sinal. No exemplo que segue, foi utilizada uma janela Hanning, escolhida aleatoriamente para mostrar o efeito sobre o sinal.

Figura 43 - Sinal senoidal $x[n]$ com duração de 1 segundo, tempo de amostragem de 0,01 segundo, frequência de 10 ciclos por segundo e um valor de N igual a 100.

Fonte: Autor.

Na Figura 43, o gráfico 1 mostra a janela Hanning utilizada, o gráfico 2 apresenta o efeito produzido no sinal no domínio do tempo, e no gráfico 3 a atenuação das rias laterais do espectro e a redução da amplitude das frequências -10 e +10 Hertz.

6.2 DENSIDADE ESPECTRAL DE ENERGIA DE UM SINAL NÃO PERIÓDICO

A energia de um sinal de tempo discreto $x[n]$ é definida como:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 \quad (9)$$

Expressando a energia E em termos do espectro $X(w)$, chega-se a:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot x[n]^* = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X^*(w) \cdot e^{-jwn} dw \right] \quad (10)$$

Alterando a ordem de integração e da somatória:

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X^*(w) \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] \cdot e^{-jwn} \right] dw \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(w)|^2 dw \quad (12)$$

e portanto,

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} |X(w)|^2 dw \quad (13)$$

Esse é o teorema de Parseval para sinais não periódicos de tempo discreto PROAKIS e MANOLAKIS (1996).

Da mesma forma que é possível considerar a DFT como um caso especial da DTFT, o resultado anterior pode ser expandido para o domínio da frequência, discreto, limitado a um número de amostras.

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} |x[n]|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X[k]|^2 dw \quad (14)$$

Como mostrado na equação anterior, é possível determinar a energia de um sinal não periódico de tempo discreto, tanto no domínio da frequência quanto no domínio do tempo. A vantagem da representação no domínio da frequência ocorre devido à capacidade de calcular a energia para um intervalo de frequências distintas. Essa capacidade de cálculo foi utilizada para verificar a viabilidade de trocar o sensor de detonação pelo sensor de corrente iônica.

6.3 VARIÁVEIS DE MAIOR RELEVÂNCIA

Conforme discutido na seção 2.5, nos sistemas de controle de ignição, é realizado um avanço da ignição com a finalidade de reduzir o consumo de combustível e aumentar o torque no motor. Entretanto, o aumento excessivo do avanço de ignição provoca a detonação. Com a finalidade de otimizar esse avanço, são criados mapas de avanço de ignição, conforme a Tabela 2.

Os mapas de avanço de ignição são elaborados como função da rotação e da pressão no coletor de admissão, que trata de uma medida indireta da carga mecânica a que o motor está submetido, e como estas duas variáveis influenciam o S_{ion} . Conforme discutido nas seções 3.6 e 3.7, seria interessante analisar o comportamento da corrente iônica com a variação destes dois parâmetros. Um

trabalho realizado por WANG e ZHOU (2003) concluiu que, para o motor submetido a cargas mecânicas e rotações diferentes, o sinal da corrente iônica, no domínio da frequência, permanece inalterado durante a ocorrência do fenômeno da detonação.

6.4 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E ENSAIOS

Como discutido na seção 2.5, o aumento da rotação deve ser compensado com o avanço da ignição para evitar a detonação no motor. Desta forma, com o intuito de produzir o fenômeno da detonação no veículo instalado no dinamômetro inercial, foi estabelecido um valor fixo para o ponto de ignição e acelerado o veículo. Assim, a falta avanço da ignição em função do aumento da rotação provocou a detonação.

O sinal do sensor de detonação foi medido como referência à ocorrência da detonação, o sinal de ignição foi medido com a finalidade de identificar o instante inicial da corrente iônica e o sinal de pressão do coletor de admissão como referência à carga mecânica a que o motor estava submetido durante os experimentos.

6.5 ANÁLISE DOS DADOS

Com base nas discussões realizadas na seção anterior, para o tratamento do sinal da corrente iônica, foram utilizadas neste trabalho diversas funções de ponderação das amostras com o mesmo comprimento do S_{ion} . Para mostrar que é possível identificar a ocorrência da detonação utilizando o S_{ion} , verificou-se a correlação entre a energia de uma faixa de frequências do sinal da corrente iônica com a energia do sinal do sensor de detonação.

Os sinais obtidos em três voltas com três níveis diferentes para a energia do sinal do sensor de detonação e os resultados dos tratamentos são apresentados entre as figuras 44 e 52.

Figura 44 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela *Hanning* utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.

Fonte: Autor.

