

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA

AGUSTINHO JOSÉ DALPRÁ

**EXPERIMENTAÇÃO PLANEJADA PARA ANÁLISE DOS FATORES QUE
INFLUENCIAM OS PONTOS ÓTIMOS DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR
DE COMBUSTÃO INTERNA**

Joinville

2020

AGUSTINHO JOSÉ DALPRÁ

EXPERIMENTAÇÃO PLANEJADA PARA ANÁLISE DOS FATORES QUE
INFLUENCIAM OS PONTOS ÓTIMOS DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA

Trabalho apresentado como requisito para
obtenção do título de bacharel no Curso de
Graduação em Engenharia Automotiva do
Centro Tecnológico de Joinville da
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Leonel R Cancino, Dr. Eng.

Coorientador: Eduardo M. Barreto, M. Eng.

Joinville

2020

AGUSTINHO JOSÉ DALPRÁ

EXPERIMENTAÇÃO PLANEJADA PARA ANÁLISE DOS FATORES QUE
INFLUENCIAM OS PONTOS ÓTIMOS DE FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Automotiva, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 04 de dezembro de 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Leonel R Cancino, Dr. Eng.
Orientador/Presidente

Prof. Marcelo Vandressen, Dr. Eng.
Membro
IFSC

Prof. Julio C. Lodetti, M. Eng.
Membro
Volvo Group

Aos meus pais, Agostinho Antonio e Clarinda Rosa que terão seus esforços e suas origens por mim sempre lembrados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de tudo à Deus e Nossa Senhora Aparecida por me iluminaram durante toda minha graduação e pelas minhas conquistas.

Agradeço imensamente aos meus pais Agostinho Antônio e Clarinda Rosa que em nenhum momento da minha vida acadêmica desacreditaram da minha capacidade e que nunca deixaram faltar nada para que eu pudesse realizar o sonho de ser Engenheiro Automotivo.

Agradeço ao meu orientador Leonel Rincon Cancino pelo apoio e incentivo do início ao fim do desenvolvimento do presente trabalho. Ao meu coorientador Eduardo da Master Injection pela paciência e tempo investido para que este trabalho pudesse se tornar realidade.

Aos membros da equipe Fórmula CEM e ao professor Modesto Hurtado Ferrer por todo a confiança depositada em meu trabalho, incentivo e apoio durante os 4 anos que fui membro da equipe.

Ao meu melhor amigo Anderson que nunca mediu esforços para me ajudar e me escutar nas horas que mais precisei de um ombro amigo para desabafar durante a árdua batalha de escrever um TCC. Aos meus colegas da graduação que me auxiliaram de todas as formas. Agradeço ao Willian da Synetic Cabeçotes por todos os ensinamentos repassados e toda a mão de obra prestada. A equipe Regicar Preparações pelo auxílio durante os experimentos.

“Somos anjos de uma asa só e só voamos quando abraçados uns aos outros”

- Luciano de Crescenzo

RESUMO

Embora muitos calibradores de motores de alta performance realizem a calibração dos motores analisando alguns fatores, porém a interação entre estes não é levada em consideração, portanto, o planejamento de um experimento em conjunto a utilização de ferramentas estatísticas pode ser utilizado para otimizar o desempenho do motor, com o objetivo de encontrar os pontos ótimos de funcionamento. A otimização de um veículo de competição é um fator importante o qual pode determinar o vencedor de uma temporada. O objetivo deste trabalho foi planejar um experimento para avaliar quais fatores tem maior influência no funcionamento de um MCI a fim de se reduzir tempo e agregar qualidade ao processo de calibração de um motor. Para alcançar tal objetivo, fez-se a utilização da ferramenta DOE, a qual foi elaborado um plano de testes a fim de se analisar a influência de 5 fatores nos pontos ótimos de consumo específico, avanço de ignição e por consequência torque máximo ao freio. O experimento foi realizado em um dinamômetro de chassis com freio magnético. Com base nos conhecimentos de motores, instrumentação, ensaios e DOE foi criado um planejamento de experimento e analisado a influência da rotação, MAP, energia de bobina, razão estequiométrica e CLT nos valores de torque, avanço de ignição e BSFC. Notou-se que MAP e a rotação tem uma forte influência nos valores de avanço de ignição e torque. Já a razão estequiométrica tem influência direta no BSFC.

Palavras-chave: DOE. Calibração de motores. Máximo torque. Dinamômetro.

ABSTRACT

Although many high performance engine calibrators perform engine calibration by analyzing some factors, however the interaction between them is not taken into account, therefore, planning an experiment together using statistical tools can be used to optimize the performance of the engine, in order to find the optimal points of operation. The optimization of a competition vehicle is an important factor which can determine the winner of a season. The objective of this work was to design an experiment to assess which factors have the greatest influence on the functioning of an MCI in order to reduce time and add quality to the engine calibration process. The objective of this work was to design an experiment to assess which factors have the greatest influence on the functioning of an MCI in order to reduce time and add quality to the engine calibration process. In order to achieve this objective, the DOE tool was used, which was designed a test plan in order to analyze the influence of 5 factors in the optimum points of specific consumption, ignition advance and consequently maximum torque to the brake. The experiment was carried out on a chassis dynamometer with a magnetic brake. Based on the knowledge of engines, instrumentation, tests and DOE, an experiment plan was created and the influence of rotation, MAP, coil energy, stoichiometric ratio and CLT on torque, ignition advance and BSFC values were analyzed. It was noticed that MAP and the rotation have a strong influence on the ignition advance and torque values. The stoichiometric ratio has a direct influence on the BSFC.

Keywords: DOE. Engine Calibration. Maximum torque. Dynamometer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistemas de um veículo.....	15
Figura 2 - Motor de combustão interna de ignição por centelha.	19
Figura 3 - Pressão no cilindro em relação ao ângulo de virabrequim.....	21
Figura 4 - Pressão no cilindro por ângulo de virabrequim.....	22
Figura 5 - Operações de um ciclo Otto de 4 tempos.....	23
Figura 6 - Princípio de operação de um dinamômetro.....	24
Figura 7 - Influência do avanço de ignição na pressão do cilindro e no torque relativo.	26
Figura 8 - influência da razão estequiométrica na máxima potência.....	28
Figura 9 - Exemplo de mapa de ignição.....	29
Figura 10 - Exemplo de mapa de injeção.....	29
Figura 11 - Modelo geral de um processo.....	30
Figura 12 - Curva característica de sensor IAT.....	34
Figura 13 - Conjunto sonda lambda e condicionador de sinal.....	35
Figura 14 - Organização de uma ECU.....	36
Figura 15 - Árvore de amostragem do experimento.....	37
Figura 16 – Mapa de processo do experimento.....	40
Figura 17 - Carro posicionado no dinamômetro.....	41
Figura 18 – Tabela de amostragem e resultados do experimento.....	42
Figura 19 - Valores de torque em ordem crescente.....	43
Figura 20 - “Cell-Plot” com alinhamento entre MAP e torque.....	44
Figura 21- Gráfico de pontos para o torque.....	45
Figura 22 - Gráfico de pontos mostrando a variação de cada fator do experimento.....	45
Figura 23 – Pareto dos graus de liberdade do experimento.	46
Figura 24 - Modelo reduzido para o torque.....	46
Figura 25 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento.....	47
Figura 26 - Variação do ângulo de ignição no experimento.....	47
Figura 27 - "Cell-Plot" com MAP alinhado com o ângulo de ignição.....	48
Figura 28 - Gráfico de pontos para o avanço de ignição.....	48
Figura 29 - "Normal Plot" mostrando os graus de liberdade significativos.....	49
Figura 30 - Pareto dos graus de liberdade do experimento.	49
Figura 31 - Modelo reduzido para o ângulo de ignição.	50
Figura 32 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento.....	50
Figura 33 - Valores de pulso de injeção de combustível.....	51

Figura 34 - “Cell-Plot”para valores de pulso de injeção de combustível.	51
Figura 35 - Gráfico de pontos para o pulso de injeção de combustível.	52
Figura 36 - Normal Plot para o pulso de injeção de combustível.....	52
Figura 37 - Pareto para o pulso de injeção de combustível.....	53
Figura 38 - Resultado do modelo reduzido.	53
Figura 39 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Parâmetros de um experimento planejado	31
Quadro 2 - Fatores selecionados para o experimento	33
Quadro 3 - Variáveis resposta	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Razão estequiométrica para diferentes combustíveis	27
Tabela 2 - Características do motor	32
Tabela 3 - Fatores e níveis do experimento.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- BSFC – Consumo específico ao freio (*Brake Specific Fuel Consumption*)
- MBT – Torque máximo ao freio (*Maximum Brake Torque*)
- DOE – Planejamento de experimentos (*Design Of Experiments*)
- MCI – Motor de combustão interna
- SI – Ignição por centelha (*Spark Ignition*)
- ECU – Unidade de controle do motor (*Engine Control Unit*)
- PMS – Ponto Morto Superior
- PMI – Ponto Morto Inferior
- BMEP – Pressão média efetiva ao freio (*Brake mean effective pressure*)
- MAP – Pressão absoluta no coletor de admissão (*Manifold Absolute Pressure*)
- IAT – Temperatura do arna admissão (*Intake Air Temperature*)
- CLT – Temperatura do líquido de arrefecimento do motor (*Engine Coolant Temperature*)
- AMPS – Antes do Ponto Morto Superior
- DPMS – Depois do Ponto Morto Superior
- VAA – Válvula de admissão aberta
- VAF – Válvula de admissão fechada
- VEA – Válvula de exaustão aberta
- VEF – Válvula de exaustão fechada
- ANOVA - Análise de Variância (*Analysis of Variance*)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA.....	19
2.1.1. Funcionamento do ciclo Otto	20
2.2 COMBUSTÃO EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA	21
2.1.2. Torque e potência ao freio	23
2.1.3. Pressão Média Efetiva ao Freio (BMEP)	24
2.1.4 Consumo Específico ao Freio (BSFC)	25
2.1.5 Torque máximo ao freio (MBT)	25
2.1.6 Mistura Ar combustível	26
2.1.7 Mapas de injeção e ignição	28
2.1.8 DOE - Planejamento de experimentos	29
3. MATERIAIS E METODOLOGIA	32
3.1 OBJETO DE ESTUDO	32
3.2 METODOLOGIA	32
3.2.1 Escolha e coleta dos sinais	33
3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO MOTOR	33
3.3.1 Sensor de pressão de absoluta –MAP	33
3.3.2 Sensores de temperatura	34
3.3.2.1 Sensor de temperatura de admissão IAT	34
3.3.2.3 Sensor de temperatura de líquido de arrefecimento ECT	34
3.3.3 Sensor de oxigênio	35
3.3.2 Dinamômetro	35
3.3.3 Sistema de gerenciamento do motor	36
4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	37
4.1 SELEÇÃO DOS DADOS COLETADOS.....	38
5. EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO E AQUISIÇÃO DOS DADOS	40
6 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS	43

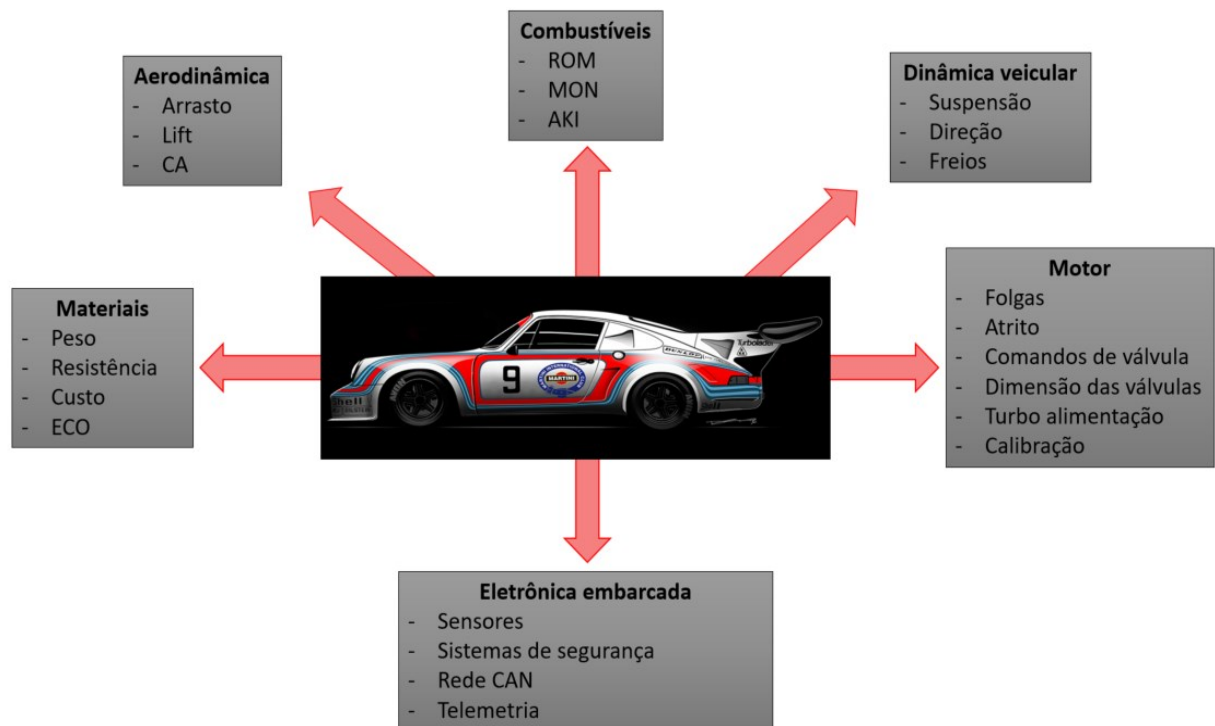
6.1 Y1 – TORQUE	43
6.2 Y2 – ÂNGULO DE IGNIÇÃO PARA MÁXIMO TORQUE	47
6.3 Y3 – PULSO DE INJEÇÃO.....	50
6.3 MAPAS	55
6.4 CURVAS CARACTERISTICAS.....	56
7. CONCLUSÃO.....	58
REFERÊNCIAS.....	60
APÊNDICE A – INTEFACE MASTER INJECTION.....	61
APÊNDICE B – INTERFACE JMP	62

1. INTRODUÇÃO

Ao participar de equipes de competições do automobilismo, um estudante de engenharia se depara com uma série de sistemas com diferentes funções, os quais podem ser explorados e otimizados. A otimização de um veículo de competição é um fator importante o qual pode determinar o vencedor de uma temporada.

Na Figura 1 é possível observar alguns dos sistemas de um veículo e suas áreas que podem ser exploradas:

Figura 1- Sistemas de um veículo



Fonte: O Autor (2020)

Os componentes estruturais de um veículo de competição vêm evoluindo, pois há um aumento na procura por chassis com menor peso, com mesma ou maior resistência estrutural e sem aumentar custos de produção. O desenvolvimento do chassi é primordial, permitindo assim melhorar as características do veículo. Com a evolução de um projeto e a sua

concepção é possível elevar os níveis competitivos sem aumentar os custos de produção e de manutenção (Marques, 2014).

