

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

COMPARAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA MÁQUINA AGRÍCOLA
COM MOTOR DIESEL DE 3 CILINDROS UTILIZANDO O SOFTWARE LOTUS
ENGINE SIMULATION E ENSAIO DINAMOMÉTRICO

por

Gabriel Ferraz Berlezi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, fevereiro de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Berlezi, Gabriel Ferraz
COMPARAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA MÁQUINA
AGRÍCOLA COM MOTOR DIESEL DE 3 CILINDROS UTILIZANDO O
SOFTWARE LOTUS ENGINE SIMULATION E ENSAIO
DINAMOMÉTRICO / Gabriel Ferraz Berlezi. -- 2024.
25 f.
Orientador: Alexandre Vagtinski De Paula.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Simulação motor. 2. Curvas de torque e potência.
3. Ensaio dinamométrico. 4. Lotus Engine Simulation.
5. Máquina agrícola. I. De Paula, Alexandre Vagtinski,
orient. II. Título.

Gabriel Ferraz Berlezi

COMPARAÇÃO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE UMA MÁQUINA AGRÍCOLA
COM MOTOR DIESEL DE 3 CILINDROS UTILIZANDO O SOFTWARE LOTUS
ENGINE SIMULATION E ENSAIO DINAMOMÉTRICO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignácio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Alexandre Vagtinski de Paula

Comissão de Avaliação:

Prof. Alexandre Vagtinski de Paula (Presidente)

Prof. Daniel Milbrath de Leon

Prof. Darci Barnech Campani

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Porto Alegre, fevereiro de 2024

BERLEZI, G. F. Comparação de curvas características de uma máquina agrícola com motor diesel de 3 cilindros utilizando o software Lotus Engine Simulation e ensaio dinamométrico. 2024. 25p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é comparar curvas de torque e potência de um motor diesel de uma máquina agrícola com 3 cilindros, obtidos de forma experimental conforme a norma ISO 14396 e de maneira simulada com o auxílio do software *Lotus Engine Simulation* na mesma norma. Para obter os valores experimentais de torque e potência, uma máquina agrícola foi submetida a um ensaio dinamométrico e um motor foi ensaiado em bancada conforme a norma ISO 14396. Para os valores teóricos de torque e potência, um modelo de motor foi elaborado no *Lotus Engine Simulation*, respeitando a mesma norma que o ensaio experimental, e posteriormente simulado. A comparação da curva simulada com a experimental resultou numa diferença de 2,1% nos valores de torque e 1,6% nos valores de potência. Já a curva de potência obtida, acoplando um dinamômetro móvel na tomada de potência da máquina agrícola em estudo, diferenciou-se em 4% quando comparada a uma curva de potência simulada no *Lotus Engine Simulation* com uma adaptação indicada pela norma ASABE D497.5, que prevê as reduções de potência no conjunto da máquina agrícola. Por fim, os resultados revelaram uma concordância em muitos pontos das curvas, pontuado a favor da eficácia da simulação como uma ferramenta valiosa na fase de desenvolvimento de projetos de motores.

PALAVRAS-CHAVE: *Lotus Engine Simulation*, Simulação motor, Curvas de torque e potência, Ensaio dinamométrico, Máquina agrícola.

BERLEZI, G. F. Comparison of the characteristic curves of an agricultural machine with a 3-cylinder diesel engine using the Lotus Engine Simulation software and dynamometer testing. 2024. 25p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The purpose of this study is to compare the torque and power curves of a 3-cylinder agricultural machine diesel engine, obtained experimentally according to the ISO 14396 standard and simulated using the Lotus Engine Simulation software according to the same standard. To obtain the experimental torque and power values, an agricultural machine was subjected to a dynamometer test and an engine was tested on a stand in accordance with the ISO 14396 standard. For the theoretical torque and power values, an engine model was developed in Lotus Engine Simulation, respecting the same standard as the experimental test, and then simulated. Comparing the simulated curve with the experimental one resulted in a difference of 2.1% in the torque values and 1.6% in the power values. The power curve that was obtained by attaching a mobile dynamometer to the power take-off of the agricultural machine under study differed by 4% when compared to a power curve simulated in Lotus Engine Simulation with an adaptation indicated by the ASABE D497.5 standard, which provides for power reductions throughout the agricultural machine. Lastly, the results showed that the curves matched in many points, supporting the effectiveness of simulation as a valuable tool in the engine design development phase.

KEYWORDS: Lotus Engine Simulation, Engine simulation, Torque and power curves, Dynamometer test, Agricultural machine.

NOMENCLATURA

Símbolos	Descrição	Unidade
m_{frac}	Fração mássica de combustível queimada	
θ	Ângulo atual de queima (depois do início da combustão)	°
θ_b	Ângulo de queima total (0% – 100% da duração da queima)	°
C_1	Coeficiente na equação de Watson e Pilley (Cp_1)	
C_2	Coeficiente na equação de Watson e Pilley (Cp_2)	
A	Coeficiente na equação de Wiebe	
Δ	Ângulo de atraso entre combustão pré-misturada e combustão por difusão	°
M	Coeficiente na equação de Wiebe	
h	Coeficiente de transferência de calor	W/(m ² K)
D_{cyl}	Diâmetro do cilindro	mm
k	Condutividade térmica do gás no cilindro	W/(mK)
A	Coeficiente A de Annand para ciclo aberto ou fechado	
Re	Número de Reynolds baseado na velocidade média do êmbolo e diâmetro do cilindro. A massa específica é a calculada para o conteúdo do cilindro para cada ângulo da árvore de manivelas.	
B	Coeficiente B de Annand para ciclo aberto ou fechado	
dQ/F	Fluxo de calor por unidade de área	W/m ²
T_{gas}	Temperatura de gás dentro da câmara de combustão	K
T_{wall}	Temperatura da parede do cilindro	K
C	Coeficiente C de Annand para ciclo fechado	
$FMEP$	Pressão efetiva média de fricção	bar
CR	Taxa de compressão	
N	Velocidade do motor	RPM
V	Tensão elétrica (Volt)	V
Hz	Frequência (Hertz)	Hz

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. OBJETIVO GERAL.....	2
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3. REVISÃO DE LITERATURA	2
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
4.1 MOTORES ALTERNATIVOS.....	3
4.2 DINAMÔMETROS DE CORRENTES PARASITAS	3
4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR	4
4.4 ESTIMATIVA DE PERDA DE POTÊNCIA	4
4.5 MODELO DE COMBUSTÃO PELA FUNÇÃO DE WIEBE	4
4.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CILINDRO.....	5
4.7 MODELO DE ATRITO DO MOTOR MILLINGTOM & HARTLES	5
4.8 NORMA ISO 14396.....	6
5. METODOLOGIA.....	6
5.1 LOTUS ENGINE SIMULATION.....	6
5.1.1 MODELAGEM DO MOTOR	6
5.2 ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS.....	9
6. RESULTADOS	11
6.1 RESULTADO DO ENSAIO DINAMOMÉTRICO	11
6.2 RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO <i>LOTUS ENGINE SIMULATION</i>	12
6.3 COMPARAÇÃO DA CURVA DO <i>LOTUS ENGINE SIMULATION</i> COM A CURVA ISO 14396 EXPERIMENTAL	12
6.4 COMPARAÇÃO DA CURVA DO ENSAIO DINAMOMÉTRICO COM A CURVA PROPOSTA PELA ASABE.D497.5 FEB2006.	13
7. CONCLUSÕES	14
7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXOS	18

1. INTRODUÇÃO

As metodologias de projeto, principalmente as que emergiram após a segunda guerra mundial, buscavam amadurecer ideias e concretizar objetivos complexos, porém conforme a complexidade aumentava, os projetos começaram a exigir uma fase para realizar um teste de prova de conceito. A prova de conceito, normalmente físico, consistia em estabelecer meios formais para determinar se o conceito sob consideração atendia ou não os requisitos do projeto, ou seja, o conceito de projeto iria funcionar conforme o previsto sob as condições previamente especificadas.

