

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THALES MENDES GARCIA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL DYNA-VT EM TRATORES AGRÍCOLAS**

GUARAPUAVA

2023

THALES MENDES GARCIA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL DYNA-VT EM TRATORES AGRÍCOLAS**

***Strenght analysis for Dyna-Vt continuously variable transmission system in
agricola tractor***

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Prof. Dr. David Lira Nunez.

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

THALES MENDES GARCIA

**ANÁLISE DA RESISTÊNCIA DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO CONTINUAMENTE
VARIÁVEL DYNA-VT EM TRATORES AGRÍCOLAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30/junho/2023

Professor Dr. David Lira Nunez
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professor Dr. Ricardo Vinicius Bubna Biscaia
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Professora Denise Alvez Ramalho
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

AGRADECIMENTOS

Sou imensamente grato à minha família, pelo apoio, esforço e dedicação para me proporcionar a melhor educação possível, ao meu avô, aos mestres que contribuíram com minha formação acadêmica, em especial ao Professor Doutor David Lira Nunez, orientador deste trabalho, pela dedicação e sabedoria com que me guiou nessa trajetória.

Agradeço também a minha namorada, aos colegas de turma pela amizade e companheirismo que me proporcionaram durante o curso de engenharia e aos demais colaboradores pelo incentivo e solicitude.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O agronegócio desempenha um papel crucial na economia brasileira, representando 26% do PIB do país, e enfrenta uma demanda crescente por alimentos diversificados no mercado internacional. Para atender a essa demanda, a engenharia mecânica tem desempenhado um papel fundamental ao combinar máquinas agrícolas com tecnologias avançadas da agricultura 4.0, resultando em um aumento significativo na produtividade por hectare. Os engenheiros têm se dedicado à busca incessante pelo aumento da eficiência dos tratores agrícolas, visando não apenas a produtividade, mas também a redução do consumo de óleo diesel e das emissões de gases poluentes dos motores de combustão interna. Atualmente, o uso da transmissão continuamente variável (CVT) em tratores agrícolas no Brasil tem se expandido devido às vantagens oferecidas, como o alto torque disponível em baixas rotações e a durabilidade do sistema. Marcas renomadas, como Massey Ferguson, Valtra e John Deere, já aplicam sistemas de transmissão hidrostática CVT em tratores de médio e grande porte. Este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência mecânica das engrenagens epicicloidais que compõem o sistema de transmissão CVT DYNA-VT desenvolvido pela AGCO e aplicado nos tratores da Massey Ferguson série 8 e na linha 700 da Fendt.

Palavras-chave: Manutenibilidade; trator; transmissão CVT; engrenagem; gêmeo digital.

ABSTRACT

The agribusiness sector plays a crucial role in the Brazilian economy, accounting for 26% of the country's GDP, and faces a growing demand for diverse food products in the international market. To meet this demand, mechanical engineering has played a vital role in combining agricultural machinery with advanced technologies of Agriculture 4.0, resulting in a significant increase in productivity per hectare. Engineers have been dedicated to continuously improving the efficiency of agricultural tractors, aiming not only to enhance productivity but also to reduce diesel consumption and emissions of pollutants from internal combustion engines. Currently, the use of Continuously Variable Transmission (CVT) in agricultural tractors in Brazil has been expanding due to its advantages, such as high torque at low speeds and system durability. Well-known brands like Massey Ferguson, Valtra, and John Deere have already implemented hydrostatic CVT transmission systems in medium and large tractors. This study aims to analyze the mechanical efficiency of the epicyclic gears that comprise the DYNAV-T CVT transmission system developed by AGCO and applied in Massey Ferguson series 8 tractors and Fendt 700 series.

Keywords: Maintainability; tractor; CVT transmission; gear; digital twin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Trator Agrícola com Implemento.....	17
Figura 2 - Tipos de transmissões aplicadas em tratores no mercado Brasileiro.	19
Figura 3 - Potência x Transmissão em tratores no Brasil.....	20
Figura 4 - Transmissão mecânica sincronizada.....	20
Figura 5 - Transmissão Powershift.....	21
Figura 6 - Transmissão CVT Dyna VT.....	23
Figura 7 - Sistema Dyna - DTM	23
Figura 8 - Fluxo de potência em transmissões CVT.....	24
Figura 9 - Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos.....	25
Figura 10 - Engrenagem Cilíndrica de Dentes Helicoidais.....	26
Figura 11 - Trem de engrenagem planetária.....	27
Figura 12 - Epicíclica com trator em posição neutra da transmissão.....	28
Figura 13 - Epicíclica com trator em posição drive da transmissão.....	29
Figura 14 - Bomba de Pistão Hidráulico.....	30
Figura 15 - Conductor de Trator Agrícola.....	31
Figura 16 - Diagrama DYNA- VT.....	32
Figura 17 - Painel Massey Ferguson Série 8740.....	33
Figura 18 - Condução em modo tartaruga.....	33
Figura 19 - Condução em modo lebre.....	34
Figura 20 - Utilizações do Gêmeo Digital.....	40
Figura 21 - Fluxograma do trabalho.....	43
Figura 22 - Nomeação Componentes Transmissão.....	45
Figura 23 – Transmissão <i>DYNA-VT</i> desmontada.....	46
Figura 24 - Gêmeo Digital <i>DYNA-VT</i>	47
Figura 25 - Epicicloidal e engrenagens reais.....	48

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TIPOS DE TRANSMISSÕES UTILIZADAS E MARCAS DE TRATORES NO BRASIL.....	18
TABELA 2 - FATORES MODIFICADORES DA NORMA AGMA.....	38
TABELA 3 - ESPECIFICAÇÕES ENGRENAGENS DYNA VT.....	45
TABELA 4 - ESPECIFICAÇÕES EIXOS DYNA-VT.....	46
TABELA 5 - RELAÇÃO DE TRANSMISSÃO DO SISTEMA DYNA VT.....	51
TABELA 6 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA NORMA AGMA.....	52
TABELA 7 - VARIÁVEIS MODIFICADORAS DA TENSÃO AO CONTATO.....	53
TABELA 8 VARIÁVEIS DO FATOR DE SEGURANÇA AO CONTATO.....	54
TABELA 9 - TENSÕES E FATOR DE SEGURANÇA AO CONTATO.....	54
TABELA 10 - VARIÁVEIS MODIFICADORAS DA TENSÃO À FLEXÃO.....	55
TABELA 11 – VARIÁVEIS DO FATOR DE SEGURANÇA À FLEXÃO.....	56
TABELA 12 - TENSÕES E FATOR DE SEGURANÇA À FLEXÃO.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
CAD	Projeto Assistido por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Design</i>).
CAE	Engenharia Assistida por Computador (do inglês - <i>Computer-Aided Engineering</i>).
FMEA	Análise de Efeitos e Modos de Falhas (do inglês - <i>Failures Mode and Effect Analysis</i>).
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
CVT	Transmissão continuamente variável (do inglês – <i>Continuously Variable Transmission</i>).
ANFAVEA	Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores.
AGCO	<i>Allis Gleaner Corporation - Your Agriculture Company</i>
HP	Cavalo de Força (do inglês – <i>Horse Power</i>).
PTG	Trem de engrenagem planetárias
PIB	Produto Interno Bruto
AGMA	<i>American Gear Manufactures Associaton</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Trator Agrícola.....	17
2.2	Transmissão	18
2.3	Transmissões utilizadas em tratores fabricados no Brasil	18
2.3.1	Transmissão mecânica sincronizada.....	20
2.3.2	Transmissão automatizadas <i>Powershift</i>	21
2.3.3	Transmissão <i>CVT</i>	21
2.4	Tipos de sistemas de transmissão CVT	23
2.4.1	Fluxo de potência	24
2.4.2	Tipos de Variador	24
2.4.3	Natureza dos componentes.....	25
2.5	Componentes do CVT DYNA-VT	25
2.5.1	Engrenagem cilíndrica de dentes retos	25
2.5.2	Engrenagem helicoidais	26
2.5.3	Trens de engrenagens planetárias	26
2.5.3.1	Primeira possibilidade de engrenamento no <i>DYNA-VT</i>	27
2.5.3.2	Segunda possibilidade de engrenamento no <i>DYNA-VT</i>	28
2.5.4	Bomba Hidráulica	29
2.5.5	Eixo de transmissão	30
2.6	Condução de tratores agrícolas.....	30
2.6.1	Condução e princípio de funcionamento do <i>CVT DYNA-VT</i>	31
2.6.1.1	Modo de condução Tartaruga	33
2.6.1.2	Modo de condução Lebre	34
2.7	Norma AGMA	34
2.7.1	AGMA 2101-D04	35
2.7.2	Resistência à flexão	35
2.7.2.1	Tensão de flexão	35
2.7.2.2	Fator de segurança à flexão	36

2.7.3	Resistência ao contato ou crateramento	36
2.7.3.1	Tensão ao contato.....	37
2.7.3.2	Fator de segurança ao contato.....	37
2.7.4	Fatores modificadores da norma AGMA 2101 – D04.....	38
2.8	Gêmeo Digital	39
2.9	Manutenção em tratores agrícolas	40
2.10	Projeto de Máquinas	41
3	ASPECTOS METODOLÓGICOS.....	42
4	CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	44
4.1	Requisitos do projeto.....	44
4.2	Especificações das engrenagens e eixos	44
4.3	Modelagem da transmissão	46
4.4	Estudo de caso da engrenagem solar do sistema	48
4.4.1	Relação de transmissão de torque	48
4.4.2	Características e especificações da engrenagem solar	51
4.4.3	Variáveis modificadoras das tensões AGMA.....	52
4.4.3.1	Variáveis modificadoras da tensão ao contato	52
4.4.4	Análise de resistência e fator de segurança ao contato	53
4.4.4.1	Variáveis modificadoras da tensão à flexão	55
4.4.5	Análise de resistência e fator de segurança à flexão	56
5	CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS	58
	REFERÊNCIAS	60
	ANEXO A - CATÁLOGO MASSEY FERGUSON SÉRIE F 8700.....	63
	ANEXO B - CATÁLOGO VALTRA SÉRIE T	65
	ANEXO C - CATÁLOGO ANFAVEA DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS FABRICADAS NO BRASIL	67
	ANEXO D - TABELA DE RESISTÊNCIA AO NÚMERO DE TENSÃO AO CONTATO PERMITIDA - NORMA AGMA 2101 – D04	69
	ANEXO E - TABELA DE RESISTÊNCIA AO NÚMERO DE TENSÃO À FLEXÃO PERMITIDA - NORMA AGMA 2101 – D04	71

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é fundamental para o desenvolvimento da economia do país, tendo em vista esta importância, no Brasil, 26% do PIB provém da agricultura (SOLA; TEIXEIRA, 2018). A tecnologia embarcada nas máquinas agrícolas ajuda a aumentar a produtividade por hectare, reduzir os impactos dos tratores no solo e garante a qualidade final dos alimentos produzidos.

Segundo Bacha (2012), a produtividade aumentou em cerca de 3,5 vezes entre as décadas de 1970 até o ano de 2010, mesmo passando por momentos de ciclos econômicos e crises, tal qual a situação atual. Para o incremento de produtividade, foi necessária uma migração do plantio manual da década de 1950 para a implementação da agricultura mecanizada a partir do ano de 1970 (TEIXEIRA, 2005).

Com a instituição do Plano Nacional da Indústria de Tratores de Rodas, houve um crescimento nacional das montadoras de tratores e colheitadeiras agrícolas, alinhado a créditos rurais que facilitavam a aquisição dos maquinários aos produtores rurais, influenciaram diversas marcas como *AGCO*, *John Deere*, *Valtra*, *Case* e *New Holland* a instalarem suas plantas fabris em solo Brasileiro.

De acordo com a Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), no ano de 1960 foram comercializados apenas 37 tratores em solo nacional, com destaque às regiões Sudeste e Centro-Oeste. Já no ano de 2019, foram vendidos 33.148 tratores agrícolas, dentre os quais foram vendidos 2.260 para a região Norte, 4.334 para o Nordeste, 13.669 para o Sudeste, 12.716 para a região Sul, e por fim 5.824 unidades para o Centro-Oeste brasileiro.

Visto que a mecanização do plantio agrícola permite otimizar as áreas de cultivo e a escala de produção nacional, torna-se essencial a realização de pesquisas relacionadas à eficiência das máquinas agrícolas. Engenheiros buscam reduzir as emissões de gases poluentes dos motores a combustão interna, utilizando o conceito de *downsizing*, motores menores e mais eficientes energeticamente (ASSIS *et al.*, 2016), com a combinação do *powertrain* e transmissões inteligentes, com infinitas relações de marchas, e que geram torque e rotação mais linear no funcionamento das máquinas.

No setor agrícola, tratores e colheitadeiras trabalham com o ciclo diesel e necessitam de altos torque em baixas rotações para mover os pesados equipamentos

agrícolas. Segundo o site da *Massey Ferguson*, os implementos podem pesar de 2000 kg para grade aradoras e podendo chegar até 12.000 kg para pulverizadores e plantadeiras. Para tal finalidade, atingir o melhor desempenho de todo o sistema é necessário, com o uso de sistemas de transmissões mais modernos, visto o cenário atual dos custos envolvidos de combustível e manutenção dessas máquinas agrícolas.

Em questões comparativas, um trator com 20 anos de uso pode ter uma manutenção superior a 20% quando comparado com tratores que possuem 5 anos de utilização (BELLOCHIO *et al.*, 2017). Deste modo, utilizar a tecnologia atual de *softwares* de simulação facilita o estudo da vida útil e conseqüentemente, a proposição de melhorias dos componentes mecânicos internos dos sistemas de transmissão.

Atualmente, os tratores evoluíram com mais potência e eficiência energética, e com isso surgiu a necessidade da aplicação da transmissão continuamente variável (CVT – do inglês *continuously variable transmission*), as quais tem infinitas relações de marchas por possuírem variação de velocidade contínua (MICHALAK, 2017). Como o trator sempre está numa faixa de torque ideal, ocorre uma redução no consumo de combustível e emissão de poluentes, além do menor deslizamento das rodas com o solo.

Sendo assim, neste trabalho, será desenvolvido o estudo do caso particular do CVT *DYNA-VT* desenvolvida pela *AGCO* na Alemanha, uma transmissão do tipo hidrostática, que está presente em tratores de linha pesada das marcas *Massey Ferguson*, *Fendt* e *Valtra*, as quais a *AGCO* tem propriedade, com potências superiores a 300 *HP* e alto valor agregado (Rodrigo *et al.*, 2010).

Devido à escassez de informações sobre este tipo de mecanismo no Brasil e devido à falta de documentação técnica, será realizada uma proposição de melhoria, através do uso da norma *AGMA*, para uma análise da eficiência mecânica das engrenagens do sistema *DYNA-VT*. Para atender a fase de esclarecimento e concepção de tarefas, da metodologia de projeto na engenharia de Pahl e Beitz (2005), será utilizado como mecanismo de suporte, um gêmeo digital da transmissão real em *software CAD 3D*.

1.1 Justificativa

Na Engenharia Mecânica, e em específico no setor de projetos de máquinas, o uso combinado de softwares e a chamada indústria 4.0 vem tomando força nos últimos anos. Esta combinação de tecnologias físicas e digitais permite aos projetistas uma infinidade de análise de informações, com a intenção de antecipar situações de falhas antes que ela aconteça, estudar e testar diversos cenários antes da produção em escala da peça e propor melhorias no sistema em futuras atualizações do projeto.

Alinhado a isso, de forma análoga, a chamada agronomia 4.0 permite através de treinamentos, uma comunicação e integração em tempo real, de técnicos que estão em laboratório com o modelo 3D de determinado componente, com um mecânico que vai a campo para realizar a manutenção daquela peça, reduzindo o tempo que a máquina ficaria parada para a realização do serviço.

No setor agrícola, diversas tecnologias são empregadas com a finalidade de aumentar a eficiência e desempenho dos maquinários usados no campo, os quais desempenham um papel fundamental na produtividade nacional e internacional de diversos tipos de alimentos. Com a crescente busca por métodos de plantio de precisão, faz-se necessário aplicar novos tipos de sistemas de transmissão em tratores agrícolas, buscando garantir um plantio mais homogêneo e eficaz, independente das características topográficas do local de cultivo.

Deste modo, devido à crescente demanda de tratores e de tecnologia no campo, alinhado à carência de informações e teoria técnica sobre a transmissão continuamente variável do modelo *DYNA - VT*, o presente trabalho tem por objetivo principal a realização de uma análise da eficiência mecânica das engrenagens do sistema, com a comparação entre o uso de engrenagens cilíndricas de dentes retos e helicoidais seguindo a norma internacional *AGMA*.