Além disso, sistemas dinâmicos como, por exemplo, veículos em movimento, também são estudados para minimizar ou evitar acidentes. A melhoria de diversos componentes, como os sistemas de suspensão, permite ter resultados tão significativos quanto aqueles obtidos em projetos de estruturas. Os fenômenos vibratórios estão fortemente presentes em sistemas veiculares como ônibus, automóveis, motos e máquinas agrícolas. Por esse motivo, devemos aprofundar-se sobre esse assunto através da análise teórica e numérica desses fenômenos. (Ruthes, 2016)

A segurança tanto ao piloto quanto aos entusiastas e a vitalidade do veículo é levada muito a sério em uma equipe. O sistema de freios, quando corretamente dimensionado, conservado e ajustado, proporciona ao piloto a garantia de uma frenagem segura, sob as mais diversas condições impostas, devendo ser capaz de parar um veículo na menor distância possível e também não superaquecer, ou até mesmo deixar de funcionar, sob qualquer condição de pista e velocidade. (Silveira, 2010)

Em tempos de restrições governamentais cada vez mais rígidas, montadoras de todos os segmentos estão investindo em pesquisa e desenvolvimento em downsizing, uma das tendências mais comuns atualmente, que significa o emprego de motores menores, porém sobrealimentados, no lugar de motores maiores e menos eficientes. (Pastorelli, 2015)

O projeto de motores de combustão interna - MCI tem se tornado um grande desafio de engenharia para os projetistas. Atualmente, tem-se a necessidade de reduzir o consumo combustíveis, reduzir as emissões residuais e otimizar a potência dos motores. Com todas essas exigências estão surgindo MCI's com injeção direta de combustível, podendo ser de forma estratificada ou homogênea. A estratégia de estratificação tem um propósito em comum alcançar a estratificação da carga, isto significa gerar "zonas" de estequiometria diferentes no interior da câmara de combustão. A otimização da eficiência global dos motores SI deu origem ao crescente esforço de desenvolvimento direcionado para motores com formação interna de mistura. A melhor eficiência é um resultado da compressão mais alta e perdas mais baixas de estrangulamento. (BOSCH, 2005)

Tratando-se de MCI's para algumas categorias do automobilismo nacional, as emissões residuais ficam em segundo plano, dando-se preferência para o aumento do torque e potência e redução do consumo de combustível, evitando assim inconvenientes paradas para abastecimento.

Para isso, agregar qualidade e tornar o processo de calibração de um motor de MCI mais eficiente e para entender realmente as relações de causa e efeito em um sistema, é necessário alterar deliberadamente as variáveis de entrada do sistema e observar na saída do sistema as mudanças que essas alterações geram. O planejamento de um experimento em conjunto a utilização de ferramentas estatísticas pode ser utilizado para otimizar o desempenho do motor, com o objetivo de encontrar os pontos ótimos de funcionamento.

Para entender realmente as relações de causa e efeito em um sistema, como escrito anteriormente, é necessário alterar deliberadamente as variáveis de entrada do sistema e observar na saída do sistema as mudanças que essas alterações geram, em outras palavras, é preciso conduzir um experimento. Experimentos planejados são utilizados para descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema ou até mesmo para confirmar experiências ou teorias. (Montgomery, 2017)

O objetivo do presente trabalho é planejar um experimento e utilizar uma ferramenta estatística para avaliar quais fatores influenciam no funcionamento de um MCI. Para alcançar tal objetivo, fez-se a utilização da ferramenta planejamento de experimentos – DOE (*Design Of Experiments*), a qual foi elaborado um plano de testes a fim de se analisar a influência de 5 fatores nos pontos ótimos de consumo específico, avanço de ignição e, por consequência, torque máximo ao freio.

Rotação, λ , energia da bobina, pressão no coletor de admissão e temperatura do motor, foram os fatores avaliados. Cada um deles teve 2 níveis para a realização do experimento. Um experimento estático foi desenvolvido e a coleta dos dados foi realizada em um dinamômetro de chassi devidamente instrumentado.

No capítulo 1 tem-se uma breve noção das otimizações possíveis em veículos e o objetivo do que foi feito no presente trabalho. No capítulo 2 é possível conhecer mais sobre os conceitos que foram abordados superficialmente anteriormente. Posteriormente, é possível acompanhar a metodologia, os materiais e o plano de teste que foi elaborado para fim de se ter uma coleta de dados eficiente e organizada.

No quarto capítulo apresentam-se os dados coletados nos ensaios, os quais são analisados futuramente no capítulo posterior. Por fim, apresentamos a conclusão que foi obtida com todos os experimentos executados.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é planejar um experimento e avaliar quais fatores influenciam nos parâmetros ótimos de funcionamento de um MCI, a fim de se reduzir tempo e agregar qualidade ao processo de calibração de um motor.

1.1.1 Objetivo Geral

Planejar um experimento de dois níveis com cinco fatores e avaliar a influência das variáveis de entrada nas variáveis de resposta.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Planejar um experimento fatorial fracionado;
- Definir fatores, níveis e as variáveis de resposta;
- Criar um mapa de processo;
- Instrumentar um motor;
- Obter valores de torque em dinamômetro de chassi;
- Utilizar ferramenta estatística para analisar a influência dos fatores na operação de um MCI;
- Obter pontos ótimos de operação de um motor;
- Analisar a influência das variáveis de entrada nas variáveis de resposta.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

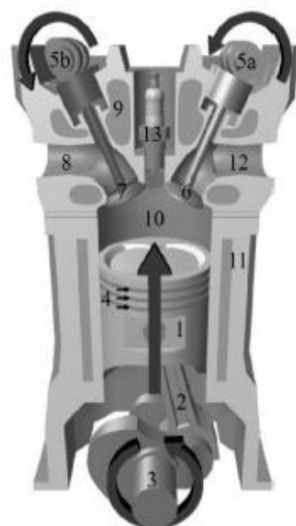
Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos teóricos utilizados no desenvolvimento deste trabalho. É apresentado o funcionamento de um motor de combustão interna de ignição por centelha, assim como alguns de seus subsistemas. O entendimento destes é a base para o desenvolvimento da metodologia em questão.

2.1. MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Um MCI, tem o objetivo de converter energia química de uma mistura ar/combustível em energia mecânica em um eixo na forma de torque.

Com o avanço do desenvolvimento de MCI's obtendo-se altas relações potência/peso, seu uso foi amplamente aplicado em veículos para transporte terrestre, marítimo e aéreo (Heywood, 1988). Esta conversão de energia contida na mistura é possível com a integração dos diversos componentes de um MCI, os quais funcionam de forma interligada, como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Motor de combustão interna de ignição por centelha.



1. Pistão;
2. Biela;
3. Virabrequim;
4. Anéis de vedação/lubrificação;
5. Comando de válvulas;
6. Válvula de admissão;
7. Válvula de exaustão;
8. Coletor de exaustão;
9. Cabeçote;
10. Cilindro;
11. Bloco;
12. Coletor de admissão

Fonte: Adaptado de (Padilha, 2007)

2.1.1. Funcionamento do ciclo Otto

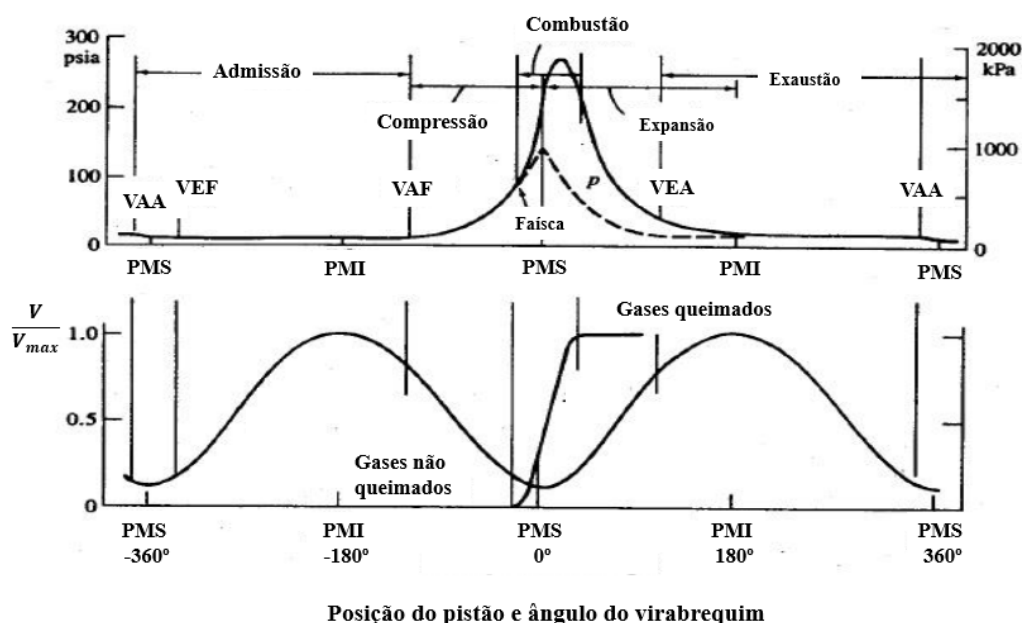
Os motores de ciclo Otto, também chamados de motores de ignição por faísca - *sparkignition* (SI), são motores que normalmente misturam o ar e o combustível antes de entrar na câmara de combustão, usando um carburador ou sistema de injeção de combustível. Estes motores apresentam razão de compressão em torno de 8 a 12. O ar entra à temperatura ambiente e é controlado por um corpo de borboleta, controlando assim a entrada de ar no motor. A injeção de combustível é gerenciada por uma central de controle eletrônico permitindo calcular a quantidade desejada de combustível a ser injetada, que deve ser de aproximadamente 15 partes de ar para uma de combustível para ter-se uma combustão confiável. (Heywood, 1988)

Em motores SI de quatro tempos, para manter uma maior potência em altas rotações, normalmente abre-se a válvula de admissão antes do ponto morto superior e fecha logo após o ponto morto inferior. Durante o processo de admissão, o ar e combustível se misturam com os gases residuais que não saíram completamente da câmara de combustão do último ciclo. Quando a válvula de admissão é fechada, ocorre a compressão do ar através da diminuição do volume do cilindro, ocorrendo um aumento na pressão e temperatura dos gases. (Heywood, 1988)

Aproximadamente entre 40° e 10° antes do ponto morto superior – PMS - acontece o disparo da faísca, iniciando a combustão, propagando uma chama turbulenta através da câmara até se extinguir chegando às paredes do cilindro. A duração da combustão varia entre combustíveis, porém valores típicos encontram-se em torno de 40° e 60° graus de giro do virabrequim. Existe ainda um ponto ótimo para ser disparada a faísca para uma determinada quantidade de ar e combustível em que se tem o máximo torque do motor, chamado *Maximum Brake Torque* (MBT). (Heywood, 1988)

Perto do final do processo de expansão, abre-se a válvula de exaustão para a saída dos gases residuais de combustão. Os gases são eliminados através da maior pressão existente dentro da câmara de combustão. Este processo tem duração variável em função da pressão existente no cilindro, fazendo assim com que possa restar uma quantidade de gás residual dentro do cilindro. A válvula de exaustão permanece aberta até pouco depois do PMS. Por esse motivo, ocorre um período em que as válvulas de admissão e exaustão ficam abertas ao mesmo tempo, podendo resultar em um retorno dos gases de combustão para a admissão. (Heywood, 1988)

Figura 3 - Pressão no cilindro em relação ao ângulo de virabrequim.



Fonte: Adaptado de Heywood (1988)

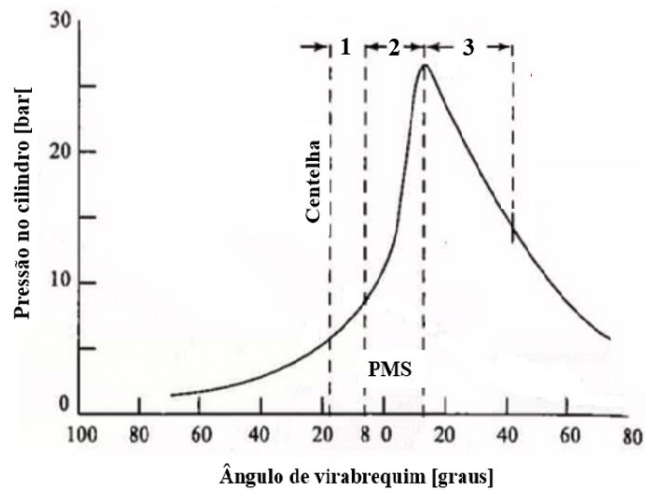
2.2 COMBUSTÃO EM MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA

Ao ser disparada a centelha dentro da câmara de combustão fazendo com que a chama comece a se propagar, ocorre também um aumento de pressão dentro do cilindro, que alcança seu máximo valor logo após o PMS e pouco antes de toda a fração de combustível seja queimada. À medida que o pistão vai indo em direção ao ponto morto inferior (PMI), a pressão vai diminuindo.

Para (Pulkrabek, 2003), o processo de combustão de motores de ignição por centelha pode ser dividido em três regiões: (1) ignição e desenvolvimento de chama, (2) propagação de chama e (3) extinção da chama. O desenvolvimento da chama é geralmente considerado o consumo dos primeiros 5% da mistura de ar-combustível. Durante o desenvolvimento da chama ocorre a ignição e o processo de combustão começa, porém o aumento da pressão é mínimo e pouco ou nenhum trabalho útil é produzido, como pode ser visto na figura 4. Praticamente todo o trabalho útil produzido em um ciclo do motor é o resultado do período de propagação da chama no processo de combustão. Este é o período em que a maior parte da massa de ar e combustível é queimada, em torno de 80-90%. A pressão do cilindro aumenta, proporcionando a força para produzir trabalho no curso de expansão. Os 5% restante da massa

de ar combustível que queima é classificado como extinção da chama. Durante este tempo a pressão diminui rapidamente e a combustão termina.

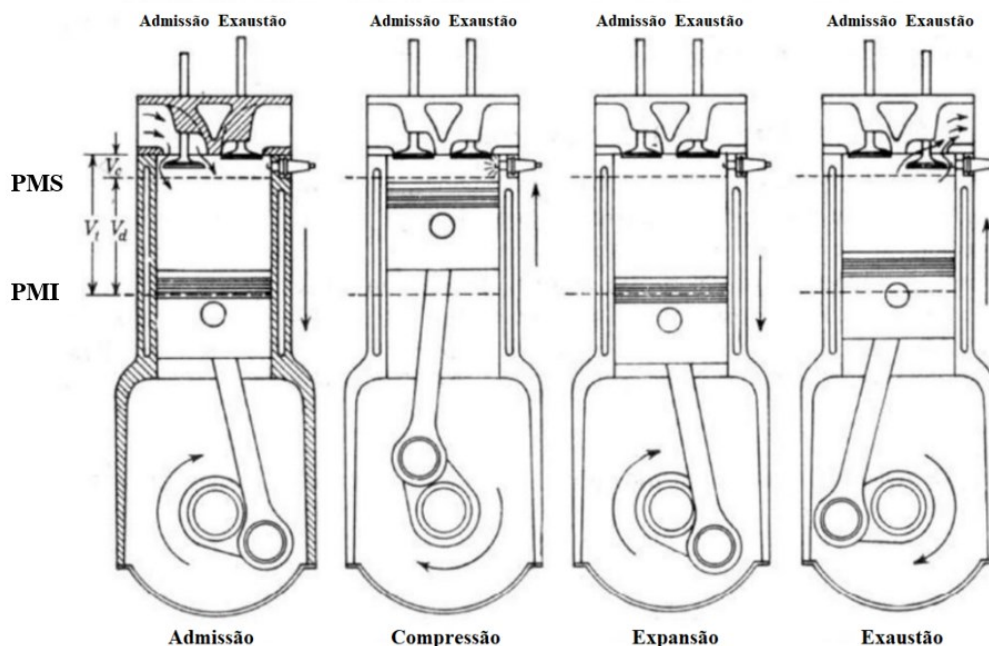
Figura 4 - Pressão no cilindro por ângulo de virabrequim



Fonte: Adaptado de(Pulkrabek, 2003)

Durante o funcionamento de um motor de ignição por centelha de 4 tempos, que é o foco do presente trabalho, quatro operações são realizadas pelo motor durante o ciclo, como detalhado na Figura 5.

