

COMPARATIVO DE EFICIÊNCIA NA UTILIZAÇÃO DE VELAS DE IGNIÇÃO DE IRÍDIO E VELAS DE NÍQUEL

Aluno: Douglas e Silva Rosa; douglas.silva91@edu.pucrs.br
Orientadora Prof. ^a Karina Ruschel

Resumo. *O objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente o desempenho e a eficiência das velas de ignição de irídio em relação às velas convencionais (níquel-cobre), considerando aspectos como torque, potência e economia de combustível. Para isso, foi realizado um estudo experimental utilizando motores de combustão interna submetidos a testes em dinamômetro e ensaios de rodagem, com gasolina e etanol como combustíveis. A metodologia incluiu a medição de torque, potência, consumo de combustível e inspeções para avaliar a durabilidade das velas sob condições controladas e de estresse. Os resultados demonstraram que as velas de irídio superaram as velas de níquel em todos os aspectos avaliados. Com gasolina comum, as velas de irídio apresentaram ganhos de 2,4% no torque máximo (10,45 kgf.m contra 10,21 kgf.m) e 3,2% na potência máxima (78,17 whp contra 75,72 whp), além de um consumo 1,2% mais eficiente (16,40 km/L versus 16,20 km/L). Já com etanol, as velas de irídio registraram torque máximo de 11,06 kgf.m e potência máxima de 81,34 whp, superiores aos valores das velas de níquel. O consumo com etanol também foi levemente melhor com velas de irídio (11,67 km/L contra 11,56 km/L). Em ambas as situações, as velas de irídio apresentaram maior linearidade nas curvas de torque e potência, indicando eficiência superior na queima do combustível. Comparando os combustíveis, a gasolina demonstrou maior eficiência em termos de autonomia, com um consumo cerca de 40% superior ao do etanol. No entanto, o etanol destacou-se em desempenho, alcançando os maiores valores de torque e potência, especialmente quando combinado com velas de irídio. Esses resultados evidenciam a versatilidade das velas de irídio, que mostraram-se vantajosas tanto para usuários que priorizam autonomia quanto para aqueles que buscam maior desempenho. Por fim, o estudo reafirma a superioridade técnica das velas de irídio, apontando seu potencial como uma solução eficiente e durável para motores de combustão interna.*

Palavras-chave: *Motores de Combustão Interna. Velas de Ignição. Irídio.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda por segurança e confiabilidade em estruturas complexas e sistemas mecânicos aumenta à medida que os padrões de desempenho são escalados. Os custos associados à falha prematura ou inesperada de componentes exigem uma necessidade contínua de empregar os avanços mais recentes em ciência e engenharia para avaliar o desempenho ao longo do ciclo de vida. Assim, a evolução dos motores de combustão interna de ciclo Otto tem sido marcada por inovações tecnológicas que buscam aumentar a eficiência e reduzir os impactos ambientais (RAMOS, 2021).

Dentre esses avanços, as velas de ignição desempenham um papel crucial na eficiência do processo de combustão, influenciando diretamente a potência do motor e o consumo de combustível. As velas de irídio, em particular, têm ganhado destaque por sua durabilidade e desempenho superior em comparação com as velas convencionais, geralmente feitas de níquel-cobre. Essas características tornam as velas de irídio uma opção interessante para aqueles que buscam otimizar o funcionamento de motores, tanto em termos de potência quanto de economia de combustível (RAMOS, 2021).

As velas de ignição são componentes fundamentais no processo de combustão dos motores a gasolina, etanol e outros combustíveis fósseis. Elas têm a função de fornecer a faísca necessária para inflamar a mistura ar-combustível na câmara de combustão, iniciando o ciclo de combustão. A eficiência dessa faísca pode ser afetada por vários fatores, incluindo o material da vela,

o qual pode influenciar a resistência ao calor, a durabilidade, e a capacidade de gerar uma faísca consistente e potente. As velas de irídio, por exemplo, apresentam uma resistência ao desgaste significativamente maior do que as velas convencionais, devido ao ponto de fusão elevado do irídio, que é aproximadamente 2.446°C, comparado aos 1.453°C do níquel (SUARES & NOBILE, 2022).

Os motores que utilizam velas de ignição de irídio podem apresentar melhorias significativas em termos de desempenho e economia de combustível. Segundo Albrano (2023), os ensaios realizados mostraram que a centelha produzida por essas velas pode proporcionar uma combustão mais completa, resultando em maior eficiência térmica e, conseqüentemente, em melhor aproveitamento da energia contida no combustível. Além disso, essa combustão mais eficiente também pode contribuir para a redução das emissões de gases poluentes, um aspecto cada vez mais importante diante das normas ambientais.

De acordo com Lima (2023), outra vantagem das velas de irídio é sua maior durabilidade em relação às velas convencionais. Enquanto as velas de níquel-cobre geralmente precisam ser substituídas a cada 20.000 a 40.000 km, as velas de irídio podem durar até 100.000 km ou mais, dependendo das condições de uso. Essa longevidade não apenas reduz a frequência de manutenção, mas também oferece um custo-benefício superior ao longo do tempo, mesmo considerando seu custo inicial mais elevado.

A durabilidade das velas de irídio também impacta positivamente a confiabilidade do motor. Motores que operam com velas de irídio tendem a manter um desempenho consistente por períodos mais longos, o que é especialmente importante em aplicações onde a confiabilidade é crítica, como em aeronaves e veículos de alto desempenho. A maior resistência ao desgaste e à corrosão do irídio contribui para a estabilidade do gap entre os eletrodos, garantindo uma faísca consistente ao longo da vida útil da vela (LIMA, 2023).

No entanto, apesar das vantagens apresentadas pelas velas de irídio, ainda existem debates sobre a real extensão dos benefícios em comparação às velas convencionais, especialmente em termos de custo-benefício em aplicações comuns, como veículos de passeio. O maior custo inicial das velas de irídio pode ser um fator limitante para muitos consumidores, embora a economia em combustível e a menor necessidade de substituição possam compensar esse investimento ao longo do tempo. Além disso, a escolha do tipo de vela deve levar em conta o tipo de motor, o perfil de uso do veículo e as condições de operação (ROSO *et al.*, 2019).

A análise da eficiência das velas de irídio também deve considerar fatores externos, como a qualidade do combustível e as condições climáticas, que podem afetar o desempenho do motor e, conseqüentemente, a eficiência das velas de ignição, deve ser levado em conta ao avaliar o papel das velas de irídio no cenário atual e futuro da indústria automotiva (ROSO *et al.*, 2019).

A escolha das velas de ignição pode influenciar diretamente a eficiência energética e o desempenho dos veículos, aspectos que são cada vez mais valorizados tanto pelos consumidores quanto pelas montadoras. Dada a crescente demanda por tecnologias que proporcionem maior economia de combustível e redução de emissões, torna-se relevante estudar as velas de irídio como uma solução potencial para melhorar a eficiência dos motores a combustão interna. Nesse sentido, este estudo se justifica pela possibilidade da pesquisa fornecer dados que possam auxiliar na tomada de decisões por parte de engenheiros e consumidores quanto à escolha das velas de ignição mais adequadas para diferentes aplicações. Destaca-se que se trata de um assunto ainda escasso tanto na literatura nacional quanto na internacional, demandando de estudos sobre o assunto.