O gêmeo digital simplificado será usado em paralelo como base para a concepção da transmissão, buscando facilitar questões de manutenibilidade e fornecendo dados para a tomada de decisões futuras que serão aplicadas no modelo físico.

1.2 Objetivos

Para o correto entendimento da proposta que este trabalho pretende apresentar, são detalhados a seguir o objetivo geral e específico.

1.2.1 Objetivo Geral

- Analisar a resistência da engrenagem solar da transmissão *CVT* aplicada em tratores da marca *Massey Ferguson* através de estudos matemáticos baseados na norma ANSI/AGMA 2101–D04.

1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de atingir o objetivo geral, abaixo tem-se listado os passos que foram seguidos nos objetivos específicos.

- Realizar uma entrevista com os técnicos de manutenção na concessionária da *Massey Ferguson* na cidade de Guarapuava – PR para a obtenção de informações sobre a transmissão *CVT*;
- Buscar em bancos de dados da *AGCO* representações fiéis de todo sistema interno do *CVT*;
- Detalhar o funcionamento dos sistemas de transmissão continuamente variável *DYNA-VT*;
- Analisar os tipos e especificações das engrenagens utilizadas na transmissão;
- Propor melhorias no conjunto através da comparação e análise da resistência à flexão e ao contato dos dentes da engrenagem do sistema de transmissão;
- Levantar conceitos sobre manutenção e manutenibilidade para questões de desenvolvimento e uso do gêmeo digital na agronomia 4.0.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para a fundamentação, foram considerados alguns conceitos iniciais para o entendimento do trabalho. Os conceitos envolvem os tipos de transmissões encontradas em tratores no Brasil, normas para análise matemática dos componentes internos da transmissão, além de partes mecânicas do sistema que ajudarão na compreensão do tema.

2.1 Trator Agrícola

Segundo a Associação Americana de Engenharia Agrônômica (1995), um trator agrícola é uma máquina desenvolvida para proporcionar potência aos implementos agrícolas (arado, semeadora e grade). Para tal, o trator é composto de diversos sistemas, como o *powertrain* (motor, câmbio e diferencial), direção, suspensão e sistemas de tomada de potência (sistema rotativo de acionamento de implementos através de eixo cardan) para os pesados maquinários agrícolas (PALUDO *et al.*, 2014).

Figura 1 - Trator Agrícola com Implemento



Fonte: Linha BH G4 de Tratores Unindo Inovação e Tradição | Valtra (2022)

2.2 Transmissão

Transmissão é o nome dado ao conjunto de elementos que asseguram a transferência de torque do motor para os diferentes pontos que serão utilizados em uma máquina (DELGADO, 2004).

Em uma máquina agrícola, o torque gerado pelo motor é utilizado para as rodas motrizes, na tomada de potência e nos sistemas hidráulicos que são acoplados aos implementos agrícolas (RIBAS *et al.*, 2010).

Em um trator, o sistema de transmissão completo, com alguns agregados como o eixo traseiro, a tomada de potência e os freios tem um custo que representa de 25% a 30% do valor total da máquina (ORTIZ-CAÑAVATE, 1994).

2.3 Transmissões utilizadas em tratores fabricados no Brasil

Segundo os catálogos da linha de produtos disponíveis para o consumidor das marcas *Massey Ferguson*, *John Deere*, *Valtra*, *Case* e *New Holland*, existem tratores de categorias de pequeno, médio e grande porte, com potências de 55 HP (*John Deere Série 5E*), até 640 HP (*John Deere 9R*).

Nos catálogos, é possível analisar que os tratores de pequeno porte utilizam transmissões mecânicas sincronizadas multidiscos banhados a óleo. Já em tratores de médio e grande porte utilizam transmissões do tipo automatizada e CVT.

De acordo com o conjunto de dados que foi gerado, com todos os tratores catalogados para vendas no ano de 2022, é possível observar na Tabela 1 a relação entre a marca e o tipo de transmissão presentes nas máquinas. Os dados foram retirados dos catálogos e sites das montadoras.

Tabela 1 - Tipos de transmissões utilizadas e marcas de tratores no Brasil

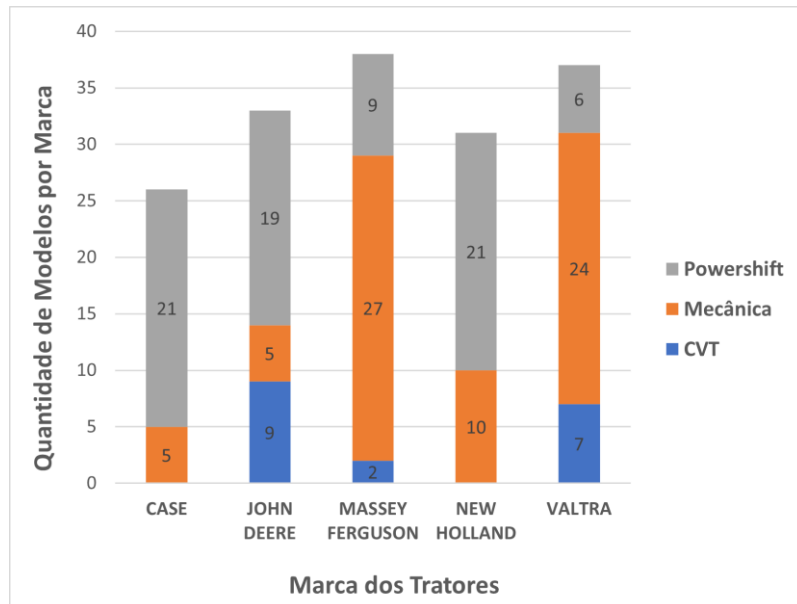
Marcas	Transmissão			Total Geral
	CVT	Mecânica	Powershift	
CASE	0	5	21	26
JOHN DEERE	9	5	19	33
MASSEY FERGUSON	2	27	9	38
NEW HOLLAND	0	10	21	31
VALTRA	7	24	6	37
Total Geral	18	71	76	165

Fonte: Autoria Própria (2022)

Na Figura 2, tem-se apresentado os tipos de transmissões presentes nos tratores à venda no Brasil. Pela pesquisa, pode-se notar que todas as marcas analisadas apresentam tratores com transmissões do tipo mecânica e *powershift*, pelo fato delas serem mais simples e aplicadas em uma gama maior de tratores. Já tratores com *CVT* representam 11% dos 165 modelos analisados e que estão disponíveis em solo brasileiro no ano de 2022.

Entre as marcas analisadas, apenas *Massey Ferguson*, *John Deere* e *Valtra* apresentam tratores com a transmissão do tipo continuamente variável hidrostático, devido ao alto valor agregado da tecnologia, que representa 30% do total do maquinário.

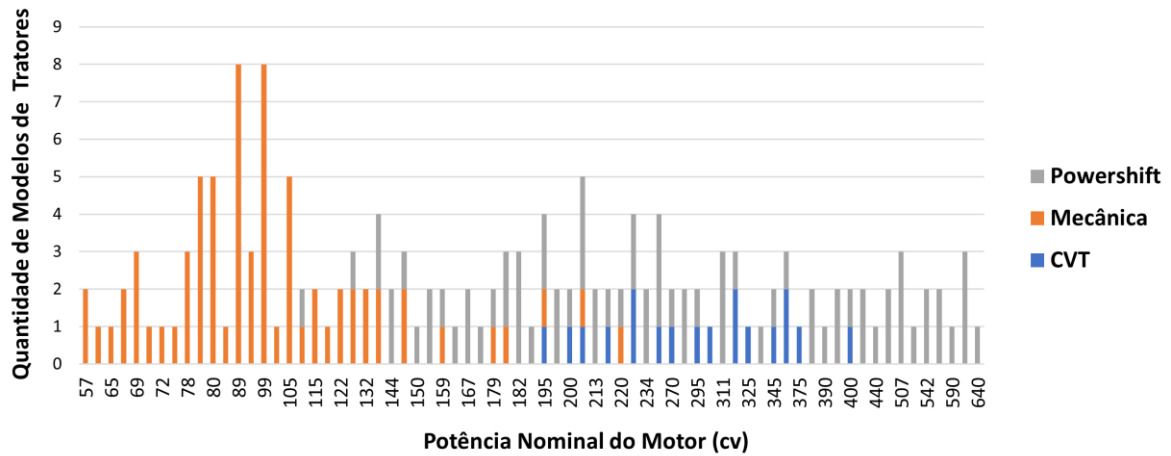
Figura 2 - Tipos de transmissões aplicadas em tratores no mercado Brasileiro



Fonte: Autoria Própria (2022)

Na Figura 3, tem-se todas as potências nominais dos 165 modelos de tratores disponíveis para venda das marcas analisadas e suas respectivas transmissões. É possível observar que tratores até 100 *HP* utilizam transmissão manual do tipo sincronizada. Já os de médio porte com até 200 *HP*, a grande maioria utiliza ainda transmissões manuais ou do tipo *Powershift*. Na faixa de 200 até 400 *HP*, há uma maior escolha por câmbios automatizados *Powershift* e alguns *CVT*. Por fim, na faixa de 400 até 640 *HP* os tratores voltam a usar apenas transmissões automatizadas. Os dados para a elaboração da Figura 3 foram retirados dos catálogos nos sites das marcas citadas.

Figura 3 - Potência x Transmissão em tratores no Brasil



Fonte: Autoria Própria (2022)

2.3.1 Transmissão mecânica sincronizada

De acordo com (RIBAS *et al.*, 2010), a transmissão mecânica por engrenagem tem por função regular a velocidade de giro do eixo proveniente do motor por meio de uma sequência eixos primários, secundários e engrenagens, até a saída para o eixo das rodas. A saída de velocidade é determinada pelo número de pares de engrenagens acoplados e pelo número de dentes das engrenagens. Ainda segundo o autor, o engrenamento é feito por casquilhos dentados através do sincronizador de fricção, este por sua vez tem a função de reduzir o ruído e sincronizar a velocidade angular dos componentes internos da transmissão manual.

Esta regulagem é feita manualmente pelo operador da máquina, o qual necessita acionar o pedal da embreagem e selecionar a marcha desejada na manopla de câmbio. Na Figura 4, é possível observar uma representação de um sistema sincronizado de um trator.

Figura 4 - Transmissão mecânica sincronizada



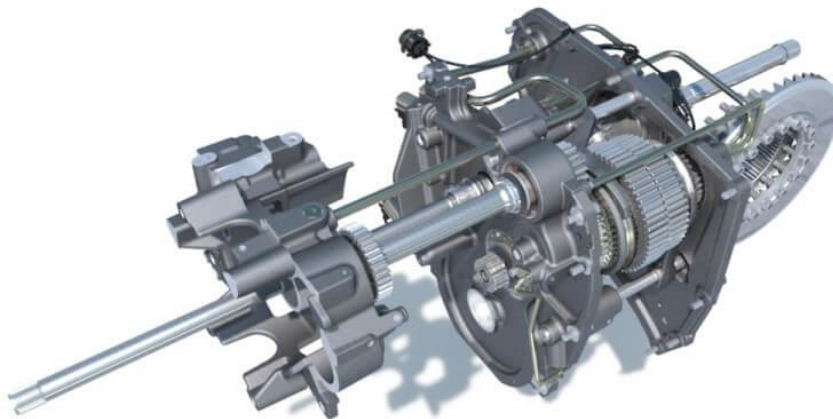
Fonte: Tratores cabinados | Tratores Série 5E | John Deere BR (2023)

2.3.2 Transmissão automatizadas *Powershift*

Segundo (GOERING, 1989), o termo *Powershift* se dá à assistência hidráulica na mudança de marchas entre diferentes taxas de velocidade do trator. Ainda segundo o autor, o termo se refere principalmente ao fato de que as mudanças de marchas não exigem que o operador da máquina desengate o sistema por um pedal de embreagem.

Assim sendo, esse sistema automatizado permite escalonar um número maior de marchas, ampliando a faixa de torque a ser utilizada e aumenta a eficiência operacional do conjunto (FARIAS, 2016). Na Figura 5, tem-se um modelo de transmissão *Powershift* aplicada em tratores da marca *Massey Ferguson*.

Figura 5 - Transmissão Powershift



Fonte: Massey Ferguson (2023)

2.3.3 Transmissão CVT

Transmissão continuamente variável é o sistema em que a variação de velocidade é realizada de forma contínua e automática. Pelo fato de não possuírem escalonamento de marchas por engrenagens como uma transmissão manual convencional, seu funcionamento se dá de forma progressiva e suave, colocando o *powertrain* sempre em um torque ideal para o funcionamento do equipamento (MICHALAK, 2017).

Existem diferentes tipos de CVT que podem ser classificados quanto ao fluxo de potência, tipo dos componentes e tipos de variadores, estes podendo ser mecânico

ou hidráulico (FARIAS, 2016). Neste trabalho, será estudado o caso particular do CVT *DYNA-VT* hidrostático desenvolvido pela *Massey Ferguson* e *AGCO*.

De acordo com as especificações técnicas da *Massey Ferguson*, a transmissão *DYNA-VT* utiliza energia mecânica e hidráulica para transmitir a potência gerada no motor diesel para as rodas. Durante as condições de trabalho, a energia hidráulica é gerada por uma bomba de pistões axiais de vazão variável que alimenta um motor também de pistões axiais de vazão variável. Já a parte da energia puramente mecânica da transmissão é transmitida por um conjunto de engrenagens cilíndricas e sistema de planetárias.

Aplicada em tratores de grande porte, esta transmissão ajuda no conforto, reduzindo vibração e ruídos internos à cabine de um trator, onde um operador passa em média 8 horas por dia trabalhando (Da Cunha *et al.*, 2012).

As transmissões CVT começaram a ser utilizadas em tratores agrícolas no ano de 1996 pela marca *Fendt*, a qual pertence ao grupo *AGCO*. Conhecida como *VARIO CVT*, trazia uma tecnologia inovadora e diferente das transmissões continuamente variável que eram aplicadas em veículos, sendo mais fácil de usar, porém com uma complexidade maior do conjunto interno (LINARES, 2010). Ainda de acordo com o autor, diversas marcas como *John Deere*, *Massey Ferguson* e *New Holland* começaram a implementar a transmissão CVT na linha de tratores, a qual foi bem aceita pelos agricultores devido a facilidade na dirigibilidade, conforto e aumento na produtividade.

Segundo o catálogo de informações do trator *Massey Ferguson* Série 8700, com a calibração para o Brasil, esta transmissão permite um deslocamento contínuo da máquina em qualquer velocidade entre 0,03 e 40 km/h para frente e 0,03 até 38 km/h em marcha a ré, para qualquer faixa de rotação do motor, aumentando a precisão do *DTM (Dynamic Tractor Management)*, o módulo de gerenciamento de rotação automático do motor. Na Figura 6, está demonstrado o CVT *DYNA-VT* da *AGCO*.

Figura 6 - Transmissão CVT Dyna VT

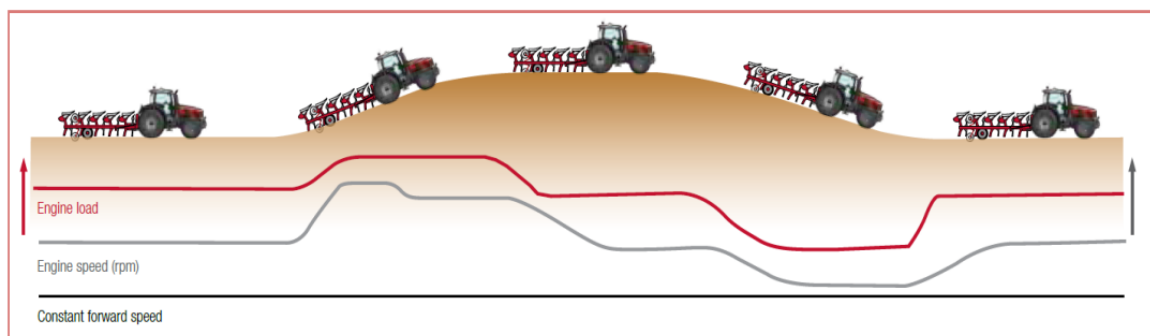


Fonte: Fendt | Empresa - Fendt (2022)

O sistema *DTM* atua diretamente no módulo eletrônico do trator e permite ajustar a rotação do *powertrain* automaticamente a fim de manter a velocidade de trabalho constante e a menor rotação possível de acordo com a carga sobre o sistema.

Na Figura 7, é possível ver um gráfico que representa a carga e rotação do motor, além da velocidade do trator de acordo com a geografia do terreno.