Esta prova de conceito geralmente estava atrelada à confecção de um protótipo físico, elaborado para validar se o protótipo atendia ou não os objetivos determinados no projeto. Conforme Dym (2010), o desenvolvimento de protótipos é um meio muito importante para determinar se um projeto pode ou não executar funções exigidas. Aqui, um protótipo ou unidade de teste incorpora as principais características funcionais do projeto final, mesmo que possa não ser parecido com o produto final esperado. Contudo, existiam muitos cenários onde a confecção de um protótipo e os testes eram inviáveis, devido às limitações de custos, tamanho e até perigo envolvido.

Em meados da década de 1950, a ciência da computação se estabeleceu como uma área acadêmica, colocando o homem diante de uma ferramenta com capacidade de cálculo e processamento capaz de criar uma simulação da realidade (LACERDA, 2012). Esta ferramenta deu origem a simulação computacional, hoje uma etapa indispensável em qualquer projeto novo e essencial para otimização de projetos já existentes. A simulação exige que o responsável por ela possua um entendimento profundo sobre o tema, sobre as condições de operação e o meio no qual o objeto de estudo está inserido, permitindo então que a modelagem produza dados pertinentes e adequados para análise.

Hoje, a habilidade de compreender os fenômenos envolvidos em um sistema, tal como o ambiente no qual o sistema está inserido, são essenciais para desenvolver uma simulação fiel. Muitas vezes, os valores obtidos em simulações se diferem dos encontrados em protótipos físicos. Entre os motivos podem ser listados os problemas com as incertezas e simplificações contidas nos softwares de simulação. Porém, se as condições de contorno e os fenômenos físicos contidos no sistema são bem entendidos, ajustes nas curvas para adequação do modelo podem resolver a diferença entre o simulado e o real.

A simulação computacional de motores é primordial para adequação às normas, otimização na vida útil de componentes e compreensão do comportamento do motor em diferentes rotações, eliminando a necessidade de produzir elevadas quantidades de protótipos para cada variável alterada no projeto. Conforme Duleba (2014), no início do desenvolvimento de um novo motor, otimizações extensivas são realizadas utilizando softwares de desempenho e softwares de análise de motores, que orientam diretamente a concepção do protótipo.

Conforme o artigo de Chan et al. (2013), entre os inúmeros softwares de simulação de motores disponíveis no mercado, o *Lotus Engine Simulation*, disponível em <https://www.lotusengineering.com/engineering-software/>, ganha destaque devido a coerência dos dados obtidos e pelo fato de ser gratuito. O *Lotus Engine Simulation* prediz perfis similares a softwares comerciais pagos, onde as pequenas discrepâncias encontradas entre os softwares podem ser explicadas pelos diferentes submodelos (submodelo de transferência de calor e submodelo de combustão) e diferentes propriedades físicas e químicas do combustível e dos produtos da combustão. O *Lotus Engine Simulation* é um programa de simulação capaz de prever a performance completa de um motor, e dentre os resultados que ele oferece, uma planilha com os dados de torque e potência é obtida, essencial para o estudo deste trabalho.

A tomada de potência (TDP) de uma máquina agrícola é uma das partes responsável por transmitir potência para os implementos acoplados, sendo que a potência originada do motor é transmitida por pacotes de transmissão até a TDP. O conhecimento da potência fornecida pela TDP é essencial para um operador de máquinas agrícolas, pois esta informação é a balizadora na hora de realizar compras de implementos ou de melhorar sua frota. Em geral, as montadoras possuem o costume de informar a potência do motor em normas onde são desconsideradas as perdas de carga pelo filtro de ar, escapamento e bomba da água, ou seja, os valores informados nos catálogos dos produtos não podem ser utilizados precisamente. Neste trabalho serão avaliadas as curvas de torque e potência obtidas por um ensaio dinamométrico, medidas na tomada de potência de uma máquina agrícola.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é comparar curvas de torque e potência de um motor alternativo de combustão interna a diesel de uma máquina agrícola com 3 cilindros, obtidas de diferentes formas. Serão analisadas 3 curvas: uma obtida em bancada conforme a norma ISO 14396; outra obtida com o auxílio do dinamômetro EGGERS PT301 MES - 600kW; e a última curva com o software *Lotus Engine Simulation* seguindo a norma ISO 14396.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Visando atingir o objetivo geral do trabalho foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Buscar compreender as variáveis de uma simulação do conjunto motor;
- Obter uma coerência dos dados obtidos fisicamente do conjunto motor com os simulados no *Lotus Engine Simulation*;
- Entender possíveis discrepâncias entre os gráficos de torque e potência físicos e simulados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

Conforme Antonello (2015), o homem sempre tentou substituir o esforço animal por máquinas, tanto para minimizar os esforços, quanto para agilizar os processos. O motor de combustão interna representa uma conquista para a humanidade, pois o tempo dedicado do homem ao exercício do esforço manual, hoje pode ser empregado para romper barreiras do conhecimento.

Após a década de 1970, com a mudança das demandas na agricultura, a qual passou a responder pelo desenvolvimento industrial brasileiro, o trabalho manual foi gradualmente sendo substituído pelo trabalho mecanizado. A introdução de máquinas agrícolas no campo foi essencial para o aumento de produtividade, que foi fundamental para alimentar o constante aumento de habitantes em nosso planeta (SORANSO, 2006).

Conforme Silva e Benez (1997 apud RUSSINI, 2012), máquinas agrícolas podem ter seu desempenho avaliado pela força e potência desenvolvida na barra de tração, torque e potência desenvolvida na tomada de potência (TDP), eficiência de tração, patinamento das rodas motrizes e consumo de combustível.

O motor de uma máquina agrícola, além da transmissão, é uma das bases para os usuários na aquisição da ferramenta, uma vez que é um dos componentes que melhor o caracteriza através de suas especificações de potência, torque e consumo de combustível. O

ensaio de máquinas agrícolas tem como propósito básico informar o consumidor sobre o desempenho de uma máquina, a qualidade do produto, os dados técnicos das máquinas e características particulares (HERZOG, 2020).

De acordo com Liljedahl *et al.* (1996), motores de ciclo diesel são projetados para ceder potência a uma velocidade relativamente baixa, uma vez que as máquinas agrícolas exercem alto esforço de tração e baixa velocidade de avanço, submetendo-os a cargas excepcionalmente grandes e variáveis durante a maioria das operações de campo.

Como evidenciado no trabalho de Ferrari (2015), a correta manutenção de uma máquina agrícola pode aumentar a potência útil disponível na TDP em até 7% e é influenciada negativamente pela falta de manutenção no filtro de ar e óleo do motor.

A determinação do desempenho de uma máquina agrícola é uma tarefa bastante complexa, principalmente quando realizada a nível de campo, pois inúmeras são as variáveis que devem ser analisadas, dentro de um contexto extremamente amplo. Mas como analisado por Russini (2012), a estimativa do desempenho de uma máquina agrícola pode ser feita com elevada exatidão realizando-se o ensaio dinamométrico em laboratório, substituindo desta forma os ensaios dinâmicos de campo e pista.

Uma das dificuldades encontradas na realização de ensaios dinamométricos está no fato de que, se o dinamômetro for fixo, as máquinas agrícolas a serem estudadas devem se deslocar até o local do ensaio, podendo inviabilizar o estudo. Para contornar essa situação, a criação de dinamômetros móveis facilitou a viabilidade de realizar estes ensaios, que unidas com a particularidade do ensaio na TDP de máquinas agrícolas ser utilizado como referência de comparação, condição esta que favorece o ensaio dinamométrico, pois evita separar o motor do restante da estrutura, visto que as cargas de frenagem geradas pelo dinamômetro podem ser aplicadas ao motor por intermédio da TDP, e os dados obtidos são fiéis ao que o agricultor terá disponível para trabalho, pois todos os elementos do motor e transmissão estão montados (FARIAS, 2014).