A partir disso, o objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente o desempenho e a eficiência das velas de ignição de irídio em relação às velas convencionais (níquel-cobre), considerando aspectos como potência, economia de combustível e durabilidade. Já os objetivos específicos são:

- Submeter as velas a um regime de estresse que simule condições extremas de operação, avaliando a degradação, desgaste e falhas ao

longo do tempo para comparar a durabilidade das velas de irídio com as convencionais;

- Avaliar a estabilidade e eficácia das velas em ambientes de temperatura e carga variáveis, simulando condições reais de uso para observar diferenças de desempenho entre as velas; e
- Comparar os dados coletados para verificar a superioridade relativa das velas de irídio em relação às convencionais, proporcionando uma visão clara das vantagens e desvantagens de cada tipo de vela de ignição.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Os motores de combustão interna são aqueles, como o próprio nome já sugere, em que o combustível é queimado internamente, se composto por um mecanismo pistão, biela e virabrequim, podendo ser de dois a quatro tempos, sendo de injeção direta ou indireta (KIMURA, 2010). Além disso é caracterizado pela ignição periódica de combustível e ar. Esses dispositivos processam volumes de ar e combustível de maneira cíclica, sendo neste tipo que se enquadram os motores de ciclo do diesel e de ciclo otto. Brunetti (2012) descreve três tipos de motores de combustão interna. Os motores alternativos produzem trabalho por meio do movimento de vaivém de um pistão, que é transformado em rotação contínua por um sistema de biela-manivela. Nos motores rotativos, o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação, com exemplos como a turbina a gás e o motor Wankel. Já os motores de impulso geram trabalho a partir da força de reação dos gases expelidos em alta velocidade, como ocorre nos motores a jato e nos foguetes.

O processo ocorre com fluidos de trabalho (ar e combustível para produtos de combustão) trocados em um ciclo repetitivo com combustão ocorrendo em câmara fechada. Dentro dos motores de combustão interna, um dos elementos mais críticos para o funcionamento eficiente e confiável do sistema é o processo de ignição, especialmente em motores que utilizam combustíveis como gasolina ou etanol. A ignição adequada do combustível dentro da câmara de combustão é o que permite a transformação da energia química do combustível em energia mecânica, proporcionando o movimento do pistão e, conseqüentemente, a geração de potência (GOULART *et al.*, 2014). Nesse contexto, as velas de ignição desempenham um papel fundamental, sendo responsáveis por gerar a faísca que inicia o processo de combustão da mistura ar-combustível.

Badawy, Bao e Xu (2017) destacam que o projeto das velas de ignição tem um impacto significativo no desempenho dos motores de ignição por faísca (IF), especialmente em relação ao formato da ponta, tamanho do eletrodo e configuração do gap (espaço entre os eletrodos). Eles ressaltam que esses fatores influenciam diretamente na performance do motor, como a variação ciclo a ciclo da Pressão Média Efetiva Indicada (PMEI) e nos níveis de emissões. Melhorias nas velas de ignição são essenciais para garantir a ignição de misturas mais pobres de combustível e suportar condições operacionais severas. Uma forma simplificada de calcular a variação ciclo a ciclo da PMEI ($PMEI_n$) para um ciclo específico (n) é:

$$PMEI_n = \frac{W_n}{V_d} \quad (1)$$

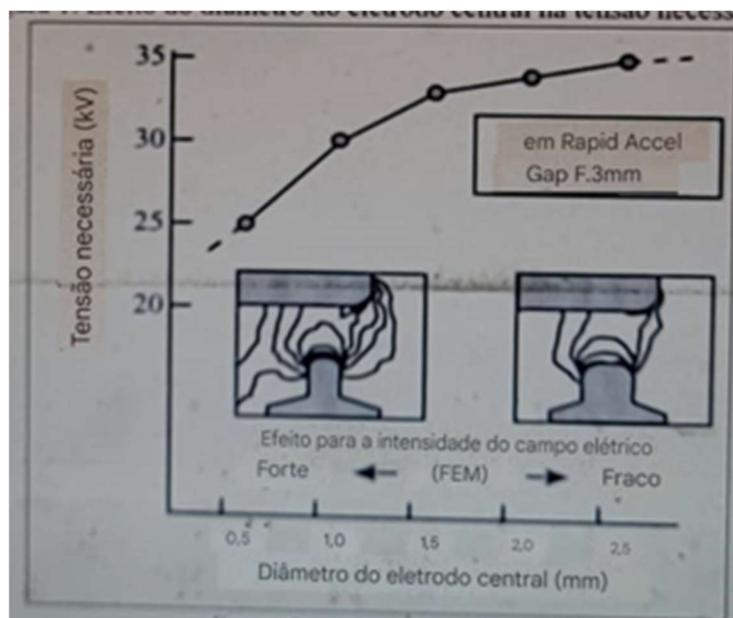
onde:

W_n é o trabalho indicado no ciclo n , que é a área do diagrama pressão e volume que é correspondente ao ciclo,

V_d é o volume deslocado do cilindro.

Osamura e Abe (1999) destacam a necessidade crescente de velas de ignição de alto desempenho e longa durabilidade em resposta à regulação do consumo de combustível e à redução de emissões poluentes. Para atender a esses requisitos, os pesquisadores se concentraram no desenvolvimento de velas de ignição que possuam diâmetros de eletrodo menores e maior resistência ao desgaste. Apesar das melhorias trazidas pelas velas de platina introduzidas em 1982, os autores consideram que existe um limite para a utilidade dessas velas em motores futuros. O estudo detalha a relação entre o diâmetro do eletrodo e a tensão necessária para a ignição. Eletrodos menores não só reduzem a tensão necessária, mas também melhoram a ignitabilidade, pois concentram o potencial elétrico na ponta do eletrodo, como mostrado no gráfico da Figura 1. Com um eletrodo menor, a energia fornecida pela bobina de ignição é usada de forma mais eficiente para o crescimento do núcleo da chama, minimizando a absorção de calor que poderia levar a falhas de ignição.

Figura 1. Efeito do diâmetro do eletrodo central na tensão necessária.



Fonte: Osamura e Abe (1999).

O gráfico mostra que a tensão necessária para a ignição aumenta conforme o diâmetro do eletrodo central aumenta. Com diâmetros menores, a tensão necessária é mais baixa, por volta de 20 kV, enquanto eletrodos maiores exigem até 35 kV. Isso ocorre porque eletrodos menores concentram o campo elétrico na ponta, facilitando a ignição, enquanto eletrodos maiores dispersam o campo, exigindo uma tensão maior para a ignição.

Osamura e Abe (1999) realizaram pesquisas para melhorar a resistência ao desgaste das velas de ignição, focando no desenvolvimento de uma nova liga de irídio. Os resultados desse estudo revelaram que o irídio possui um ponto de fusão 700°C superior ao da platina, conferindo-lhe excelente resistência ao desgaste durante a ignição. No entanto, sob condições de alta velocidade, a volatilidade oxidativa do irídio pode causar desgaste anormal, dificultando sua aplicação. Para resolver isso, foi criada uma liga com 10% de ródio, que, apesar de ter um ponto de fusão mais baixo, oferece excelente resistência ao desgaste em altas temperaturas. O ródio forma uma camada estável de óxido que protege o irídio da oxidação. Com novas técnicas de fabricação de baixo custo, foi possível produzir em massa essas velas, que superaram em desempenho e durabilidade as convencionais. O ganho específico em resistência ao desgaste foi alcançado com a adição de 10% em peso de ródio, o que melhorou significativamente a resistência a altas temperaturas e à oxidação.