Figura 7 - Sistema Dyna - DTM



Fonte: Massey Ferguson (2022)

2.4 Tipos de sistemas de transmissão CVT

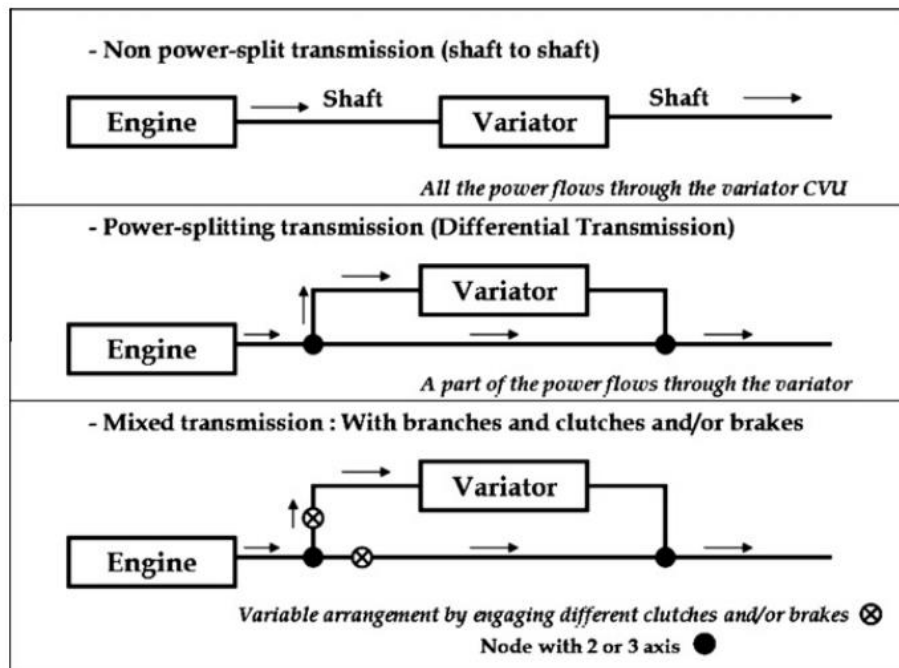
De acordo com LINARES (2010), no mercado existem diversos tipos de transmissão *CVT*, os quais podem ser classificados de acordo com os critérios que serão apresentados a seguir.

2.4.1 Fluxo de potência

O fluxo de potência que provém do motor da máquina agrícola e passa pelo conjunto de transmissão, pode seguir dois tipos de caminho até as rodas. O primeiro trata do sistema do tipo não dividido, onde existe um único caminho para o fluxo de potência e são conhecidos como *CVT* eixo a eixo. Já o segundo sistema é conhecido como sistema do tipo dividido, onde há uma divisão da potência em eixos diferentes, os quais se juntam novamente na saída do fluxo de potência para a transmissão do torque nas rodas (LINARES, 2010).

Ainda segundo o autor, existem equipamentos que utilizam uma versão mista entre os tipos não dividido e dividido, cabendo ao operador escolher o tipo de funcionamento dependendo do uso. Este modelo misto utiliza freios e embreagens para realizar a comutação do fluxo de potência. Na Figura 8, estão representados os três tipos de fluxo de potência em uma transmissão continuamente variável.

Figura 8 - Fluxo de potência em transmissões CVT



Fonte: LINARES (2010)

2.4.2 Tipos de Variador

Os variadores são os componentes que ajustam continuamente a relação de transmissão de torque. Podendo ser mecânico ou hidráulico, os primeiros são baseados em correias, correntes e roletes do tipo toroidal. Os tipos hidráulicos, são separados em hidrostáticos e de conversor de torque (LINARES, 2010).

2.4.3 Natureza dos componentes

No terceiro tipo de classificação, diz respeito à característica da construção interna dos componentes da transmissão *CVT*, podendo ser completamente mecânicos, completamente hidráulicos ou opções mistas entre esses componentes (LINARES, 2010).

2.5 Componentes do *CVT DYNA-VT*

Os elementos básicos que compõem uma transmissão *CVT* do tipo hidrostática são:

- Eixo de entrada na unidade *CVT*;
- Eixo de saída da unidade *CVT*;
- Eixo de recolha *CVT*;
- Eixo bomba de óleo;
- Bomba hidráulica e motor hidráulico;
- Trem de engrenagens planetárias;
- Variadores hidráulicos;
- Engrenagens cilíndricas retas e helicoidais.

2.5.1 Engrenagem cilíndrica de dentes retos

São engrenagens as quais os dentes se dispõem de forma paralela ao eixo da engrenagem. Um par de engrenagens de dentes retos só se encaixará se seus eixos forem paralelos (NORTON, 2010). Na Figura 9 é possível observar uma engrenagem cilíndrica de dentes retos.

Figura 9 - Engrenagem Cilíndrica de Dentes Retos



Fonte: NORTON (2010)

2.5.2 Engrenagem helicoidais

Segundo o Norton, engrenagens helicoidais são aquelas que apresentam os dentes com uma angulação helicoidal em relação ao eixo da engrenagem. Elas podem ter duas geometrias diferentes, sendo de mão esquerda ou direita, e seu engrenamento pode ser feito de forma paralela ou de forma cruzada. Na Figura 10, tem-se um conjunto de engrenagens helicoidais.

Figura 10 - Engrenagem Cilíndrica de Dentes Helicoidais

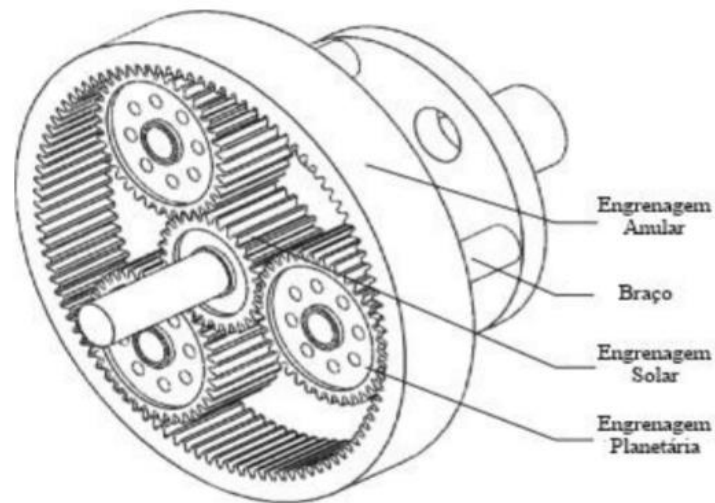


Fonte: Soluções Industriais (2023)

2.5.3 Trens de engrenagens planetárias

Trens de engrenagens planetárias ou epicicloidais são um arranjo de engrenagens compostas por engrenagem solar, engrenagem planetária, engrenagem anelar e portador que trabalham juntas, conectadas entre si para transmitir torque com mais graus de liberdade. Existem várias formas de construção de engrenagens epicicloidais para se obter um fluxo de potência (NORTON, 2010). Na Figura 11, é possível observar um esquema de trem de engrenagens planetárias.

Figura 11 - Trem de engrenagem planetária



Fonte: MANSANO; BARRETO (2016)

De acordo com a *Massey Ferguson*, a energia mecânica proveniente do motor chega pela porta planetária (portador) e é transferida até a engrenagem solar e anelar. Dependendo da velocidade que é selecionada no painel do trator, o torque transmitido às engrenagens planetárias se altera, o que gera diferentes possibilidades de engrenamento e consequentes diferentes rotações de saída para o eixo das rodas do trator.

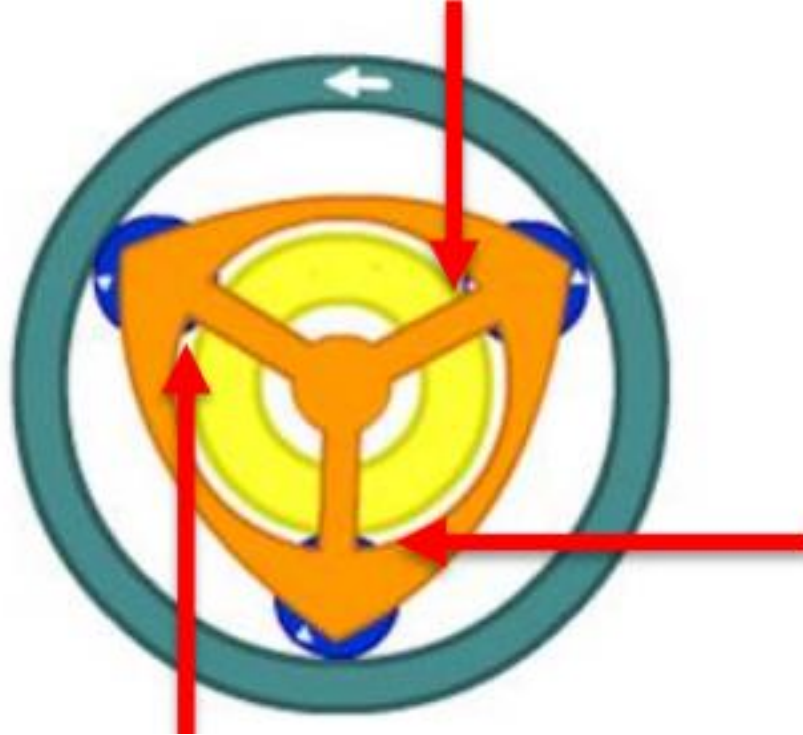
2.5.3.1 Primeira possibilidade de engrenamento no *DYNA-VT*

A primeira possibilidade acontece quando a engrenagem anelar gira livre, devido ao fato de a bomba hidráulica estar com inclinação zero, não gerando débito de fluido pelo sistema e consequentemente de potência para as rodas. Nesta possibilidade a engrenagem solar não terá rotação. Essa situação representa a posição neutra da transmissão, onde toda energia proveniente do motor a diesel é enviada para a engrenagem anelar, a qual atinge sua velocidade seja máxima.

Conforme o operador solicita a posição “*drive*” da transmissão, a bomba hidráulica começa a se inclinar e consequentemente aumenta a vazão hidráulica pelo sistema. O efeito desta reação é o início do giro da engrenagem solar, que é composto tanto pelo torque do motor hidráulico, quanto pela resistência gerada na engrenagem anelar, iniciando a transmissão gradativa de torque para as rodas, assim o trator começa a acelerar.

A Figura 12 representa esta situação, onde as setas vermelhas representam o ponto de apoio máximo, e a branca o sentido de rotação da anelar.

Figura 12 - Epicíclica com trator em posição neutra da transmissão



Fonte: Massey Ferguson (2022)

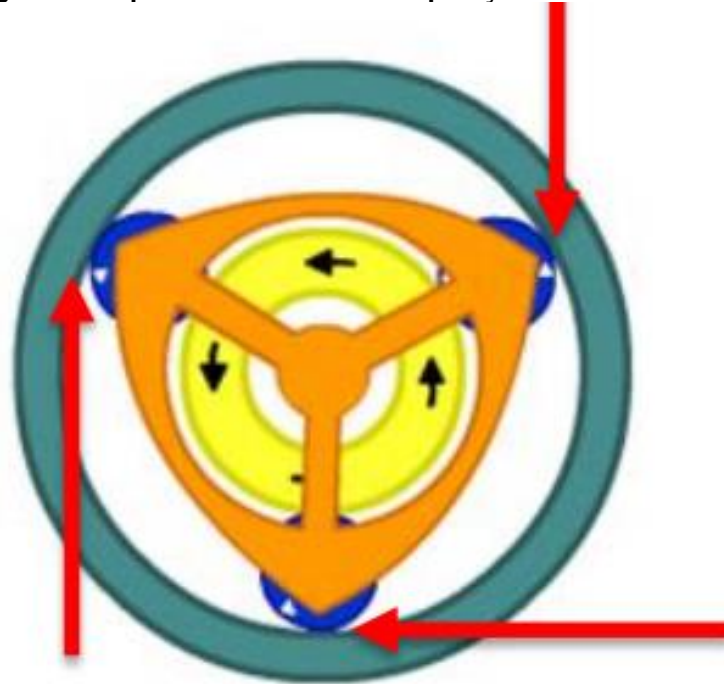
2.5.3.2 Segunda possibilidade de engrenamento no *DYNA-VT*

Com o movimento do solar, a engrenagem anelar começa a diminuir sua velocidade até sua parada, decorrente da inclinação máxima da bomba hidráulica, e da inclinação zero do motor hidráulico, gerando um calço hidráulico no sistema. Nesta possibilidade, a engrenagem anelar e a bomba hidráulica terão rotação zero.

O efeito desta reação é a transmissão 100% mecânica de torque, rotação e potência através do portador das planetárias para engrenagem solar, ocasionando sua máxima rotação e conseqüentemente a máxima velocidade do trator de 40 km/h.

Na Figura 13, tem-se representado a segunda possibilidade, novamente, as setas vermelhas representam o ponto de apoio máximo e a preta a rotação da engrenagem solar.

Figura 13 - Epicíclica com trator em posição drive da transmissão



Fonte: Massey Ferguson (2022)

2.5.4 Bomba Hidráulica

Segundo a fabricante Bruma, as bombas hidráulicas de pistão axial, funcionam a partir da ação de bombeamento de um fluido em pistões que sobem e descem, em um movimento alternado dentro de um cilindro rotativo, o qual pode mudar sua inclinação a partir da vazão desejada de trabalho.

De acordo com Ernane Horst, mecânico da *Massey Ferguson*, no sistema *DYNA-VT*, existem 2 bombas hidráulicas, que atuam como motor hidráulico e bomba hidráulica simultaneamente, o operador pré-seleciona uma velocidade no painel da máquina e um conjunto de passo movido por um motor elétrico fica responsável por alterar a inclinação e conseqüentemente a vazão da bomba hidráulica do sistema, fazendo com que o trator altere sua velocidade até a velocidade escolhida.

Este tipo de bomba é composto por um tambor cilíndrico, pistões, placa de deslizamento e sapatas. A Figura 14 ilustra a bomba.

Figura 14 - Bomba de Pistão Hidráulico



Fonte: AUTOMAÇÃO (2022)

2.5.5 Eixo de transmissão

Eixos são elementos mecânicos que são responsáveis pela transmissão de movimento rotativo e de torque. São utilizados em máquinas rotativas geralmente acoplados a outros elementos mecânicos como engrenagens e polias, sofrendo esforços de tração, compressão, torção e flexão (SILVA; CHAVES; GUIDI, 2016).

2.6 Condução de tratores agrícolas

A condução das máquinas agrícolas depende de diversos fatores, como a potência do trator, topografia do solo, condições climáticas, habilidade do tratorista, peso dos equipamentos, e por fim, o tipo de transmissão utilizado no conjunto.

Assim sendo, diferentes tipos de conduções são realizados com o intuito de se obter a potência necessária em cada aplicação do maquinário agrícola (KIM *et al.*, 2013).

Na Figura 15, é possível observar uma situação de uso em campo de um trator por um operador, eles são os responsáveis pela integridade e zelo no dia a dia da máquina e seus componentes mecânicos, devendo seguir as recomendações de manuseio e pilotagem presentes no manual dos tratores.

Figura 15 - Conductor de Trator Agrícola



Fonte: NEW HOLLAND T9 PLM INTELLIGENCE (2022)

2.6.1 Condução e princípio de funcionamento do *CVT DYNA-VT*

A aplicação de transmissões continuamente variáveis em máquinas agrícolas, alinhado a novas estratégias de condução e mapeamento de áreas de plantio contribuíram para uma maior produtividade (LINARES, 2010).

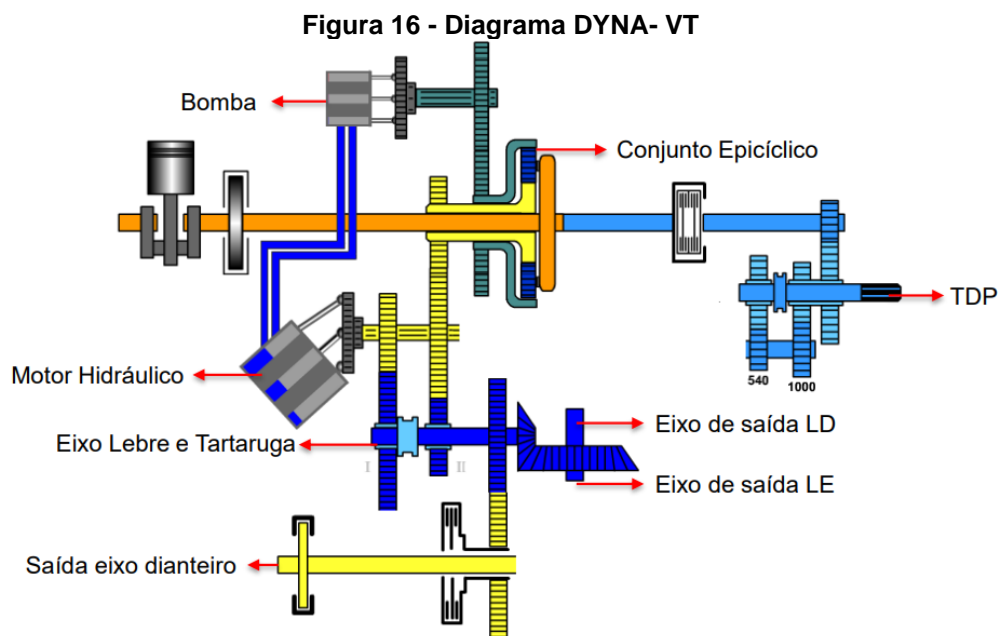
Segundo o site da *Massey Ferguson*, com uma condução ideal dos tratores com a transmissão *DYNA-VT* é possível obter um aumento de produtividade de até 19%, alinhado com as demais tecnologias embarcadas na máquina, o que permite ao condutor uma maior agilidade nas manobras em campo e um plantio mais regular e eficiente.