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 MOTORES ALTERNATIVOS

Um motor é uma máquina térmica que permite transformar calor em trabalho, sendo que nos motores endotérmicos o calor é obtido pela queima de um combustível com o oxigênio presente no ar, isto é, ele transforma a energia química em trabalho mecânico. Quando o trabalho mecânico é obtido pelo movimento de vaivém de um êmbolo, transformado em rotação contínua por um conjunto biela-manivela, o motor é classificado como um motor alternativo (BRUNETTI, 2012).

4.2 DINAMÔMETROS DE CORRENTES PARASITAS

Também conhecido como dinamômetro de correntes de Foucault, seu princípio de funcionamento se dá pela indução eletromagnética produzida pelo rotor, que em movimento produz correntes parasitas, que são dissipadas sob a forma de perdas resistivas no estator. Esta variação de corrente elétrica produz as variações de carga no freio. A principal vantagem desse tipo de dinamômetro é a rápida resposta a variações de carga e a possibilidade de leitura do torque em baixas rotações (CLARA, 2007 apud RUSSINI, 2012).

4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS DO MOTOR

As propriedades dos motores variam em função das condições de funcionamento. Para se ter uma visualização dessa variação, são construídas curvas características a partir de ensaios realizados em laboratórios.

O melhor ponto para o torque máximo acontecer é em uma rotação intermediária do motor, porque em altas rotações o momento resistente aumenta no eixo do motor, ocasionando a queda da rotação e aumento do torque do motor, possibilitando um novo equilíbrio. No intervalo entre a rotação de torque máximo e a máxima rotação, o motor apresenta um comportamento estável e se autorregula para pequenas variações de momento resistente (BRUNETTI, 2012).

4.4 ESTIMATIVA DE PERDA DE POTÊNCIA

De acordo com Mialhe (1991 apud RUSSINI, 2012), na transmissão da potência do motor ocorre uma redução desta potência, que dependendo das condições de operação da máquina agrícola, podem atingir níveis totalmente insatisfatórios. A ASABE D497.5 (2006) organiza a análise da redução de potência, conforme ilustra a Figura 1.

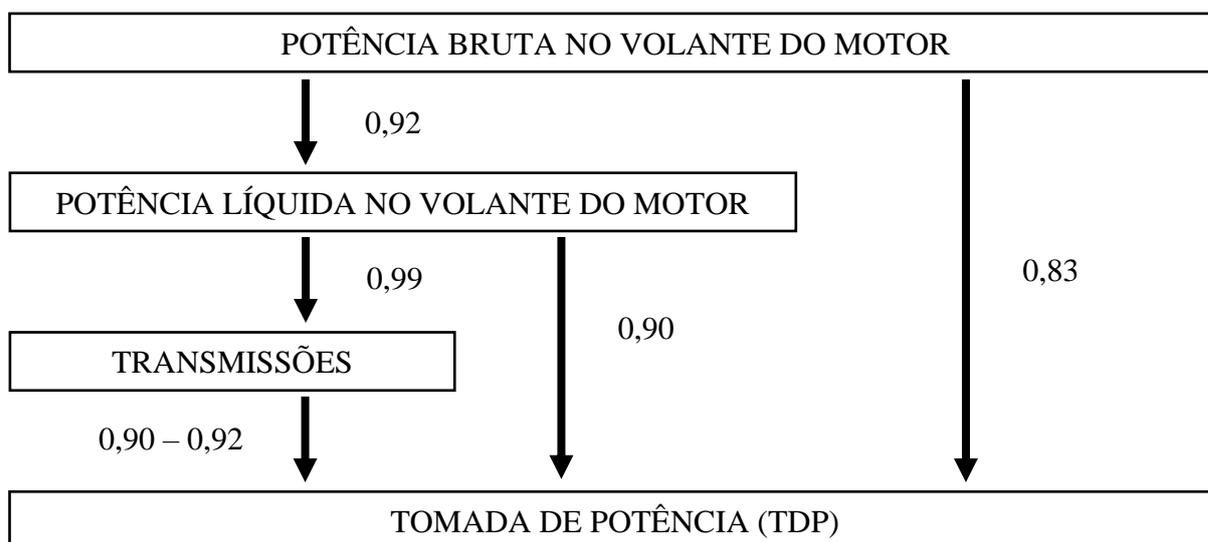


Figura 1 – Diagrama de estimativa de perda de potência. Adaptado de: ASABE **D497.5 FEB2006**, (2006).

4.5 MODELO DE COMBUSTÃO PELA FUNÇÃO DE WIEBE

O software *Lotus Engine Simulation* utiliza um modelo de liberação de calor em zona única, ou seja, isso significa que durante a combustão o calor liberado é utilizado para aquecer todo o espaço da câmara de combustão. A principal implicação desta simplificação é que a temperatura do gás é geralmente mais baixa do que a temperatura do núcleo do gás queimado atrás da frente de chama. No entanto, uma vez que os modelos semiempíricos de transferência de calor fazem suposições grosseiras em relação ao coeficiente de transferência de calor e à temperatura da parede, os efeitos desta simplificação são pequenos. A função disponível no programa para modelar a combustão de motores diesel é a função de Wiebe de duas partes (LOTUS CARS, 2001b).

A função de Wiebe de duas partes define a fração de massa queimada no período de combustão da pré-mistura como:

$$m_{frac} = 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta}{\theta_b}\right)^{c_1}\right]^{c_2} \quad (1)$$

A fração de massa queimada durante o período de combustão por difusão é definida como:

$$m_{frac} = 1 - e^{-A\left(\frac{\theta-\Delta}{\theta_b-\Delta}\right)^{M+1}} \quad (2)$$

A principal vantagem das funções Wiebe está o fato delas serem normalizadas pela duração da combustão. Assim, o usuário pode alterar rapidamente a duração total da combustão e ter a certeza de obter uma taxa de liberação de calor realista.

4.6 TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CILINDRO

Os modelos de transferência de calor do *Lotus Engine Simulation* utilizam coeficientes que foram desenvolvidos para melhor reproduzir os resultados de transferência de calor obtidos experimentalmente. Os coeficientes utilizados podem ser os valores padrão propostos pelo *Lotus Engine Simulation*, ou ajustado pelo usuário para se adequar ao motor sendo estudado. Os modelos de transferência de calor do software são o de Woschni, Annand e Eichelberg, e o adotado neste trabalho foi o de Annand, indicado para motores que utilizam diesel. A função de Annand é definida como (LOTUS CARS, 2001c):

$$\frac{hD_{cyl}}{k} = ARe^B \quad (3)$$

A transferência de calor por unidade de área da parede do cilindro é dada por:

$$\frac{dQ}{F} = h(T_{gas} - T_{wall}) + C(T_{gas}^4 - T_{wall}^4) \quad (4)$$

4.7 MODELO DE ATRITO DO MOTOR MILLINGTOM & HARTLES

Este método de calcular os valores de fricção de motores diesel de injeção direta e indireta foi obtida do modelo de Barnes-Moss, adaptada por Millington e Hartles e ajustada pela engenharia da fabricante britânica de carros desportivos *Lotus Cars* para excluir a pressão efetiva média de atrito de bombeamento, visto que este valor é calculado dentro do código da simulação, e adicionado o termo de taxa de compressão (LOTUS CARS, 2001d). A equação que rege esse ajuste é a seguinte:

$$FMEP = \left(\frac{CR - 4,0}{14,5}\right) + 0.48275 \times 10^{-3} \cdot N \quad (5)$$

4.8 NORMA ISO 14396

Esta norma especifica os requisitos adicionais e o método para determinar a potência de motores alternativos de combustão interna. A Tabela 1 exemplifica alguns dos parâmetros empregados pela norma e que serão empregados no trabalho (MÁRQUEZ, 2012).