Sobre as velas de irídio, Badawy, Bao e Xu (2017) verificaram o impacto do projeto das velas de ignição e do tamanho da abertura do eletrodo no desempenho e nas emissões de motores a

combustão, comparando duas velas de ignição, uma delas sendo a NGK Laser Iridium, com eletrodo de irídio de 0,6 mm, conhecida por sua durabilidade e resistência a altas temperaturas. Diferentes tamanhos de abertura (1,0, 1,2 e 1,4 mm) foram testados. Os principais resultados mostraram que a vela NGK Iridium teve um desempenho inferior à vela BUGAETS em termos de propagação da chama e pressão no cilindro. A vela NGK com abertura de 1,4 mm apresentou o melhor desempenho em termos de eficiência do motor e menores emissões de poluentes. Apesar de sua resistência e durabilidade, a vela de irídio da NGK produziu menos pressão no cilindro e uma menor taxa de liberação de calor em comparação com a vela BUGAETS. O estudo mostra que a concentração de monóxido de carbono varia com a proporção de combustível-ar e a abertura do gap da vela de ignição. Explica-se que para gaps de 1,2 mm e 1,4 mm, houve uma redução na concentração de partículas em comparação com o gap de 1 mm, devido a menores emissões de hidrocarbonetos e melhor mistura de combustível-ar com gaps maiores. Nos resultados específicos, para uma mistura pobre ($u = 0.8$), o aumento do gap de 1 mm para 1,2 mm e 1,4 mm reduziu a concentração total de partículas em 9,8% e 10,6%, respectivamente. Para a condição estequiométrica, a redução foi de 20.7% e 33.2%. O estudo concluiu que a configuração e o ajuste correto da abertura das velas de irídio, como a NGK, são fundamentais para melhorar a eficiência do motor e reduzir as emissões.

A pesquisa sobre velas de ignição de alta durabilidade, como as de irídio, evidencia avanços significativos na resistência ao desgaste e na eficiência da ignição, embora desafios permaneçam, especialmente em condições de alta velocidade. Os estudos demonstram que a configuração adequada das velas, incluindo o tamanho do eletrodo e a abertura, é crucial para otimizar a eficiência do motor e reduzir a poluição, destacando a importância de inovações contínuas no design e na fabricação dessas peças. O desenvolvimento de ligas de irídio e ródio marca um passo importante rumo a soluções mais eficazes e sustentáveis para a indústria automotiva, contribuindo para um futuro onde a performance e a responsabilidade ambiental andem lado a lado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo experimental foi projetado para realizar uma análise comparativa entre o desempenho e a eficiência das velas de ignição de irídio e as velas convencionais (níquel-cobre). A pesquisa focou em três aspectos principais: torque, potência e economia de combustível.

No teste de rodagem, o veículo percorreu cerca de 100 km em um percurso padronizado com velocidade de cruzeiro constante, repetindo o procedimento para cada combinação de vela e combustível, totalizando 400 km rodados no mesmo dia.

O material utilizado no experimento foi um automóvel com um motor de combustão interna EA827, a preparação incluiu sua montagem em um banco de testes conectado a um dinamômetro de rolos, com a instalação das velas de ignição de acordo com as especificações do fabricante, garantindo um torque adequado e conferência da distância do gap conforme recomendação. O dinamômetro foi calibrado para assegurar medições precisas, incluindo a configuração dos sensores de torque e velocidade (Figura 2).



Dinamômetro Servitec 2025 Automotivo	
Modelo:	2025 Rolo 24*Pol
Código	50.170.98
Número do rolo	1093
Circunferência do rolo	1,9m
Momento de inércia	70,419kgf.m ²
Versão firmware	218/4b

Figura 2. Dinamômetro modelo 2025 4x4

Fonte: servitecdinamometro.com.br (2024).

No primeiro experimento, um veículo Saveiro 2009, com motor 1.6 TotalFlex, foi submetido ao dinamômetro no mesmo dia, assegurando condições uniformes de temperatura e ambiente (Figura 3). Foram comparados o desempenho de velas de ignição de níquel e de irídio com gasolina comum e etanol, sempre com o motor em temperatura de trabalho.

Figura 3. Especificações do motor

MOTOR

Dianteiro, longitudinal, 1.6 litros, 4 cilindros em linha, 8 válvulas; total flex (álcool/gasolina); refrigeração a ar

Número de válvulas por cilindro	2; comando de válvulas no cabeçote; bloco em ferro fundido e cabeçote de alumínio
Diâmetro x curso	76,5 x 86,9 mm
Cilindrada	1.596 cm ³
Potência máxima (cv / rpm)	101,0 / 5.750 (gasolina)
	103,0 / 5.750 (álcool)
Torque máximo (kgfm / rpm)	14,2 / 3.000 (gasolina)
	14,5 / 3.000 (álcool)
Taxa de compressão	10,1
Sistema de alimentação	Injeção eletrônica multiponto sequencial

DESEMPENHO

Velocidade máxima	183 km/h (gasolina)
	184 km/h (álcool)
Aceleração de 0 a 100 km/h	11,3 s (gasolina)
	11,1 s (álcool)

Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

A injeção eletrônica foi configurada para permitir a troca de combustível e as velas de ignição foram substituídas de forma rápida e eficiente. As velas de ignição de irídio, modelo NGK Laser Iridium, foram comparadas com velas convencionais, modelo NGK Standard, mantendo as mesmas especificações do fabricante (Figura 4).