Figura 5 - Operação de um ciclo Otto de 4 tempos



Fonte: Adaptado de (Heywood, 1988)

No tempo de admissão a válvula de admissão encontra-se aberta enquanto o pistão se desloca no sentido do PMI. Esse movimento cria uma diferença de pressão que favorece a entrada da mistura ar combustível no cilindro. Após o pistão atingir o PMI, a válvula de admissão é fechada e ele inicia o movimento de subida, em sentido ao PMS, permitindo a compressão da mistura dos gases dentro do cilindro, indicando o tempo de compressão. O tempo o qual o motor apresenta trabalho líquido positivo é caracterizado como expansão ou tempo de potência. Neste ciclo a mistura dos gases é queimada a partir de uma centelha e a combustão desta mistura aumenta a pressão dentro do cilindro, fazendo com que o pistão se desloque para baixo. No tempo de exaustão, a válvula de exaustão se abre e o pistão sobe até que os gases da combustão sejam expelidos para fora do cilindro

2.1.2. Torque e potência ao freio

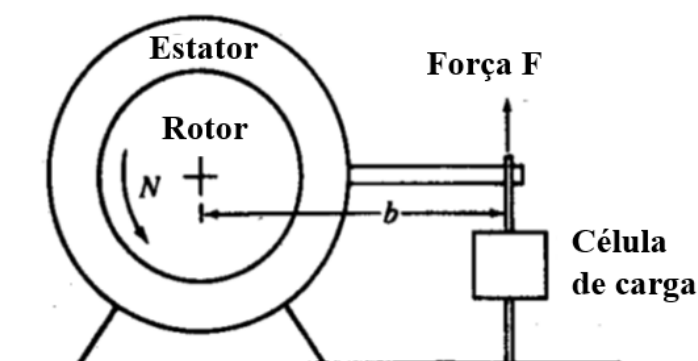
O torque de um MCI é normalmente medido em um dispositivo denominado dinamômetro. Este possui um rotor ao qual se acopla o virabrequim do motor e um sistema de freio. Um esquema simplificado do princípio de funcionamento de um dinamômetro é apresentado na Figura 6. O sistema de freio se encontra no estator, o qual pode ser eletromagnético, hidráulico ou por fricção mecânica. Define-se uma rotação do motor e ao

acionar o freio é imposto um torque externo resistente de mesmo valor que o produzido pelo motor, o torque que o motor está exercendo pode ser mensurado

Para medir o torque em uma dada rotação é necessário impor ao eixo um torque externo resistente de mesmo valor que o produzido pelo motor.

O torque líquido que um MCI produz é quantificado por ensaios em dinamômetro. Esse equipamento possui um acoplamento para o virabrequim do motor e um freio. Um esquema simplificado do princípio de funcionamento de um dinamômetro é apresentado na Figura 6. Por possuir um sistema de freio que efetivamente freará o motor, a potência e o torque obtidos em um ensaio deste tipo são denominados potência ao freio e torque ao freio. Esse valor corresponde à potência útil gerada pelo MCI. (Heywood, 1988)

Figura 6 - Princípio de operação de um dinamômetro.



Fonte: Adaptado de (Heywood, 1988)

2.1.3. Pressão Média Efetiva ao Freio (BMEP)

A pressão média efetiva ao freio (BMEP) é a pressão responsável por gerar o trabalho útil do motor, sendo também uma medida de comparação entre motores de diferentes tamanhos. É proveniente do IMEP descontando-se as perdas por atrito e bombeamento, ou seja, FMEP e PMEP. Pode ser calculada pela equação 1.

$$BMEP = \frac{Pn_r}{V_d N} \quad (1)$$

Onde P é a potência, n_r é o número de voltas do virabrequim por ciclo completo, sendo ele 2 para motores 4 tempos e 1 para motores 2 tempos, V_d é o volume deslocado e N é a rotação do motor.

2.1.4 Consumo Específico ao Freio (BSFC)

Embora parâmetros de desempenho de MCI normalmente sejam restritos a potência e torque, o consumo e eficiência energética são parâmetros igualmente relevantes para o desenvolvimento de qualquer veículo ou aplicação de motores. Para aferição do consumo de combustível de um MCI, usualmente é medida a vazão mássica de combustível durante um teste do motor para diferentes rotações. Porém, essa vazão mássica variará muito de acordo com o deslocamento do motor. Assim, o parâmetro de consumo específico de combustível busca normalizar a maneira como aferimos a eficiência que um MCI utiliza o combustível para produzir trabalho (Heywood, 1988)

A relação de consumo específico apresentada por (Heywood, 1988) é reproduzida na Equação 2.

$$BSFC = \frac{\dot{m}_f}{P} \quad (2)$$

P = Potência [kW]

\dot{m}_f = vazão mássica de combustível [g/h]

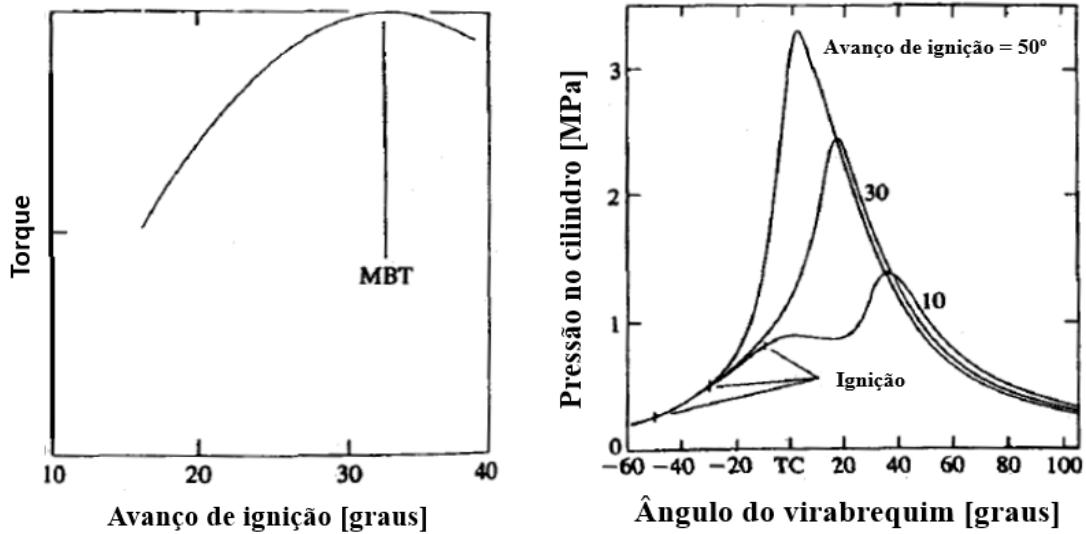
BSFC = consumo específico ao freio [g/kWh]

2.1.5 Torque máximo ao freio (MBT)

A combustão se inicia quando a centelha é disparada em algum instante antes do PMS. Para cada condição de carga e razão de ar-combustível, um avanço de ignição será o ponto o qual o motor apresentará o máximo torque ao freio (MBT). Segundo (Heywood, 1988), ao adiantar-se o ponto de ignição tem-se um valor de pressão de maior intensidade, como pode-se observar na figura 7b. Porém quando se atrasa o avanço, ou seja, diminui-se o ângulo APMS, o efeito contrário ocorre, levando o pico de pressão a amplitudes menores e mais distantes do PMS.

Na Figura 7 (a) podemos observar o efeito do avanço de ignição no torque, aonde tem-se rotação e razão ar-combustível constantes e em (b) pode-se observar a influência do avanço de ignição na pressão do cilindro.

Figura 7 - Influência do avanço de ignição na pressão do cilindro e no torque relativo.



Fonte: Adaptado de (Heywood, 1988)

2.1.6 Mistura Ar combustível

Em testes realizados com MCI's, vazão mássica do ar, \dot{m}_{ar} , e vazão mássica de combustível, \dot{m}_f , são normalmente obtidos. A razão dessas taxas de fluxo é útil na definição de condições de funcionamento do motor. (Heywood, 1988)

$$\frac{A}{F} = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_f} \quad (3)$$

Outro termo frequentemente utilizado é o λ , que representa uma forma normalizada da razão A/F para diferentes combustíveis. Na equação 4 é apresentado a forma de se chegar a estes valores.

$$\lambda = \frac{A/F}{\alpha_S} \quad (4)$$

Em que α_S é a razão ar-combustível estequiométrica para cada tipo de combustível. A Tabela 1 apresenta a razão A/F estequiométrica de alguns combustíveis.

Tabela 1 – Razão estequiométrica para diferentes combustíveis

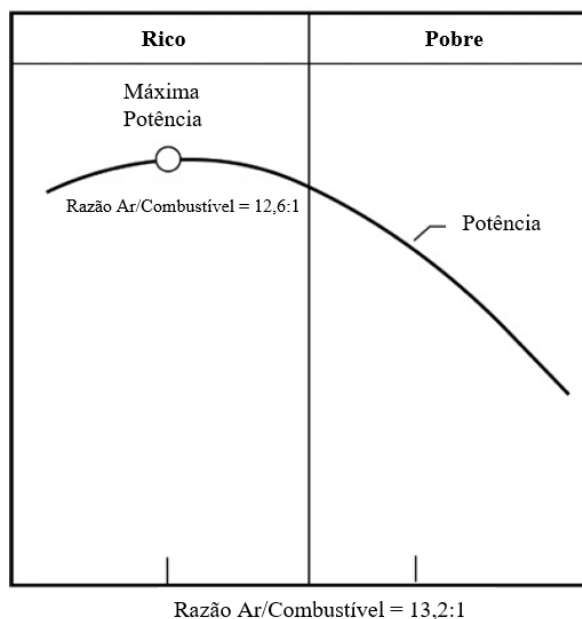
Razão estequiométrica de combustíveis comerciais	
Tipo de combustível	α_S
Gasolina sem adição de etanol	14,7
Gasolina com 25% de etanol	13,2
Etanol	9
Metanol	6,4
Diesel	14,6

Fonte: Adaptado de (Heywood, 1988)

Quando λ for igual a 1, significa que a razão A/F é estequiométrica. A mistura será rica quando $\lambda < 1$ e pobre quando $\lambda > 1$. Na Figura 8 é possível observar a influência da razão estequiométrica na potência em um MCI.

Para atingir maiores valores de potência, verificou-se que algo entre 13,2 e 13,4: 1, $\lambda = 0,95$, é o ideal. Um pequeno enriquecimento de combustível na mistura significa que o combustível extra injetado foi suficiente para garantir que o maior número possível de moléculas de oxigênio reaja com combustível podendo gerar mais energia na câmara de combustão. (Banish, 2007)

Figura 8 - Influência da razão estequiométrica na máxima potência



Autor: Modificado de (Banish, 2007)

2.1.7 Mapas de injeção e ignição

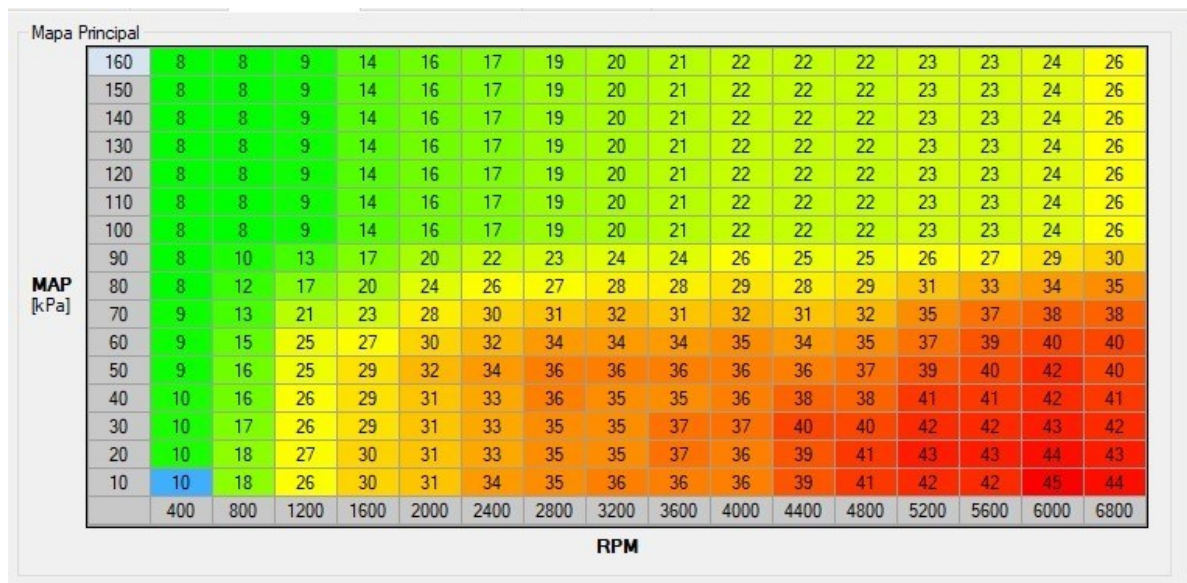
A fim de se reduzir processamento, o controle dos parâmetros de funcionamento de um MCI é realizado por mapas. Esses mapas são compostos por matrizes de dimensões finitas que fornecem valores pré-estabelecidos na calibração do motor para diferentes condições de operação.

Na figura 9 é possível observar um exemplo de mapa de ignição da Master Injection este mapa fornece ao sistema de ignição o ângulo de ignição para cada par rotação-MAP - Pressão absoluta no coletor de admissão (*Manifold Absolut Pressure*). Aonde o eixo horizontal são os valores de rotação e o vertical os valores de MAP. O valor contido em cada célula para cada par rotação-MAP é o de avanço de ignição em graus APMS.

Um mapa de injeção pode ser observado na figura 10, assim como o de ignição, este tem pares rotação-MAP, porém os valores contidos nas células são valores de eficiência volumétrica multiplicados por 10. Estes valores, associados a um pulso base de injeção e tempo morto, geram o pulso de injeção, em microssegundos, aplicado aos bicos injetores.