Tabela 1 – Alguns parâmetros empregados pela norma ISO 14396.

Norma	Pressão atmosférica	Temperatura ambiente	Temperatura combustível
ISO 14396	0,99 bar	25°C	de 37°C até 43°C

5. METODOLOGIA

5.1 LOTUS ENGINE SIMULATION

O software *Lotus Engine Simulation* é um programa desenvolvido dentro da área de engenharia da *Lotus* desde os anos de 1980 (LOTUS CARS, 2001a). Essa ferramenta possui uma alta abrangência de itens que podem simulados, conforme a lista abaixo:

- Motores de 2 tempos e motores de 4 tempos;
- Disposições arbitrárias dos cilindros e intervalos de ignição;
- Sistemas de combustão dos modelos de injeção direta e indireta do diesel e ignição por centelha;
- Taxas de combustão através das funções Wiebe de 1 ou 2 partes, ou perfis do usuário;
- Turbocompressores e sobrealimentadores;
- Sistemas de limpeza de motores de 2 tempos;
- Fenômenos de transferência de calor e fricção;
- Válvulas de porta e de palheta.

A estrutura do programa é generalizada, ou seja, não é necessário refazer todo o modelo ao alterar parâmetros e geometrias do motor. Desta maneira, os sistemas de motores podem ser configurados e estruturas de controles simples podem ser implementadas. A validação dos parâmetros de desempenho global de potência, eficiência volumétrica e consumo de combustível foi realizada em uma vasta gama de motores. A validação detalhada de muitos dos submodelos para prever a pressão do cilindro, combustão, transferência de calor e a dinâmica dos gases do sistema de admissão e escape também foram realizadas (LOTUS CARS, 2001a).

5.1.1 MODELAGEM DO MOTOR

Para a modelagem do motor diesel instalado em uma máquina agrícola, este trabalho teve como suporte o acesso ao motor físico instalado em uma máquina, desenhos em 3D e em 2D de alguns componentes e apoio do manual de oficina do produto.

Para desenvolver um modelo no *Lotus Engine Simulation*, Duleba (2014) propôs o diagrama ilustrado na Figura 2.

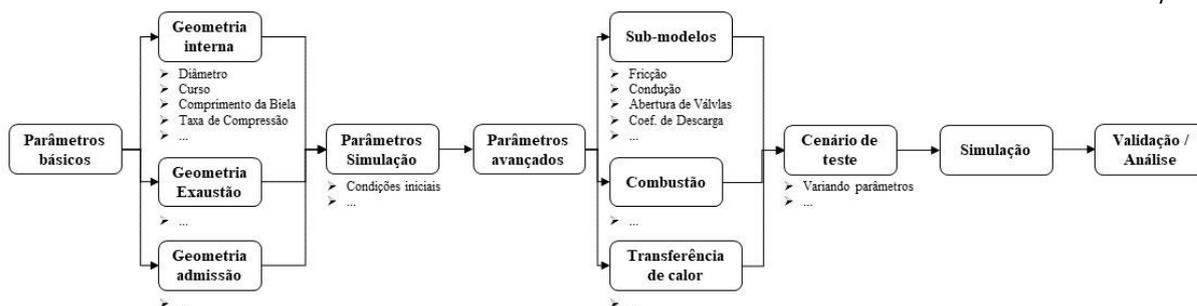


Figura 2 – Desenvolvimento do modelo do motor. Adaptado de Duleba (2014)

As informações básicas incluem a geometria do motor (diâmetro do êmbolo, curso do êmbolo, comprimento da biela e taxa de compressão), inércia do motor (massa e inércia de alguns componentes) e fases do cilindro e válvulas. As informações complementares da geometria do motor para os cálculos da simulação são obtidas a partir dos dados de entrada, como por exemplo, do volume do cilindro, que é calculado baseado na taxa de compressão.

Após a definição das informações básicas, informações avançadas são necessárias, e caso não sejam preenchidas, o software indica valores padrões a partir de sua base de dados. Neste trabalho foi utilizado a função de Wiebe de 2 partes para o modelo de combustão e o modelo de Annand para a transferência de calor dos cilindros. O *Lotus Engine Simulation* possibilita a otimização e especificação da câmara de combustão para maior exatidão do modelo, conforme os parâmetros do anexo A. Contudo, se não forem preenchidos tais valores, o software completa com os dados fornecidos do modelo geral.

O tipo de motor foi definido como um motor diesel com cilindros dispostos em linha, com sistema de injeção direta e as propriedades do diesel escolhido para uso na simulação estão representadas na Tabela 2, diferente do óleo diesel Rubilene 813, utilizado no ensaio dinamométrico com o motor montado na máquina agrícola.

Tabela 2 – Propriedades do diesel no *Lotus Engine Simulation*.

Valor calorífico	42700 kJ/kg
Densidade relativa	0,84 kg/litro
Razão de Hidrogênio / Carbono	1,9 [mol/mol]
Massa molecular	170 kg/k.mol

Foram especificados os comprimentos e materiais dos condutos de admissão e escape, das válvulas, do modelo de atrito do motor (modelo de Millington & Hartles Model) e o mapa do turbocompressor e *intercooler*, dentre outros parâmetros. O modelo final simulado do motor da máquina agrícola pode ser observado na Figura 3.