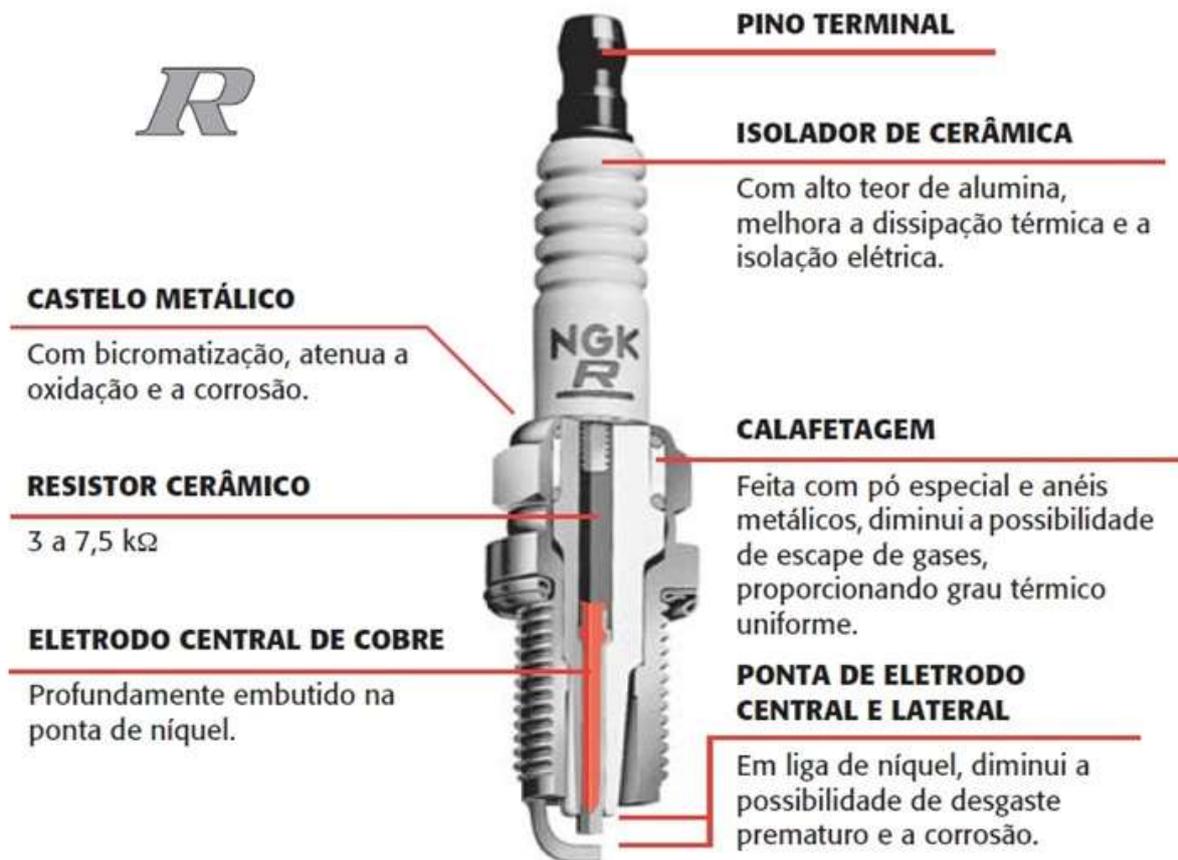
Figura 4. Especificações das Velas de Ignição

NGK												
VEÍCULO	MOTOR / VERSÃO	B	VELAS DE IGNIÇÃO				CABOS DE IGNIÇÃO		BOBINA DE IGNIÇÃO			
			ANO	NGK	NGK Green	NGK G-POWER PLATINUM ALLOY SPARK PLUGS	NGK IRIDIUM IX SPARK PLUG	ANO	CABO	ANO	BOBINA	
Saveiro	1.6 8v / Totalflex G5 (101cv gas. / 103cv etá. / CCR Transf. 2X2)	B	Desde 08/2009	BKR7ESB-D			BKR7EIX	0,9	Desde 08/2009	ST-V25	Desde 08/2009	U2003

Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

A Figura 5 apresenta um detalhamento técnico da construção de uma vela de ignição da marca NGK, destacando seus componentes e respectivas funções. (Manual velas NGK)

Figura 5. Detalhamento técnico da vela de ignição da NGK



Fonte: Catalogo NGK(2024).

O pino terminal é a extremidade superior da vela e tem como função conectar a vela ao cabo de ignição, permitindo a condução da corrente elétrica para o eletrodo central. O isolador de cerâmica, fabricado com alto teor de alumina, melhora a dissipação térmica e a isolamento elétrica, garantindo que a energia seja direcionada corretamente ao eletrodo central sem dispersões. O castelo metálico, com tratamento de bicromatização, protege a vela contra oxidação e corrosão, aumentando sua durabilidade em condições adversas. Pinto, B. R. (2016).

O resistor cerâmico, localizado internamente, apresenta resistência elétrica entre 3 e 7,5 k Ω e tem como objetivo reduzir interferências eletromagnéticas que poderiam afetar sistemas eletrônicos do veículo (Figura 6).

Figura 6. Vela de ignição da NGK



Fonte: Catálogo NGK (2024).

A calafetagem, feita com pó especial e anéis metálicos, impede o vazamento de gases e proporciona uma operação segura e estável, além de contribuir para a uniformidade térmica. O eletrodo central de cobre, profundamente embutido em uma ponta de níquel, é responsável por conduzir a corrente elétrica que gera a centelha necessária para a combustão. O cobre melhora a condução térmica, enquanto o revestimento de níquel aumenta a resistência ao desgaste.

Por fim, a ponta do eletrodo central e lateral, fabricada em liga de níquel, é projetada para suportar altas temperaturas e condições severas de combustão. Essa composição diminui o desgaste prematuro e oferece maior resistência à corrosão. A integração de todos esses componentes resulta em uma vela eficiente, durável e confiável, capaz de atender às demandas de diferentes motores, promovendo combustões mais completas e reduzindo emissões. Pinto, B. R. (2016)

Gasolina comum e etanol foram utilizados como combustíveis, com a intenção de avaliar o desempenho das velas em diferentes condições de operação. Os testes foram realizados em duas etapas principais: teste de desempenho e teste de autonomia e durabilidade.

No teste de desempenho com dinamômetro, os motores foram acoplados ao equipamento para medir a potência máxima e o torque em diferentes rotações por minuto (RPM). Cada tipo de vela de ignição foi instalado no mesmo motor, e os testes foram conduzidos separadamente para cada combustível (gasolina e etanol). A potência e o torque foram registrados em intervalos regulares durante o funcionamento do motor sob carga variável.

O motor foi iniciado e aquecido até atingir a temperatura de operação ideal. O dinamômetro aplicou cargas progressivas ao motor, aumentando a carga gradualmente e registrando

a potência e o torque em diferentes rotações por minuto (RPM). O teste ocorreu em uma faixa de RPM predefinida, normalmente entre 1.000 e 6.000 RPM, dependendo das especificações do motor. Durante todo o teste, a pressão do combustível, a temperatura do motor e outros parâmetros relevantes foram monitorados e registrados.

Os dados de potência e torque foram coletados pelo dinamômetro, permitindo a análise do desempenho do motor com cada tipo de vela. O comportamento do motor sob diferentes condições de carga foi avaliado, possibilitando observar variações de desempenho entre as velas de ignição.

No teste de autonomia e durabilidade, o motor foram submetidos a um regime de estresse que simulou condições extremas de operação, como altas rotações e acelerações rápidas. As velas foram monitoradas ao longo de um período definido, com registros de qualquer falha ou degradação visíveis.

Os testes incluíram variações controladas de carga, temperatura e tempo, permitindo a avaliação da durabilidade e do desempenho das velas sob diferentes cenários. Inicialmente, o motor foi operado em baixas rotações (RPM) e com carga reduzida, simulando condições de marcha lenta ou aceleração gradual, para avaliar a estabilidade das velas em um ambiente mais fresco. Em seguida, o motor foi submetido a altas rotações e cargas pesadas, simulando situações de aceleração intensa ou de arrasto, gerando altas temperaturas e pressões na câmara de combustão.

O ciclo também incluíra variações térmicas, alternando entre temperaturas elevadas e baixas para simular condições climáticas extremas. Cada ciclo teve uma duração específica, geralmente entre 15 a 30 minutos no dinamômetro de rolo, durante a qual o motor operou sob as condições de carga e temperatura previamente definidas. A cada determinado número de ciclos, as velas foram inspecionadas visualmente, e análises intermediárias foram realizadas para monitorar a condição das velas, incluindo medições de temperatura, pressão e desempenho da ignição.