Esta maior agilidade e regularidade no plantio se dá ao comportamento continuamente variável da transmissão. Diferentemente dos *CVT* aplicados em automóveis, o *DYNA-VT* tem seu princípio de funcionamento utilizando uma combinação de energia hidráulica e mecânica para transmitir o torque do motor para as rodas. Em quase toda faixa de velocidade do trator, a transmissão utiliza as duas formas de energia simultaneamente a fim de se obter uma velocidade de deslocamento sempre constante, independentemente do terreno ao qual o trator está exposto.

A energia hidráulica do sistema é gerada por um conjunto de bomba de pistão de vazão variável e um motor hidráulico também de vazão variável, esses dois componentes fornecem o torque em velocidades reduzidas dependendo da inclinação de cada um. A energia mecânica é transmitida pelo conjunto epicicloidal do sistema,

e atua em velocidades médias e altas. O *DTM*, alinhado ao módulo de transmissão do trator, são os responsáveis por realizar este controle e permutar as energias hidráulicas e mecânicas, através da inclinação do tambor portador dos pistões da bomba hidráulica do sistema.

A Figura 16 representa o diagrama da disposição esquemática dos componentes do *DYNA-VT*, nela é possível observar a entrada de potência pelo motor a diesel, tubulações hidráulicas, conjunto epicíclico, acoplamento para os modos de condução lebre e tartaruga, fluxo de óleo, diferencial dianteiro e traseiro do trator e a tomada de potência (TDP) para os implementos.



Fonte: Massey Ferguson (2022)

De acordo com Ernane Horst, mecânico da marca, seu funcionamento se dá de forma simplificada, com a utilização de um joystick e alguns botões, os quais têm a função de selecionar uma faixa de velocidade para a utilização do trator. No painel da máquina, fica visível ao operador a velocidade e a faixa de rotação dos modos de condução conhecidos como lebre e tartaruga.

Na transmissão *DYNA-VT* é possível selecionar velocidades para que o trator trabalhe com faixas de 0,03 até 28 km/h no modo tartaruga, e a faixa de 0,03 até 40 km/h no modo lebre. De acordo com mecânico, as mudanças dos modos de condução devem ser feitas com o trator parado, para garantir uma maior vida útil da flange mecânica de engate dos modos de condução.

Na Figura 17, tem-se o painel de instrumentos completo do modelo 8740 S DYNA-VT da Massey Ferguson.

Figura 17 - Painel Massey Ferguson Série 8740

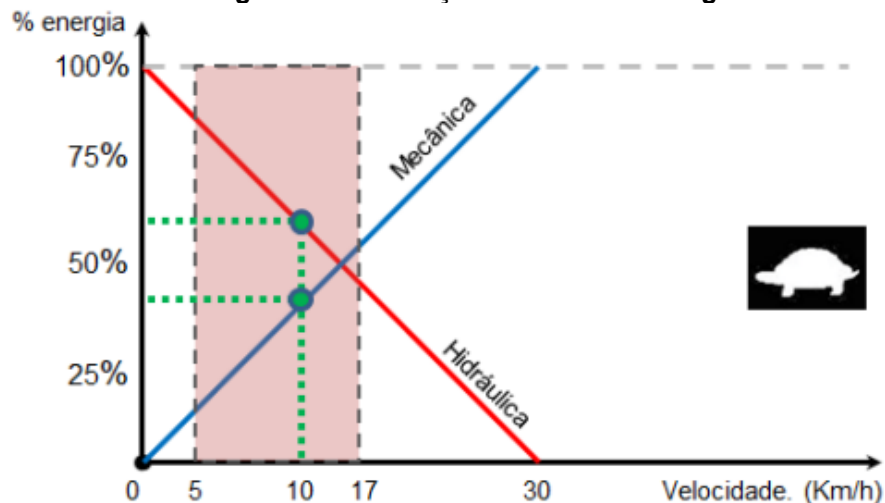


Fonte: Massey Ferguson (2022)

2.6.1.1 Modo de condução Tartaruga

O modo de condução tartaruga é utilizado e recomendado quando a máquina agrícola está carregada com implemento, seja uma plantadeira ou semeadeira. A distribuição de energia mecânica proveniente motor e energia hidráulica vinda das bombas se ajustam automaticamente para garantir um maior torque e uma rotação menor. A Figura 18 representa a distribuição de energias e a velocidade atingida pelo trator em modo tartaruga. É possível notar que no início do movimento, quase toda energia é hidráulica, já próximo da velocidade máxima do trator no modo tartaruga, a energia passa a ser quase totalmente mecânica, proveniente do motor a diesel.

Figura 18 - Condução em modo tartaruga

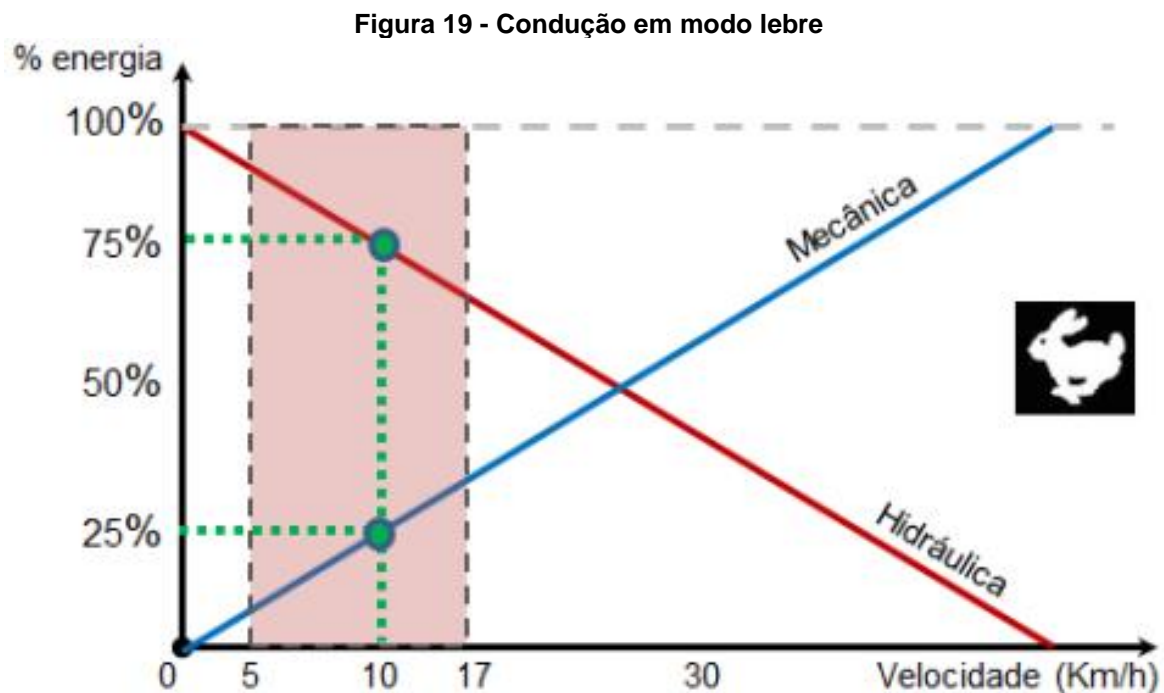


Fonte: Massey Ferguson (2022)

2.6.1.2 Modo de condução Lebre

O modo de condução conhecido como lebre é utilizado e recomendado quando o trator está vazio, ou seja, sem nenhum implemento, o que lhe permite atingir uma maior velocidade final. A distribuição de energias mecânicas e hidráulicas se dá de forma similar ao do modo tartaruga, alterando-se apenas a proporção de cada energia que é utilizada.

Na Figura 19, tem-se o gráfico de percentual de energia por velocidade no modo lebre. Pode-se notar que a velocidade final atingida é maior, e que a demanda de energia mecânica e hidráulica se compõem de maneira diferente em relação ao modo tartaruga para uma mesma velocidade.



Fonte: Massey Ferguson (2022)

2.7 Norma AGMA

Segundo o livro Elemento de Máquinas Shigley, a associação americana de manufatura de engrenagens (AGMA - American Gear Manufactures Associaton) são os responsáveis pelo projeto, análise e disseminação de métodos de estudos em engrenagens. Os estudos realizados por esta organização visam padronizar os ensaios e obter dados como o desgaste e a resistência destes componentes mecânicos, utilizando cálculos analíticos e tabelas (BUDYNAS, 2016).

2.7.1 AGMA 2101-D04

A norma *AGMA 2101 – D04* fornece o método ao qual é capaz de comparar, através de fórmulas, a capacidade à flexão e ao crateramento dos dentes de diferentes tipos de engrenagens. Tendo diversos fatores para análise, esta norma é utilizada por projetistas que sejam capazes de distinguir e selecionar os fatores corretos para a correta aplicação da metodologia (“ANSI/AGMA 2101-D04”, 2016).

Neste trabalho, a norma *AGMA 2101- D04* será utilizada para a análise da resistência à flexão e ao contato nos dentes das engrenagens do conjunto epicicloidial dentro da transmissão *CVT DYNA-VT*.

2.7.2 Resistência à flexão

Ao se projetar uma máquina, é importante conhecer os esforços atuantes nos elementos mecânicos que compõem aquele maquinário, de modo a assegurar que sua resistência seja superior às tensões admissíveis vindas dos carregamentos e cargas as quais a peça está sendo submetida (ALMEIDA, 2022).

Segundo (NUNEZ, 2022), o objetivo do estudo da resistência à flexão, é analisar o fenômeno da fadiga, ocasionado especificamente no cordão raiz do dente de uma engrenagem, a qual está associada ao processo de fissura.

De acordo com (BUDYNAS, 2016), a resistência a flexão leva em conta diversos fatores e variáveis que modificam os valores de limite de tensão no componente em estudo. A fim de calcular este limite de tensão, será detalhado as variáveis utilizadas no cálculo.

2.7.2.1 Tensão de flexão

Para a tensão flexional, será utilizada a Equação 1, prevista em (BUDYNAS, 2016).

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot K_O \cdot K_V \cdot K_S \cdot K_H \cdot K_b}{b \cdot m \cdot Y_J} \quad (1)$$

Onde as variáveis representam:

σ_F : Tensão de flexão, em $\frac{N}{mm^2}$;

F_t : Carga tangencial transmitida, em N ;

K_O : Fator de sobrecarga;

K_V : Fator dinâmico;

K_s : Fator de tamanho;

K_H : Fator de distribuição de carga;

K_b : Fator de espessura de borda;

b : Largura da face da engrenagem, em mm;

m_n : Módulo métrico normal, em mm, usado para dentes retos;

m_t : Módulo métrico transversal, em mm, usado para dentes helicoidais;

Y_j : Fator geométrico para a resistência à flexão.

2.7.2.2 Fator de segurança à flexão

Com o objetivo de se garantir a resistência à flexão dos dentes da engrenagem, diversos fatores como a qualidade de construção, material utilizado e tratamento térmico são levados em consideração para o cálculo desta variável. O fator de segurança à flexão está representado na Equação 2, prevista em (NUNEZ, 2022).

$$S_f = \frac{\sigma_{Fp}}{\sigma_F} \cdot \frac{Y_N}{Y_\Phi \cdot Y_Z} \quad (2)$$

Onde:

- S_f : Fator de segurança à flexão;
- σ_{Fp} : Tensão à flexão permitido AGMA, em $\frac{N}{mm^2}$;
- σ_F : Tensão à flexão AGMA, em $\frac{N}{mm^2}$;
- Y_N : Fator de ciclagem para a flexão;
- Y_Φ : Fator de temperatura;
- Y_Z : Fator de confiabilidade.

2.7.3 Resistência ao contato ou crateramento

Dando continuidade aos estudos dos esforços atuantes nas engrenagens, de acordo com (NUNEZ, 2022), a resistência ao crateramento está relacionada à pressão de contato entre duas superfícies curvas, as quais em uma engrenagem são encontradas na superfície de flanco do dente.

Neste estudo, busca-se avaliar a vida útil desta superfície por meio de fórmulas que contêm variáveis que também modificam o limite de tensão ao contato entre os dentes das engrenagens durante seu engrenamento.

2.7.3.1 Tensão ao contato

Para a tensão de contato, será utilizada a Equação 3, prevista em (BUDYNAS, 2016).

$$\sigma_H = Z_e \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot K_0 \cdot K_v \cdot K_s \cdot K_H \cdot Z_R}{D_p \cdot b \cdot Z_I}} \quad (3)$$

Onde representam:

σ_H : Tensão ao contato, em $\frac{N}{mm^2}$;

Z_e : Coeficiente de elasticidade, em $\frac{N}{mm^2}^{0,5}$;

F_t : Carga tangencial, em N ;

K_0 : Fator de sobrecarga;

K_v : Fator dinâmico;

K_s : Fator de tamanho;

K_H : Fator de distribuição de carga;

Z_R : Fator de condição de superfície;

D_p : Diâmetro primitivo da engrenagem;

b : Largura da face, em mm ;

Z_I : Fator geométrico para a resistência ao crateramento.

2.7.3.2 Fator de segurança ao contato

Para o fator de segurança ao contato, também são avaliados alguns critérios de fabricação da engrenagem em estudo. A Equação 4 será utilizada para o cálculo do fator de segurança ao contato, prevista em (NUNEZ, 2022).

$$S_h = \frac{\sigma_{H_p}}{\sigma_H} \cdot \frac{Z_N \cdot Z_W}{\gamma_\phi \cdot \gamma_Z} \quad (4)$$

Onde:

- S_h : Fator de segurança ao contato;
- σ_{H_p} : Tensão ao contato permitido *AGMA*, em $\frac{N}{mm^2}$;
- σ_H : Tensão ao contato *AGMA*, em $\frac{N}{mm^2}$;
- Z_N : Fator de ciclagem para a resistência ao contato;
- Z_W : Fator de razão de dureza para resistência ao contato;
- γ_ϕ : Fator de temperatura;

- Y_Z : Fator de confiabilidade.

2.7.4 Fatores modificadores da norma AGMA 2101 – D04

A Tabela 2 representa os fatores e as respectivas características que são responsáveis por modificar as tensões e fatores de segurança ao contato e de flexão.

Tabela 2 - Fatores modificadores da norma AGMA

Parâmetros	Símbolo	Característica
Carga Tangencial	F_t	Está baseada na velocidade, torque e rotação da engrenagem do dispositivo a ser acionado
Fator de sobrecarga	K_0	Leva em consideração todas as cargas aplicadas externamente, tipo de máquina e variações de torque do sistema
Fator dinâmico	K_v	Se baseia nas forças dinâmicas decorrentes da qualidade do processo de manufatura da engrenagem
Fator de tamanho	K_s	Refere-se a característica de não conformidade das propriedades do material da engrenagem
Fator de distribuição de carga	K_H	Responsável pela distribuição não uniforme de carga ao longo da região de flanco da engrenagem
Fator de espessura de borda	K_B	Responsável pelo ajuste da tensão à flexão em engrenagens com bordas finas
Módulo normal	m_n	Usado para engrenagem reta
Módulo Transversal	m_t	Usado para engrenagem helicoidal
Resistência ao número de tensão permitida AGMA	σ_{F_x}	Valor tabelado na norma AGMA, o qual considera a qualidade e tratamento térmico durante a produção da engrenagem
Coeficiente de elasticidade	Z_E	Valor tabelado
Fator de condição de superfície	Z_R	Depende das tensões residuais e de acabamento superficial da engrenagem
Fator de ciclagem para resistência	Y_N	Está baseado no número de ciclos de tensão que a máquina está exposta durante sua vida útil na operação
Fator de confiabilidade	Y_Z	probabilidade estática de falhas encontrada nos testes dos materiais utilizados nas engrenagens
Fator de temperatura.	Y_Φ	Relaciona-se a temperatura de operação do sistema analisado

Fonte: Norma AGMA 2101-D04 (2016).