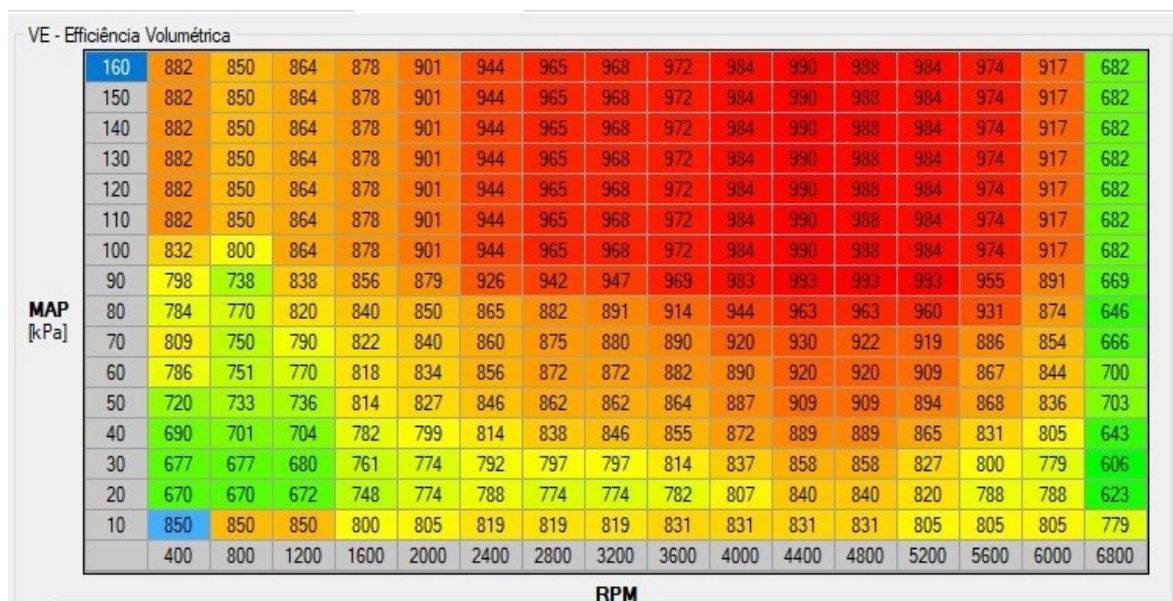
A coloração do mapa se dá a partir de uma escala de cores, aonde tons mais frios, verde, amarelo, são valores menores e em tons mais quentes, amarelo queimado e vermelho, representam valores maiores. É possível observar no mapa de injeção um possível aumento de eficiência volumétrica para faixas de operação mais altas, tons mais quentes.

Figura 9 - Exemplo de mapa de ignição



Fonte: O Autor (2020)

Figura 10 - Exemplo de mapa de injeção



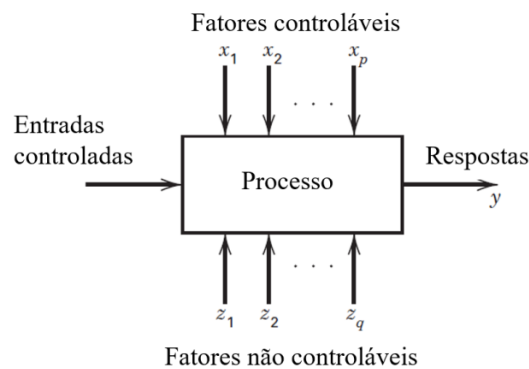
Fonte: O Autor (2020)

2.1.8DOE - Planejamento de experimentos

Para entender realmente as relações de causa e efeito em um sistema, você deve alterar deliberadamente as variáveis de entrada do sistema e observar na saída do sistema as mudanças que essas alterações geram, em outras palavras, você precisa conduzir um

experimento. As Observações sobre um sistema ou processo podem levar a teorias ou hipóteses sobre o que faz o sistema funcionar. Experimentos planejados são utilizados para descobrir algo sobre um determinado processo ou sistema ou até mesmo para confirmar experiências ou teorias. (Montgomery, 2017)

Figura 11 - Modelo geral de um processo



Fonte: Modificado de (Montgomery, 2017)

Podemos definir um experimento como um teste ou séries de rodadas onde o propósito é modificar variáveis de entrada de um processo ou sistema para que possamos observar a influência de cada variável de entrada nas respostas. Muitos experimentos envolvem o estudo dos efeitos de dois ou mais fatores, em geral, um planejamento fatorial é mais eficiente para este tipo de experimento, pois com este é possível analisar o efeito conjunto, ou de interações, dos fatores em uma resposta. Em um planejamento fatorial completo todas as combinações possíveis dos níveis são investigadas. (Montgomery, 2017)

No quadro 1 é possível observar a descrição dos parâmetros de um experimento planejado.

Quadro 1 - Parâmetros de um experimento planejado

Parâmetro	Descrição
Fatores ou tratamentos	Variáveis de controle.
Níveis	Faixa de valores das variáveis de controle.
Variável resposta	Parâmetro de saída, resultado da mudança das variáveis de entrada.
Aleatorização	É a prática de realizar a escolha das corridas ou pontos experimentais por meio de um processo aleatório. Esta prática simples em muitos casos garante as condições de identidade e independência dos dados coletados e evita erros sistemáticos.
Blocos	São agrupamentos de dados para eliminar fontes de variabilidade que não são de interesse do experimentador

Fonte: O Autor (2020)

Nos experimentos fatoriais a quantidade de combinações pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\text{Combinações} = 2^k \quad (5)$$

Onde 2 é o número de níveis e k a quantidade de fatores.

Conforme os fatores em um projeto fatorial 2^k aumentam, o número de execuções necessárias para uma experimentação completa supera rapidamente os recursos da maioria dos experimentadores. Para que um experimento consiga ser realizado com os recursos disponíveis é necessário reduzir a quantidade de testes, sendo assim faz-se necessário a utilização de um experimento fatorial fracionado, aonde muitos fatores são considerados e o objetivo é identificar, caso haja, os fatores que tem grandes efeitos nas respostas. (Montgomery, 2017)

Portanto, um experimento fatorial fracionado talvez não identifique os fatores de pouca influência, porém os de maior influência são identificados. Ao se reduzir a quantidade de testes tem-se uma redução no tempo investido nos experimentos, porém a análise é prejudicada por esta redução. Após um experimento fatorial fracionado, é possível planejar outro experimento apenas com os fatores de real influência.

3.MATERIAIS E METODOLOGIA

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O motor utilizado nos ensaios foi o motor VW 2.0L ABA, a ECU OEM teve que ser substituída por uma ECU programável Master Injection - Golf MK3 1.74, aonde, com ela, pode-se elaborar os mapas de injeção e ignição do motor. As demais características do motor foram mantidas, como apresentado na tabela abaixo.

Tabela 2 - Características do motor

Parâmetro	Descrição
Modelo	2.0L ABA
Número de cilindros	4 em linha
Número de válvulas por cilindro	2
Diâmetro e curso	82,5 x 92,8 mm
Volume Deslocado	1984 cm ³
Razão de compressão	10:1
Diâmetro da válvula de admissão	27mm
<i>Lift</i> máximo da admissão	8,3mm
Abertura das válvulas de admissão (IVO)	21° AMPS
Fechamento das válvulas de admissão (IVC)	44° DPMS
Diâmetro da válvula de exaustão	22mm
<i>Lift</i> máximo da exaustão	7,7mm
Abertura das válvulas de exaustão (EVO)	40° APMS
Fechamento das válvulas de exaustão (EVC)	5° DPMS
Lubrificação	Forçada, SAE 20W40
Arrefecimento	Água
Injeção	PFI
Ordem de ignição	1-3-4-2
Folga da válvula de admissão	Tucho Hidráulico
Folga da válvula de exaustão	Tucho Hidráulico

Fonte: Adaptado de (VOLKSWAGEN, 1996)

3.2 METODOLOGIA

A partir dos mapas de injeção e ignição, podemos controlar os parâmetros e gerenciar eletronicamente o funcionamento de um MCI. Estes mapas são elaborados a partir da leitura de alguns sensores

3.2.1 Escolha e coleta dos sinais

Para determinar o espaço de inferência do experimento, podendo assim observar a influência dos parâmetros de entrada nos valores de saída, foram necessários alguns sinais do sistema de controle do motor cujos seguem abaixo.

Quadro 2 - Fatores selecionados para o experimento

Variáveis
Rotação
Razão A/F
Pressão do coletor
Energia de bobina
Temperatura do motor

Fonte: O Autor (2020)

3.3 INSTRUMENTAÇÃO DO MOTOR

Tendo em vista que o objetivo do presente experimento é vivenciar uma experiência com calibração de motores em dinamômetro, buscando analisar a influência dos fatores nos pontos ótimos de funcionamento do motor utilizando DOE, faz-se necessário a variação destes fatores em diferentes níveis. E para a obtenção destes fatores e seus níveis faz-se necessário a utilização de alguns sensores.

3.3.1 Sensor de pressão de absoluta –MAP

Este sensor mede a pressão absoluta do coletor de admissão através de um diafragma que atua diretamente em um extensômetro. O sinal de variação deste extensômetro é tratado internamente e enviado a ECU.

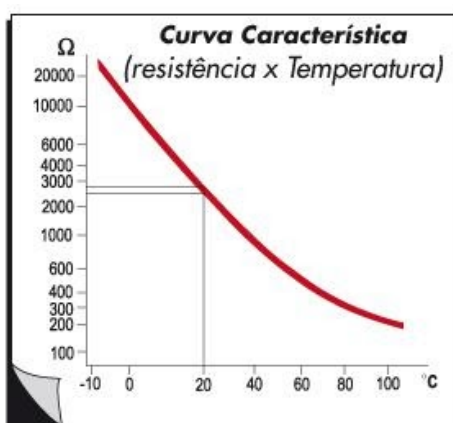
A pressão absoluta no coletor é um dos parâmetros utilizado pela ECU para o cálculo da massa de ar admitida para dentro do cilindro. Em conjunto com a temperatura do ar admitido, para o cálculo de densidade, a eficiência volumétrica do motor a uma dada condição rotação e pressão e o volume do cilindro (Banish, 2007).

3.3.2 Sensores de temperatura

3.3.2.1 Sensor de temperatura de admissão IAT

Como apresentado anteriormente, temperatura e pressão do ar na admissão são fatores cruciais para o cálculo da massa de ar admitida para dentro do cilindro. Os sensores de temperatura são termistores, dispositivos elétricos que tem sua resistência elétrica alterada termicamente. Na Figura 10 pode-se observar uma característica peculiar destes sensores, sua resistência elétrica diminui de forma exponencial com o aumento da temperatura à qual está sendo submetido.

Figura 12 - Curva característica de sensor IAT



Fonte: (Thomson, 2020)

3.3.2.3 Sensor de temperatura de líquido de arrefecimento ECT

A temperatura do motor é um fator extremamente importante para se monitorar, cada MCI tem sua faixa de operação a qual se torna mais efetivo, este operando muito frio temos o problema de atomização do combustível antes da combustão, porém, operando em temperaturas muito elevadas, pode-se ocorrer pré-ignição ou até mesmo empenamento de partes dos sistemas de vedação, anéis e juntas. Atualmente os motores trabalham a temperaturas entre 90 e 95°C, valores que permitem uma combustão ideal e valores de emissões satisfatórios. (Banish, 2007)

A fim de se monitorar a temperatura do líquido de arrefecimento utilizou-se um dispositivo termistor. Este dispositivo é o original do motor em teste.

3.3.3 Sensor de oxigênio

Este mede a concentração de oxigênio nos gases do escapamento. Foi instalada uma sonda lambda Bosch LSU 4.2 junto a um condicionador de sinais ODG no sistema de exaustão, logo após a junção dos 4 dutos de escapamento. Este sensor possui em sua construção um elemento cerâmico, dióxido de Zircônio, o qual tem as suas propriedades elétricas alteradas quando a concentração de oxigênio presente no resultado da combustão é comparada a uma referência de concentração interna.

A concentração de oxigênio nos gases queimados nos fornece quantidade de oxigênio que está em excesso na combustão. A sonda lambda, conectada ao condicionador de sinais, informa como está a mistura de ar-combustível, apresentando valores de λ em um intervalo de 0,65 até 1,3.

Figura 13 - Conjunto sonda lambda e condicionador de sinal



Fonte: O Autor (2020)

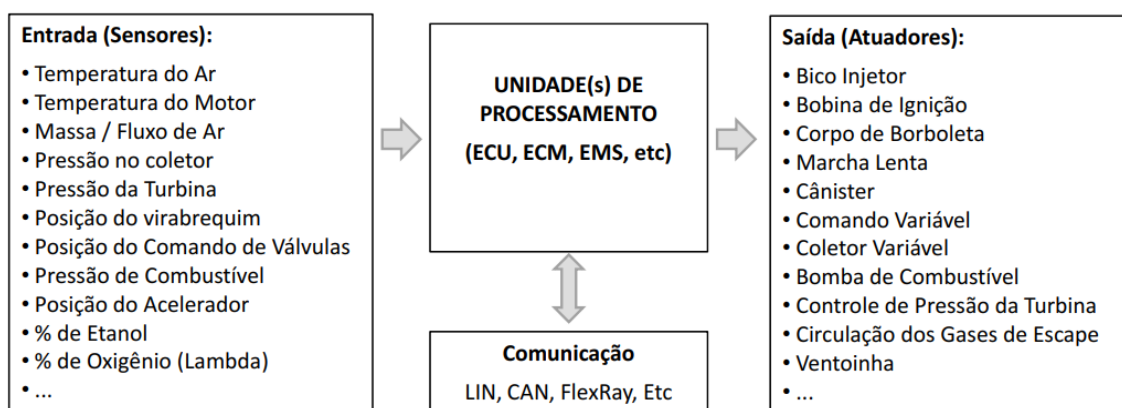
3.3.2 Dinamômetro

Os dinamômetros de chassis são os mais populares entre os calibradores (*Tuners*) fora das montadoras. Para os testes serem realizados nestes, o motor do veículo tem que estar instalado no carro junto ao sistema de tração. As rodas de tração ficam em contato com um rolo, as quais fazem este rotacionar à medida que o motor despeja seu torque para o sistema de tração. Diferentes cargas podem ser simuladas, com o auxílio do sistema freio acoplado ao rolo, sem que o carro se movimente. (Banish, 2007)

3.3.3 Sistema de gerenciamento do motor

Uma ECU é um módulo que recebe os sinais de entrada (sensores) e traduz em comandos para as saídas (atuadores), coerentes com as condições previamente programadas na unidade de processamento.

Figura 14 - Organização de uma ECU



Fonte: O Autor (2020)

Em veículos originais estes valores são mais difíceis de mudar, pois exigem ferramentas de desenvolvimento do fabricante para gravação e atualização do módulo. Além disso, quando alterados, estes parâmetros são gravados no módulo de uma só vez, ou seja, para cada gravação, em geral com o motor desligado ou com o módulo em bancada, se tem um novo resultado para avaliação.

Ao contrário, os módulos de injeção programável em tempo real, como o nome diz, permitem que se alterem os parâmetros com o motor ligado e se perceba esta alteração imediatamente. Isso dá uma velocidade muito grande durante o ajuste de um motor e permite um número muito maior de experimentações. A interface do software da ECU pode ser observada no Apêndice A.