Após a realização de uma série de ciclos de estresse, o motor foi deixado em uma fase de repouso para permitir que as velas se resfriassem antes de iniciar um novo ciclo, simulando o comportamento real do motor, onde ocorrem variações de carga e períodos de descanso. Todos os dados coletados durante os ciclos de estresse foram registrados para análise posterior, permitindo a comparação entre diferentes tipos de velas e a avaliação de resistência, durabilidade e eficácia sob condições de uso intensivo.

Após a conclusão dos ciclos de estresse, as velas foram inspecionadas visualmente para avaliar se houve degradação, desgaste ou falhas. Foi analisado o estado dos eletrodos, a integridade da cerâmica isolante e a capacidade de gerar a faísca necessária para a ignição.

Para os testes de autonomia, o tanque foi completado no mesmo posto e bomba saído direto para fazer os testes de consumo. O motor foi colocado em funcionamento e operado em um ciclo específico que simulou condições de uso real, com acelerações e desacelerações. A medição do fluxo de combustível foi registrada no abastecimento na bomba de combustível ao longo do tempo, permitindo calcular o consumo total durante o teste. O teste de autonomia continuou até que o tanque de combustível atingisse um nível mínimo predefinido ou até um tempo determinado de operação.

As informações obtidas permitiram avaliar a eficácia das velas de irídio em termos de potência, economia de combustível e durabilidade, contribuindo para a compreensão do impacto do design das velas na eficiência dos motores de combustão interna. Após a coleta de dados, os resultados foram analisados estatisticamente para comparar a eficiência, a potência e a durabilidade das velas de irídio em relação às velas convencionais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os testes realizados na pesquisa incluíram medições de torque e potência na roda, utilizando dinamômetro, e um teste de rodagem para avaliar consumo e autonomia do veículo.

Com gasolina comum, as velas de níquel apresentaram desempenho inferior em torque e potência na roda, enquanto as velas de irídio conforme mostrado na figura 7. demonstraram ganhos

médios de 3 a 5% no torque e 4 a 6% na potência máxima. A curva de potência obtida com as velas de irídio foi mais linear, indicando maior eficiência na queima do combustível. Ao utilizar etanol, as velas de níquel mostraram uma leve melhora no desempenho em comparação à gasolina, devido à maior octanagem do combustível, mas permaneceram abaixo dos valores registrados com velas de irídio. Estas últimas apresentaram os melhores resultados, com aumentos de 6 a 8% no torque e 5 a 7% na potência máxima em relação às velas de níquel, além de maior estabilidade no comportamento do motor.

4.1 Teste de Rodagem

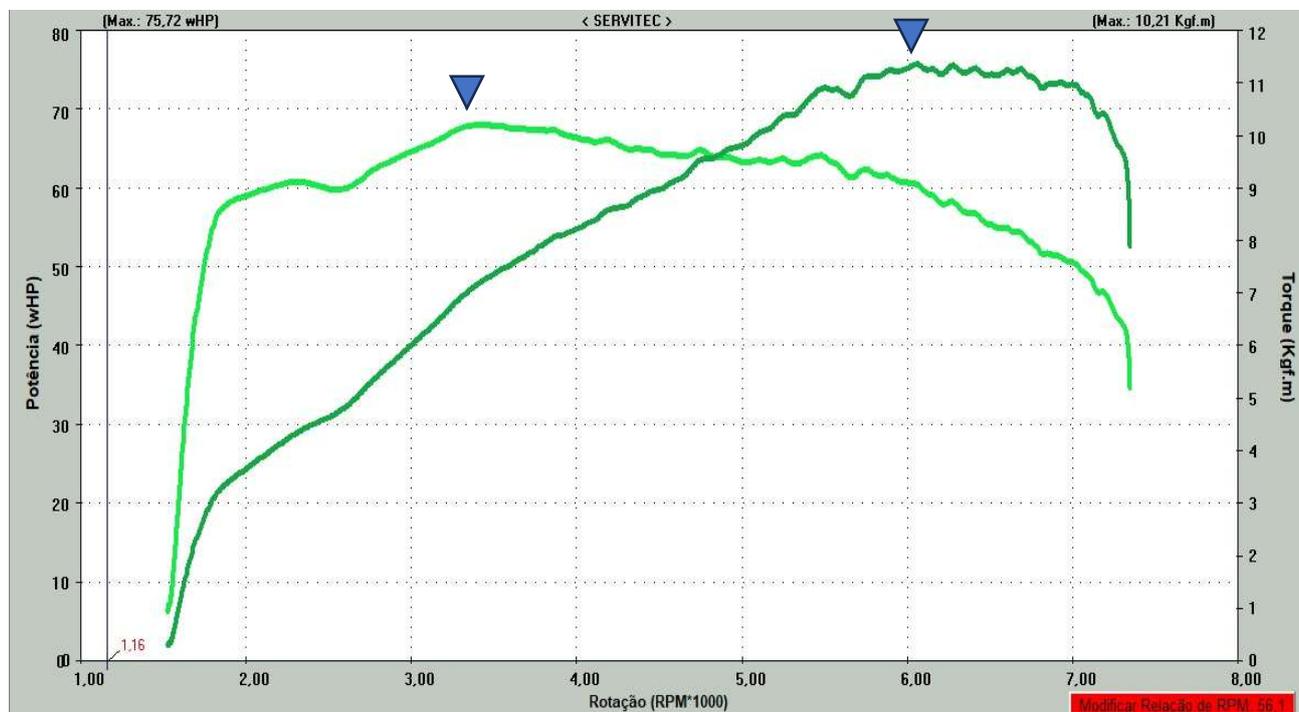
Com gasolina comum, as velas de níquel apresentaram um consumo médio de 16,20 km/L, enquanto as velas de irídio alcançaram 16,40 km/L, um ganho de cerca de 1,25% na autonomia. Com etanol, as velas de níquel registraram um consumo médio de 11,56 km/L, enquanto as de irídio apresentaram uma eficiência superior, com média de 11,67 km/L, destacando-se pela maior eficiência na queima do combustível mesmo em condições de uso prolongado.

Os resultados demonstram a superioridade das velas de irídio tanto em termos de desempenho quanto de eficiência, independentemente do tipo de combustível utilizado. A seguir, são apresentados gráficos e análises detalhadas que evidenciam as diferenças nos valores de torque, potência e consumo observados nos testes.

4.2 Teste de torque e potência

A figura 7 mostra as curvas de torque e potência em função da rotação do motor (RPM) para um veículo utilizando gasolina comum e velas de níquel.