2.8 Gêmeo Digital

O conceito de Gêmeo digital vem do inglês *Digital Twin*, significa realizar uma cópia no mundo digital de um objeto, uma planta industrial ou até um processo do mundo real. Através de *softwares* de desenho, esta versão digital é utilizada para uma manufatura inteligente, onde diversas simulações, testes e mudanças são realizados, com a finalidade de se obter dados necessários para uma análise minuciosa da peça real em questão (OCHOA; PEIXOTO; BORIN, 2021).

Ainda segundo os autores, com esta integração do mundo físico e digital, é possível aumentar a qualidade final do produto, reduzir custos, melhorar processos produtivos e agir com antecedência na previsão de falhas de determinado produto.

A representação do gêmeo digital pode ser feita com uma riqueza de detalhes ou com simplificações pertinentes ao modelo estudado, deixando de lado a complexidade da peça real, assim, o modelo digital passa por uma bateria de análises desenvolvidas em *software*, que simula a aplicação de sensores visando a captação de variáveis para estudo, o que representaria uma situação em bancada de uma peça real.(PARROT; WARSHAW, 2017).

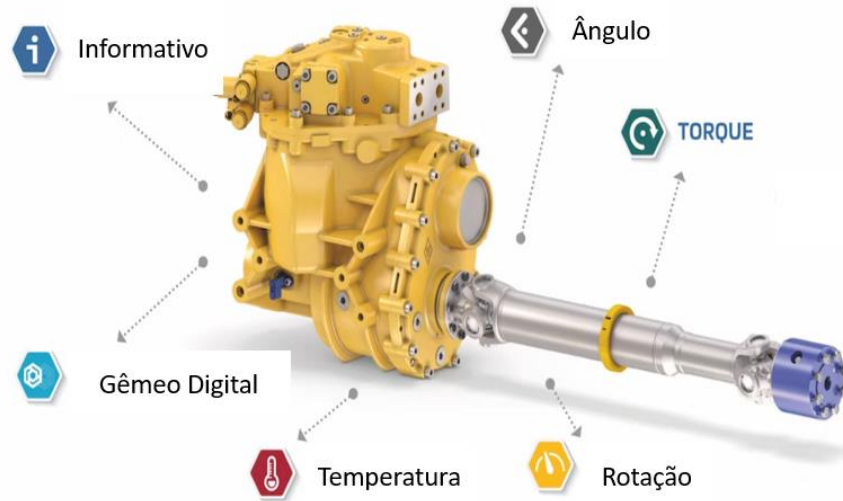
De acordo com a *General Eletric*, um Gêmeo Digital é composto por três tópicos. Primeiramente, o modelo ativo do gêmeo deve descrever os componentes da peça ou a estrutura do processo a ser copiado, em segundo lugar, análises devem ser feitas para prever e descrever o comportamento do objeto em estudo, com a finalidade de entender suas reações e automatizar o modelo digital, e por fim, criar uma base de dados a partir da captação de variáveis do modelo real.

Com a utilização desta tecnologia, e alinhada à agronomia 4.0, é possível realizar uma coleta de dados nas máquinas agrícolas através de sensores que replicam no gêmeo digital os parâmetros reais (QUINALHA, 2018).

O conceito de agricultura 4.0 está relacionada à base teórica da indústria 4.0, uma inteligência artificial alinhada com automação de processos e eletrônica avançada. Na agricultura inteligente, são usados sistemas de informações integrados, com o objetivo de gerenciar os dados obtidos, assim, esta tecnologia busca estruturas de produção enxutas, minimizando os desperdícios e reduzindo a variabilidade de informações entre fornecedores e clientes (SCHLOSSER *et al.*, 2020).

A Figura 20 traz um exemplo de gêmeo digital aplicado a um sistema de transmissão, o qual fornece diversos tipos de informações ao projetista.

Figura 20 - Utilizações do Gêmeo Digital



Fonte: Oemoffhighway (2023)

2.9 Manutenção em tratores agrícolas

A manutenção de máquinas agrícolas é essencial e exige cuidados e atenção por parte do mecânico responsável. Para tal, um conjunto de procedimentos e análises são realizados periodicamente, com o intuito de manter os tratores nas condições ideais de trabalho, aumentando a vida útil do equipamento, melhorando a produtividade e garantindo a segurança para o condutor (REIS *et al.*, 2005).

De acordo com Oliveira (2001), devido ao uso intenso das máquinas agrícolas, as despesas para a realização periódica de manutenções e reparos nos tratores tem altos custos agregados, desde pneus e lubrificantes até peças mecânicas de reposição.

Segundo as fabricantes, que disponibilizam materiais como o manual do proprietário, que contém informações sobre manutenção periódicas, especificações técnicas das peças utilizadas para reposição e cuidados com os tratores, uma correta manutenção e armazenamento dos maquinários prolonga a vida útil e reduz perdas de tempo com as paradas inesperadas durante o uso.

Devido à complexidade de uma máquina agrícola, as marcas recomendam que as manutenções sejam realizadas por profissionais que passaram por treinamentos. Assim, esses mecânicos ficam disponíveis para realização dos serviços em campo e nas concessionárias, utilizando os benefícios do gêmeo digital para

facilitar treinamentos, ampliar os conhecimentos e aumentar a eficiência da manutenção.

No site da marca *Massey Ferguson*, é possível encontrar diversas recomendações para evitar a parada inesperada dos tratores durante a safra. Segundo Ernane Horst, mecânico da marca, a manutenção preventiva é necessária para aumentar a eficiência e produtividade da lavoura. O coordenador de serviços da AGCO, Fábio Bona, destaca que a colheita é o período mais esperado pelo agricultor, pois é nesta fase do ciclo de cultivo que o produtor irá colher seu investimento, e para isso, ter tratores e colheitadeiras com as manutenções periódicas em dia evita imprevistos durante o período.

De acordo com a *Massey Ferguson*, uma parada inesperada de 8 horas de uma máquina agrícola por falta de manutenção pode resultar em até 3400 sacas a menos de colheita, numa área de até 50 hectares, podendo levar à grandes prejuízos de R\$ 530 mil reais ao produtor, caso ele não consiga realizar a manutenção na máquina agrícola a tempo da colheita.

2.10 Projeto de Máquinas

De acordo com (PAHL *et al.*, 2016) projetar máquinas e peças é a principal missão de um engenheiro projetista. Para tal, uma equipe de profissionais realiza pesquisas e se baseia em conhecimentos técnicos e práticos da engenharia, além da consulta de literaturas, com o objetivo de solucionar os problemas propostos, atendendo as condicionantes do projeto, como o tipo de material aplicado, tecnologias embarcadas, questões econômicas, e de meio ambiente que envolvem a elaboração de um novo produto.

Ainda de acordo com os autores, para se realizar um projeto em engenharia, existem três graus diferentes de concepção na elaboração e planejamento da criação de um produto, sendo elas: projeto adaptativo, alternativo e inovador. No projeto adaptativo, o qual é a razão deste trabalho, a solução para o problema apresentado é preservada, e apenas suas características são adaptadas para atender as novas demandas do produto.

3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Para o trabalho em questão, que busca inicialmente realizar um estudo de eficácia da norma *AGMA 2101 – D04*, a qual será aplicada na análise comparativa entre o uso de engrenagens cilíndricas de dentes retos e dentes helicoidais da transmissão continuamente variável *DYNA-VT*. Para a análise, será seguida uma metodologia de projeto de máquinas (PAHL *et al.*, 2016):

- Esclarecimento da tarefa: Na primeira fase do projeto, é fundamental o esclarecimento e concepção das tarefas realizadas pelo sistema de transmissão *CVT*;
- Concepção: Nesta fase, a identificação de pontos de melhoria e pesquisas dos princípios de solução são realizadas, com as consultas ao mecânico, responsável pela manutenção em campo dos tratores da *Massey Ferguson*;
- Projeto preliminar: Após os estudos, são realizadas otimizações e melhorias no sistema de transmissão *DYNA-VT*, com o intuito de alavancar a manutenibilidade e eficiência das engrenagens do sistema;
- Projeto detalhado: Completar e finalizar os cálculos com a comparação entre a eficiência do uso de engrenagens de dentes retos e helicoidais, buscando salientar a importância da norma *AGMA* e sua robustez.

Na primeira etapa, foi realizado uma visita à concessionária da *Massey Ferguson* na cidade de Guarapuava – PR, para uma conversa inicial com um mecânico da marca, com o objetivo de se esclarecer possíveis dúvidas dos componentes internos da transmissão *CVT*.

Devido à escassez de informações do *DYNA-VT*, por ser um projeto confidencial da *AGCO*, não foi possível obter os dados de dimensões das peças internas com tantos detalhes. Desta forma, o mecânico auxiliou no levantamento dos dados iniciais, como o manual do trator e de manutenções. Após a coleta dos dados e o desenho dos componentes, realizou-se o estudo do funcionamento do sistema, através de materiais disponibilizados pela montadora de tratores, no qual demonstra uma versão simplificada da transmissão em um Gêmeo Digital.

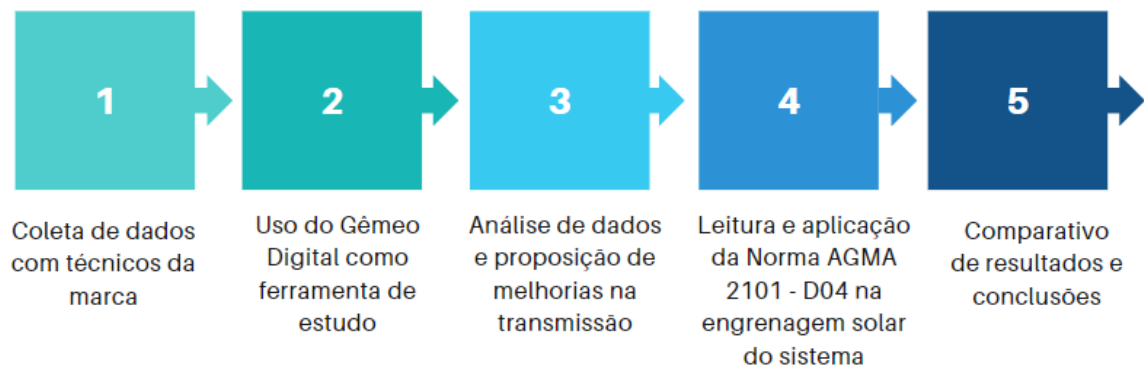
Na segunda e terceira etapa, a partir do Gêmeo Digital, foram analisadas possíveis melhorias no sistema interno da transmissão, como a substituição da

engrenagem solar de dentes retos outras de dentes helicoidais, através de cálculos de torque e rotação das engrenagens da transmissão.

Para a quarta etapa deste trabalho, utilizou-se a norma *AGMA 2101- D04* para o embasamento dos cálculos da tensão à flexão e ao contato, do conjunto epicicloidial de dentes retos pertencente à transmissão *DYNA-VT*. A comparação foi realizada considerando a proposta de uma engrenagem helicoidal com as mesmas características geométricas (módulo e número de dentes) da engrenagem pertencente ao conjunto.

A quinta e última etapa buscou comparar os resultados obtidos e buscar a melhor aplicação de qual tipo de engrenagem, reta ou helicoidal, é mais vantajosa na transmissão *DYNA-VT*. Abaixo, na Figura 21, tem-se listados em formato de fluxograma os passos utilizados na coleta e análise dos dados utilizados no desenvolvimento do trabalho.

Figura 21 - Fluxograma do trabalho



Fonte: Autoria Própria (2023).

4 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Na fase de concepção do trabalho, foi realizado o planejamento do projeto, em que a metodologia, os recursos utilizados e a viabilidade técnica das informações foram tomadas como fatores essenciais para se desenvolver um trabalho organizado.

Para que as expectativas do período de concepção fossem atendidas, inicialmente foi agendada uma visita técnica na concessionária da *Massey Ferguson* na cidade de Guarapuava – PR, onde Hernane Horst, mecânico e especialista com 10 anos de experiência em manutenções de tratores e plantadeiras da marca, cedeu uma entrevista para a coleta de dados, esclarecimento de dúvidas e fornecimento de materiais como o manual do trator e apostilas utilizadas nos treinamentos dos mecânicos, viabilizando assim, o desenvolvimento do projeto.

Com os dados coletados, deu-se início a etapa do desenvolvimento e execução do trabalho, a qual foi dividida em fases. A primeira etapa baseou-se na análise de dados presentes na documentação do sistema de transmissão. A etapa seguinte teve enfoque para a elaboração do Gêmeo Digital simplificado baseado em diagramas e simuladores.

A última etapa do desenvolvimento deste trabalho baseou-se na aplicação de um estudo de caso nas engrenagens da transmissão, com o intuito avaliar a robustez da norma *AGMA 2101 – D04*, aplicando-a na análise de resistência das engrenagens do conjunto *CVT*.

4.1 Requisitos do projeto

A transmissão *DYNA-VT* e suas engrenagens foram utilizadas como base para a aplicação da norma *AGMA* e para o estudo do Gêmeo Digital, tendo como principais características em sua composição, uma bomba hidráulica, um motor hidráulico, doze engrenagens cilíndricas, dentre as quais seis são retas e seis são helicoidais, quatro eixos, uma manga de eixo e por último uma luva deslizante.

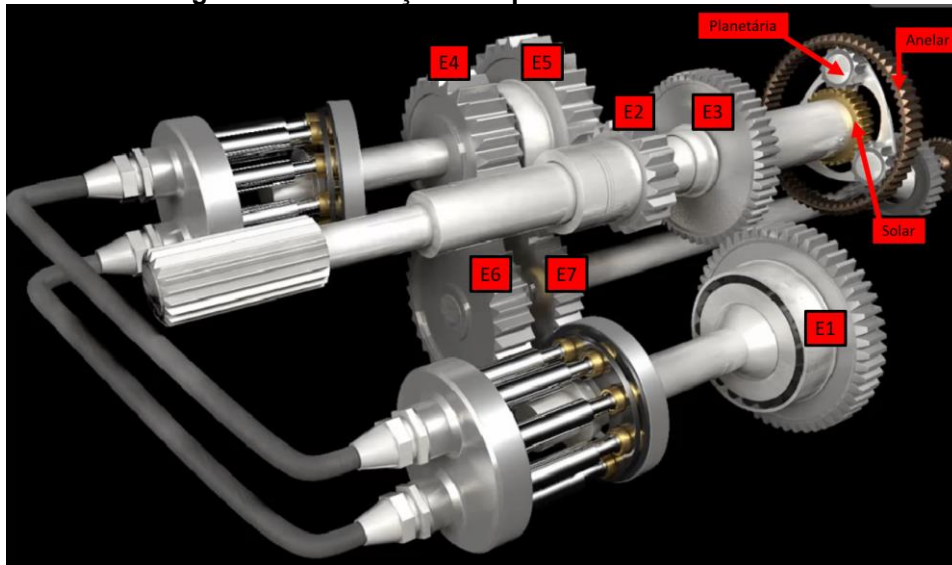
4.2 Especificações das engrenagens e eixos

Partindo das características e do requisito do projeto, a próxima etapa é definir a geometria, número de dentes e distância entre centros de todo o conjunto, para que as relações de transmissão sejam atendidas no Gêmeo Digital.

A escolha do módulo, ângulo de pressão e material dos componentes foram escolhidos de forma arbitrária, já o número de dentes de cada engrenagem foi embasado em imagens reais da transmissão desmontada, imagens que foram cedidas por uma empresa de mecânica especializada em manutenções de transmissões de tratores, localizada na Polônia.

Para questões didáticas, a Figura 22 apresenta o sistema de transmissão com todas as engrenagens nomeadas e numeradas.

Figura 22 - Nomeação Componentes Transmissão



Fonte: Massey Ferguson (2022).

A Tabela 3 retrata as especificações que foram utilizadas para a criação simplificada do Gêmeo Digital, os valores utilizados foram levados em conta a aplicação e fotos reais dos componentes.

Tabela 3 - Especificações engrenagens DYN-VT

Descrição		Engrenagem	Módulo	Nº de dentes	Diâmetro Primitivo [mm]	Ângulo de pressão	Largura da face [mm]	Nº de planetas	Diâmetro do eixo [mm]	Tipo	
Especificações Engrenagens do Sistema Dyna VT	Eixo 1	Bomba Hidráulica	E1	4	40	160	20°	36	40	Reta	
	Eixo 2	Planetária	Anelar	6	72	432	20°	36		60	Reta
			Planetária	6	24	144	20°	36	3	30	Reta
			Solar	6	24	144	20°	36		65	Reta
			E2	6	28	168	20°	36		60	Helicoidal
			E3	4	48	192	20°	36		60	Reta
	Eixo 3	Motor Hidráulico	E4	4	35	140	20°	36		40	Helicoidal
			E5	5	40	200	20°	36		40	Helicoidal
	Eixo 4	Tração e Diferencial	E6	4	50	200	20°	36		50	Helicoidal
			E7	5	28	140	20°	36		50	Helicoidal

Fonte: Autoria Própria (2022).