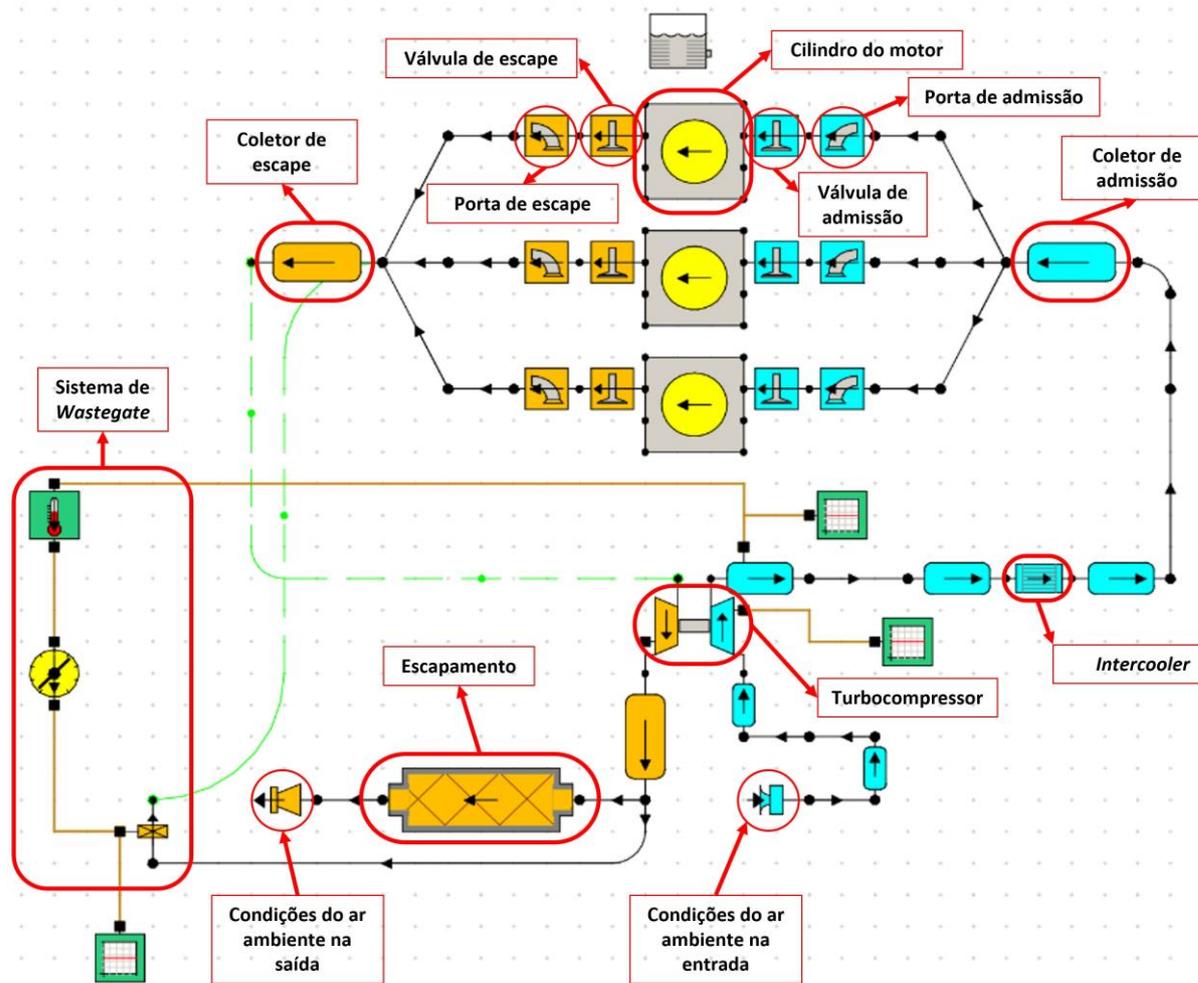


Figura 3 – Modelo simulado do motor de uma máquina agrícola 3 cilindros no *Lotus Engine Simulation*.

Para executar a simulação do modelo foram fornecidas as condições de contorno exibidas na Tabela 3, e solicitado para calcular o torque e potência do modelo completo a partir de 1400 rpm até 2300 rpm, aumentando 100 rpm a cada etapa.

Tabela 3 – Condições de contorno da simulação.

Pressão atmosférica	0,99 bar
Temperatura ambiente	25°C
Temperatura do combustível	37°C
Umidade específica	0,013 kg/kg

Após 120 minutos executando a simulação, a curva de torque e potência em razão da rotação do motor foi obtida. O modelo e as condições de contorno respeitaram a norma ISO 14396, como objetivo de comparar a curva simulada com a curva adquirida experimentalmente na norma mencionada.

5.2 ENSAIOS DINAMOMÉTRICOS

Um dos ensaios dinamométricos foi realizado com o motor em uma bancada de testes dentro de uma montadora brasileira de máquinas agrícolas, respeitando a norma ISO 14396, onde a metodologia não pode ser compartilhada devido ao sigilo empresarial. O outro foi realizado com o auxílio de um dinamômetro móvel calibrado, ilustrado na Figura 4, da marca EGGERS e modelo PT301 MES, com capacidade de até 600kW, do tipo de correntes de Foucault.



Figura 4 – Dinamômetro móvel utilizado nos ensaios de levantamento das curvas de torque e potência do motor em função da rotação.

As principais especificações técnicas deste equipamento estão ilustradas na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações técnicas do dinamômetro móvel utilizado nos ensaios de levantamento das curvas de torque e potência do motor em função da rotação. Fonte: Catálogo de produtos EGGERS.

Sistema de frenagem	Dois freios de Faraday	
Sistema de refrigeração	2 ventiladores elétricos com vazão 17000 m ³ /h.	
Rotação máxima	3600 rpm	
Torque máximo	7200 Nm	
Exatidão	< 1%	
Massa	1300 kg	
Intervalo de medição	600 kW – 1 min 550 kW – 2 min 500 kW – 2,5 min 450 kW – 3,5 min	400 kW – 4,5 min 320 kW – 7,5 min 280 kW – 9 min 220 kW – 40 min

Para iniciar o ensaio dinamométrico é necessário verificar se a máquina agrícola está com o nível de óleo, líquido de arrefecimento e óleo da transmissão no volume adequado, conforme ilustrado na Figura 5.



Figura 5 – Verificação do nível de óleo do motor (1), verificação do nível do líquido de arrefecimento (2) e verificação do nível de óleo da transmissão (3).

Com a máquina em condições de se submeter ao ensaio, a área de teste é demarcada para segurança. Então um computador é posicionado para registro dos dados através do software do fabricante e o dinamômetro móvel é energizado, verificando-se se não há um torque parasita proveniente de um teste anterior. Caso haja, se faz necessário corrigir os valores. Após a correção, acopla-se o eixo cardam do dinamômetro à TDP da máquina agrícola, conforme ilustrado na Figura 6.

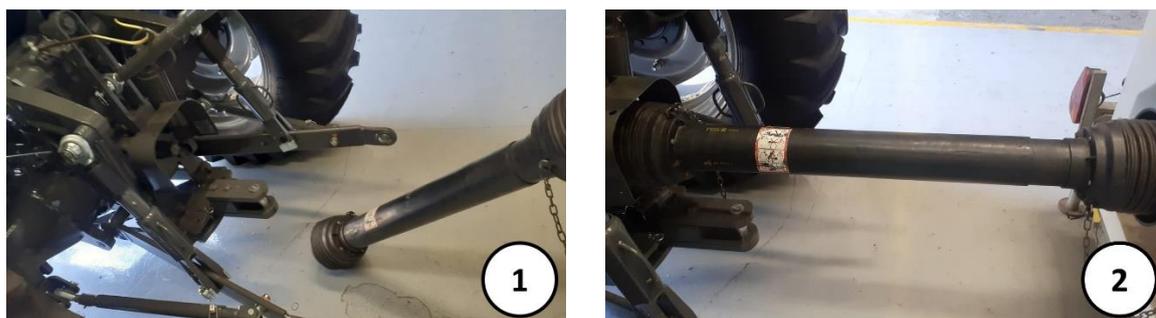


Figura 6 – Eixo cardam desacoplado à TDP (1) e com o acoplamento realizado (2).

Antes de iniciar a operação, os seguintes itens devem ser verificados:

- Freios da máquina agrícola ativados;
- Eixo cardam travado com segurança;
- Cabo elétrico completamente desenrolado;
- Suportes do dinamômetro travados;
- Utilização de protetores auriculares pelos presentes;

- Pessoas instruídas sobre as normas de segurança;
- Pessoal treinado presente.

Com todos os itens anteriores em conformidade, a máquina é abastecida com Rubilene 813, um tipo de diesel empregado em empresas de máquinas agrícolas para motores de combustão interna inativos, o óleo possui a mesma quantidade de cetanos que o diesel comercial e se difere pelo alto teor de enxofre total, proporcionando um ponto de fulgor mínimo mais elevado (BRUNELLI, 2009). Então é dada a partida no motor e espera-se atingir a temperatura de trabalho, para que assim o teste possa se iniciar. Como o intuito desse teste é apenas de obter a curva de torque e potência líquida disponível após perdas do sistema em uma condição normal de trabalho, e não de comparar com outra máquina, ou para fins de certificação ou homologação, optou-se por não seguir nenhuma norma de ensaio.

A máquina é submetida a um único teste durante 5 minutos e ao final o software da EGGERS fornece a curva de torque e potência lida na TDP em razão da rotação do motor.

6. RESULTADOS

Por se tratar de dados sensíveis de uma montadora de máquinas agrícolas localizada no Brasil, os valores de torque (Nm) e potência (kW) não podem ser fornecidos e foram omitidos por motivo de confidencialidade por se tratar de segredo industrial, logo serão resultados qualitativos. Contudo, essa omissão não impede a análise criteriosa dos resultados.