Na Figura 44, o sinal em azul representa o S_{ion} , em vermelho a janela *Hanning* utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação. Neste caso por não ter ocorrido o fenômeno da detonação a energia do sinal do sensor de detonação foi pequena (37,72). Portanto, é possível observar que não ocorreu nenhuma oscilação em alta frequência no S_{ion} .

Figura 45 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela *Hanning*.

Fonte: Autor.

A Figura 45 mostra o mesmo S_{ion} da Figura 44 após o uso da Janela *Hanning*. É possível observar uma redução na amplitude do sinal da corrente iônica durante a ignição, e a alteração no S_{ion} de modo que seu início e fim tenham amplitude nula.

Figura 46 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.

Fonte: Autor.

O primeiro gráfico da Figura 46 mostra a resposta em frequência de S_{ion} para a mesma volta das figuras anteriores, e o segundo gráfico mostra com mais detalhe a faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz. Para esta volta, a energia obtida do sinal de detonação foi de 37,72 e a energia dos harmônicos foi de $0,577 \times 10^{-3}$.

Figura 47 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela *Hanning* utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.

Fonte: Autor.

Na Figura 47, o sinal em azul representa o S_{ion} , em vermelho a janela *Hanning* utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação. Neste caso, devido a uma pequena detonação, a energia do sinal de detonação resultou em um nível intermediário (285,35). Portanto, é possível observar que ocorreu uma pequena oscilação em alta frequência no S_{ion} .

Figura 48 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela *Hanning*.

Fonte: Autor.

A Figura 48 apresenta o mesmo S_{ion} da Figura 47 após o uso da Janela *Hanning*. É possível observar uma redução na amplitude do sinal da corrente iônica durante a ignição, e a alteração no S_{ion} de modo que seu início e fim tenham amplitude nula.

Figura 49 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.

Fonte: Autor.

O primeiro gráfico da Figura 49 mostra a resposta em frequência do S_{ion} para a mesma volta das figuras anteriores, e o segundo gráfico mostra com mais detalhe a faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz. Para esta volta, a energia obtida do sinal de detonação foi de 285,35 e a energia dos harmônicos foi de $1,669 \times 10^{-3}$.

Figura 50 - Em azul o sinal da corrente iônica, em vermelho a janela *Hanning* utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação.

Fonte: Autor.

Na Figura 50, o sinal em azul representa o S_{ion} , em vermelho a janela Hanning utilizada para tratamento do sinal, e em verde o sinal de detonação. Neste caso, a energia do sinal de detonação foi alta (1097,8), devido à ocorrência de uma grande detonação. Portanto, é possível observar que ocorreu uma oscilação em alta frequência com amplitudes maiores no S_{ion} que o ocorrido na Figura 47.

Figura 51 - Sinal da corrente iônica após o uso da janela *Hanning*.

Fonte: Autor.

A Figura 51 apresenta o mesmo S_{ion} da Figura 50 após o uso da Janela Hanning. É possível observar uma redução na amplitude do sinal da corrente iônica durante a ignição, e a alteração no S_{ion} de modo que seu início e fim tenham amplitude nula.

Figura 52 - Resposta em frequência do sinal da corrente iônica.

Fonte: Autor.

O primeiro gráfico da Figura 52 mostra a resposta em frequência do S_{ion} para a mesma volta das figuras anteriores, e o segundo gráfico mostra com mais detalhe a faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz. Para esta volta, a energia obtida do sinal de detonação foi de 1097,79 e a energia dos harmônicos foi de $6,062 \times 10^{-3}$.

Os dados obtidos entre as figuras 44 e 52 mostram que o aumento da energia do sinal do sensor de detonação está refletido no aumento da energia dos harmônicos do S_{ion} , na faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz. Esta proporcionalidade de aumento serve como motivação para o estudo da análise de correlação entre a energia do sinal de detonação e a energia dos harmônicos.

Com finalidade de mostrar não apenas o coeficiente de correlação, mas também indicar a janela mais eficiente, foram analisados os harmônicos do S_{ion} utilizando funções de ponderação das amostras ou janelas.

A Tabela 5 mostra as janelas utilizadas e os coeficientes de correlação obtidos. É possível notar que ao ignorar o uso das janelas, o que seria o mesmo efeito de usar uma janela retangular, os coeficientes de correlação obtidos seriam sempre inferiores aos obtidos com o uso das janelas.

A Tabela 5 também indica que o melhor resultado obtido foi com o uso da janela *Bohman* que produziu um coeficiente de correlação de 0,7429.