Para o eixo, têm-se listado na Tabela 4 as dimensões arbitrárias utilizadas no projeto.

Tabela 4 - Especificações eixos DYNA-VT

Descrição		Diâmetro [mm]	Comprimento [mm]	
Especificações Eixos do Sistema Dyna VT	Eixo 1	Bomba Hidráulica	40	310
	Eixo 2	Planetária	60	720
	Eixo 3	Motor Hidráulico	40	310
	Eixo 4	Tração e Diferencial	50	900

Fonte: Autoria Própria (2022).

Em sequência, a Figura 23 representa a transmissão real desmontada em processo de manutenção, onde é possível observar a grande maioria dos componentes que compõem o sistema.

Figura 23 – Transmissão DYNA-VT desmontada



Fonte: Mecânica Korbanek (2022).

4.3 Modelagem da transmissão

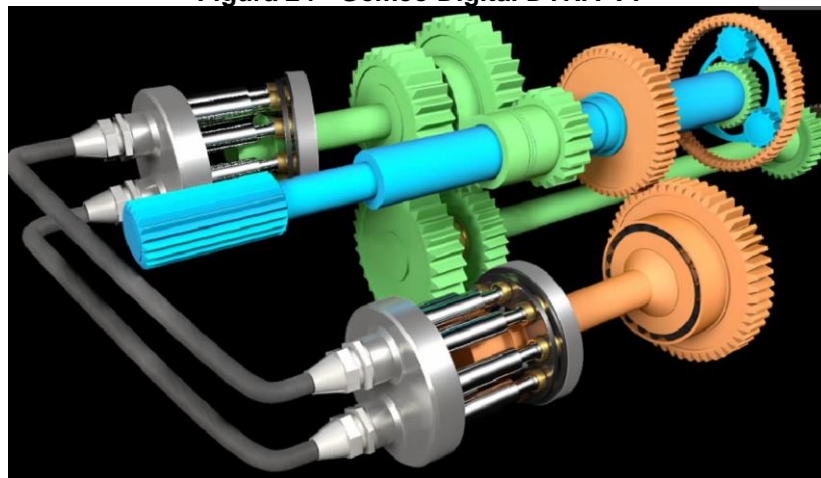
Para a modelagem do sistema, considerou-se as engrenagens do sistema que possuem tanto dentes retos quanto helicoidais, e os respectivos números de dentes e módulos foram utilizados inicialmente em uma planilha *Excel* para o cálculo de engrenamento e diâmetros primitivos. Na sequência, a plataforma de modelagem do programa *SolidWorks* foi configurada com a norma ISO (*International Organization for*

Standardization), utilizada em todo o projeto para a elaboração e compatibilidade mecânica dos componentes.

A ferramenta de criação *ToolBox* foi utilizada para o desenvolvimento das 12 engrenagens que compõem o Gêmeo Digital simplificado. A partir dos dados de entrada o software realiza a parametrização para a criação do componente. Os 4 eixos foram criados na plataforma de desenho, seguindo o diâmetro interno das engrenagens já criadas.

A Figura 24 representa o Gêmeo Digital fornecido pela marca, e foi dividido em 3 cores com a finalidade de se representar a parte hidráulica do sistema, simbolizado pelos componentes em laranja, junto da bomba e motor hidráulico. A parte verde representa o sistema mecânico da transmissão, compostos pelas engrenagens solar, eixo de coleta e do eixo de saída para o diferencial. A parte azul do Gêmeo Digital exibe o eixo de entrada proveniente do motor a diesel e o portador das engrenagens planetárias.

Figura 24 - Gêmeo Digital DYNA-VT



Fonte: Massey Ferguson (2022).

De acordo com a inclinação da bomba e do motor hidráulico, a vazão de óleo se altera, interferindo diretamente na transferência de energia mecânica e hidráulica pelo sistema, ocasionando uma mudança de velocidade do trator a partir das relações de engrenamento.

Em vista disso, a modelagem e animação do gêmeo digital são fundamentais para o entendimento e consolidação do correto funcionamento do sistema *DYNA-VT*. A Figura 25 representa os componentes reais do *CVT*.

Figura 25 - Epicicloidal e engrenagens reais



Fonte: Mecânica Korbanek (2022).

4.4 Estudo de caso da engrenagem solar do sistema

O estudo de caso que tem por objetivo a proposição de melhorias no sistema de transmissão do trator através da análise de tensões nos dentes da engrenagem selecionada. Para tal, foi escolhida a engrenagem solar de dentes retos, pelo motivo da consideração inicial da transmissão em posição lebre, ou seja 100% mecânica, a qual servirá como referência para o estudo, e sua substituição por uma engrenagem solar de dentes helicoidais. Inicialmente, a relação de transmissão entre as engrenagens do sistema foi calculada.

4.4.1 Relação de transmissão de torque

Considerando que o torque não é constante no sistema de transmissão (BUDYNAS, 2016), será necessário calcular a relação de transmissão de torque entre as engrenagens do sistema *DYNA-VT*.

Uma premissa inicial foi considerada para os cálculos da relação de transmissão, tomando como base os dados disponíveis no catálogo do trator *Massey Ferguson MF 8700* presente no Anexo A deste trabalho. Por fim, assumiu-se que o motor estará sempre a uma rotação constante de 1500 rpm e que todo torque proveniente do eixo do motor será transmitido de forma mecânica para o portador das engrenagens planetárias e conseqüentemente, para as engrenagens da transmissão, ou seja, o torque gerado pela parte hidráulica do sistema será nulo.

Assim, os dados adotados neste trabalho são:

- Potência a 1500 rpm: 340 *HP* / 253.538 W;
- Torque no motor a diesel a 1500 rpm: 1590 N.m;
- Transmissão na posição lebre, (conjunto 100% mecânico);

- Portador das engrenagens planetárias está conectado ao eixo do motor diesel;
- Engrenagem anelar, E1 e E3 estão paradas, devido ao calço hidráulico do sistema.

Inicialmente, foram calculados o torque e rotação da engrenagem solar, através das Equações 5, 6, 7 e 8, disponíveis em (WOLF, 2021).

$$T_s = T_{pp} \cdot \left(\frac{Z_s}{Z_a + Z_s} \right) \quad (5)$$

Onde:

T_s : Torque na engrenagem solar, em N.m;

T_{pp} : Torque no portador das engrenagens planetárias, em N.m;

Z_s : Número de dentes da engrenagem solar;

Z_a : Número de dentes da engrenagem anelar.

$$T_s = 1590 \cdot \left(\frac{24}{72+24} \right)$$

$$T_s = 397,5 \text{ N.m}$$

Para se encontrar o torque nas demais engrenagens, utilizou-se a Equação 6:

$$T_{out} = T_{in} \cdot i \quad (6)$$

Onde:

T_{out} : Torque da engrenagem movida, em N.m;

T_{in} : Torque da engrenagem motora, em N.m;

i : Relação de engrenamento.

Já a rotação das demais engrenagens é dada pela Equação 7 de Willis (MARQUES; FLORES, 2020):

$$N_a \cdot Z_a + N_s \cdot Z_s = N_{pp} \cdot (Z_a + Z_s) \quad (7)$$

Onde:

N_a : Rotação da engrenagem anelar, em rpm;

Z_a : Número de dentes da engrenagem anelar;

N_s : Rotação da engrenagem solar, em rpm;

Z_s : Número de dentes da engrenagem solar;

N_{pp} : Rotação do portador das engrenagens planetárias, em rpm;

Z_a : Número de dentes da engrenagem anelar.

Para a rotação da engrenagem solar, tem-se:

$$0 \cdot 72 + N_s \cdot 24 = 1500 \cdot (72 + 24)$$

$$N_s = 6000 \text{ rpm}$$

A partir desses dados da engrenagem solar, é possível calcular as rotações e torques nas demais engrenagens através da relação de transmissão de trens de engrenagens compostos. As engrenagens E1 e E3 serão desconsideradas neste cálculo, elas são responsáveis pela rotação da bomba hidráulica do sistema, e estão estáticas pela condição inicial dos cálculos.

A relação do trem composto tem 2 estágios de transmissão de rotação e torque, inicialmente entre o eixo 2 e 3 (entrada e de coleta), e subsequentemente entre os eixos 3 e 4 (coleta e de saída). A relação de transmissão é dada pela Equação 8 (FILHO; SOLANO, 2018):

$$i = \frac{Z_{movida}}{Z_{motora}} = \frac{N_{motora}}{N_{movida}} \quad (8)$$

Onde:

Z_{movida} : Número de dentes da engrenagem movida;

Z_{motora} : Número de dentes da engrenagem motora;

N_{movida} : Rotação da engrenagem movida, em rpm;

N_{motora} : Rotação da engrenagem motora, em rpm;

A Tabela 5 demonstra todas as rotações presentes no sistema DYNA-VT.

Tabela 5 - Relação de transmissão do sistema Dyna Vt

Descrição		Engrenagem	Nº de dentes	Rotação [rpm]	Torque [N.m]
Especificações Engrenagens do Sistema Dyna VT	Eixo 1 Bomba Hidráulica	E1	40	0	0
	Eixo 2 Motor Diesel	Anelar	72	0	0
		Portador (Entrada)	24	1500	1590
		Solar (Saída)	24	6000	398
		E2	28	6000	398
		E3	48	0	0
	Eixo 3 Motor Hidráulico	E4	35	4200	568
		E5	40	4200	568
	Eixo 4 Saída para Diferencial	E6	50	2940	811
		E7	28	6000	398

Fonte: Autoria Própria (2022).

Com a engrenagem solar selecionada para o estudo, foi realizado uma comparação entre a engrenagem com dentes retos e helicoidais. A comparação embasou-se nos estudos da norma *AGMA 2101- D04*, onde as resistências à flexão e de contato da engrenagem foram calculadas para se obter comparações e conclusões de qual tipo de engrenagem, de dentes retos ou helicoidais, é mais resistente para a aplicação no trator *Massey Ferguson 8700 DYNA-VT*.

Em vista disso, uma vez que as resistências são afetadas por diversas variáveis que geram resultados distintos de limites de tensão à flexão e ao contato (BUDYNAS, 2016), serão apresentadas as seguintes informações acerca das características da transmissão: as especificações das engrenagens que compõem o sistema epicicloidal, os fatores modificadores das tensões *AGMA* e por último, os valores encontrados para a tensão de flexão e ao contato com seus respectivos coeficientes de segurança.

Como definido anteriormente, a entrada de potência acontecerá pelo portador das engrenagens planetárias. A saída de potência se dá pela engrenagem solar e o elemento fixo ou resistivo será a engrenagem anelar.

4.4.2 Características e especificações da engrenagem solar

As especificações da engrenagem solar que será analisada se baseiam em dados de geometria e material da engrenagem, além de condições de aplicação

destes elementos mecânicos na transmissão, onde ambas engrenagens são da mesma largura e material. Na Tabela 5 tem-se listado as principais características utilizadas neste estudo. Cabe destaque o material utilizado, aço carbono AISI 1045 e tratamento térmico dos dentes da engrenagem por indução tipo A, ou seja, que a superfície de flanco e o cordão raiz foram endurecidos no processo. A partir destes dados é possível obter a dureza de cada tipo de engrenagem nas aplicações de flexão e ao contato.

4.4.3 Variáveis modificadoras das tensões AGMA

Para que a norma *AGMA 2101-D04* possa ser utilizada com eficácia, é necessário definir as variáveis que compõem as fórmulas das tensões de flexão e ao contato, a partir das características e especificações do conjunto analisado. Os parâmetros utilizados nos cálculos estão detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros utilizados na norma AGMA

Variável	Símbolo	Engrenagem		Unidade
		Reta	Helicoidal	
Ângulo de pressão normal	θ_n	20,00	20,00	Graus
Ângulo de helice	β	-	30,00	Graus
Ângulo de pressão tangencial	θ_t	-	22,80	Graus
Módulo normal	m_n	6,00	6,00	-
Módulo transversal	m_t	-	6,93	-
Número de dentes	N	24,00	24,00	-
Diâmetro primit da engrenagem	D_p	144,00	166,28	mm
Largura da face	b	36,00	36,00	mm
Passo axial	p_x	-	37,70	mm
Material da engrenagem	Aço carbono AISI 1045			
Tratamento térmico	Endurecido superficialmente por indução do tipo A			

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.3.1 Variáveis modificadoras da tensão ao contato

As variáveis que compõem a fórmula da tensão ao contato que foram descritas no item 2.7.3.1, estão detalhados na Tabela 7. As equações podem ser encontradas em (NUNEZ, 2022).

Tabela 7 - Variáveis modificadoras da tensão ao contato

Variável	Símbolo	Engrenagem		Unidade
		Reta	Helicodal	
Diâmetro Primitivo	D_p	144	166,28	mm
Carga Tangencial	F_t	1866,98	1616,85	N
Fator de sobrecarga	K_0	2,75	2,75	-
Fator dinâmico	K_v	1,11	1,11	-
Fator de tamanho	K_s	1,09	1,09	-
Fator de distribuição de carga	K_H	1,26	1,26	-
Largura da face da engrenagem	b	36,00	36,00	mm
Coeficiente de elasticidade	Z_e	191,00	191,00	$\left[\frac{N}{mm^2} \right]^{0,5}$
Fator de condição de superfície	Z_r	1,00	1,00	-
Fator geométrico para dentes retos	Z_{IR}	0,11	-	-
Fator geométrico para dentes helicoidais	Z_{IH}	-	0,20	-
Tensão ao contato	σ_H	710,86	442,33	Mpa

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.4 Análise de resistência e fator de segurança ao contato

A análise da resistência ao contato levou em consideração a mesma metodologia *AGMA*, apresentada no tópico 2.7.3.1 deste trabalho, onde a Equação 3 foi utilizada para o cálculo da tensão de contato. Considera-se que a engrenagem solar gira para ambos os lados, devido a condição de marcha a ré, a transmissão terá uma vida nominal de 6000 horas e que a transmissão não irá superar os 120°C durante o funcionamento.

Para o fator de segurança, inicialmente foi encontrada a dureza padronizada para o material e tratamento térmico usado na engrenagem, uma vez que o dado oficial não foi disponibilizado pela fabricante.

Uma estimativa inicial para o fator de segurança igual a 1 foi considerada tanto para dente reto, quanto para o helicoidal, e a partir deste valor é encontrado a resistência ao número de tensão ao contato usando-se a Equação 9. Com essa resistência em mãos e a tabela da norma *AGMA* presente no Anexo D deste trabalho, foi possível encontrar o real valor da resistência ao número de tensão, e por consequência, a dureza final do material usado.

$$S_h = \frac{\sigma_{H_p}}{\sigma_H} \cdot \frac{Z_N \cdot Z_W}{Y_\phi \cdot Y_Z} \quad (9)$$

A resistência ao número de tensão ao contato permitida *AGMA* não tem relação com a resistência ao escoamento do material e se encontra tabelada na norma *AGMA*, presente no Anexo D deste trabalho. A Tabela 8 apresenta as variáveis que compõem o fator de segurança ao contato.

Tabela 8 Variáveis do fator de segurança ao contato

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência ao número de tensão ao contato permitido <i>AGMA</i>	σ_{H_p}	1170	MPa
Fator de ciclagem de tensão para a resistência ao crateramento	Z_n	0,898	-
Fator de confiabilidade	Y_z	1,5	-
Fator de temperatura	Y_Φ	1	-
Fator de razão de dureza para resistência ao craterament	Z_w	1	-

Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados da tensão ao contato e fator de segurança estão descritos na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9 - Tensões e Fator de Segurança ao Contato

Variável	Símbolo	Engrenagem		Unidade
		Reta	Helicodal	
Resistência ao número de tensão ao contato permitido <i>AGMA</i>	σ_{H_p}	1170,00	1170,00	MPa
Tensão ao Contato	σ_H	710,86	442,33	MPa
Fator de segurança ao contato	S_n	1,00	1,58	-
Dureza selecionada	H_b	481,00	243,00	-

Fonte: Autoria Própria (2023).

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que:

- A tensão ao crateramento segundo a norma *AGMA* em engrenagem com dentes retos é cerca de 38% maior se comparado à tensão ao crateramento em engrenagem com dentes helicoidais.
- A dureza *Brinell* do material da engrenagem helicoidal, desconsiderando-se a superfície dos dentes, é cerca de 50% menor em relação à dentes retos, o que representa um aumento na tenacidade do componente.