6.1 RESULTADO DO ENSAIO DINAMOMÉTRICO

As curvas de torque e potência em função da rotação do motor (em RPM) obtidas com o dinamômetro móvel da marca EGGERS modelo PT301 MES é apresentada na Figura 7, levando em conta o valor de 1% de exatidão do instrumento.

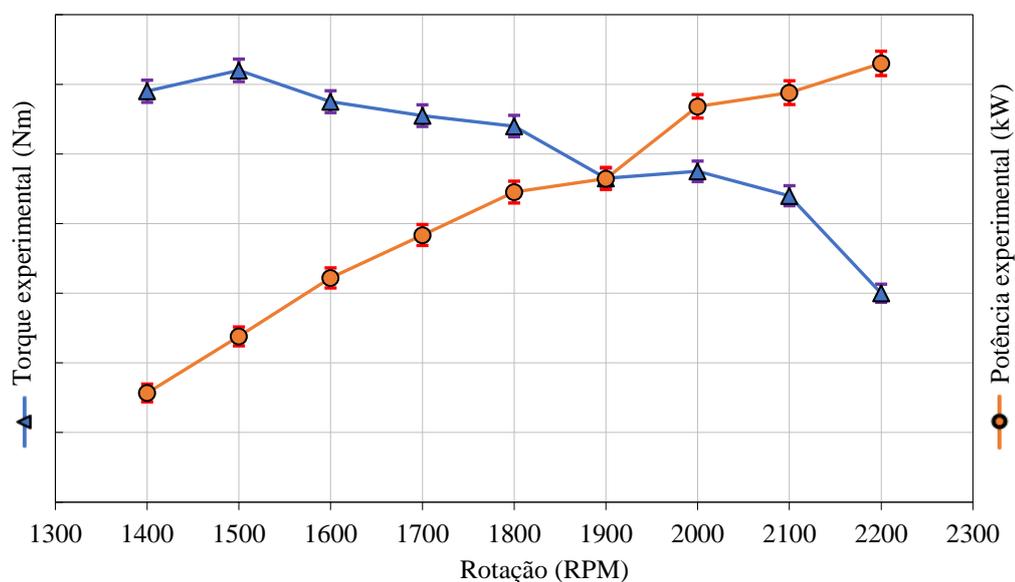


Figura 7 – Curvas de torque e de potência em função da rotação do motor (RPM) obtido com o dinamômetro EGGERS.

O torque máximo ficou na faixa de 1500 RPM, comportamento esperado para este tipo de máquina, e a potência máxima por volta de 2200 RPM, comportamento também esperado.

Pode ser observado que na faixa de 1900 RPM houve uma queda brusca no valor de torque e potência, um comportamento não esperado, que pode ter sido ocasionado pelo combustível utilizado no ensaio, ou por algum fator externo na hora do experimento.

6.2 RESULTADO DA SIMULAÇÃO NO *LOTUS ENGINE SIMULATION*

O resultado da simulação do sistema motor dessa máquina agrícola dentro do *Lotus Engine Simulation* pode ser visualizado na Figura 8.

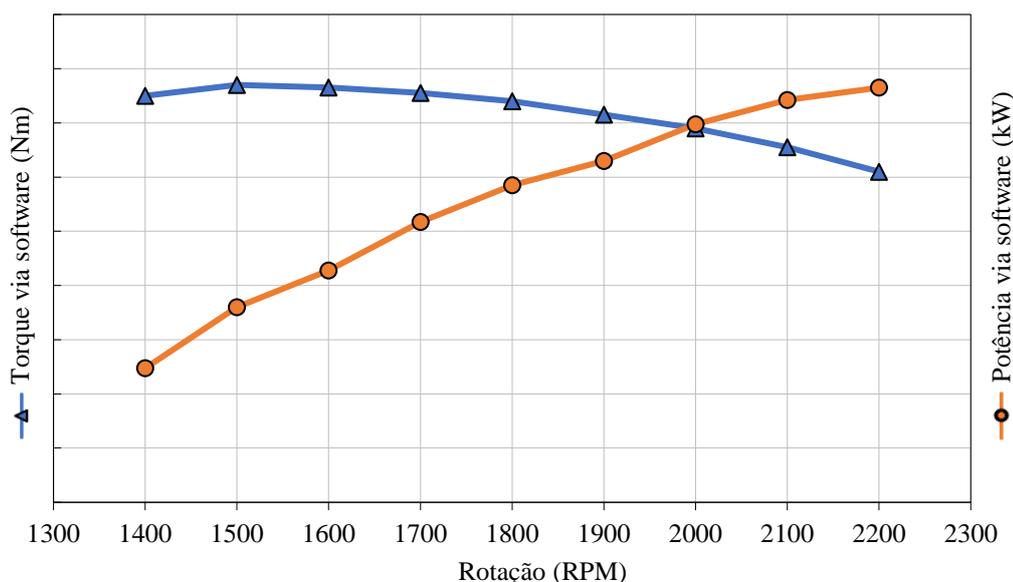


Figura 8 – Curvas de torque e de potência em função da rotação do motor (RPM) obtido no *Lotus Engine Simulation*.

A curva de torque e potência simulada no *Lotus Engine Simulation* teve seu pico de torque por volta de 1500 RPM do motor, e o pico de potência na faixa de 2200 RPM. A potência apresentou um comportamento quase que linear de crescimento com o aumento de rotação do motor, enquanto o torque teve seu ponto de inflexão à 1500 RPM, e, a partir deste ponto, decresceu lentamente até a rotação de 1800 RPM. É observado que o torque decaí mais expressivamente após 1800 RPM.

6.3 COMPARAÇÃO DA CURVA DO *LOTUS ENGINE SIMULATION* COM A CURVA ISO 14396 EXPERIMENTAL

Para comparar a curva simulada no *Lotus Engine Simulation* obtida com os padrões ISO 14396, foi utilizado a curva característica experimental obtida conforme a norma ISO 14396, utilizada como referência nos testes internos da montadora. A sobreposição das duas é exibida na Figura 9.

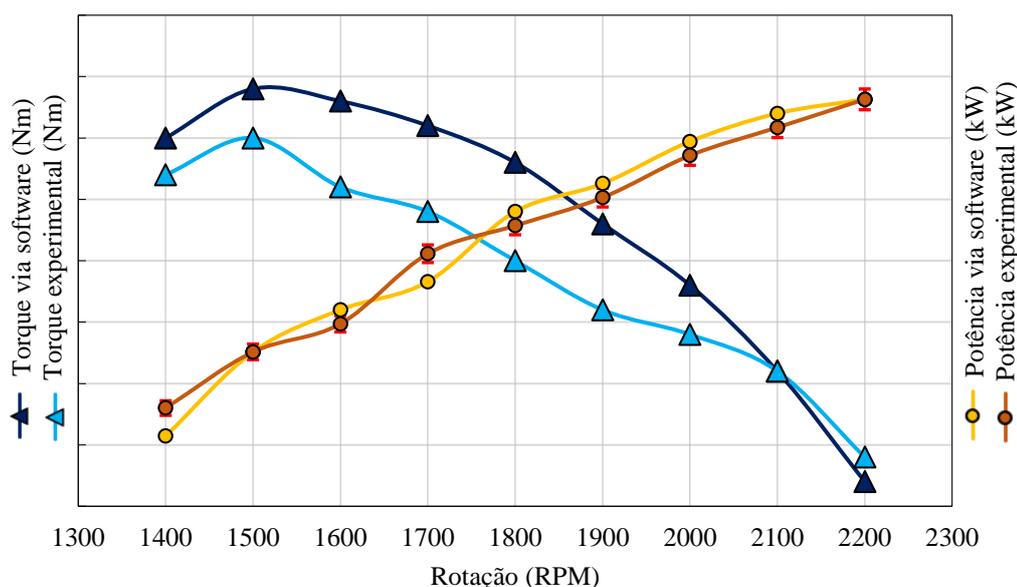


Figura 9 – Comparação das curvas de torque e de potência simulada com a experimental seguindo a norma ISO 14396.