Figura 7. Teste de torque e potência com gasolina comum + vela comum



Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

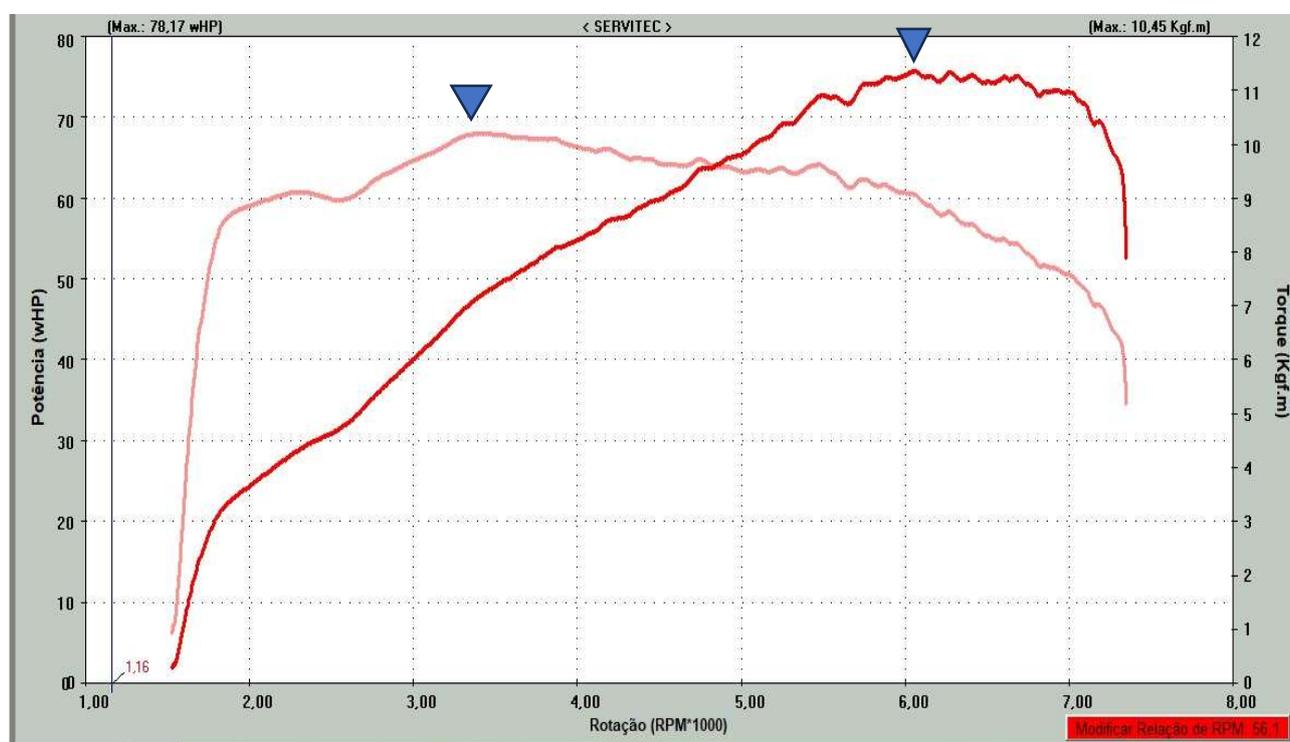
O torque atinge o pico de aproximadamente 10,21 kgf.m por volta de 3.400 RPM, mantendo-se estável até 4.000 RPM, antes de iniciar uma queda gradual. Já a potência cresce de forma

linear, atingindo seu valor máximo de 75,72 whp em torno de 6.000 RPM, com uma queda rápida logo em seguida. O comportamento linear das curvas indica uma combustão consistente, porém limitada, característica das velas de níquel.

O consumo de 16,20 km/L representa uma eficiência razoável para a configuração testada, especialmente em condições padronizadas de rodagem, onde o motor opera próximo de sua faixa ideal de eficiência energética, situada entre 2.000 e 3.000 RPM. A estabilidade do torque nessa faixa sugere que o veículo consegue manter velocidades de cruzeiro sem exigir muito esforço do motor, enquanto o crescimento constante da potência até 6.000 RPM demonstra a capacidade de manter o desempenho em situações mais exigentes.

A Figura 8, por sua vez, mostra as curvas de torque e potência do veículo utilizando gasolina comum e velas de irídio, com um consumo registrado de 16,40 km/L.

Figura 8. Teste de torque e potência gasolina comum + vela de irídio



Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

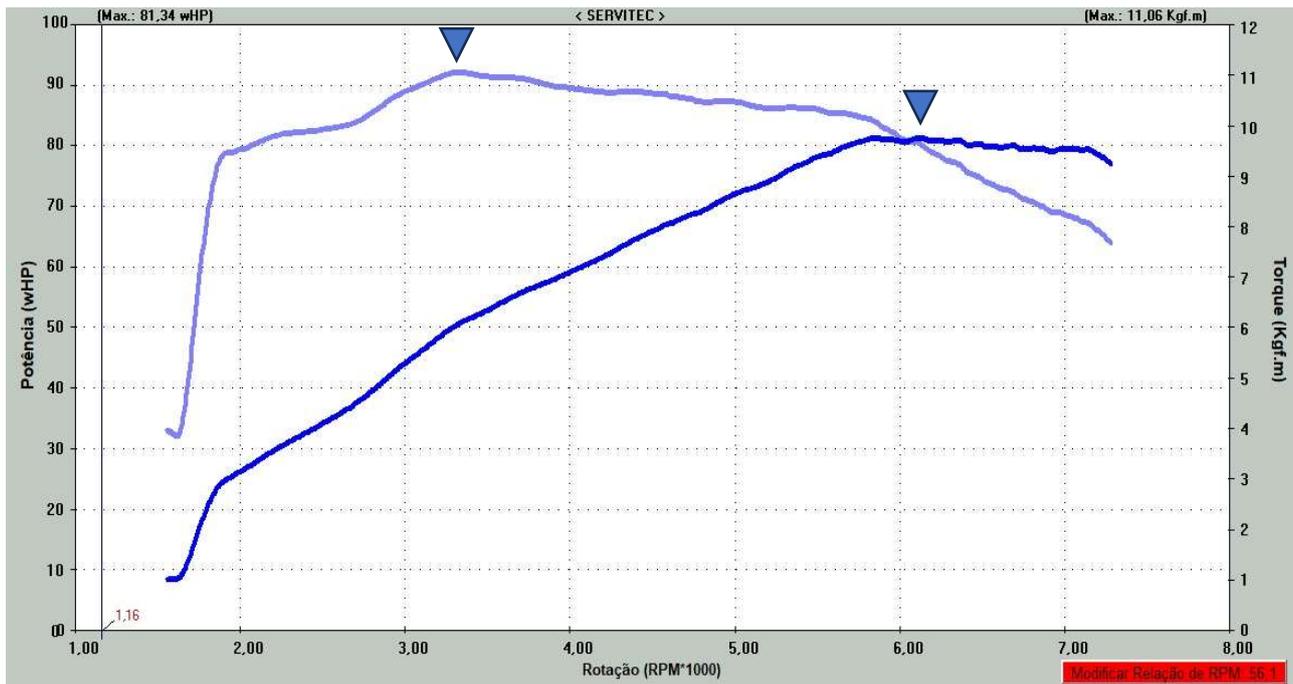
Em comparação ao gráfico anterior, referente às velas de níquel, observa-se um desempenho superior das velas de irídio. O torque máximo atinge 10,45 kgf.m, valor superior aos 10,21 kgf.m obtidos com as velas de níquel, e mantém-se estável por uma faixa mais ampla de rotação, começando a cair gradativamente somente após 4.000 RPM, o que evidencia maior eficiência e consistência na queima do combustível. Já a potência máxima chega a 78,17 whp, superando os 75,72 whp das velas de níquel. O crescimento da potência também se mostra mais linear e consistente, sem flutuações abruptas, o que reforça o aproveitamento mais eficiente da energia gerada pela combustão.

O consumo de 16,40 km/L, embora levemente superior ao das velas de níquel, reflete a maior eficiência das velas de irídio nas condições do teste. Essa melhora pode ser atribuída à maior linearidade das curvas e ao melhor aproveitamento energético, especialmente nas rotações intermediárias entre 2.000 e 4.000 RPM, faixa ideal para velocidades de cruzeiro. A estabilidade do torque e da potência nessa faixa reduz as perdas energéticas e maximiza a economia de combustível.