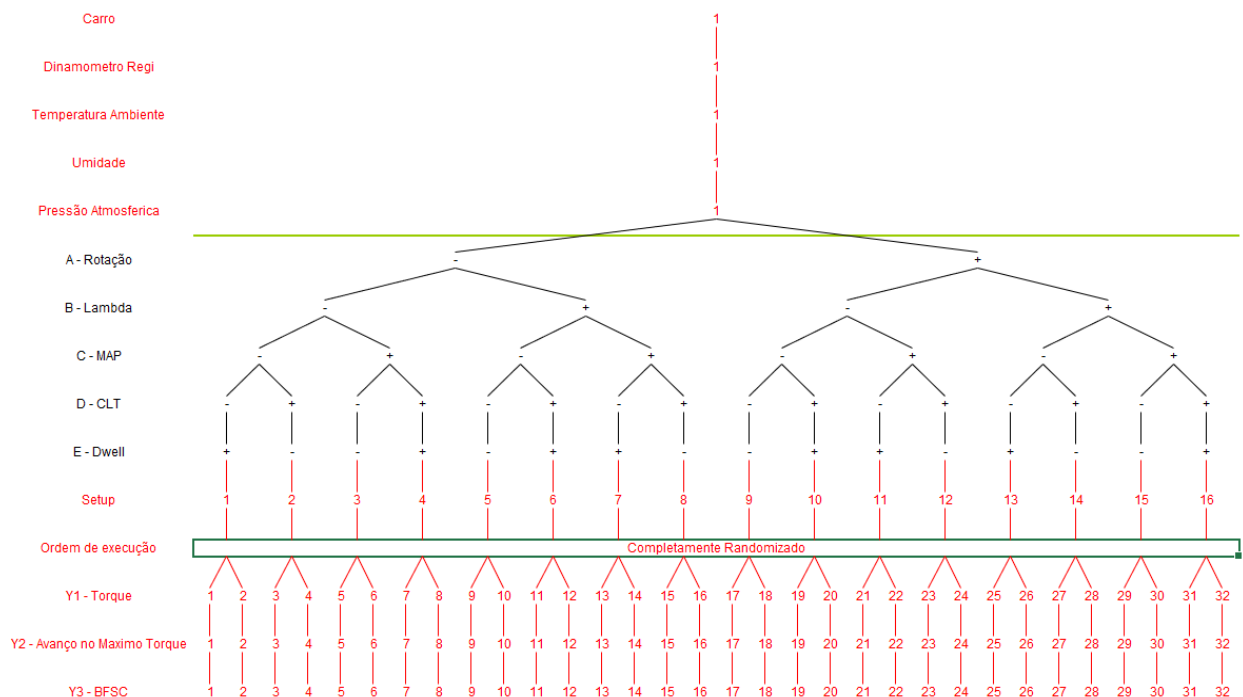
4. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

A experimentação é uma parte vital de um estudo de engenharia. Certamente existem situações em que os fenômenos podem ser compreendidos e traduzidos em modelos matemáticos facilmente. No entanto, a maioria dos problemas de engenharia requer a observação do sistema em funcionamento e experimentação para ter informações sobre o porquê e como funciona. Experimentos bem planejados podem levar a um modelo de desempenho do sistema, tais modelos determinados experimentalmente são chamados de modelos empíricos. (Montgomery, 2017)

O experimento estático é um experimento o qual os ensaios são feitos com condições estabilizadas.

O planejamento do presente experimento teve como propósito modificar as variáveis de entrada e analisar o efeito conjunto destes fatores nas variáveis resposta. A partir dos fatores, níveis e variáveis respostas estabelecidas, é possível realizar a escolha das rodadas por meio de um processo aleatório, o qual faz combinações aleatórias dos fatores e seus níveis. Na figura 15 é possível observar uma árvore de amostragem, esta apresenta as combinações dos níveis dos fatores analisados, mas também auxilia na parte de experimentação, pois apresenta de forma organizada as rodadas.

Figura 15 - Árvore de amostragem do experimento



Fonte: O Autor (2020)

Alguns fatores são considerados fixos: carro, dinamômetro, temperatura ambiente, umidade e pressão atmosférica. Os fatores avaliados em dois níveis são nomeados com letras maiúsculas, aonde:

- A – Rotação do motor
- B – Lambda (λ)
- C – MAP
- D – CLT
- E – Carga de bobina - *Dwell*

4.1 SELEÇÃO DOS DADOS COLETADOS

A fim de deixar valores bastante distantes para os fatores, estes foram extrapolados para se notar a influência destes, arbitrando valores para os níveis. A partir das curvas características originais do motor, pode-se observar que na região próxima a 2500 rpm o motor já iniciava sua mesa de torque, ou seja, o motor não possui uma variação de torque considerável nesta região, portanto este valor foi arbitrado como o nível baixo do fator rotação. O nível alto na rotação de 4500 rpm foi selecionado pois nesta região está o término da mesa de torque do motor, ou seja, o motor começa a diminuir seu torque.

O nível baixo de razão estequiométrica foi considerado o valor cuja razão estequiométrica é ideal, ou seja, $\lambda=1$. O nível alto foi considerado um valor extrapolado com $\lambda=0,85$.

O nível alto na parte pressão do coletor foi o de 100 kPa pois é aonde tem-se uma pressão bem próxima a pressão atmosférica e praticamente temos o corpo de borboleta totalmente aberto diminuindo a restrição de passagem do ar pelo mesmo e tendo uma maior eficiência volumétrica do motor. O nível baixo foi considerado 50 kPa.

A carga da bobina também teve dois níveis bastante distintos, o nível baixo com 45 mJ e o alto com 70 mJ.

A lista de fatores necessários para a realização do experimento estático e os níveis a serem avaliados estão resumidas de forma organizada na tabela 5.

O torque é a principal variável resposta de um ensaio de MCI, porém para se chegar ao MBT de um MCI é necessário variar o avanço de ignição, portanto, as variáveis repostas do presente trabalho são avanço de ignição, MBT, além do consumo de combustível nestas condições.

Quadro 3 - Variáveis resposta

Variáveis Resposta
Avanço de ignição
Torque
BSFC

Fonte: O Autor (2020)

Tabela 3- Fatores e níveis do experimento

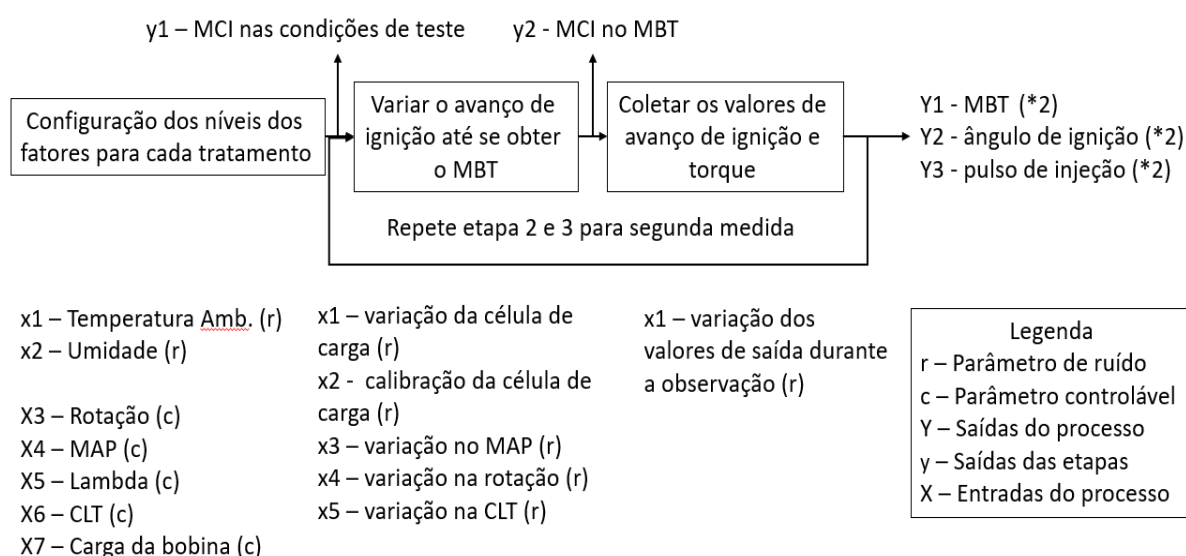
Variáveis de entrada / Fatores	Níveis
Rotação	2500 e 4500 rpm
Razão estequiométrica (λ)	0.85 e 1
Pressão do coletor	50 kPa e 100 kPa
Temperatura do motor	87 e 95°C
Energia da centelha	45 e 70 mJ

Fonte: O Autor (2020)

5.EXECUÇÃO DO EXPERIMENTO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Antes que qualquer experimento fosse realizado, foi criado um mapa de processos para tal. A fim de que, de forma organizada, os dados pudessem ser coletados. Abaixo segue o mapa:

Figura 16–Mapa de processo do experimento



Fonte: O Autor (2020)

Executando o processo, estava feita a coleta com repetição de um dos tratamentos do experimento completo. Foi repetido o mesmo procedimento para os demais 15 tratamentos do experimento, seguindo a ordem aleatória previamente estipulada.

Os dados foram obtidos através de um dinamômetro de chassi com freio a partir do veículo instrumentado. Os valores de torque foram obtidos através da célula de carga do dinamômetro. Os valores de avanço de ignição foram controlados e adquiridos pela ECU. Durante o experimento gerou-se um log para posteriormente analisar os dados e possíveis ruídos.

Durante a realização do experimento foram observados alguns ruídos. O freio do dinamômetro tinha um certo tempo de acomodação do controle, o que as vezes gerava instabilidade e, conseqüentemente, pequenas variações de rotação. Estes erros não foram maiores do que 5%. O ajuste da pressão do coletor em 50 kPa também apresentou ruídos. Este

valor é controlado pela posição do pedal e acabava oscilando na tentativa de estabilizar a rotação, no entanto o seu erro também não foi maior do que 5%. Por último, a temperatura do motor também sofreu variação, devido a histerese da ventoinha e aquecimento natural devido a carga aplicada, principalmente nos tratamentos em 100 kPa. Todas estas variações foram consideradas ruídos no experimento.

Figura 17 - Carro posicionado no dinamômetro



Fonte: O Autor (2020)

A partir da árvore de amostragem, apresentada na figura 15, pode-se gerar uma planilha a qual auxiliou na parte da coleta dos dados. Esta apresenta os fatores, níveis, configurações dos ensaios, ordem de execução e resultados. Na figura 18 é possível observar a imagem desta planilha.

Figura 18– Tabela de amostragem e resultados do experimento

A - Rotação	B - Lambda	C - MAP	D - CLT	E - Dwell	Setup	Ordem de execução	Y1 - Torque	Y2 - Avanço no Maximo Torque	Y3 - BFSC
-1	-1	-1	-1	1	1	9	12,6	33	3200
-1	-1	-1	-1	1	1	9	12,7	32	3100
-1	-1	-1	1	-1	2	1	12,4	31	3150
-1	-1	-1	1	-1	2	1	12,1	32	3180
-1	-1	1	-1	-1	3	10	29,2	22	6100
-1	-1	1	-1	-1	3	10	28,5	24	6100
-1	-1	1	1	1	4	2	29,3	23	6070
-1	-1	1	1	1	4	2	29,1	23	6050
-1	1	-1	-1	-1	5	14	13,1	32	3420
-1	1	-1	-1	-1	5	14	13,5	30	3300
-1	1	-1	1	1	6	8	13,1	29	3380
-1	1	-1	1	1	6	8	13,5	31	3320
-1	1	1	-1	1	7	13	34,2	24	7200
-1	1	1	-1	1	7	13	34,2	20	7400
-1	1	1	1	-1	8	7	33,8	23	7300
-1	1	1	1	-1	8	7	33,9	23	7360
1	-1	-1	-1	-1	9	15	10,7	40	3600
1	-1	-1	-1	-1	9	15	11,6	37	3600
1	-1	-1	1	1	10	4	11,4	39	3580
1	-1	-1	1	1	10	4	11,1	38	3550
1	-1	1	-1	1	11	16	33,9	22	6600
1	-1	1	-1	1	11	16	33	22	6600
1	-1	1	1	-1	12	3	33,4	23	6580
1	-1	1	1	-1	12	3	33,6	22	6680
1	1	-1	-1	1	13	12	11,4	40	4400
1	1	-1	-1	1	13	12	11,9	40	4400
1	1	-1	1	-1	14	5	11,8	41	4380
1	1	-1	1	-1	14	5	11,6	40	4420
1	1	1	-1	-1	15	11	34,8	18	8000
1	1	1	-1	-1	15	11	34,2	20	8000
1	1	1	1	1	16	6	34,3	19	8020
1	1	1	1	1	16	6	34,7	20	7980

Fonte: O Autor (2020)

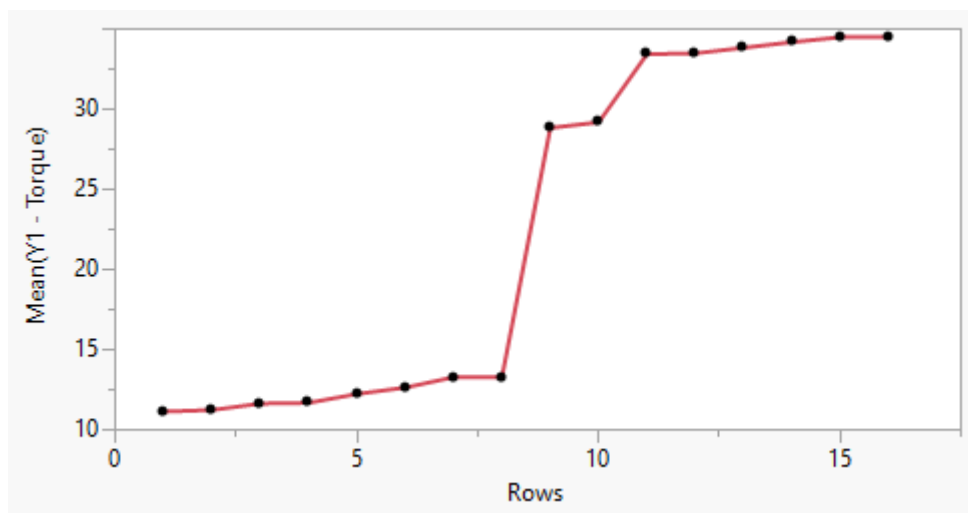
6 ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS

A análise do experimento deu-se seguindo a metodologia de Ross, onde os dados são primeiramente analisados de forma prática, apenas observando a variação do experimento, a seguir é feita uma análise gráfica, observando os graus de liberdade e suas significâncias e, por fim, é feita uma análise quantitativa, onde é dado valor estatístico para os graus de liberdade, com a geração de um modelo matemático. A análise dos dados foi executada em um software chamado JMP, ferramenta esta que possibilita explorar os dados e fazer as análises estatísticas apresentadas no decorrer do presente trabalho. Mais características do software podem ser observadas nas imagens contidas no Apêndice B.

6.1 Y1 – TORQUE

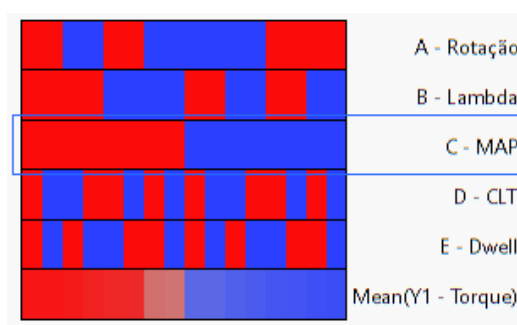
Na figura 19 apresenta-se a variação dos valores obtidos de torque, e o seu comportamento durante o experimento. O valor de torque apresentou uma variação com patamares bem distintos, isso se deve ao fator MAP que está diretamente relacionado ao torque, esta afirmação pode ser observada na figura 20.