Comparando a curva de torque fornecida pelo *Lotus Engine Simulation* com a curva de torque obtida experimentalmente seguindo a norma ISO 14396, percebe-se que ambas possuem o comportamento semelhante conforme a rotação do motor aumenta. A diferença dos valores simulados comparados com o experimental ficou em cerca de 2,1%. Esta divergência é esperada, pois além das simplificações dentro de código do software (LOTUS CARS, 2001a), somam-se as incertezas de medições e a falta de ajustes nos coeficientes de Annand e Wiebe.

Já na comparação das curvas de potência, percebe-se que ambas possuem comportamento semelhante com o aumento de rotação do motor, com uma diferença média dos valores simulados comparados com o experimental na ordem de 1,6%. A diferença nessa curva foi inferior quando comparada a diferença na curva de torque, apesar de ambas terem as mesmas considerações referentes a divergência de dados simulados e experimentais. Entre 1500 RPM e 1800 RPM nota-se um comportamento similar da curva de potência experimental e da curva de potência via software, contudo inverso. Onde se deduz que, além das suposições anteriores sobre a causa das divergências, adiciona-se o efeito do erro de paralaxe, originário da transferência dos dados da tabela física impressa em folha A4 do ensaio experimental do motor conforme a norma ISO 14396.

6.4 COMPARAÇÃO DA CURVA DO ENSAIO DINAMOMÉTRICO COM A CURVA PROPOSTA PELA ASABE.D497.5 FEB2006.

De acordo com a ASABE (2006), as perdas típicas de potência ao longo de uma máquina agrícola até a saída da TDP são da ordem de 11%. Visando uma comparação com a curva obtida pelo ensaio dinamométrico utilizando o dinamômetro móvel da marca EGGERS, foi utilizada a curva simulada no *Lotus Engine Simulation* e decrescido dos seus valores em 11%, de acordo com esta referência da literatura. Os resultados desta comparação estão ilustrados na Figura 10.

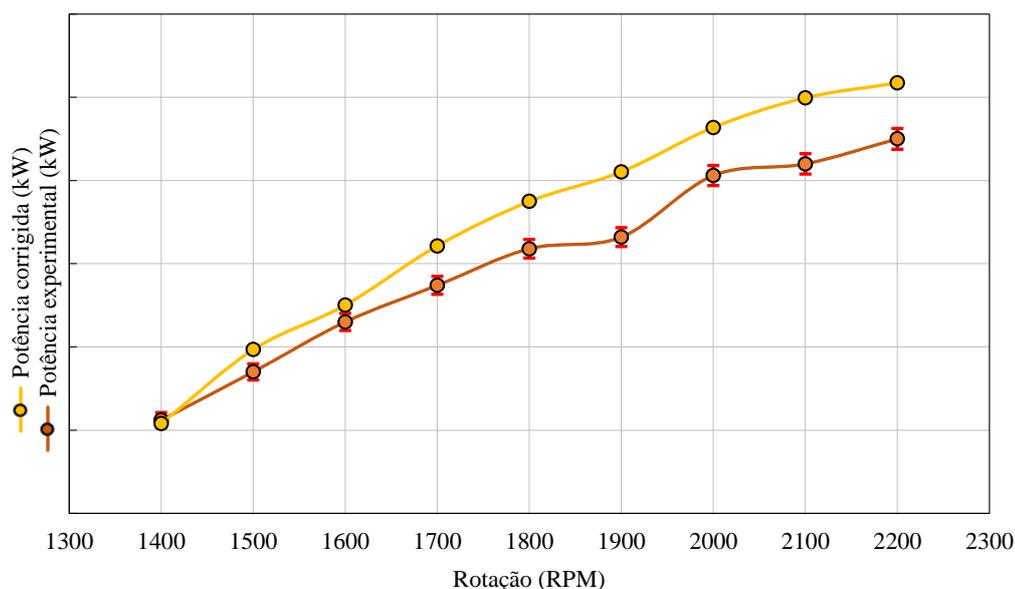


Figura 10 – Comparação da curva de torque e potência obtida com o dinamômetro móvel e a estimada a partir da simulação no *Lotus Engine Simulation*.

A curva de potência obtida com o dinamômetro móvel da EGGERS será considerada como a real, visto que ela representa valores obtidos experimentalmente. Já a curva de potência com os descontos de perdas pelo sistema de transmissão, sistema hidráulico e dissipação térmica será chamada de curva ajustada.

Comparando-se a curva real com a curva ajustada da Figura 10, nota-se uma diferença dos dados de 4% para a potência. A motivação dessa diferença pode ser atribuída às simplificações dentro do código do software (LOTUS CARS, 2001a), às incertezas de medições, falta de ajuste nos coeficientes de Annand e Wiebe e pelo uso de 11% na redução de potência do volante do motor para a TDP (ASABE, 2006). A razão pelo qual este trabalho indica o valor adotado para a redução de potência como um potencial causador de diferenças entre os resultados obtidos é devido à constante atualização dos valores na norma ASABE D497, que constantemente sofre ajustes para atender o mercado atual.

7. CONCLUSÕES

O presente estudo realizou a simulação do comportamento de um motor agrícola com o uso do software *Lotus Engine Simulation* e comparou com dados obtidos através de testes dinamométricos e também ajustados de acordo com a literatura em função das perdas em sua tomada de potência.

A simulação do motor de uma máquina agrícola no software *Lotus Engine Simulation* necessitou de várias informações, tais como as características geométricas e construtivas do motor e seus acessórios, sendo que várias destas ou não são de rápida obtenção, ou foram preenchidas com a base de dados fornecida pelo software, tais como a eficiência do *intercooler* e comportamento do turbocompressor em diferentes vazões mássicas. Observou-se também a importância da utilização de normas técnicas adequadas para a correta reprodutibilidade, comparação e homologação de curvas características dos motores de máquinas agrícolas. Conforme erros e inconsistências apareciam no software, o estudo das variáveis e suas influências no conjunto final da simulação foram essenciais para o aprofundamento no tema e obtenção de valores correntes do conjunto simulado e do conjunto experimentado fisicamente.

Os resultados foram comparados, revelando uma concordância em muitos pontos das curvas, pontuando a favor da eficácia da simulação como uma ferramenta confiável para prever a curva de torque e potência de um motor diesel de uma máquina agrícola. Já onde foram observadas as divergências mais notáveis, evidenciou-se a necessidade de aprofundar a análise naquele ponto para aprimorar a exatidão da simulação.

Comparando-se as curvas reais com as curvas ajustadas com as perdas previstas pela norma na TDP, observou-se uma diferença dos dados de 4% para a potência. Já na comparação entre as curvas experimentais com as curvas simuladas evidenciou-se uma diferença de 2,1% dos dados de torque e 1,6% dos dados de potência.

Na comparação da potência real obtida na TDP, com o que a literatura diz sobre as perdas sofridas pelos sub-conjuntos da máquina agrícola, ficou evidenciado que os valores são muito próximos e que a literatura pode ser utilizada para uma estimativa inicial. Contudo, como cada montadora possui a sua estratégia de gerenciamento eletrônico do motor e sistemas de transmissão e hidráulico únicos, quantificar a perda para todas essas variáveis é um desafio considerável. Logo, para um estudo ou dimensionamento mais assertivo, o ensaio dinamométrico é o caminho mais seguro a ser tomado.