Em comparação às velas de níquel, as velas de irídio apresentaram um ganho de aproximadamente 2,4% no torque máximo, 3,2% na potência máxima e 1,2% no consumo. Apesar do ganho modesto em autonomia, o desempenho superior em torque, potência e linearidade demonstra a superioridade das velas de irídio, que garantem maior eficiência e estabilidade ao motor, especialmente em condições de uso prolongado ou mais exigentes.

A figura 9 exibe as curvas de torque e potência do veículo utilizando etanol e velas de irídio, associado a um consumo de 11,67 km/L.

Figura 9. Teste de torque e potência com etanol + vela de irídio



Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

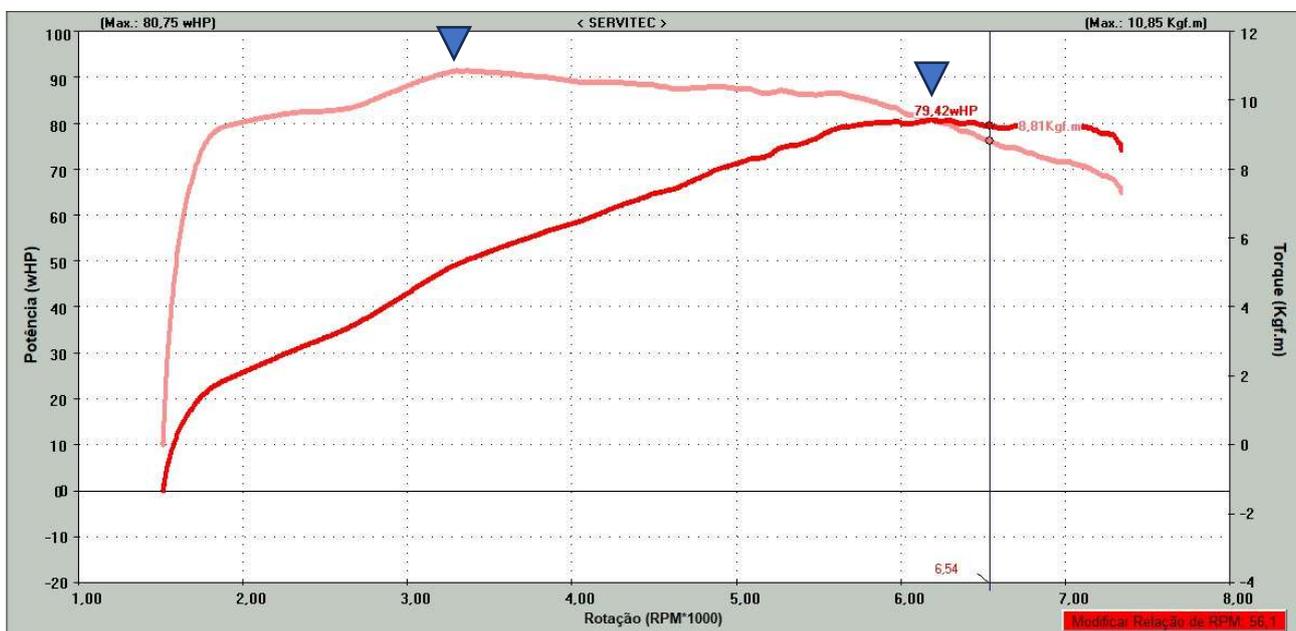
Comparando com os resultados obtidos no teste com velas de níquel utilizando etanol, que registraram um consumo de 11,56 km/L, observa-se uma vantagem de 0,11 km/L em favor das velas de irídio. Embora a diferença no consumo seja pequena, os dados indicam um desempenho superior das velas de irídio em termos de torque e potência. Analisando os dados do gráfico com etanol e velas de irídio, o torque máximo registrado é de 11,06 kgf.m, superior ao torque obtido com velas de níquel em testes com etanol, evidenciando maior eficiência na combustão proporcionada pelas velas de irídio. Além disso, a curva de torque é mais estável em uma faixa mais ampla de rotação, demonstrando maior consistência do motor. A potência máxima alcançada com essa configuração é de 81,34 whp, novamente superior aos valores observados com velas de níquel, indicando que as velas de irídio conseguem extrair mais energia do etanol, maximizando o desempenho do veículo.

Comparando os resultados de consumo com gasolina e etanol, para as velas de irídio, o consumo com etanol foi de 11,67 km/L, enquanto com gasolina foi de 16,40 km/L, o que demonstra uma eficiência significativamente maior da gasolina, cerca de 40% superior em termos de autonomia. No entanto, é importante destacar que a potência e o torque máximos registrados com etanol foram superiores, evidenciando o potencial do etanol para aplicações que priorizem o desempenho. Com velas de níquel, o consumo com etanol foi de 11,56 km/L, enquanto com gasolina foi de 16,20 km/L. Assim como no caso das velas de irídio, a gasolina também apresentou maior eficiência em autonomia

com as velas de níquel, e a diferença em relação ao etanol foi proporcionalmente semelhante à observada com as velas de irídio.

A Figura 10 exibe as curvas de torque e potência do veículo utilizando etanol e velas de níquel, associado a um consumo de 11,56 km/L.

Figura 10. Torque e potência com etanol + vela de níquel



Fonte: Dados primários da pesquisa (2024).

Destacando as comparações principais, com relação às velas de irídio versus velas de níquel, as velas de irídio apresentaram melhor desempenho as velas de irídio apresentaram um ganho de aproximadamente 2% no torque máximo, 0,74% na potência máxima e 1,2% no consumo. em consumo e potência em ambas as combinações de combustíveis. Com etanol, as velas de irídio apresentaram uma leve melhora no consumo (0,11 km/L) e desempenho superior em torque e potência. Com gasolina, os ganhos no consumo foram mais expressivos (0,20 km/L), além de apresentarem uma curva de potência mais linear. Comparando gasolina e etanol, a gasolina garantiu maior autonomia em todas as combinações de velas, enquanto o etanol destacou-se pelo maior desempenho absoluto em torque e potência máxima, refletindo as características intrínsecas dos combustíveis: a maior densidade energética da gasolina e o maior potencial de combustão do etanol.

De forma geral, as velas de irídio mostraram-se mais eficientes em todas as combinações de combustíveis, oferecendo ganhos tanto em desempenho (torque e potência) quanto em consumo, ainda que modestos no caso do etanol. A gasolina permanece como a escolha mais eficiente para autonomia, enquanto o etanol se destaca como a melhor opção para desempenho, em função dos resultados de torque e potência.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo trouxe uma análise comparativa entre as velas de ignição de irídio e as velas convencionais de níquel-cobre, levando em conta aspectos como torque, potência e economia de combustível, conforme estabelecido nos objetivos. Os testes realizados em condições controladas e sob regimes de estresse que simulam situações extremas de operação revelaram diferenças significativas entre os dois tipos de velas.