Figura19- Valores de torque em ordem crescente



Fonte: O Autor (2020)

Figura 20 - “Cell-Plot” com alinhamento entre MAP e torque



Nível Alto (+)



Nível Baixo (-)

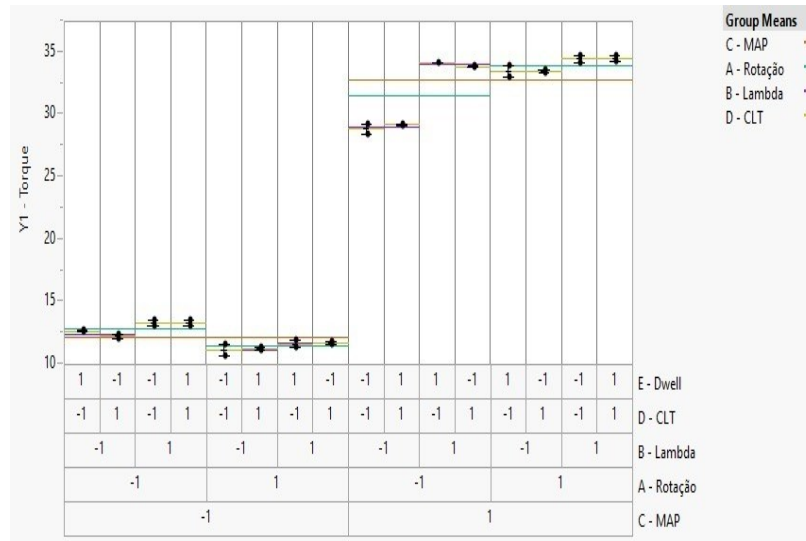


Fonte: O Autor (2020)

Na figura 20 é possível observar que com o aumento do MAP, crescentemente do vermelho para o azul, houve um aumento do torque também, sendo assim o MAP tem forte influência no torque. Nota-se também que tanto a temperatura do motor como a energia da centelha não afetaram significativamente o torque do motor. Este resultado era de certa forma esperado, uma vez que as variações causadas por estes dois fatores seriam pequenas e com grandes chances de serem confundidas com os ruídos experimentais.

Na figura 21 também é possível analisar que o torque aumenta com o aumento do nível do MAP, e também uma diminuição no torque para os níveis baixos de λ e de rotação, porém alto de MAP, concluindo assim que o λ também tem influência no torque.

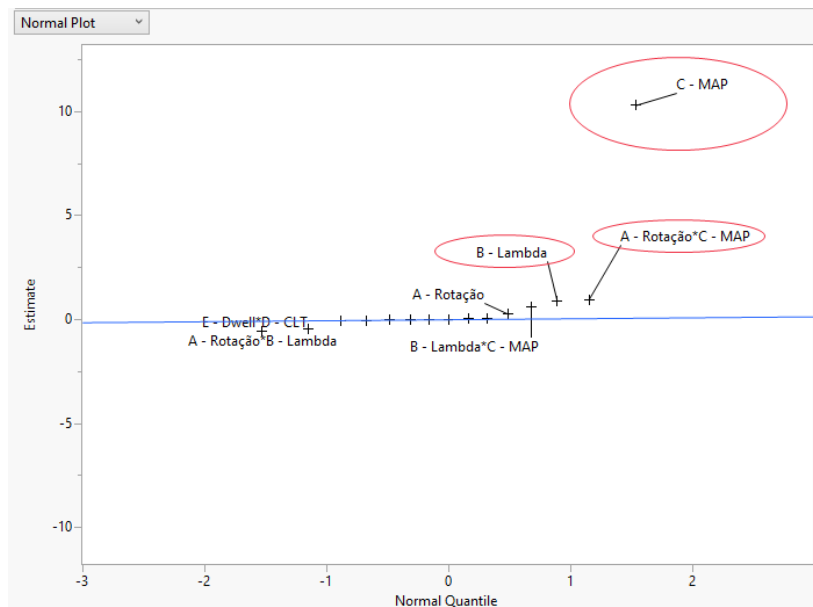
Figura 21- Gráfico de pontos para o torque



Fonte: O Autor (2020)

O gráfico de “Normal plot” ou “Daniel plot” apresentado na figura 22, informa o quão influente é um termo nas variáveis respostas do experimento. Ou seja, quanto mais distante o fator estiver da linha de centro, maior sua influência nas respostas. Nota-se que o MAP é o mais distante de todos os fatores, em seguida com menor influência, λ e a interação de rotação e MAP.

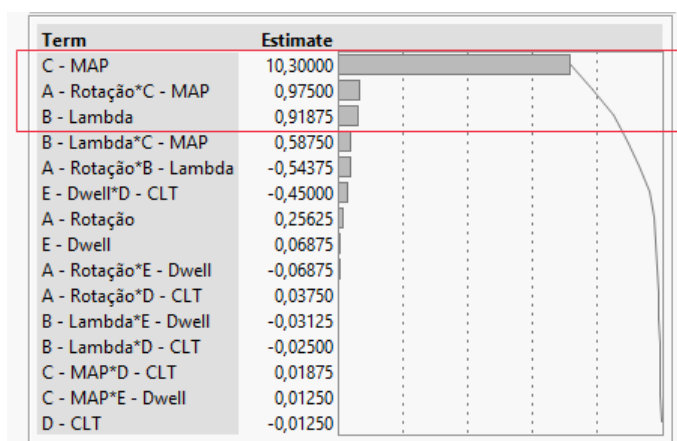
Figura 22 – Normal plot mostrando a variação de cada fator do experimento



Fonte: O Autor (2020)

Ao considerarmos apenas os Graus de liberdade com maior influência obtidos na figura 22, A – Rotação, B – Lambda, C – MAP e a interação A – Rotação * C – MAP pode-se obter os valores de estimativa que a variação de cada grau de liberdade gerou no torque. Estes valores de estimativa podem ser observados na figura 23. Novamente temos o fator MAP como o mais influente nos valores de torque.

Figura23 – Pareto dos graus de liberdade do experimento.



Fonte: O Autor (2020)

Os valores de RSquare apresentado na figura 24 são a medida de ajuste de um modelo estatístico linear de uma variável aleatória. Este valor varia entre 0 e 1. Neste caso expressa a quantidade da variância dos dados explicados pelo modelo linear, quanto maior o RSquare, melhor ele se ajusta à amostra. Então pode-se afirmar com 98,92% que o modelo calculado está próximo do modelo experimental ajustado.

Figura 24 - Modelo reduzido para o torque

RSquare	0,992129
RSquare Adj	0,989266
Root Mean Square Error	1,116127
Mean of Response	22,45625
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: O Autor (2020)

Este modelo reduzido, pode ser entendido como bem assertivo, pois o valor do RSquare e RSquare ajustado ficaram bem altos, próximos a 1,0. O resultado mostra também que a escolha por uma significância prática e não pela significância estatística, não comprometeu o modelo e fez com que ele ficasse mais simples.

Pela tabela de ANOVA apresentada na figura 25, também se observa que o modelo possui significância estatística adequada, pois $\text{Prob} > F < 0,001$.

Figura 25 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	4	1727,2063	431,802	346,6229
Error	11	13,7031	1,246	Prob > F
C. Total	15	1740,9094		<,0001*

Fonte: O Autor (2020)

Pode-se ainda obter a equação normalizada que rege o torque, considerando estes graus de liberdade:

$$Y1 = 22,45625 + 0,25625.A + 0,91875.B + 10,3.C + A.[0,975.C] \quad (6)$$

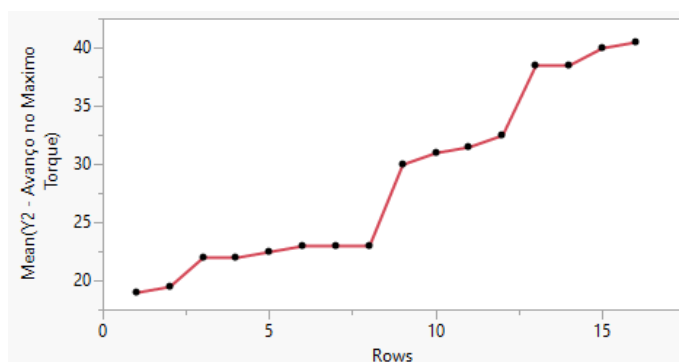
Aonde:

Y1- Torque; A – Rotação; B – λ ; C – MAP

6.2 Y2 – ÂNGULO DE IGNIÇÃO PARA MÁXIMO TORQUE

Da mesma forma que para o torque, foi analisado o ângulo de ignição onde o máximo torque foi obtido. Ao longo do experimento este ângulo de ignição variou de 19 a 42° APMS.

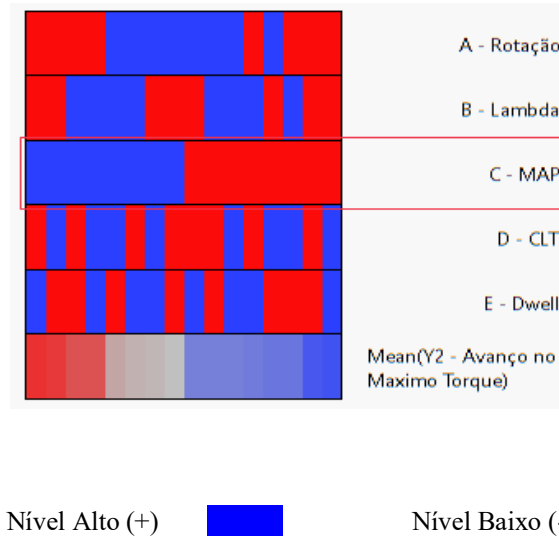
Figura -26 Variação do ângulo de ignição no experimento



Fonte: O Autor (2020)

Da mesma forma que no torque, nota-se que o fator principal foi para a determinação do ângulo de ignição foi o MAP.

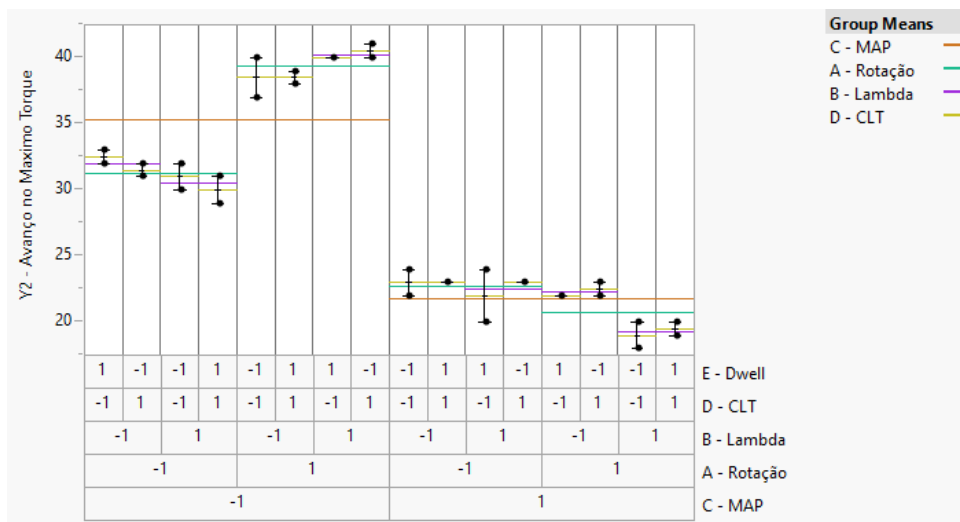
Figura 27 - "Cell-Plot" com MAP alinhado com o ângulo de ignição



Fonte: O Autor (2020)

Na figura 28 através do gráfico de nuvem de pontos é possível notar uma variação expressiva do ponto de ignição pela rotação para valores de MAP a 50 kPa. Portanto tem-se, além do MAP, uma forte influência da rotação ao se obter os valores de avanço de ignição.

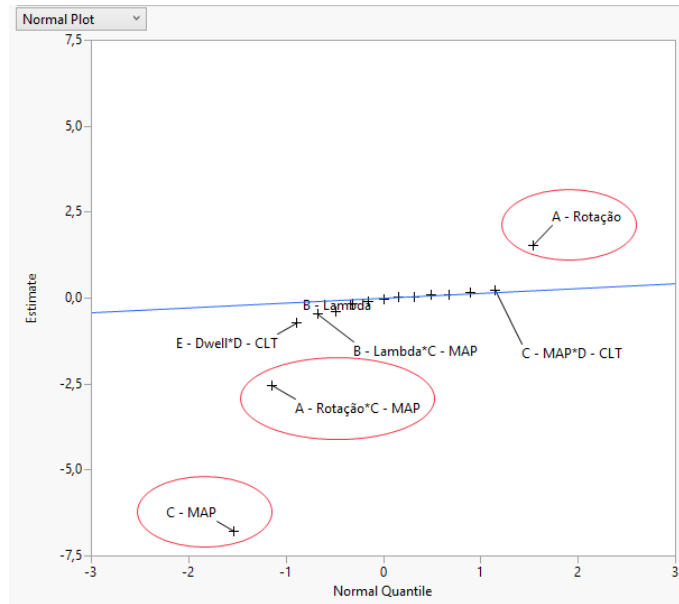
Figura 28- Gráfico de pontos para o avanço de ignição.



Fonte: O Autor (2020)

Nota-se a partir do gráfico "Normal-Plot" apresentado na figura 29, que os fatores mais afastados na linha de centro são rotação, MAP e interação rotação-MAP.

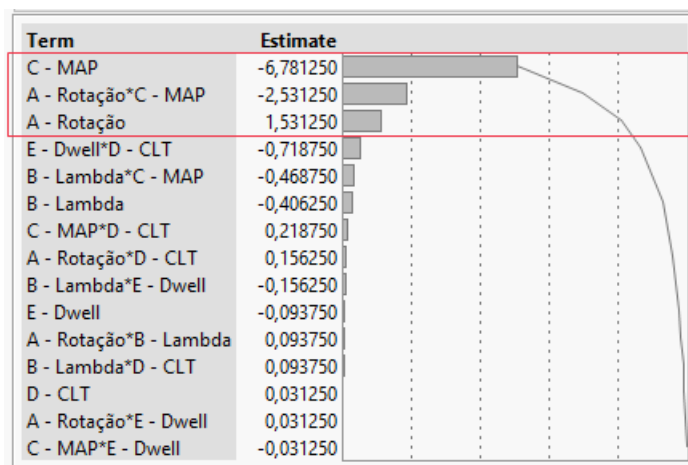
Figura 29- "Normal Plot" mostrando os graus de liberdade significativos.



Fonte: O Autor (2020)

Ao considerarmos apenas os Graus de liberdade com maior influência obtidos na figura 29, A – Rotação, C – MAP e a interação A – Rotação * C – MAP pode-se obter os valores de estimativa que a variação de cada grau de liberdade gerou no avanço de ignição. Estes valores de estimativa podem ser observados na figura 30. Novamente temos o fator MAP como o mais influente nos valores de torque.

Figura 30- Pareto dos graus de liberdade do experimento.