- O fator de segurança ao crateramento segundo a norma *AGMA* é 36% maior na engrenagem solar com dentes helicoidais se comparado à mesma engrenagem solar com dentes retos.
- Na aplicação do estudo, em uma transmissão *DYNA-VT*, a resistência mecânica relacionada ao crateramento na superfície de flanco dos dentes da engrenagem helicoidal é maior quando utilizado uma engrenagem solar de dentes helicoidais, aplicando-se um tratamento térmico de endurecimento superficial dos seus dentes por indução.
- A aplicação de dentes helicoidais no sistema resultará em uma redução na pressão de contato entre as superfícies curvas dos dentes da engrenagem solar e planetária, aumentando a vida útil do conjunto epicicloidal.

4.4.4.1 Variáveis modificadoras da tensão à flexão

As variáveis que compõem a fórmula da tensão à flexão que foram descritas no item 2.7.2.1, estão detalhados na Tabela 10. As equações podem ser encontradas em (NUNEZ, 2022).

Tabela 10 - Variáveis modificadoras da tensão à flexão

Variável	Símbolo	Engrenagem		Unidade
		Reta	Helicoidal	
Carga Tangencial	F_t	1886,98	1616,85	N
Fator de sobrecarga	K_0	2,75	2,75	-
Fator dinâmico	K_v	1,11	1,11	-
Fator de tamanho	K_s	1,09	1,09	-
Fator de distribuição de carga	K_H	1,26	1,26	-
Fator de espessura de borda	K_B	1,00	1,00	-
Módulo normal	m_n	6,00	-	-
Módulo Transversal	m_t	-	6,93	-
Largura da face da engrenagem	b	36,00	36,00	mm
Fator geométrico para dentes retos	Y_{Jr}	0,38	-	-
Fator geométrico para dentes helicoidais	Y_{JH}	-	0,48	-
Tensão de flexão	σ_F	96,97	57,42	Mpa

Fonte: Autoria Própria (2023).

4.4.5 Análise de resistência e fator de segurança à flexão

A análise da resistência à flexão e seu fator de segurança foram baseados na metodologia *AGMA*, em específico a mais atualizada, 2101 – D04 do ano de 2016, detalhada em (BUDYNAS, 2016) e apresentada no tópico 2.7.2.1 deste trabalho.

Para o fator de segurança à flexão, considerou-se o dado para dureza de 481 *Hb* calculada anteriormente. Desta vez, utilizou-se a Equação 10 e 11 para se encontrar a resistência ao número de tensão à flexão permitido e o fator de segurança à flexão.

$$\sigma_{Fp} = 0,533Hb + 88.3 \quad (10)$$

$$S_f = \frac{\sigma_{Fp}}{\sigma_F} \cdot \frac{Y_N}{Y_\Phi \cdot Y_Z} \quad (11)$$

A resistência ao número de tensão à flexão permitida *AGMA* não tem relação com a resistência ao escoamento do material, e seu valor também foi corrigido para o valor mais próximo conforme a tabelada da norma *AGMA*, presente no Anexo E deste trabalho. A Tabela 11 apresenta as variáveis que compõem o fator de segurança à flexão.

Tabela 11 – Variáveis do fator de segurança à flexão

Variável	Símbolo	Valor	Unidade
Resistência ao número de tensão à flexão permitida <i>AGMA</i>	σ_{Fp}	310	MPa
Fator de ciclagem para resistência à flexão	Y_N	0,94	-
Fator de confiabilidade	Y_Z	1,5	-
fator de temperatura.	Y_Φ	1	-

Fonte: Autoria Própria (2023).

Os resultados de tensões de flexão e fator de segurança obtidos estão descritos na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12 - Tensões e fator de segurança à flexão

Variável	Símbolo	Engrenagem		Unidade
		Reta	Helicodal	
Resistência ao número de tensão à flexão permitida AGMA	σ_{F_p}	310,00	310,00	MPa
Tensão à Flexão	σ_F	96,97	57,42	MPa
Fator de segurança à Flexão	S_f	2,00	3,38	-
Dureza selecionada	Hb	481,00	243,00	

Fonte: Autoria Própria (2023).

Analisando os resultados obtidos, pode-se observar que:

- A tensão à flexão segundo a norma *AGMA* em engrenagem com dentes retos é 40% maior se comparado à tensão de flexão em engrenagem com dentes helicoidais.
- A dureza *Brinell* do material da engrenagem helicoidal, desconsiderando-se a superfície dos dentes, é cerca de 50% menor em relação à dentes retos, o que representa um aumento na tenacidade do componente.
- O fator de segurança à flexão segundo a norma *AGMA* é 40% maior na engrenagem solar com dentes helicoidais se comparado à mesma engrenagem solar com dentes retos.
- Na aplicação do estudo, em uma transmissão *DYNA-VT*, a resistência mecânica relacionada à flexão dos dentes da engrenagem no cordão raiz é maior quando utilizado uma engrenagem solar de dentes helicoidais aplicando-se um tratamento térmico de endurecimento superficial dos seus dentes por indução.

5 CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS

No presente trabalho, foram realizados levantamentos com dados atualizados da ANFAVEA e catálogo das marcas *Massey Ferguson*, *John Deere*, *Valtra*, *Case* e *New Holland*, sobre os tipos de transmissão aplicada em tratores comercializados no Brasil, onde foi constatado que tratores de médio porte utilizam transmissão do tipo CVT hidrostático. Foi observado uma similaridade na geometria e funcionamento do sistema, utilizando bombas hidráulicas e um conjunto de engrenagens planetárias para a transmissão do torque do motor, tanto em marcas que tenham a fabricação própria da transmissão, assim como as que utilizam o sistema fabricado pela AGCO, a qual é proprietária das marcas *Massey Ferguson*, *Fendt* e *Valtra*.

Alinhado às novas tecnologias de transmissão em máquinas agrícolas, a expansão da agronomia 4.0 busca automatizar e melhorar a eficiência das máquinas em campo durante o período de plantio, cultivo e colheita. Para tal fim, a aplicação de um Gêmeos Digitais seria eficiente nas diversas aplicações da indústria de máquinas agrícolas, pois abrem portas para estudos e análises (simulações) em todos os sistemas do trator, tanto na parte de projeto como na manutenção.

Em busca de informações teóricas básicas para o início do estudo de caso, foi realizada uma pesquisa no site da *Massey Ferguson* e *Fendt*. Também em repositórios online para encontrar imagens e vídeos dos componentes interno e funcionamento do sistema completo. Além disso, uma visita técnica à concessionária da marca foi feita para uma conversa com o técnico responsável, a fim de sanar algumas dúvidas de funcionamento do conjunto de transmissão.

Utilizando os dados obtidos na concessionária, representou-se como ferramenta auxiliar dos estudos, o Gêmeo Digital simplificado da transmissão CVT DYNA-VT em plataforma CAD. O objetivo da representação consistiu em buscar a compreensão aprofundada do funcionamento do sistema e propor melhorias dos componentes internos do CVT.

Para o estudo de caso, identificou-se em imagens da transmissão, a aplicação de engrenagens cilíndricas de dentes retos no sistema planetário do conjunto. O objetivo desta etapa foi a proposição da substituição das engrenagens retas por engrenagens helicoidais, com a finalidade de se analisar a resistência à flexão e ao contato dos dentes em pontos específicos, buscando um conjunto mais resistente para a aplicação nos tratores agrícolas.

Para embasar tecnicamente as análises, os cálculos analíticos deste trabalho se basearam na norma ANSI/AGMA 2101 – D04 (2016), que é referência internacional em estudos de engrenagens de dentes retos e helicoidais, trazendo confiabilidade e robustez às análises e variáveis que compõem o estudo devido sua precisão, simplicidade e um protocolo detalhado dos passos a serem seguidos durante o desenvolvimento do projeto.

Ao realizar o comparativo entre a engrenagem solar de dentes retos e helicoidais, buscou-se avaliar a resistência à fadiga do crateramento nos flancos dos dentes, e a flexão no cordão raiz do dente, além do cálculo do fator de segurança para cada tópico.

É importante ressaltar que a aplicação da norma AGMA foi efetiva para concluir qual perfil de engrenagem, seja reta ou helicoidal, é mais resistente para ser aplicado na transmissão CVT DYNA-VT utilizada nos tratores da Massey Ferguson. Os resultados comprovaram que a utilização de engrenagens solares helicoidais é mais eficaz, uma vez que apresentam menores tensões de flexão e de contato, resultando em um maior fator de segurança e, conseqüentemente, maior resistência do conjunto. Portanto, recomenda-se substituir as demais engrenagens do sistema epicíclico por engrenagens helicoidais para garantir o correto engrenamento do conjunto.

Em futuros trabalhos, é recomendável realizar uma análise comparativa utilizando outras normas e métodos para o cálculo das tensões de flexão e de contato dos dentes das demais engrenagens. Além disso, sugere-se explorar uma maior integração do Gêmeo Digital com a inteligência artificial aplicada na agricultura atual. Essas melhorias podem contribuir para aprimorar ainda mais o estudo e obter resultados mais abrangentes e precisos.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. C. **Elementos de máquinas: projeto de sistemas mecânicos**. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555064933/pageid/25>>. Acesso em: 22 out. 2022.

ANSI/AGMA 2101-D04. Disponível em: <https://members.agma.org/MyAGMA/MyAGMA/Store/Item_Detail.aspx?iProductCode=2101-D04&Category=STANDARDS>. Acesso em: 15 out. 2022.

ASSIS, A. et al. DOWNSIZING DE MOTORES ASSOCIADO AO USO DE TURBOCOMPRESSOR. p. 16, 2016.

AUTOMAÇÃO, H. T. **Bomba de pistão axial**. Disponível em: <<https://www.henrytechautomacao.com.br/bomba-pistao-axial>>. Acesso em: 9 maio. 2022.

BELLOCHIO, S. D. C. et al. FROTA ATUAL DE TRATORES POR TEMPO DE USO NO BRASIL. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 3, p. 154–159, 9 nov. 2017.

BUDYNAS, R. **Elementos de Máquinas de Shigley**. [s.l: s.n.].

DA CUNHA, J. P. A. R.; VIANA DUARTE, M. A.; DE SOUZA, C. M. A. Vibração e ruído emitidos por dois tratores agrícolas. **Idesia (Arica)**, v. 30, n. 1, p. 25–34, abr. 2012.

DELGADO, L. M. Las transmisiones: el escalonamiento de las marchas. **Agrotécnica**, n. 10, p. 55–62, 2004.

DEPETRIS, A. **Desenvolvimento e aplicação de um programa em MatLab Simulink para a simulação do desempenho de veículos rodoviários comerciais em movimento acelerado**. text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 26 set. 2005.

DUARTE, B. T.; BARRETO, J. R. Análise de Dinâmica Veicular do Protótipo Baja SAE. p. 177, 2016.

FARIAS, M. S. DE. **Economia de combustível de tratores agrícolas utilizando diferentes transmissões e estratégia de condução**. Tese—[s.l.] Universidade Federal de Santa Maria, 19 ago. 2016.

Fendt | Empresa - Fendt. Disponível em: <<https://www.fendt.com/br/empresa/fendt>>. Acesso em: 7 maio. 2022.

FILHO, M.; SOLANO, J. M. **Projeto e dimensionamento de trens de engrenagens para fins comparativos em relação aos tamanhos, massas e aplicações**. TCC. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br>>. Acesso em: 26 out. 2022.

GOERING, C. E. Engine and tractor power. **Engine and tractor power.**, 1989.

GREGÓRIO. **Manutenção industrial.** Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788595026971/pageid/17>>. Acesso em: 19 maio. 2022.

Linha de tratores agrícolas Steiger CASE. Disponível em: <<https://www.caseih.com/latam/pt-br/Pages/Produtos/Tratores/Linha-Steiger/Steiger.aspx?TermStoreId=bf664b5b-1400-42d7-a6ad-252c2104f802&TermSetId=07a6e078-8252-4af3-8ad6-fea73afb3c3f&TermId=19a2341f-ca03-449e-9488-cd53ae964938>>. Acesso em: 9 maio. 2022.

I4.0, H. **Agricultura 4.0 será debatida durante o Fórum Brasil África 2019. HUB i4.0**, 20 set. 2019. Disponível em: <<https://www.hubi40.com.br/agricultura-4-0-sera-debatida-durante-o-forum-brasil-africa-2019/>>. Acesso em: 11 maio. 2022

LEAL, F. et al. UMA PROPOSTA DE TÉCNICA DE MODELAGEM CONCEITUAL PARA A SIMULAÇÃO ATRAVÉS DE ELEMENTOS DO IDEF. p. 12, 2008.

LINARES. **Design parameters for continuously variable power-split transmissions using planetaries with 3 active shafts | Elsevier Enhanced Reader.** Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0022489810000364?token=C823884F2B343E0334F27CC1D3F456C7D3E5E7D90855AF275495BD5E3285718BC1107483D6C41C9643CD7C0FBCEDAF92&originRegion=us-east-1&originCreation=20220525130139>>. Acesso em: 25 maio. 2022.

Linha BH G4 de Tratores Unindo Inovação e Tradição | Valtra. Disponível em: <<https://www.valtra.com.br/produtos/tratores/bh-g4.html>>. Acesso em: 9 maio. 2022.

MAGÓ, L.; CVETANOVSKI, A. Smart Attached Working Equipment in Precision Agriculture. **HUNGARIAN AGRICULTURAL ENGINEERING**, n. 35, p. 5–12, 2019.

MANSANO, A. D. P.; BARRETO, M. A. Z. ESTUDO DA DINÂMICA DOS SISTEMAS DE ENGRENAGENS PLANETÁRIAS. p. 1, [s.d.].

MARQUES, F.; FLORES, P. Órgãos de Máquinas II - Análise e Síntese de Trens de Engrenagens. Em: [s.l: s.n.].

MICHALAK, C. H. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ COORDENAÇÃO DE MECÂNICA ENGENHARIA MECÂNICA. p. 56, 2017.

NORTON. **Cinemática e Dinâmica dos Mecanismos.** [s.l: s.n.].

NUNEZ, D. L. **Análise da resistência à flexão e ao crateramento de uma engrenagem cilíndrica de dentes retos e helicoidais: avaliação da eficácia da norma ANSI/AGMA 2101-D04.** [s.l.] Preprints, 21 jul. 2022. Disponível em: <<https://www.authorea.com/users/336192/articles/462559-an%C3%A1lise-da-resist%C3%Aancia-%C3%A0-flex%C3%A3o-e-ao-crateramento-de-uma-engrenagem-cil%C3%ADndrica-de-dentes-retos-e-helicoidais-avalia%C3%A7%C3%A3o-da-efic%C3%A1cia-da-norma-ansi-agma-2101-d04?commit=ae771394e8ffc75df1e527667be8390db518761d>>. Acesso em: 22 out. 2022.

OCHOA, V.; PEIXOTO, J.; BORIN, A. AUTOGEMINI - Gêmeos Digitais na Indústria 4.0. **Salão Integrado de Ensino, Pesquisa e Extensão da Uergs (SIEPEX)**, v. 1, n. 10, 13 nov. 2021.

ORTIZ-CAÑAVATE, J. Características técnicas de los tractores agrícolas. p. 3, 1994.

PAHL ET AL. **Projeto na Engenharia**. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521215516/pageid/17>>. Acesso em: 3 jun. 2022.

PALUDO, V. et al. RENDIMENTO OPERACIONAL DE UM TRATOR COM DIFERENTES SISTEMAS DE TRANSMISSÃO NA OPERAÇÃO DE SUBSOLAGEM. p. 6, 2014.

PARROT; WARSHAW, , 2017. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/industry-4-0/digital-twin-technology-smart-factory.html>>

QUINALHA, E. GÊMEOS DIGITAIS, O FUTURO DA INDÚSTRIA 4.0: ESTUDO DE CASO. p. 61, 2018.

REIS, G. N. DOS et al. Manutenção de tratores agrícolas e condição técnica dos operadores. **Engenharia Agrícola**, v. 25, n. 1, p. 282–290, abr. 2005.

RIBAS, R. L. et al. Transmissões presentes em tratores agrícolas no Brasil. **Ciência Rural**, v. 40, n. 10, p. 2206–2209, 8 out. 2010a.

RIBAS, R. L. et al. Transmissões presentes em tratores agrícolas no Brasil. **Ciência Rural**, v. 40, n. 10, p. 2206–2209, 8 out. 2010b.

SASENA, M. Simulink as a Platform for Full Vehicle Simulation. p. 78, [s.d.].

SCHLOSSER, J. F. et al. Agricultural tractor engines from the perspective of Agriculture 4.0. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA**, v. 51, n. 5, 2020.