A Figura 53 mostra o diagrama de dispersão da energia do sinal do sensor de detonação e a energia dos harmônicos do S_{ion} , na faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz, obtido com a janela de maior correlação (*Bohman*).

Tabela 5 - Funções de ponderação e coeficientes de correlação obtidos.

Janela	Coeficiente de correlação	Janela	Coeficiente de correlação
<i>Parzen</i>	0,7366	<i>Hamming</i>	0,5565
<i>Hann</i>	0,7091	<i>Flat Top</i>	0,5815
<i>Bohman</i>	0,7429	<i>Blackman-Harris</i>	0,7314
<i>Blackman</i>	0,7400	<i>Bartlett</i>	0,5012
<i>Bartlett-Hann</i>	0,6735	<i>Retangular</i>	0,0810

Fonte: Autor.

Figura 53 - Diagrama de dispersão da energia do sinal do sensor de detonação e da energia dos harmônicos na faixa de frequência de 14,5 kHz a 19 kHz obtido com uma janela *Bohman*.

Fonte: Autor.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho mostrou a viabilidade do uso da corrente iônica para identificar o cilindro que se encontra em combustão e a ocorrência do fenômeno da detonação em um motor de ciclo Otto.

Inicialmente, foi realizado um estudo da literatura, que mostrou a grande quantidade de variáveis que influenciam o comportamento do sinal da corrente iônica. Após este levantamento, foram realizados experimentos de forma a isolar diversas variáveis em estudo e, posteriormente, verificar sua influência sobre a área sob a curva do sinal da corrente iônica.

Um dos pontos que merece destaque neste trabalho é a demonstração da dispersão da A_{ion} , informação que não está presente nas investigações de outros autores. Outro ponto que merece destaque é o resultado obtido com a variação da proporção de álcool hidratado na gasolina E0. No trabalho de Reinmann et al., (1998), os valores obtidos para o etanol são superiores aos da gasolina, porém os valores obtidos com álcool hidratado (utilizado no Brasil) foram inferiores. Este é um ponto importante que pode ser explorado em trabalhos futuros, pois a adição de água no álcool hidratado pode justificar estes resultados.

Este trabalho mostrou que 300 Volts é um nível de tensão suficiente para identificação do cilindro que se encontra em combustão, mostrou também que o tempo de uso da vela de ignição não afetou os valores médios obtidos. Esse resultado é importante, pois garante a possibilidade de uso do sinal da corrente iônica para identificação do cilindro que se encontra em combustão durante toda a vida útil da vela de ignição.

Outro ponto importante é em relação à área do eletrodo da vela de ignição que, como observado em trabalhos anteriores, influencia no valor da área sob a curva do sinal da corrente iônica. Este trabalho mostrou que para identificação do cilindro que se encontra em combustão é necessário uma vela de ignição de maior área do eletrodo, vela do TIPO 2.

A investigação realizada neste trabalho, com o objetivo de identificar o fenômeno da detonação, mostrou que é mais eficaz utilizar o sensor de corrente iônica do que a medida indireta, ou seja, sensor instalado no bloco para medir vibração.

Para o caso do sensor de detonação instalado no bloco do motor são necessários sensores diferentes para motores diferentes. Além disso, para este tipo de sensor é necessária a realização de diversos testes até que seja possível determinar o ponto ideal no motor para instalação deste tipo de sensor, problemas estes que não são encontrados com a utilização do sensor de corrente iônica.

Outro problema presente nos sensores de medida indireta que não é encontrado no sensor de corrente iônica, tem relação com a influência que os sinais sofrem por vibrações mecânicas presentes em um veículo em alta velocidade, ou quando o motor está submetido a grandes cargas. Estas vibrações mecânicas podem induzir às interpretações de falsas detonações.

Este trabalho se mostrou inovador quando apresenta o efeito do uso de funções de ponderação das amostras ou janelas. Dentre as janelas de ponderação utilizadas neste trabalho, a janela *Bohman* produziu o maior coeficiente de correlação.

Desta forma, este trabalho mostrou que é viável o uso do sinal da corrente iônica para identificação do cilindro em combustão, e também a remoção do sensor de detonação, utilizando o sensor de corrente iônica para esta função.