Fonte: O Autor (2020)

Se considerarmos apenas os Graus de liberdade A – Rotação, C – MAP e a interação A – Rotação * C – MAP tem-se o seguinte resultado:

Figura 31- Modelo reduzido para o ângulo de ignição.

RSquare	0,981577
RSquare Adj	0,976971
Root Mean Square Error	1,170381
Mean of Response	28,53125
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: O Autor (2020)

Este modelo reduzido também pode ser entendido como bem assertivo, pois o valor do RSquare e RSquare ajustado ficaram bem altos, próximos a 1. Mais uma vez a escolha por uma significância prática e não pela significância estatística, não comprometeu o modelo e fez com que ele ficasse mais simples. Então pode-se afirmar com 97,69% que o modelo calculado está próximo do modelo experimental ajustado.

Pela tabela de ANOVA apresentada na figura 32, também se observa que o modelo possui significância estatística adequada, pois $\text{Prob} > F$ é $< 0,001$.

Figura 32 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	3	875,79688	291,932	213,1217
Error	12	16,43750	1,370	Prob > F
C. Total	15	892,23438		<,0001*

Fonte: O Autor (2020)

Pode-se ainda obter a equação normalizada que rege o torque, considerando estes graus de liberdade:

$$Y2 = 28,53125 + 1,53125.A - 6,78125.C + A. [-2,53125.C] \quad (7)$$

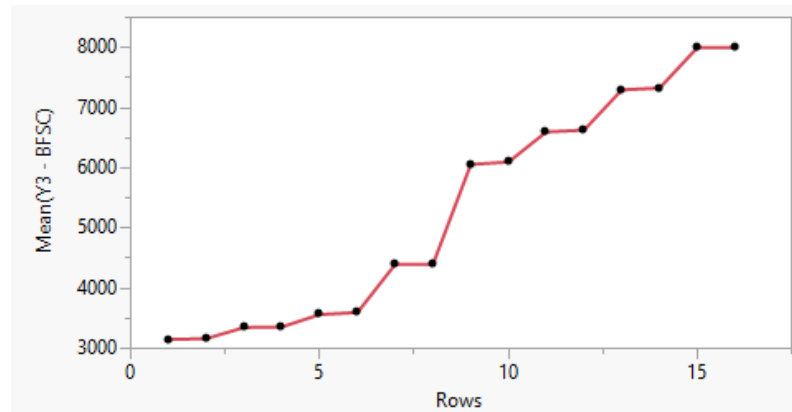
Aonde:

Y2- Avanço de ignição; A – Rotação; C – MAP

6.3 Y3 – PULSO DE INJEÇÃO

A variação dos pulsos de injeção de combustível ficou dentro do esperado, com valores entre 3150 μs e 8000 μs . Estes valores podem ser observados na figura 33 a qual apresenta a variação destes valores durante o experimento.

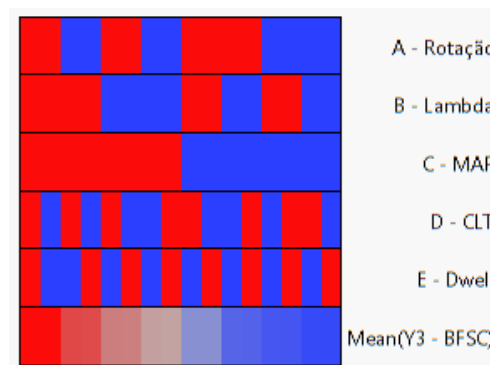
Figura 33- Valores de pulso de injeção de combustível



Fonte: O Autor (2020)

Novamente o MAP foi o fator principal para a determinação do pulso de injeção de combustível, conforme esperado.

Figura 34- “Cell-Plot” para valores de pulso de injeção de combustível.

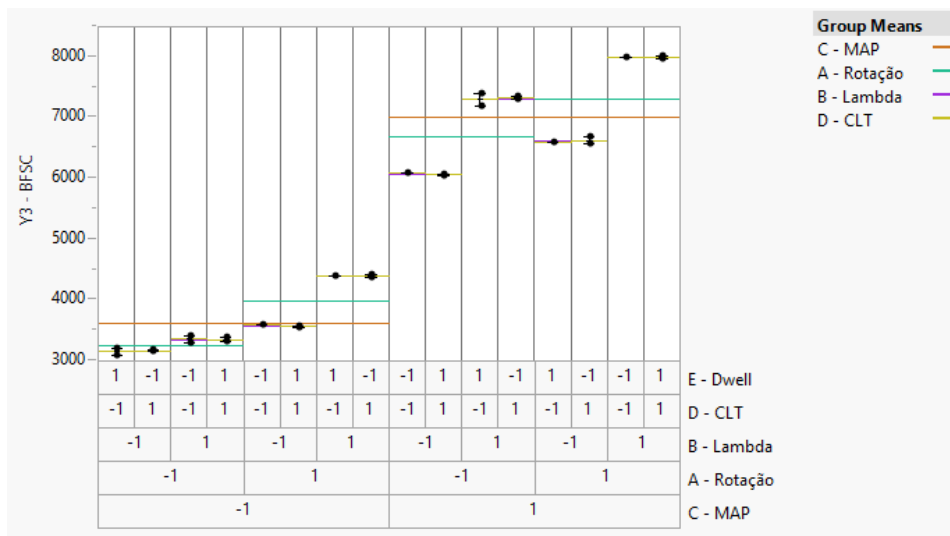


Nível Alto (+) ■ Nível Baixo (-) ■

Fonte: O Autor (2020)

No gráfico de pontos, apresentado na figura 35, observa-se que além do MAP, o fator Lambda também teve forte atuação no pulso de injeção, o que está alinhado com a previsão teórica.

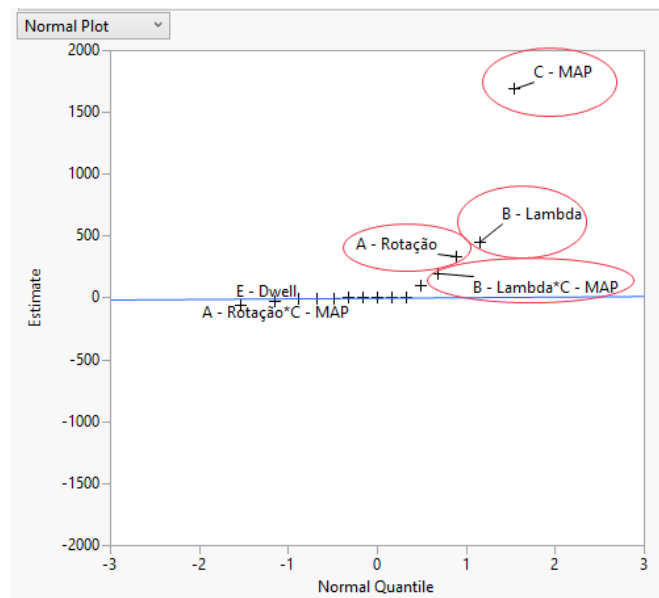
Figura 35 - Gráfico de pontos para o pulso de injeção de combustível.



Fonte: O Autor (2020)

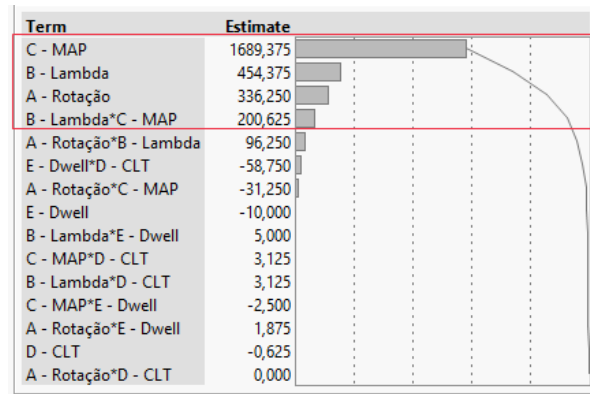
Pelo “Normal Plot” apresentado na figura 36 e pelo “Pareto” apresentado na figura 37, podem-se observar os graus de liberdade que tiveram significância estatística e ainda determinar uma linha de corte para se obter a significância prática.

Figura 36 - Normal Plot para o pulso de injeção de combustível.



Fonte: O Autor (2020)

Figura 37 - Pareto para o pulso de injeção de combustível.



Fonte: O Autor (2020)

Com base nos graus de liberdade selecionados, gera-se o modelo reduzido para o experimento. Neste caso foi adicionado ao modelo apenas os graus de liberdade A – Rotação, B – Lambda, C – MAP e a interação B – Lambda * C – MAP.

Pode-se notar, na figura 38, que o modelo ficou próximo a idealidade pelo RSquare e pelo RSquare ajustado.

Figura 38- Resultado do modelo reduzido.

RSquare	0,99571
RSquare Adj	0,99415
Root Mean Square Error	141,9187
Mean of Response	5313,125
Observations (or Sum Wgts)	16

Fonte: O Autor (2020)

Pelo ANOVA, na figura 39, pode-se concluir que este modelo tem uma probabilidade extremamente baixa de estar errado.

Figura 39 - ANOVA para o modelo reduzido do experimento

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Ratio
Model	4	51420144	12855036	638,2550
Error	11	221550	20140,909	Prob > F
C. Total	15	51641694		<,0001*

Fonte: O Autor (2020)

A expressão matemática que representa este modelo pode ser vista abaixo na equação 8.

$$Y3 = 5313,125 + 336,25.A + 454,375.B + 1689,375.C + B.[200,625.C] \quad (8)$$

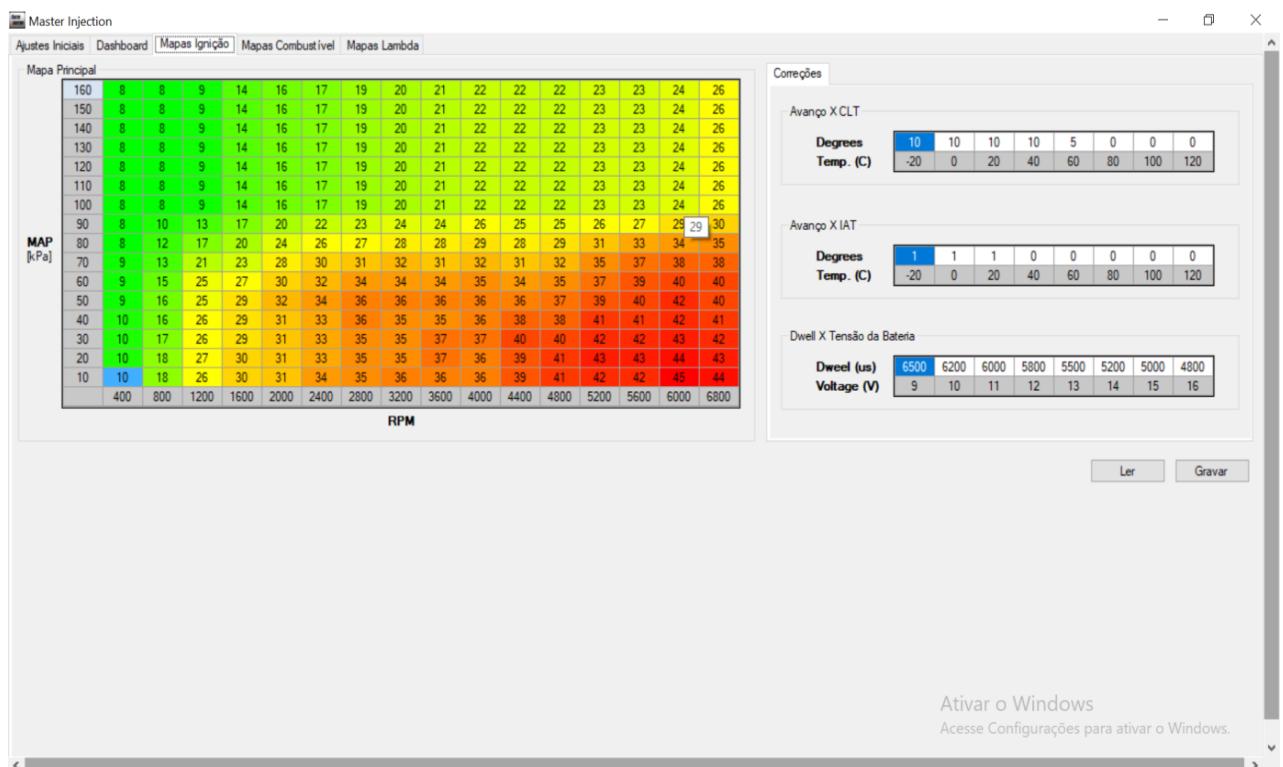
Aonde:

Y3- Pulso de injeção; A – Rotação; B – λ ; C – MAP

6.3 MAPAS

A partir das análises feitas, pode-se obter mapas de ignição e injeção, na figura 40 é possível observar o mapa de ignição o qual os valores de ângulo de ignição para cada par rotação-MAP. Aonde o eixo horizontal são os valores de rotação e o vertical os valores de MAP. O valor contido em cada célula para cada par é o de avanço de ignição em graus APMS.

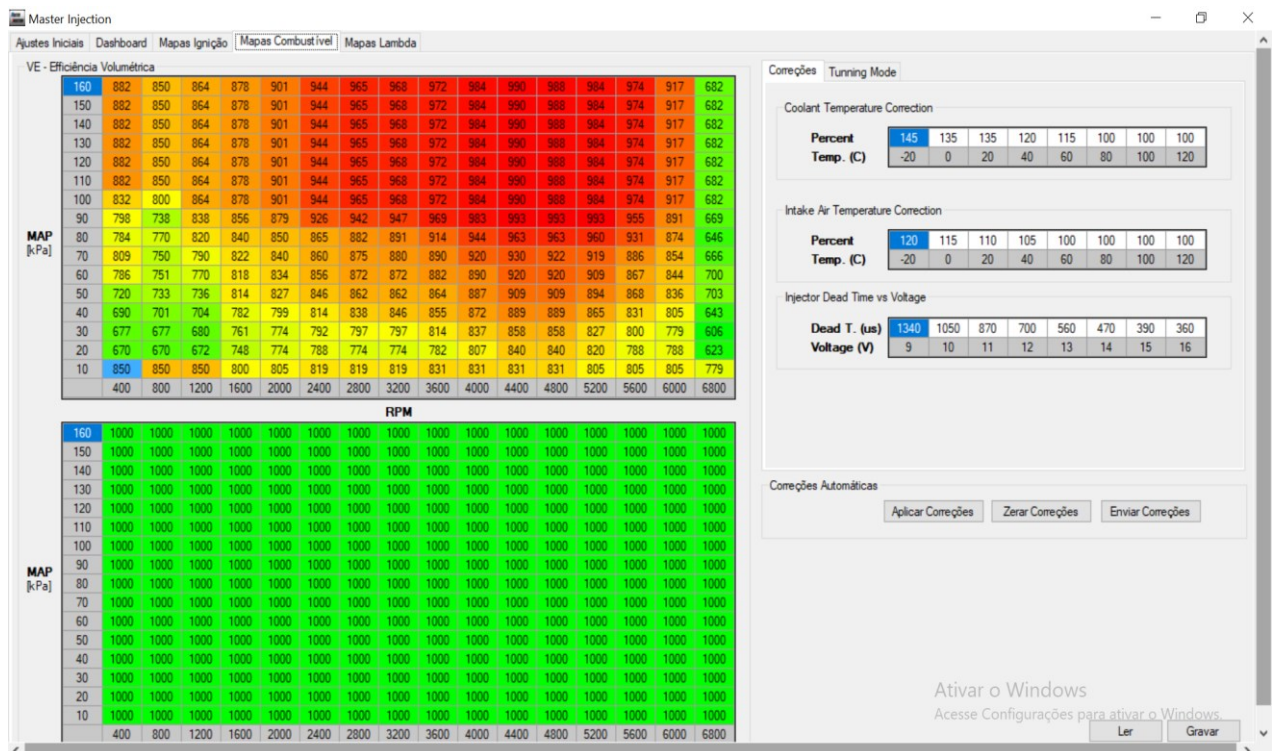
Figura 40 - Mapa de ignição



Fonte: O Autor (2020)

A figura 41 apresenta o mapa de injeção obtido, assim como o de ignição, este tem pares rotação-MAP, porém os valores contidos nas células são valores de eficiência volumétrica multiplicados por 10. Na parte de baixo do mapa de injeção se encontra o mapa de alvo de lambda.