SILVA, F. DE A.; CHAVES, C. A.; GUIDI, E. S. Análise de falha por fadiga em eixo de transmissão utilizando o método dos elementos finitos. **São Paulo**, v. 14, n. 2, p. 15, 2016.

T9 PLM INTELLIGENCE TM. Disponível em: <<https://agriculture.newholland.com/lar/pt-br/equipamento/produtos/tl/t9-plm-intelligence>>. Acesso em: 7 maio. 2022.

Tratores cabinados | Tratores Série 5E | John Deere BR. Disponível em: <<https://www.deere.com.br/pt/tratores/s%C3%A9rie-5e-pequenos/>>. Acesso em: 7 maio. 2022.

WOLF, P. PROJETO PRELIMINAR DE UM REDUTOR PLANETÁRIO COM MÚLTIPLAS ENTRADAS. p. 90, 2021.

ANEXO A - CATÁLOGO MASSEY FERGUSON SÉRIE F 8700

TRATORES SÉRIE

MF 8700S Dyna-VT

295 – 370 cv

Inacreditável. Extraordinário. O maior trator Massey Ferguson Brasil.

SUPORTA CONDIÇÕES EXTREMAS DE TERRENO

MÁXIMO DE POTÊNCIA, MÁXIMO DE TECNOLOGIA, MÁXIMO EM PRODUTIVIDADE

IDEAL PARA TRABALHAR COM GRANDES IMPLEMENTOS EM LONGAS JORNADAS

MF 8700S Dyna-VT. O MAIOR TRATOR MASSEY FERGUSON BRASIL.

QUEM ACREDITA FAZ COM O CORAÇÃO



www.masseyferguson.com.br  masseyfergusonbr  masseyfergusonbr  masseyfergusonbr

MF 8700S Dyna-VT. O MAIOR TRATOR MASSEY FERGUSON BRASIL.

	MF 8730S Dyna-VT	MF 8732S Dyna-VT	MF 8735S Dyna-VT	MF 8737S Dyna-VT
Tração	4x4			
MOTOR				
Modelo	AGCO Power			
Potência máxima cv @ 1900 rpm	ISO TR14396 295	320	350	370
Torque máximo N.m @ 1500 rpm	ISO TR14396 1300	1500	1530	1590
Cilindrada (cm³)	8400			
N. de cilindros - aspiração	6 - Turbo duplo stage 2 com Resfriador			
Sistema de injeção	Common rail			
EMFREAGEM				
Diâmetro do disco (mm)	Eletro-hidráulico			
TOMADA DE POTÊNCIA				
Tipo	Independente			
Acionamento	Eletro-Hidráulico no apoio de braço do assento e nos paralamas traseiros, com automação para manobra de cabeceira			
Velocidades (rpm - rpm do motor)	1000 - 1970 / 1000E - 1605			
Opções de velocidades (rpm)	1000/1000E			
Potência máxima (cv) - rot.motor	250	275	300	320
TRANSMISSÃO				
Tipo de transmissão	Dyna-VT			
Tipo km/h	Transmissão automática de variação contínua com DTM (Dynamic Tractor Management)			
Velocidade máxima no modo Trabalho km/h	0,03 - 28 km/h em marcha para a frente e 0,03 - 16 km/h em marcha ré			
Velocidade máxima no modo Transporte km/h	0,03 - 40 km/h* em marcha para a frente e 0,03 - 38 km/h em marcha ré 40 km/h Eco as 1400 rpm			
SISTEMA HIDRÁULICO TRASEIRO				
Tipo de bomba	Bomba de pistão (vazão variável)			
Vazão de bomba (l/min)	205			
Capacidade de levantar máx. Olhal (kgf)	12.000			
Válvula de controle remoto	6 válvulas eletrônicas, sendo 4 em botões e 2 em joystick			
Controle remoto - vazão (lpm)	175			

	MF 8730S Dyna-VT	MF 8732S Dyna-VT	MF 8735S Dyna-VT	MF 8737S Dyna-VT
SISTEMA HIDRÁULICO DIANTEIRO				
Capacidade máxima de elevação na rútila	5.000			
Regime do motor a uma velocidade de tomada de força dianteira de 1000 rpm	2036			
FREIOS				
Tipo	Atuação hidráulica com resfriamento de óleo			
Acionamento	Hidráulico			
Freio de estacionamento - tipo	Hidráulico integrado com alavanca do reversor			
DIREÇÃO				
Tipo	Hidroestática com coluna de estarcimento telescópica			
Raio de giro c/freio - s/freio (mm)	8400 / 7400			
DIMENSÕES C/ PNEUS STD				
Distância entre eixos (mm)	3100			
Comprimento total (mm)	5552			
Altura total (mm)	3515			
CAPACIDADES				
Tanque de combustível (l)	630			
POSTO DE OPERAÇÃO				
Tipo	Cabine			
TECNOLOGIA EMBARCADA				
Piloto Automático Hidráulico				
Massey Ferguson Guide – Centimétrico				
O trator possui duas opções de receptor GNSS: Trimble e NovAtel (consultar preferências e/ou estrutura do cliente para definir a opção que melhor se adequa).				



MASSEY FERGUSON É UMA MARCA MUNDIAL DA AGCO. Este material contém o resumo das informações do Produto, cujas especificações podem ser alteradas a qualquer tempo, sem aviso prévio. A configuração da versão standard pode ser diferente das fotos ilustrativas. Por isso, antes de comprar, sempre confirme todas as informações do Produto com a concessionária de sua região. FOP/MF-8700S-DYNA-VT/FV/MAR-2021



Disponível em: https://www.masseyferguson.com/pt_br/product/tractors/mf-8700-s.html

ANEXO B - CATÁLOGO VALTRA SÉRIE T



SÉRIE T CVT 195 - 250 CV

TECNOLOGIA PARA ELEVAR A PERFORMANCE

- MAIS HECTARES/DIA**
TRANSMISSÃO CVT
- 25% MAIS ECONOMIA DE COMBUSTÍVEL**
MOTOR AGCO POWER
- MAIS DURABILIDADE**
SISTEMA HIDRÁULICO ELETRÔNICO

VALTRA **SUA MÁQUINA DE TRABALHO**

SÉRIE T CVT

Valtra.com.br

0800 729 22 11

ValtraBrasil

ValtraBrasil

ValtraBR

ESPECIFICAÇÕES	T195 CVT	T210 CVT	T230 CVT	T250 CVT
MOTOR				
Modelo	66 DW3 AGCO Power		74 DW3 AGCO Power	
Potência máxima - 1.850 rpm @ SAE J1995 - cv	195	210	230	250
Torque máximo @ 1.800 (N.m)	880	900	976	1.000
Cilindrada - cm ³	8.800		7.400	
N. Cilindros - Aspiração	8 cilindros - Turbo Intercooler			
Sistema de injeção	Common Rail			
TOMADA DE POTÊNCIA				
Tipo	Independente			
Aoionamento	Eletra-hidráulico por multidisco			
Velocidades - rpm	640/1000			
Potência máxima TDP dianteira - cv @ rpm	187 @ 1000 (sentido horário) 204 @ 1000 (sentido anti-horário)			
Potência máxima TDP traseira @ 2.100 rpm - cv	175	185	205	220
TIPO DE TRANSMISSÃO				
Tipo de transmissão	DVT - Continuamente Variável			
Posição dos comandos	Coystok no apoio de braço			
Faixa de velocidades - Campo	0,03 a 28 km/h			
Faixa de velocidades - Transporte	0,03 a 40 km/h			
Power Control DTM	Desenvolvimento dinâmico do trator: mantém a velocidade de deslocamento do conjunto ajustando automaticamente a potência (velocidade do motor) de acordo com a carga			
FREIOS				
Aoionamento	Hidráulico / Pneumático			
Freio de estacionamento	Com Park Lock; controle eletro-hidráulico e aoionamento mecânico ou alavanca			
DIREÇÃO				
Tipo	Direção hidroestática com Quick Steering (redução de voltas no volante para manobras de esboceira)			
CAPACIDADES				
Tanque de combustível - litros	600			
SISTEMA HIDRÁULICO				
Vazão máxima - litros/min	180			
Pressão máxima - kgf/cm ²	200			
Capacidade de levantar traseiro - kgf	8.800		9.950	
Capacidade de levantar dianteiro - kgf	4.000			
Controles	Eletrônico com controle de posição, profundidade, reação e amortecimento para transporte			

ESPECIFICAÇÕES	T195 CVT	T210 CVT	T230 CVT	T250 CVT
CONTROLE REMOTO				
Tipo	Centro fechado com controle de fluxo de pressão			
Bomba	Bomba de pistão			
Número de válvulas	4 traseiras / 2 dianteiras*			
Aoionamentos das válvulas	2 eletrônicas e 2 por alavancas ou 4 eletrônicas (Coystok+finger tips ou finger tips+finger tips)			
RODADOS				
	18,8-28 R1 + 24,5-32 R1			
	18,8-30 R1 + 20,8-42 R1 Duplo			
	800/85R28 + 710/70R28			
	18,8-28 R1 + 30,5-32 R1			
	18,8-28 R1 + 20,8-38 R1 Duplo			
	800/85 R28 + 820/85 R42 Duplo			
*Consulte seu concessionário/Pacote de Vendas				
POSTO DE OPERAÇÃO				
Cabine	Integrada			
Opcional	Com suspensão mecânica			
TECNOLOGIA EMBARCADA				
Piloto Automático				
Piloto Automático (Ready)				
Valtra Guide, by Trimble Centimétrico (Rádio RTM Trimble ou Catel) (Opc)				
Valtra Guide, by Trimble Decimétrico (Opc)				
O trator, quando preparado para trabalhar com piloto automático, já estará compatível com o Valtra Guide, by Trimble e o Auto Guide 3000, que podem ser adquiridos através do canal de vendas no site de concessionárias.				
DIMENSÕES 4x4 COM PNEU STANDARD (710/70 R38)				
Distância entre eixos - mm	2.873			
Comprimento total - mm	5.514			
Comprimento com levante frontal - mm	5.818			
Altura total com antena Auto Guide - mm	3.044			
Largura total - mm	2.650			
Vão livre na barra de tração - mm	417 - 517			
BITOLAS				
Bitola dianteira (mín-máx) - mm	1.722 - 2.400			
Bitolas traseira (mín-máx) - mm	1.808 - 2.981			

Este material contém o resumo das informações do Produto, cujas especificações podem ser alteradas a qualquer tempo, sem aviso prévio. A configuração de versão standard pode ser diferente das fotos ilustrativas. Por isso, antes de comprar, sempre confirme todas as informações do Produto com a concessionária de sua região. FOP/VT/T-DVT/F/V1/MAIO-2021



VALTRA é uma marca mundial de AGCO.

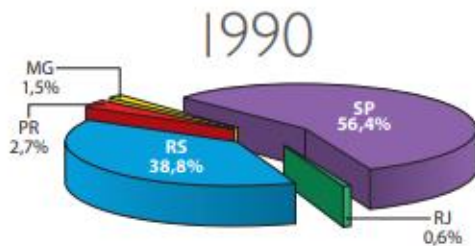
Disponível em: <https://www.valtra.com.br/produtos/tratores/serie-tcvt.html>

**ANEXO C - CATÁLOGO ANFAVEA DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS FABRICADAS
NO BRASIL**

Máquinas agrícolas e rodoviárias: produção, vendas internas e exportações
 Agricultural and highway construction machinery: production, domestic sales and exports

Produção por Unidade da Federação – 1990, 2017, 2018 e 2019

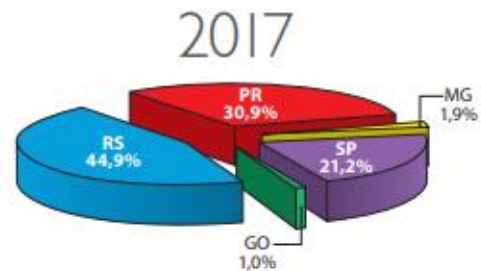
Production by state – 1990, 2017, 2018 and 2019



Estados / States	Empresas / Companies
Rio Grande do Sul	Agrale, Ideal, Maxion, SLC
Paraná	Ford New Holland
São Paulo	Caterpillar, CBT, Engesa, Ford New, Holland, JI Case, Komatsu, Kubota, Valmet, Yanmar
Rio de Janeiro	Muller
Minas Gerais	Fiat Allis

Máquinas agrícolas automotrizas produzidas / Agricultural and highway construction machinery

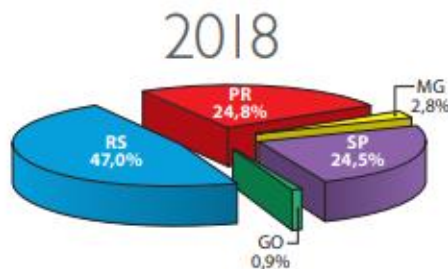
33.114



Estados / States	Empresas / Companies
Rio Grande do Sul	Agco, Agrale, John Deere
Paraná	CNH, Caterpillar
Minas Gerais	CNH
São Paulo	CNH, Caterpillar, Komatsu, Valtra

Máquinas agrícolas automotrizas produzidas / Agricultural and highway construction machinery

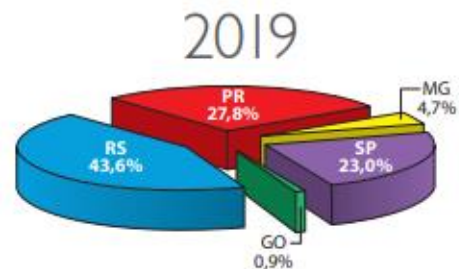
53.043



Estados / States	Empresas / Companies
Rio Grande do Sul	Agco, Agrale, John Deere
Paraná	CNH, Caterpillar
Minas Gerais	CNH
São Paulo	CNH, Caterpillar, John Deere, Komatsu, Valtra
Goiás	John Deere

Máquinas agrícolas automotrizas produzidas / Agricultural and highway construction machinery

65.656



Estados / States	Empresas / Companies
Rio Grande do Sul	Agco, Agrale, John Deere
Paraná	CNH, Caterpillar
Minas Gerais	CNH
São Paulo	CNH, Caterpillar, John Deere, Komatsu, Valtra
Goiás	John Deere

Máquinas agrícolas automotrizas produzidas / Agricultural and highway construction machinery

53.125

Disponível em: <https://anfavea.com.br/anuario2020/anuario.pdf>

**ANEXO D - TABELA DE RESISTÊNCIA AO NÚMERO DE TENSÃO AO
CONTATO PERMITIDA - NORMA AGMA 2101 – D04**

Material designation	Heat treatment	Minimum surface hardness ¹⁾	Allowable contact stress number ²⁾ , σ_{HP} N/mm ²		
			Grade 1	Grade 2	Grade 3
Steel ³⁾	Through hardened ⁴⁾	see figure 6)	see figure 6)	see figure 6)	--
	Flame ⁵⁾ or induction hardened ⁵⁾	50 HRC	1170	1310	--
		54 HRC	1205	1345	--
	Carburized & hardened ⁵⁾	see table 9	1240	1550	1895
			1035	1125	1205
Nitrided ⁵⁾ (through hardened steels)		83.5 HR15N	1070	1160	1240
		84.5 HR15N	1070	1185	1305
2.5% Chrome (no aluminum)	Nitrided ⁵⁾	87.5 HR15N	1170	1260	1345
Nitralloy 135M	Nitrided ⁵⁾	90.0 HR15N	1185	1300	1415
Nitralloy N	Nitrided ⁵⁾	90.0 HR15N	1215	1350	1490

**ANEXO E - TABELA DE RESISTÊNCIA AO NÚMERO DE TENSÃO À FLEXÃO
PERMITIDA - NORMA AGMA 2101 – D04**

Material designation	Heat treatment	Minimum surface hardness ¹⁾	Allowable bending stress number ²⁾ , σ_{FP} N/mm ²		
			Grade 1	Grade 2	Grade 3
Steel ³⁾	Through hardened	see figure 9	see figure 9	see figure 9	--
	Flame ⁴⁾ or induction hardened ⁴⁾ with type A pattern ⁵⁾	see table 8	310	380	--
	Flame ⁴⁾ or induction hardened ⁴⁾ with type B pattern ⁵⁾	see table 8	150	150	--
	Carburized & hardened ⁴⁾	see table 9	380	450 or 485 ⁶⁾	515
	Nitrided ⁴⁾ 7) (through hardened steels)	83.5 HR15N	see figure 10	see figure 10	--
	Nitrided ⁴⁾ 7)	87.5 HR15N	see figure 11	see figure 11	see figure 11
Nitralloy 135M, Nitralloy N, and 2.5% Chrome (no aluminum)					