REFERÊNCIAS

- AHMEDI, A., et al. **Prediction Tool for the Ion Current in SI Combustion**. SAE International, v. 1, n. 3136, 2003. Disponível em: <http://papers.sae.org/2003-01-3136/> Acesso em 04 jan. 2015.
- ANDERSSON, I. **Cylinder Pressure and Ionization Current Modeling for Spark Ignited Engines**. 2002. 82 f. Tese (Doutorado em engenharia elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Linköpings, Suécia, 2002.
- BOSCH, R. **Manual de tecnologia automotiva**. Tradução Helga Madjderey, Gunter W. Prokesch, Euryale de Zerbine e Suely Pfeferman. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- BRAY, K.; COLLINGS, N. **Ionization sensors for internal combustion engine diagnostics**. Pergamon Press, v. 1, n.15, p. 10 - 12, 1991.
- BYTTNER, S; HOLMBERG, U. **Closed-loop control of EGR using ion currents**. In: 27th IASTED International Conference, 2008.
- CALCOTE, H. F.; **Ion and electron profiles in flames**. Symposium (International) on Combustion, p. 622 - 637, 1963.
- CALCOTE, H. F.; **Mechanisms for the Formation of Ions in Flames**. Project SQUID, Office of Naval Research, p. 385 - 403, 1957.
- DOCQUIER, N.; CANDEL, S. **Combustion Control and Sensors: a review**. Pergamon, n. 28, p. 107 -150, 2002.
- DOI, K., NAKAMURA, Y., HANASHI, K.; HASHIZUME, K. **Development of Spark Plug for Ion Current Misfire Detection**. SAE International, v. 1, n. 1253, 2012. Disponível em: <http://papers.sae.org/2012-01-1253/> Acesso em 04 de jan. 2015.
- DONG, G. et al. **Study on the phase relation between ion current signal and combustion phase in an HCCI combustion engine**. Proceedings of the Combustion Institute, n. 35, p. 3097–3105, 2015.

ERIKSSON, L. **Methods for Ionization Current Interpretation to be Used in Ignition Control**. Dissertação (Mestrado em Sistemas Veiculares). Universidade de Linköpings, Suécia, 1995.

ERIKSSON, L.; NIELSEN, L. **Ionization current interpretation for ignition control in internal combustion engines**. Pergamon, v. 8, n. 5, p. 1107–1113, 1997.

FAN, Q. et al. **Misfire detection and re-ignition control by ion current signal feedback during cold start in two-stage direct injection engines**. International Journal of Engine Research, 2012.

FIALKOV, A. B.; KALINICH, K. YA.; FIALKOV, B. S. **Experimental determination of primary ions in flame**. Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion /The Combustion Institute, p. 785 - 791, 1992.

GAO, Z. et al. **Investigation on characteristics of ion current in a metanol direct-injection spark-ignition engine**. Fuel the science and technology of Fuel and Energy, n. 141, p. 185-191, 2015.

GAO, Z. et al. **The interdependency between the maximal pressure and ion current in a spark-ignition engine**. International Journal of Engine Research, 14(4), p. 320–332, 2012.

GAO, Z. et al. **Investigation on characteristics of ionization current in a spark-ignition engine fueled with natural gas hydrogen blends with BSS de-noising method**. International Journal of Hydrogen Energy, n. 35, p. 12918–12929, 2010.

GUIBET, J. C. **Fuels and Engines: Technology energy environment**. ed. rev. Traduzido por Frank Carr, Institut Français du Pétrole Publications, Paris: Technip, 1999.

HAYKIN, S.; VEEN, B. V. **Signals and Systems**. 2. ed. Danvers, Bookman, 2003.

HELLRING, M.; HOLMBERG, U. **An Ion Current Based Peak-Finding Algorithm for Pressure Peak Position Estimation**. Society of Automotive Engineers, 1998. Disponível em: <http://not2fast.com/ignition/SAEPeakfind.pdf> Acesso 04 de jan. 2015.

HELLRING, M. et al. **Spark Advance Control Using the Ion Current and Neural Soft Sensors**. SAE International, v. 1, n. 1162, 1998. Disponível em: <http://papers.sae.org/1999-01-1162/> Acesso 04 de jan. 2015.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. New York: McGraw-Hill, 2011.

KINOSHITA, M., SAITO, A., MOGI, K.; NAKATA, K. **Study on ion current and pressure behavior with knocking in engine cylinder**. JSAE Review, v. 21, p. 483–488, 2000. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0389430400000692> Acesso em 04 jan. 2015.

MEHRESH, P. et al. **Combustion timing in HCCI engines determined by ion-sensor: experimental and kinetic modeling**. Elsevier – ScienceDirect, n. 2, v. 30, p. 2701–2709, 2005. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0082078404001870> Acesso em 04 jan. 2015.

MERKISZ, J., BOGUS, P.; GRZESZCZYK, R. **Overview of engine misfire detection methods used in on board diagnostics**. Journal of Kones, v. 8, n. 1 -2, p. 326-341, 2001.

MOUDDEN, Y., SEGHOUANE, A.-K.; BOUBAL, O. **Extraction of peak pressure position information from the spark-plug ionization signal**. Elsevier – ScienceDirect - Computer Standards & Interfaces, v. 24, n. 2, p. 161–170, 2002. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920548902000132> Acesso em 04 jan. 2015.

OHASHI, Y., KOIWA, M., OKAMURA, K.; UEDA, A. **The Application of Ionic Current Detection System for the Combustion Condition Control**. SAE International, v. 1, n. 0550, p. 328 - 334, 1999.

PANOUSAKIS, D. et al. **Using Ion-current Sensing to Interpret HCCI Combustion Processes**. SAE International, v.1, n. 24, 2006. Disponível em: <http://papers.sae.org/2006-01-0024/> Acesso 04 jan. 2015.

PROAKIS, J. G.; MANOLAKIS, D. G. **Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications**, 3. ed. New Jersey, 1996.

REINMANN, R., SAITZKOFF, A., LASSESSON, B.; STRANDH, P. **Fuel and Additive Influence on the Current**. SAE International, 1998. Disponível em: <http://papers.sae.org/980161/> Acesso 04 jan. 2015.

RIVARA, N., DICKINSON, P. B.; SHENTON, A. T. **A transient virtual-AFR sensor using the in-cylinder ion current signal**. Elsevier – ScienceDirect - Mechanical Systems and Signal Processing, v. 23, n. 5, p. 1672–1682, 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327009000028> Acesso 04 jan. 2015.

ROTH, G., MALACZYNSKI, G.; JOHNSON, D. **Ion-Sense-Based Real-Time Combustion Sensing for Closed Loop Engine Control**. SAE International, v. 1, n. 0354, 2013. Disponível em: <http://papers.sae.org/2013-01-0354/> Acesso em 04 de jan. 2015.

ROY, M. K., KAWAHARA, N.; TOMITA, E. **Visualization of Knocking Combustion in a Hydrogen Spark-Ignition Engine**. In: 18th World Hydrogen Energy Conference, p. 141-148, 2010.

SAITZKOFF, A., REINMANN, R.; GLAVMO, T. B. **An Ionization Equilibrium Analysis of the Spark Plug as an Ionization Sensor**. SAE International, p. 157 - 167, 1996. Disponível em: <http://papers.sae.org/960337/> Acesso em 04 jan 2015.

SAITZKOFF, A., REINMANN, R., MAUSS, F.; GLAVMO, M. **In-Cylinder Pressure Measurements Using the Spark Plug as an Ionization Sensor**. SAE International, p. 187 - 197, 1997. Disponível em: <http://papers.sae.org/970857/> Acesso em 04 jan. 2015.

SAXENA, S., CHEN, J.-Y.; DIBBLE, R. W. **Increasing the signal-to-noise ratio of sparkplug ion sensors through the addition of a potassium acetate fuel additive**. Elsevier – ScienceDirect - Proceedings of the Combustion Institute, v. 33, p. 3081–3088, 2011.

SHAMEKHI, A. H.; GHAFARI, A. **Ion Current Simulation During the Post Flame Period in SI Engines**. Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering, v. 4, n. 2, p. 51-58, 2005.

VRESSNER, A. et al. **Multiple Point Ion Current Diagnostics in an HCCI Engine**. SAE International, v. 1, n. 0934, 2004. Disponível em: <http://papers.sae.org/2004-01-0934/> Acesso em 04 jan. 2015.

WANG, Y., ZHOU, L. **Investigation of the detection of knock and misfire of a spark ignition engine with the ionic current method**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, v. 217, p. 617-621 (2003).

YAMADA, T., MATSUBARA, Y.; KONDO, N. **Characteristics of Multi Spark Ignition System**. SAE International, v. 1, n. 0205, p. 250 - 255, 1999. Disponível em: <http://papers.sae.org/1999-01-0205/> Acesso em 04 jan. 2015.

ZHU, G. G., HASKARA, I.; WINKELMAN, J. **Stochastic Limit Control and Its Application to Knock Limit Control**. SAE International, v. 1, n. 18, 2005. Disponível em: <http://papers.sae.org/2005-01-0018/> Acesso em 04 jan. 2015.

ANEXOS

ANEXO A - FONTE DE ALIMENTAÇÃO V_{TESTE}

Fonte: Autor

ANEXO B - CONDICIONADOR DO SINAL DE ROTAÇÃO