Em termos de potência e eficiência, as velas de irídio apresentaram vantagem em relação às velas convencionais. Foi observado um aumento na potência máxima, ainda que sutil, com uma maior estabilidade na entrega de torque ao longo das faixas de rotação. Essa estabilidade, aliada à capacidade do irídio de manter a centelha mais precisa e constante, contribuiu para uma combustão mais eficiente. Em relação à economia de combustível, os testes mostraram um ganho marginal com as velas de irídio, especialmente em motores que operam com gasolina, enquanto os ganhos foram menos expressivos com etanol. Apesar da diferença modesta, ela reflete a maior eficácia do irídio em otimizar o processo de combustão.

Quanto à durabilidade, o regime de estresse evidenciou a superioridade do irídio. A resistência ao desgaste e à corrosão desse material prolonga significativamente a vida útil da vela em comparação com as velas convencionais, que apresentaram sinais de degradação mais rapidamente. Essa durabilidade é especialmente importante em veículos submetidos a condições severas de uso, como altas temperaturas e cargas elevadas.

A análise também confirmou a eficácia das velas de irídio em condições variáveis de operação, com menor perda de desempenho em ambientes de alta exigência. Isso sugere que as velas de irídio são mais adequadas para motores modernos, que demandam maior precisão na ignição para atender às normas de eficiência energética e emissões.

Os resultados do estudo evidenciam a superioridade das velas de irídio em relação às velas de níquel, tanto em desempenho quanto em consumo de combustível. Nos testes com gasolina comum, as velas de irídio apresentaram ganhos de 2,4% no torque máximo (10,45 kgf.m contra 10,21 kgf.m das velas de níquel) e 3,2% na potência máxima (78,17 whp contra 75,72 whp). Além disso, o consumo foi 1,2% mais eficiente, alcançando 16,40 km/L em comparação com os 16,20 km/L das velas de níquel. O desempenho superior das velas de irídio foi associado a curvas de torque e potência mais lineares, indicando maior eficiência na queima do combustível.

Com etanol, as velas de irídio também se destacaram, registrando um torque máximo de (11,06 kgf.m contra 10,85 kgf.m) e uma potência máxima de (81,34 whp contra 80,75 whp), valores superiores aos obtidos com velas de níquel. O consumo médio foi ligeiramente melhor com as velas de irídio, atingindo 11,67 km/L contra 11,56 km/L com as velas de níquel. Embora o ganho em consumo tenha sido modesto (0,11 km/L), a maior estabilidade e eficiência nas faixas de torque e potência reforçam a superioridade das velas de irídio, especialmente em condições de uso prolongado ou em regimes mais exigentes.

Quando comparados os combustíveis, a gasolina se mostrou mais eficiente em termos de autonomia, com um consumo superior em cerca de 40% em relação ao etanol, independentemente do tipo de vela. Contudo, o etanol demonstrou maior desempenho em torque e potência máxima, especialmente quando utilizado com velas de irídio. Assim, enquanto a gasolina é ideal para quem busca maior autonomia, o etanol se destaca como uma opção para aplicações que priorizem desempenho. Em ambos os casos, as velas de irídio garantiram maior eficiência e estabilidade em comparação com as velas de níquel.

Nesse sentido, os resultados corroboram a superioridade das velas de ignição de irídio, principalmente em aspectos relacionados à durabilidade e eficiência em combustão. No entanto, é importante ponderar que os benefícios em termos de desempenho e economia de combustível podem ser mais relevantes para determinados tipos de motores e condições de uso. Embora as velas de níquel-cobre ainda apresentem bom custo-benefício em situações menos exigentes, as velas de irídio se destacam como uma escolha mais vantajosa para quem busca maior desempenho, economia a longo prazo e menor necessidade de manutenção.

Ao final do estudo foi possível confirmar as vantagens técnicas das velas de irídio e forneceu informações para que consumidores e profissionais da área automotiva possam tomar decisões informadas ao optar por um tipo de vela de ignição. Além disso, os resultados abrem possibilidades para estudos futuros que considerem a interação entre diferentes tipos de combustível e tecnologias de motor mais avançadas.

As principais limitações deste estudo estão relacionadas à abrangência das condições testadas e à generalização dos resultados. Os testes foram realizados em cenários controlados e com parâmetros específicos de motor e combustível, o que pode não refletir a ampla variedade de configurações e situações reais encontradas no uso cotidiano. Além disso, os resultados observados podem variar dependendo de fatores externos, como a qualidade do combustível utilizado, o estado geral do motor e as condições ambientais, como temperatura e altitude.

Outro ponto limitante é que o regime de estresse e os períodos de uso simulados não necessariamente correspondem à totalidade do ciclo de vida das velas, podendo haver diferenças na degradação em situações de uso prolongado. Por fim, embora tenha sido realizada uma comparação detalhada entre velas de irídio e níquel-cobre, outras tecnologias de velas disponíveis no mercado não foram incluídas, o que restringe a análise a esses dois tipos específicos.

Para pesquisas futuras, recomenda-se aprofundar a análise sobre o uso de velas de ignição de irídio, explorando sua aplicação em motores de diferentes arquiteturas e cilindradas, incluindo tecnologias emergentes, como motores híbridos que utilizam geradores a combustão.

6. REFERÊNCIAS

- Badawy, T., Bao, X. and Xu, H., 2017. Impact of spark plug gap on flame kernel propagation and engine performance. *Applied energy*, 191, pp.311-327.
- Brunetti, F., 2018. *Motores de combustão interna, v. 1* (Vol. 2). Editora Blucher.
- Dang, Q., Lin, H., Fan, Z., Ma, L., Shao, Q., Ji, Y., Zheng, F., Geng, S., Yang, S.Z., Kong, N. and Zhu, W., 2021. Iridium metallene oxide for acidic oxygen evolution catalysis. *Nature Communications*, 12(1), p.6007.
- Goulart, B.S., Bringhenti, C., Tomita, J.T. e Oliveira, A.C., 2014. Technical evaluation of vehicle ignition systems: conduct differences between a high energy capacitive system and a standard inductive system. *Acta Scientiarum. Technology*, 36(4), pp.629-634.
- Heywood, J.B., 1988. *Internal combustion engine fundamentals*. 2d edn. United States: McGraw Hill Education.
- Kimura, R.K., 2010. Uso da técnica de análise de óleo lubrificante em motores diesel estacionários, utilizando-se misturas de biodiesel e diferentes níveis de contaminação do lubrificante. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Mecânica dos Sólidos.
- Lima, V. 2023. Raio X: Honda Civic Híbrido 2023. *O Mecânico*. 23(350) pp. 30-39. https://omecanico.com.br/wp-content/uploads/2023/06/Mecanico_ed350_site.pdf
- Osamura, H. and Abe, N., 1999. *Development of new iridium alloy for spark plug electrodes* (No. 1999-01-0796). SAE Technical Paper.

Suares, J., & Nobile, A. (2022). A Conversão das aeronaves Cessna 152 de instrução para o uso do etanol. *Revista do CIAAR*, 3.

Goulart, B. S., Bringhenti, C., Tomita, J. T., & Oliveira, A. C. (2014). Technical evaluation of vehicle ignition systems: conduct differences between a high energy capacitive system and a standard inductive system. *Acta Scientiarum. Technology*, 36(4), 629-634.

Ramos, R. D. (2021). Impacto do avanço de ignição na leitura da sonda lambda em motores de combustão interna.

Pinto, B. R. (2016). Pesquisa, projeto e construção de um sistema de ignição por magneto de baixa tensão.