Por fim, este estudo apresentou resultados adequados, obtidos na simulação e evidenciando que esta pode ser uma ferramenta valiosa na fase de desenvolvimento de projetos de motores devido a sua capacidade preditiva.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para aprimorar a exatidão das análises dentro do software *Lotus Engine Simulation*, um estudo do rendimento do *intercooler* conforme a vazão mássica, perda de pressão e temperatura do líquido de arrefecimento se torna necessário. Também se sugere a realização do ensaio dinamométrico em ambiente controlado, para que possam ser seguidas as normas de comparação e reprodutividade dos ensaios. Sugere-se a utilização de uma bancada para obtenção dos coeficientes de escoamento reais na admissão e escape, e não as calculadas pelo software. Propõe-se entender a influência do Rubilene 813 nas curvas de torque e potência em ensaios no dinamômetro e buscar quantificar as eventuais diferenças quando comparado com o diesel recomendado pela norma ISO 14396. Por fim, é sugerido aprimorar a análise do coeficiente de atrito do motor, utilizando a extensão do *Lotus Engine Simulation* para tratar o caso a ser simulado, e não utilizar o modelo de atrito padrão para motores diesel de injeção direta, e tentar compreender se o modelo utilizado pelo software, chamado de modelo de Millington & Hartles, é válido para um motor agrícola.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTONELLO, Miguel Guilherme. **Proposta de Metodologia para o Projeto de Motores de Combustão Interna**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2015.

ASABE (2006). **D497.5 FEB2006**: Agricultural machinery management. in: Asae standards: standards engineering practices data. St. Joseph. American Society Of Agricultural and Biological Engineers.

BRUNELLI, Rafael Rogério. **Estudo de viabilidade operacional e desempenho de motores de combustão interna operando com combustível biodiesel em relação ao combustível diesel automotivo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012. v. 1. ISBN 978-85-212-0708-5.

CHAN, Kinyip *et al.* **Comparison of Engine Simulation Software for Development of Control System**. London: Hindawi Publishing Corporation, 2013.

DULEBA, Branislav. **SIMULATION OF AUTOMOTIVE ENGINE IN LOTUS SIMULATION TOOLS**. Kosice: Technical University of Kosice, 2014.

DYM, Clive L.; LITTLE, Patrick; ORWIN, com Elizabeth J. e SPJUT, R. Erik. **Introdução à engenharia: Uma abordagem baseada em projeto**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 346 p. ISBN 978-85-7780-648-5.

FARIAS, Marcelo Silveira De. **Avaliação de motores de tratores agrícolas utilizando dinamômetro móvel**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2014.

FERRARI, Luís Eduardo Accordi. **Análise dos efeitos da manutenção periódica de tratores agrícolas através do método de planejamento de experimentos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.

HERZOG, Daniela. **Parâmetros de projeto e desempenho de tratores agrícolas a partir do banco mundial de ensaios**. Santa Maria: Universidade Federal e Santa Maria, 2020.

LACERDA, André Pedroso De. **Pioneiros dos métodos de projeto (1962-1973): redes na gênese da metodologia do design**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

LILJEDAHL, J. B. et al. **Tractor and their power units**. 4. ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1996. 463 p. ISBN 978-1-4684-6634-8.

LOTUS CARS; **“Program Overview - Introduction”**. Manual do usuário, software Lotus Engine Simulation, 2001a.

LOTUS CARS; **“Theory – Combustion Models”**. Manual do usuário, software Lotus Engine Simulation, 2001b.

LOTUS CARS; “**Theory – Cylinder Heat Transfer**”. Manual do usuário, software Lotus Engine Simulation, 2001c.

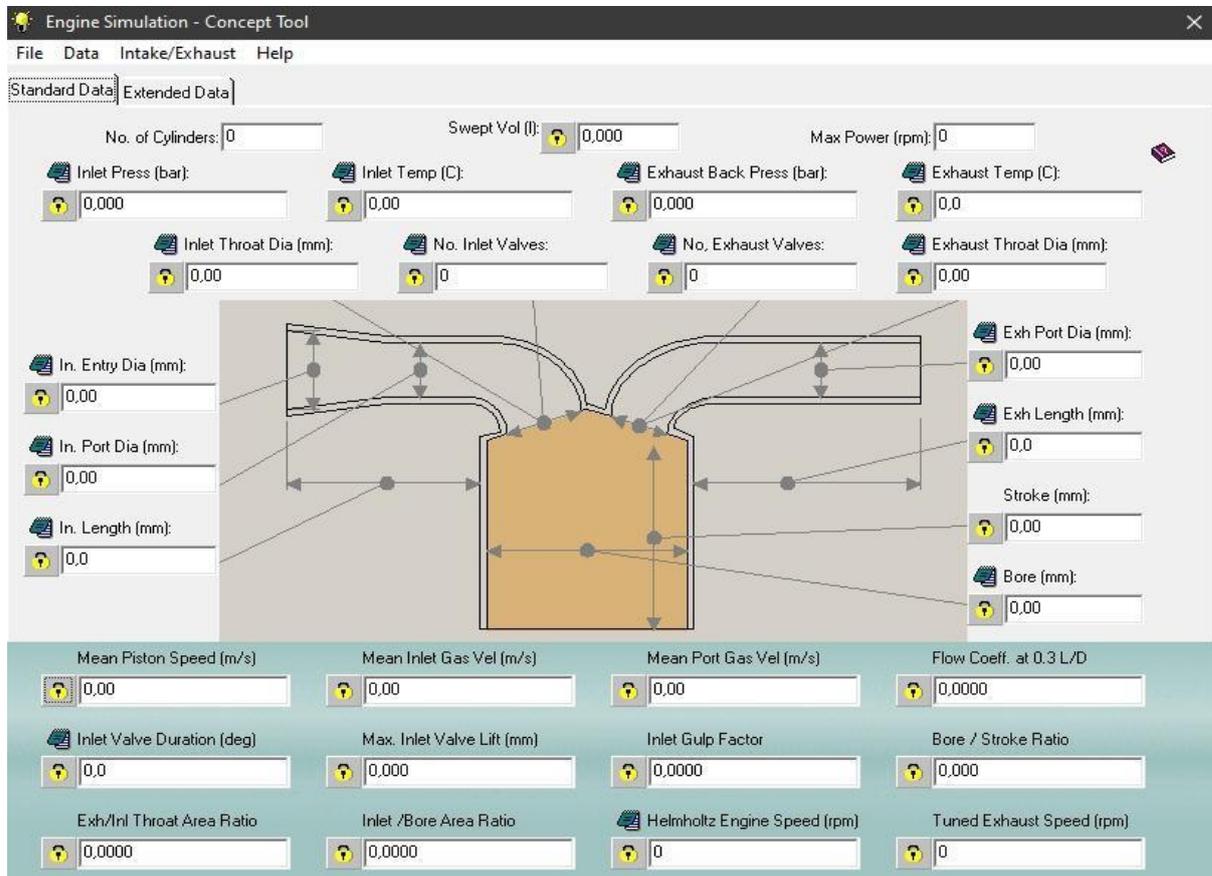
LOTUS CARS; “**Theory – Friction**”. Manual do usuário, software Lotus Engine Simulation, 2001d.

MARQUÉZ, L. **Tractores Agrícolas: Tecnología y utilización**. España: B&H Grupo Editorial, 2012. 844p.

SILVA, S. L., BENEZ, S. H. **Construção de um sistema de aquisição de dados para avaliação do desempenho energético de máquinas e implementos agrícolas em ensaios de campo**. Revista Energia na Agricultura, Botucatu, v. 12, p. 10-18, 1997.

SORANSO, Ana Marta. **Desempenho dinâmico de um trator agrícola utilizando biodiesel destilado etílico e metílico**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

ANEXOS

ANEXO A – Ferramenta da câmara de combustão do *Lotus Engine Simulation*.

Fonte: *Software Lotus Engine Simulation – Concept Tool*