Figura 41 - Mapa de injeção

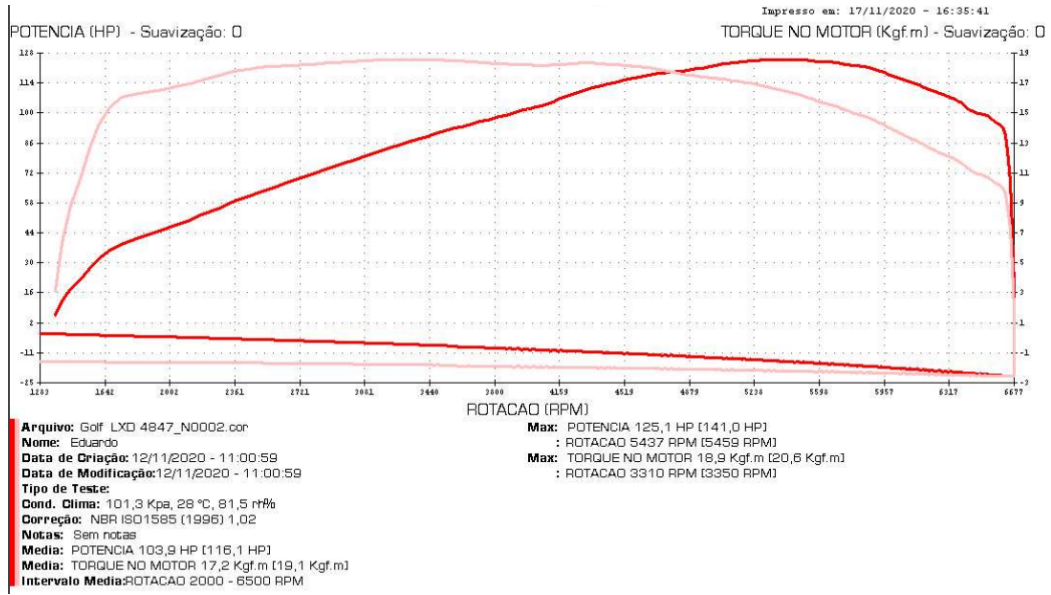


Fonte: O Autor (2020)

6.4 CURVAS CARACTERISTICAS

Com o auxílio do dinamômetro em seu modo inercial, foi possível obter as curvas de torque e potência do motor após a calibração. Essas curvas podem ser observadas na figura 42, aonde no eixo horizontal tem-se rotação do motor em rotação por minuto, no vertical direito torque em Kgf.m e no vertical a esquerda potência em HP.

Figura 42 - Curvas características



Fonte: O Autor (2020)

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a elaboração de um experimento planejado para que se pudesse avaliar a real influência de fatores nos pontos ótimos de funcionamento de um MCI.

Devido ao grande valor monetário agregado aos testes de MCI's por conta dos equipamentos utilizados, uma cuidadosa análise dos fatores que serão avaliados em conjunto a um planejamento de experimentos bem desenvolvido é indispensável quando cogita-se ensaiar motores.

Antes de realizar o experimento em estudo, realizou-se uma revisão teórica dos parâmetros e características importantes no funcionamento de MCI's. O conhecimento na parte de instrumentação foi adquirido de forma a se entender a funcionalidade e a aplicação dos equipamentos disponíveis. Um planejamento de experimento fatorial fracionado foi desenvolvido junto com a definição dos fatores avaliados e seus níveis. Um mapa de processo foi elaborado deixando claro e organizado as etapas da execução dos experimentos. O veículo utilizado possuía a ECU e os sensores instalados, porém a instalação de uma sonda de banda larga foi indispensável. A instrumentação dos testes contou também com um dinamômetro de chassis com freio magnético, o qual possibilitou a coleta dos dados de torque através de sua célula de carga.

A utilização do software JMP fez-se necessária, pois com este foi possível fazer a análise estatísticas dos dados e as regressões lineares para se chegar até os presentes resultados. Com a utilização do software foi possível observar a influência de cada um dos fatores nas variáveis repostas e por consequência a obtenção dos pontos ótimos de funcionamento do motor em questão.

Com o auxílio dos gráficos "Normal plot" foi possível observar quais fatores tinham maior influência nas variáveis resposta. Na variável resposta torque notou-se que o principal influente é o MAP, porém λ também tem uma pequena influência quando comparado a este. Nos valores de avanço de ignição, conclui-se que MAP, rotação e a interação rotação-MAP têm uma influência bastante próxima. Já na avaliação do pulso de injeção, foi possível notar que MAP, rotação, λ e a interação λ -MAP foram os fatores de maior influência nesta variável resposta. Os demais fatores, temperatura do motor e energia da centelha não afetaram de forma significativa em nenhuma das variáveis respostas.

Com utilização de modelo de experimento fatorial fracionado pode-se afirmar com até 99,41% que o modelo experimental mesmo simplificado chegou a valores próximos aos calculados. Portanto, os resultados mostram que a escolha por uma significância prática e não pela significância estatística, não comprometeu o modelo e fez com que ele ficasse mais simples. Equações normalizadas que regem as variáveis de saída puderam ser apresentadas em todos os modelos.

Para trabalhos futuros o experimento pode ser planejado de forma a se ter mais níveis nos fatores rotação, MAP e λ . Recomenda-se que os experimentos sejam realizados em dinamômetros de bancada. A fim de se analisar o BSFC de forma mais acurada, recomenda-se utilizar motores injeção direta e de forma sequencial. Também é possível adicionar a razão de compressão aos fatores, se possível, utilizar um motor de compressão variável nos experimentos. Indica-se fortemente a implementação de sensores de temperatura no coletor de exaustão a fim de se monitorar a temperatura dos gases da exaustão e ter também essas temperaturas como variáveis resposta do experimento.

REFERÊNCIAS

- Banish, G. (2007). *Engine Management Advanced Tuning*. North Branch: SA design.
- BOSCH. (2005). *Manual de tecnologia automotiva*. São Paulo: Edgard Blucher.
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Massachusetts: McGraw-Hill.
- Marques, P. A. (2014). *Otimização das características de um chassis tubular de automóvel de competição com tração integral*. Braga: Universidade do Minho.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments Ninth Edition*. Arizona: Wiley.
- Padilha, R. S. (2007). *Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento eletrônico e de um ambiente de aferição para motores mono cilíndricos de pequeno porte*. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- Pastorelli, P. P. (2015). *Análise da implementação de um turbocompressor em motor monocilíndrico para competição Fórmula SAE*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.
- Pulkrabek, W. W. (2003). *Engineering fundamental of the internal combustion engine*. New Jersey: Prentice Hall.
- Ruthes, J. P. (2016). *Análise de sensibilidade de suspensão veicular*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Automotiva), Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- Silveira, R. (2010). *Dimensionamento e projeto do sistema de freios de um veículo fora de estrada tipo baja*. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.
- Thomson, M. (2020, Abril 13). Retrieved from site da MTE Thomson: <https://www.mte-thomson.com.br/produtosmte/plug-eletronico-agua/>
- VOLKSWAGEN. (1996). *Motor AP 2000 Treinamento de serviço*.

APÊNDICE A – INTEFACE MASTER INJECTION

Master Injection

Ajustes Iniciais | Dashboard | Mapas Ignição | Mapas Combustível | Mapas Lambda

Comunicação: Porta COM: Não Conectado

Carregar e Salvar Dados: Ler tudo do módulo, Ler Arquivo do PC, Gravar tudo no módulo, Gravar Arquivo no PC, Salvar na Memória

Informações do Módulo: Modelo: 0, Versão de SW: Update SW

Ajustes Básicos: Ajustes Básicos de Combustível

Pulso Base: 6500 us, Pulso Partida: 1800 us, Angulo Injeção: 72° APMS, Timer Bomba: 10 x 0.1s, Cut Off In: 1750 RPM, Cut Off Out: 1500 RPM, Velocidade: Divisor Velocidade: 5000

Aceleração Rápida: dTPS Gatilho: 10 %/s, dTPS Const.: 150 us x dTPS, dTPS Adic. Max.: 1800 us, Nº Pulsos Kick: 2, Nº Pulsos por Ciclo: 2, dTPS Kick: 2%

Rápida X RPM: Gráfico de 0.00% a 120.00% vs RPM (2500 a 4000)

Rápida X Angulo TPS %: Gráfico de 0.00% a 120.00% vs TPS (10 a 25)

Sensor de Rotação: Offset Ignição: 84°, Borda do Sinal: Positivo

Sensor de Fase: Ler no Dente: 0, Valor Cilindro 1: Positivo

Ignição na Partida: Dwell Adicional: 4000 us

Ajuste de Ponto: Strobo: 0

Controle de Rotação: Shift Light: 6000 RPM, RPM Máximo: 6750 RPM, Hister. Max. RPM: 20 RPM

Rotação na Lenta X CLT: Tabela de RPM vs CLT (°C)

RPM	1200	1200	1100	950	850	800	800	800
CLT (°C)	-20	0	20	40	60	80	100	120

Ativar o Windows. Acesse Configurações para ativar o Windows.

Master Injection

Ajustes Iniciais | Dashboard | Mapas Ignição | Mapas Combustível | Mapas Lambda

Informações do Motor:

- Posição Lenta: 0
- CLT: 0 °C
- IAT: 0 °C
- Inj. Dead Time: 0 us
- Inj. Pulso: 0 ms
- Inj. Utilização: 0 %
- Eff. Volumétrica: 0 %
- Ign. Dwell: 0 us
- Ign. Avanço: 0 s
- Lambda: 0 /1000
- Lambda Aivo: 0 /1000
- Lambda Corr.: 0 %
- Velocidade: 0 km/h
- Rotação: 0 RPM
- Boost Aivo: 0 kPa
- dTPS: 0 %/s

Entradas:

- Chave A/C: --
- Auxiliar: --
- Tensão Bateria: 0 V
- Sensor de Fase: --

Saídas:

- MIL: --
- Bomba Comb.: --
- Relé Principal: --
- Lambda Heater: --
- Shift Light: --
- Canister: --

Controle de Mistura Lambda:

Closed Loop: [] Open Loop: []

RAW A/D - Valores Puros:

- Lambda: 0
- A/C: 0
- Temperatura: 0
- MAP Sensor: 0
- Boost Sensor: 0
- Knock Level: 0
- Batt. Voltage: 0
- CAM Sensor: 0
- CLT Sensor: 0
- IAT Sensor: 0
- TPS Sensor: 0
- Idle Position: 0
- Idle Switch: 0
- Speed Sensor: 0
- MAF Sensor: 0
- Motor I Sensor: 0

Ativar o Windows. Inicia Para. Acesse Configurações para ativar o Windows.

APÊNDICE B – INTERFACE JMP

Resultados Finais_v2 - JMP

File Edit Tables Rows Cols DOE Analyze Graph Tools View Window Help

Resultados Finais_v2

	A - Rotação	B - Lambda	C - MAP	D - CLT	E - Dwell	Setup	Ordem de execução	Y1 - Torque	Y2 - Avanço no Máximo..	Y3 - BFSC
1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	12,6	33	3200
2	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	12,7	32	3100
3	-1	-1	-1	-1	1	-1	2	12,4	31	3150
4	-1	-1	-1	1	-1	2	1	12,1	32	3180
5	-1	-1	1	-1	-1	3	10	29,2	22	6100
6	-1	-1	1	-1	-1	3	10	28,5	24	6100
7	-1	-1	1	1	1	4	2	29,3	23	6070
8	-1	-1	1	1	1	4	2	29,1	23	6050
9	-1	1	-1	-1	-1	5	14	13,1	32	3420
10	-1	1	-1	-1	-1	5	14	13,5	30	3300
11	-1	1	-1	1	1	6	8	13,1	29	3380
12	-1	1	-1	1	1	6	8	13,5	31	3320
13	-1	1	1	-1	1	7	13	34,2	24	7200
14	-1	1	1	-1	1	7	13	34,2	20	7400
15	-1	1	1	1	-1	8	7	33,8	23	7300
16	-1	1	1	1	-1	8	7	33,9	23	7360
17	1	-1	-1	-1	-1	9	15	10,7	40	3600
18	1	-1	-1	-1	-1	9	15	11,6	37	3600
19	1	-1	-1	-1	1	10	4	11,4	39	3580
20	1	-1	-1	1	1	10	4	11,1	38	3550
21	1	-1	1	-1	-1	11	16	33,9	22	6600
22	1	-1	1	-1	1	11	16	33	22	6600
23	1	-1	1	1	-1	12	3	33,4	23	6580
24	1	-1	1	1	-1	12	3	33,6	22	6680
25	1	1	-1	-1	1	13	12	11,4	40	4400
26	1	1	-1	-1	1	13	12	11,9	40	4400
27	1	1	-1	1	-1	14	5	11,8	41	4380
28	1	1	-1	1	-1	14	5	11,6	40	4420
29	1	1	1	-1	-1	15	11	34,8	18	8000
30	1	1	1	-1	-1	15	11	34,2	20	8000
31	1	1	1	1	1	16	6	34,3	19	8020
32	1	1	1	1	1	16	6	34,7	20	7980

Columns (10/0)

- A - Rotação
- B - Lambda
- C - MAP
- D - CLT
- E - Dwell
- Setup
- Ordem de execução
- Y1 - Torque
- Y2 - Avanço no Máximo Torque
- Y3 - BFSC

Rows

All rows 32
Selected 0
Excluded 0
Hidden 0
Labelled 0

Fit Model - JMP

Model Specification

Select Columns

- A - Rotação
- B - Lambda
- C - MAP
- D - CLT
- E - Dwell
- Setup
- Ordem de execução
- Y1 - Torque
- Y2 - Avanço...ximo Torque
- Y3 - BFSC

Pick Role Variables

Y: Y1 - Torque (optional)

Weight: optional numeric

Freq: optional numeric

By: optional

Personality: Standard Least Squares

Emphasis: Effect Leverage

Buttons: Help, Run, Recall, Remove

Keep dialog open:

Construct Model Effects

Add: A - Rotação

Cross: B - Lambda, C - MAP, D - CLT, E - Dwell

Nest: A - Rotação*B - Lambda, B - Lambda*C - MAP, A - Rotação*C - MAP

Macros:

Degree: 2

Attributes:

Transform:

No Intercept: