



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE TRATORES  
UTILIZANDO A ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS (FAULT TREE  
ANALYSIS - FTA).**

**JULIANO AMARAL FERNANDES**

**Belo Horizonte, 09 de março de 2007**

Juliano Amaral Fernandes

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE TRATORES  
UTILIZANDO A ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS (FAULT TREE  
ANALYSIS - FTA).**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Projeto Mecânico

Orientadora: Profa. Maria Lúcia Machado Duarte  
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Co-orientador: Prof. Alexandre Carlos Eduardo  
(Universidade Federal de Minas Gerais)

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG

2007



**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**

Av. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha - 31.270-901 - Belo Horizonte – MG

Tel.: +55 31 3499-5145 - Fax.: +55 31 3443-3783

www.demec.ufmg.br - E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE COMBUSTÍVEL DE TRATORES  
UTILIZANDO A ANÁLISE DA ÁRVORE DE FALHAS (FAULT TREE  
ANALYSIS - FTA).**

**JULIANO AMARAL FERNANDES**

Dissertação defendida em 09 de Março de 2007, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "Projeto Mecânico"

---

Prof.a Maria Lúcia Machado Duarte, Ph.D. - (UFMG) - Orientadora

---

Prof. Dr. Alexandre Carlos Eduardo - (UFMG) – Co-orientador

---

Prof. Dr. Jorge Nei Brito - (UFSJ) - Examinador

---

Prof. Dr. Ramon Molina Valle - (UFMG) – Examinador

*"O mundo é um lugar perigoso de se viver, não por causa daqueles que fazem o mal, mas sim por causa daqueles que observam e deixam o mal acontecer"*  
(Albert Einstein)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABELAS	7
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	8
NOMENCLATURA	9
RESUMO	11
ABSTRACT	12
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Contextualização.	15
1.2 Justificativa do trabalho	17
1.3 Relevância	18
1.4 Objetivos do trabalho	18
1.5 Estrutura do trabalho.	19
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Comportamento mecânico de tratores	21
2.1.1 Introdução	21
2.1.2 Definições	23
2.1.3 Cronologia da mecânica de tratores	27
2.1.4 Formulações matemáticas para o consumo de combustível	28
2.1.5 Métodos utilizados nas medições de desempenho de tratores.	33
2.2 Análise da Árvore de Falhas (FTA)	37
2.2.1 Elementos básicos da Árvore de Falhas	39
2.2.2 Regras básicas para a construção da FTA	41
CAPÍTULO 3 METODOLOGIA DO TRABALHO	43
3.1 Aplicação da técnica da Análise de Árvore de Falhas	43
3.1.1 Definição do evento principal (efeito indesejado)	43

3.1.2	Definição das causas que podem acarretar no evento principal	43
3.1.3	Separação de causas responsáveis por diversos eventos	44
3.1.4	Determinação das relações lógicas entre causas	44
3.1.5	Eliminação das causas para evitar o evento principal	44
3.2	Apresentação da Árvore de Falhas	44
3.2.1	Patinagem ( <i>TR</i> )	46
3.2.2	Fatores de operação	49
3.2.3	Falhas no combustível	50
3.2.4	Fatores ambientais	52
3.2.5	Falhas do equipamento	54
3.2.6	Falhas no sistema de aquisição de dados	60
<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS</b>		<b>62</b>
4.1	Simulação computacional do modelo para o consumo de combustível	62
4.2	Influência da patinagem no consumo de combustível	65
4.3	Método para a escolha do sistema trator-implemento	67
4.4	Análise da potência de serviço / rotação através do consumo médio.	69
4.5	Estudo de Caso	71
4.5.1	Determinação prática do consumo de combustível	72
4.5.2	Aplicação da FTA nos controles de abastecimento.	72
<b>CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES</b>		<b>76</b>
5.1	Conclusões	76
5.2	Diretrizes para economia de combustível em tratores	78
5.2.1	Manutenção	78
5.2.2	Operação	80
5.2.3	Gerência e Controladores:	81
5.3	Sugestões para trabalhos futuros	82
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>		<b>85</b>
<b>ANEXO A</b>		<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – Diagrama de forças atuantes em um trator com tração traseira .....	22
FIGURA 2.2 – Transdutores de torque e tração .....	25
FIGURA 2.3 – Esquema do protótipo para a medição do consumo de combustível em tratores.....	35
FIGURA 3.1 – FTA para a variação no consumo de combustível.....	45
FIGURA 3.2 – Eficiências de tração, perdas de velocidade e de força de tração .....	46
FIGURA 3.3 – Árvore de Falhas para a patinagem.....	48
FIGURA 3.4 – Curva de desempenho de um motor Diesel e curvas de isoconsumo .....	49
FIGURA 3.5 – Desempenho de tração de pneus duplos 20.8R42 em três superfícies....	53
FIGURA 3.6 – Diagrama esquemático do Sistema de Alimentação de Combustível CAT 3306B .....	55
FIGURA 3.7 – Relações de potência aproximadas para tratores agrícolas .....	58
FIGURA 4.1 – Gráfico da estimativa do Fator de Potência .....	63
FIGURA 4.2 – Gráfico do consumo vs. fator de potência (aceleração máxima). .....	63
FIGURA 4.3 – Gráfico do consumo de combustível e decréscimo no consumo em função da taxa de redução da rotação do motor.....	64
FIGURA 4.4 – Gráfico da economia de combustível em função da redução na rotação do motor, para um trator com $P_{pto} = 86,47$ kW e fator de potência de 0,641.....	65
FIGURA 4.5 – Gráfico da patinagem vs consumo de combustível ( $\eta_{tr} = 0,9$ e $SVFC = 0,250$ kg/kW.h). .....	66
FIGURA 4.6 – Consumo de combustível para cargas parciais e rotações reduzidas para o trator de pneus Valmet 128 4x4. ....	70

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 2.1 – Simbologia utilizada na construção da árvore de falhas.....</b>	<b>40</b>
<b>TABELA 4.1 – Dados do Trator John Deere 7610 Powershift .....</b>	<b>62</b>
<b>TABELA 4.2 – Simulação do consumo de combustível para tratores específicos.....</b>	<b>68</b>
<b>TABELA 4.3 – Especificações Técnicas Trator VALMET 128 4x4 .....</b>	<b>69</b>
<b>TABELA 4.4 – Valores próximos do consumo real.....</b>	<b>71</b>
<b>TABELA 1.1 – Planilha de abastecimentos do trator agrícola TP 09 – Agosto/05 .....</b>	<b>74</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CMM	Consumo Médio Mensal
FTA	Análise de Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis)
SVFC	Consumo de Combustível Volumétrico Específico
ASAE	Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas
CVT	Transmissão Continuamente Variável (Continuously Variable Transmission)
IVT	Transmissão Infinitamente Variável (Infinitely Variable Transmission)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (Global Positioning System)

## NOMENCLATURA

<i>AHP</i>	Potência no Eixo de Tração [HP]
<i>ARPM</i>	Rotação do Eixo de Tração [RPM]
<i>SA</i>	Velocidade atual do trator [MPH].
<i>B</i>	Coordenada horizontal do ponto de aplicação da força pelo Implemento [pol].
<i>D</i>	Decréscimo no consumo de combustível [%].
<i>DBHP</i>	Potência da Barra de Tração [HP].
<i>DH</i>	Altura da barra de tração [pol].
<i>DR</i>	Razão Dinâmica [adimensional]
<i>DWC</i>	Coefficiente Dinâmico de Transferência de Peso [adimensional]
<i>FES</i>	Rotação de Trabalho [RPM].
<i>FWS</i>	Peso Estático dianteiro [Lbs].
<i>GR</i>	Razão de Engrenamento total entre o motor e o eixo de tração [adimensional].
<i>H</i>	Coordenada vertical do ponto de aplicação da força pelo implemento [pol].
<i>h</i>	Horímetro [H].
<i>HI</i>	Rotação máxima do motor, sem carga [RPM].
<i>LR</i>	Raio efetivo de Rolamento do Pneu [Pol].
<i>N</i>	Taxa de Rotação do motor [%].
<i>P</i>	Força da Barra de Tração[Lbs] (Componente horizontal da força Total, R)
<i>Q</i>	Consumo de Combustível [L].
<i>R</i>	Resultante das Forças Trator-Implemento [Lbs].
<i>Rated</i>	Rotação nominal do motor [RPM].
<i>RWD</i>	Peso Dinâmico Traseiro [Lbs].
<i>RWS</i>	Peso Estático traseiro [Lbs].
<i>SO</i>	Velocidade periférica da roda carregada ou velocidade “sem Carga”[MPH]
<i>SVFC</i>	Consumo de Combustível Volumétrico Específico [L/kW.h]
<i>T</i>	Torque no Eixo [pol.Lbs]
<i>TE</i>	Eficiência de Tração [adimensional]
<i>TRR</i>	Patinagem [%].
<i>WB</i>	Base da Roda [pol].
<i>WSP</i>	Razão Peso, Velocidade, razão de Potência [adimensional].

$WT$	Peso Total do Trator [Lbs].
$X$	Relação entre a potência equivalente e a potência nominal da tomada de força [adimensional].

#### Letras Gregas

$\theta$	Ângulo de aplicação da Força (traçado abaixo da linha horizontal), rad.
$\eta$	Eficiência, [adimensional]

#### Subscritos

$F$	Aceleração total
$R$	Rotação reduzida
$pto$	Tomada de força
$i$	Operação Específica
$red$	Redução
$tr$	Transmissão
$c$	Combustível
$m$	Médio
$Dec$	Decréscimo

## RESUMO

Neste trabalho é proposta uma metodologia para a determinação de fatores que influenciam na variação do consumo de combustível de tratores através da Técnica de Análise da Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis – FTA). O sistema mecânico de um trator com tração traseira é modelado matematicamente, dando ênfase aos parâmetros responsáveis pelo seu desempenho. A partir da definição de tais parâmetros, como por exemplo, peso dinâmico traseiro, patinagem, coeficiente dinâmico de transferência de peso e fator de potência, dentre outros, as equações que regem o consumo de combustível são descritas com o objetivo de serem utilizadas na predição dos diversos tipos de consumo de combustível de tratores. A FTA, normalmente utilizada para detecção de falhas, é utilizada para se determinar os fatores que, direta ou indiretamente, afetam o consumo de combustível, sendo este o principal objetivo deste trabalho. Alguns fatores são quantificados através da literatura e utilizados na construção da Árvore de Falhas. Uma FTA é desenvolvida para evidenciar os eventos responsáveis pela variação no consumo. Simulações computacionais são realizadas com o objetivo de analisar as variáveis presentes nas equações de consumo de combustível (fator de potência e a rotação do motor, por exemplo); analisar a influência da patinagem no consumo de combustível, apresentar uma metodologia para a escolha do sistema trator-implemento e fazer uma análise da potência de serviço e da rotação do motor através do consumo médio. É mostrado um estudo de caso real, onde a FTA apresentada é utilizada na detecção das causas responsáveis pela variação do consumo médio mensal de tratores durante operações de campo. Os resultados mostraram que a metodologia proposta utilizando a FTA apresentou resultados satisfatórios na determinação da influência de cada fator no consumo de combustível.

**Palavras chaves: (FTA, Árvore de Falhas, consumo de combustível, tratores)**

## ABSTRACT

In the present study a methodology for determining the factors affecting the fuel consumption variation in tractors using the Fault Tree Analysis technique is presented. The mechanical system of a rear traction tractor is mathematically modeled and the parameters responsible for the tractor performance are emphasized. From the definition of such parameters, for example, rear weight dynamic, slip, dynamic weight coefficient and ratio of power, among others, the equations governing the fuel consumption are described in order to be used for the prediction of the several types of tractors fuel consumption expressions.

The FTA, normally used for fault detection, can be used to determine the factors that, directly or indirectly affect the fuel consumption, being this the main objective of this work. Some factors are quantified through literature and used for the construction of the FTA. The FTA is developed to show the events responsible for the fuel consumption variation. Simulations in spreadsheets are carried out to analyze the variables in fuel consumption equations (power factor and engine rotation , for example); to analyze the influence of slippage in fuel consumption, to present a methodology for the choice of the tractor-implement size and to make an analysis of the service power and the engine rotation through the fuel consumption data. A real case study is shown, where the FTA presented is used to detect the causes responsible by the variation of the monthly average fuel consumption in tractors, during field operations. The results shows that the FTA methodology proposed had presented satisfactory results in determining each factor's influence in fuel consumption.

Keywords: (FTA, Fault Tree Analysis, fuel consumption, tractors)

# Capítulo 1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma introdução sobre o assunto tratado no trabalho. Primeiramente, será mostrada uma contextualização que cita de maneira resumida a situação das indústrias no cenário mundial de livre concorrência. Neste cenário, a escassez de recursos naturais tende a ficar cada vez maior, levando a uma busca por soluções que viabilizem uma redução nos custos de produção visando uma maior lucratividade. Também é abordada neste tópico a situação preocupante criada pela queima de combustíveis fósseis e suas conseqüências para o aumento da temperatura global. São mostradas alternativas para um aumento da eficiência operacional dos sistemas de tração juntamente com conceitos preliminares sobre Árvores de Falhas. Ainda neste capítulo, são apresentadas a justificativa, relevância, objetivos e estrutura do trabalho.

A simbologia utilizada em todo o trabalho, as equações e unidades estão no sistema inglês, opção adotada visando uma maior padronização com os demais trabalhos encontrados nesta área.

## 1.1 Contextualização.

No contexto atual de competitividade e qualidade nas indústrias, a busca pela melhoria contínua em todos os processos da linha de fabricação tem se tornado um fator importante para garantir a lucratividade. O combustível, como matéria prima essencial para o processo de produção, constitui um fator importante, que merece atenção especial pelos altos custos envolvidos. Aliado a isto, com o aumento da temperatura global devido ao efeito estufa, a racionalização dos combustíveis fósseis deve ser uma preocupação de todos. A redução da emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa tem sido alvo de preocupação dos governos de muitos países. O governo brasileiro mantém programas energéticos que contemplam a utilização de fontes de energia alternativas, visando uma maior independência dos combustíveis fósseis. Fontes como energia eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas são incentivadas pelo Programa de Incentivo a Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Porém, veículos ainda utilizam combustíveis fósseis em larga escala, não se beneficiando destas fontes alternativas. O Próalcool, programa iniciado na década de 70, foi o maior programa de substituição de combustíveis fósseis do mercado automotivo mundial. O Programa Nacional de Produção e Utilização do Biodiesel (PNPB) tenta promover a

implantação de projetos auto-sustentáveis para a produção do biodiesel a partir de diferentes tipos de oleaginosas, cultivadas em diferentes regiões do país. A projeção é que em um algumas décadas a utilização dos combustíveis destilados do petróleo, tais como a gasolina e o óleo diesel caiam em desuso. Mas a maioria dos caminhões e tratores utilizados no Brasil ainda dependem do óleo diesel. Enquanto isso não acontece, medidas para uma melhor utilização deste recurso devem ser buscadas e incentivadas.

Além de tantos motivos ambientais para uma racionalização dos combustíveis fósseis, tem-se também os motivos econômicos. De acordo com KRISPER e SCHIMMEL (1985) no cenário agrícola, custos referentes a combustíveis representam cerca de 26% dos custos operacionais, sendo que 60% deste valor é gasto com o tratamento de solos pesados. Para atingir um alto nível de qualidade e preço em um mercado cada vez mais competitivo e globalizado, o setor agrícola brasileiro precisa minimizar os custos referentes à sua produção. Isto pode ser atingido através da busca pela manutenção visando a produtividade total e a operação eficiente dos equipamentos utilizados na produção.

Os tratores são máquinas fundamentais para a produção agrícola em larga escala e sua operação eficiente pode ser obtida através de três fatores básicos: (1) Maximização da eficiência da queima do combustível no motor e eficiência mecânica da transmissão, (2) Maximização da eficiência dos sistemas de tração e (3) Seleção de uma velocidade ótima de trabalho para um dado sistema trator-implemento (GRISSE et al., 2004). As duas primeiras opções têm sido buscadas pelos fabricantes de equipamentos. Isto inclui o desenvolvimento de motores e transmissões com maior eficiência energética, mudanças nas configurações dos sistemas de tração (tamanho, formato e número de pneus, lastragem, dentre outros). Já a velocidade ótima de trabalho para um dado conjunto trator-implemento é mais fácil de ser buscada pelos proprietários e/ou operadores. A idéia inicial é que através da escolha correta da marcha e da velocidade de trabalho, pode-se trabalhar com o motor do trator em uma região de maior eficiência energética e, portanto, de menor consumo específico. Através da aplicação de uma marcha mais alta e do recuo da posição do acelerador, conceito conhecido como GUTD (*Gear up, throttle down*), é conseguida uma economia de combustível significativa, principalmente quando a potência de serviço é inferior a 80% da potência nominal do trator.

Diversas pesquisas vem sendo desenvolvidas visando a predição do consumo de combustível em tratores. GRISSE et al. (2004) propõem novas equações para a determinação do consumo de combustível em tratores agrícolas. Estas formulações permitiram um maior acerto na predição em comparação com equações da ASAE (ASAE

*Standards, 2002a; ASAE Standards, 2002b*). Grisso et al. (2006) apresentaram equações para o consumo de combustível destinadas a modelos específicos de tratores. Através destas equações foi possível atingir um maior nível de acerto se comparado às equações “genéricas”.

Através destas equações é possível determinar alguns fatores responsáveis pela variação no consumo. Porém, existem vários outros fatores que não estão explícitos nas equações e a determinação destes fatores consiste numa tarefa um tanto quanto complexa.

A Análise da Árvore de Falhas (FTA) é conhecida em todo o mundo como uma ferramenta importante na avaliação da segurança e confiabilidade no projeto de sistemas, desenvolvimento e operação. Durante mais de quatro décadas, a FTA vem sendo usada nas indústrias nucleares, aeroespaciais e de transporte. A FTA traduz o comportamento de falhas de um sistema para um diagrama visual, fornecendo uma representação visual das várias combinações de possíveis ocorrências em um sistema que podem acabar em um evento predefinido ou indesejado (falha). Através da mesma, a estrutura do sistema e as interações entre os diversos componentes podem ser representadas, eventos indesejados podem ser rastreados e eliminados. Sistemas complexos, onde falhas poderiam acarretar danos ambientais ou de segurança, utilizam esta ferramenta do projeto ao fim da vida.

A metodologia proposta para a FTA será utilizada neste trabalho, através da aplicação da Análise da Árvore de Falhas para o evento “Variação no consumo de combustível”. Os fatores que influenciam no consumo de combustível serão relacionados. Apesar da grande quantidade de variáveis, a FTA irá permitir uma visualização simples e estruturada desses fatores.

## **1.2 Justificativa do trabalho**

Diante da significativa utilização de tratores por setores tais como agrícola, construção pesada e mineração, altos custos com combustíveis são comuns. O consumo de combustível sofre variações de acordo com uma série de fatores. Alguns destes fatores são conhecidos, mas não se achou na literatura um trabalho que agrupe todos estes fatores e indique qual a relação entre os mesmos. Além disso, não foi encontrada a aplicação da Árvore de Falhas para se tentar reduzir o consumo de combustível. Através da FTA espera-se que o conhecimento de tais fatores possa ser transmitido às pessoas que interagem com a

máquina, para que se possa conseguir uma melhoria na eficiência da operação e da manutenção dos equipamentos.

### **1.3 Relevância**

A relevância principal deste trabalho é a divulgação de uma metodologia, baseada na literatura, capaz de descrever os fatores mais relevantes responsáveis pelo consumo de combustível de tratores. Os conceitos descritos no trabalho poderão servir como subsídio para uma redução dos custos com combustíveis e focalizar itens que devem ser observados pela manutenção para redução do consumo. Além disto, o trabalho pode ser utilizado como base para a elaboração de programas de treinamento. A redução na queima de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, nas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa também destaca-se, como uma alternativa para amenizar os impactos no meio ambiente. A metodologia apresentada também pode ser adaptada para outros tipos de combustíveis, como o biodiesel, o etanol, o gás natural, dentre outros.

### **1.4 Objetivos do trabalho**

Diante da justificativa e relevância deste trabalho podem ser citados os seguintes objetivos:

1. Estudo da variação do consumo de combustível de tratores através da aplicação da FTA.
2. Levantamento das equações utilizadas para a determinação do consumo de combustíveis.
3. Levantamento dos parâmetros necessários para a construção da FTA.
4. Desenvolvimento do evento: “Variação no Consumo de Combustível” e sub-eventos da FTA.
5. Levantamento de um método para a escolha do par trator-implemento visando uma maior economia de combustível.
6. Quantificação percentual, através da literatura existente, da influência de cada parâmetro utilizado na FTA.
7. Adaptação da metodologia utilizada para fins de treinamento de operadores visando uma economia de combustível.
8. Aplicação da Árvore de Falhas na:

- 8.1. Identificação de falhas em controles de abastecimento de tratores,
  - 8.2. Identificação de erros no sistema,
  - 8.3. Interpretação dos resultados obtidos nos controles de consumo.
9. Utilização da FTA como guia para pesquisas futuras visando o consumo de combustível.

## **1.5 Estrutura do trabalho.**

Este trabalho foi estruturado para permitir a construção da FTA de maneira fundamentada, através de um estudo da literatura existente. Neste capítulo, foi dada uma introdução breve dos objetivos, justificativa, relevância e do conteúdo do trabalho. No próximo capítulo, será mostrada a modelagem matemática utilizada para o entendimento dos principais parâmetros relacionados ao comportamento mecânico de tratores e as principais formulações empíricas utilizadas na predição do consumo de combustível, objeto do estudo. Ainda no capítulo 2, são mostradas algumas soluções para a medição do consumo de combustível e do desempenho de tratores, encontradas na literatura.

No capítulo 3 é feita a apresentação da ferramenta usada no trabalho, a FTA. Os elementos básicos utilizados e a teoria envolvida na construção da árvore de falhas são mostrados.

No capítulo 4, onde é apresentada a metodologia do trabalho, a FTA é aplicada para a determinação da variação no consumo de combustível. Os resultados são mostrados e os eventos são discutidos para um melhor entendimento dos fatores responsáveis pela variação. Uma FTA para a patinagem é desenvolvida em separadamente para um entendimento dos eventos responsáveis pela mesma, visto que este fator é influenciado por fatores relacionados a outros ramos da FTA.

No capítulo 5 são apresentadas simulações computacionais das equações para o consumo de combustível de modo a permitir um entendimento dos níveis de consumo em função da potência do equipamento. Através da simulação das equações para o consumo de combustível é calculado o decréscimo no consumo de combustível devido à redução na rotação do motor, para uma situação específica. A equação para o consumo de combustível em função da patinagem é simulada para diversos níveis de potência do trator. Ainda no capítulo 5 é mostrada uma metodologia para a escolha do trator em função do implemento, visando uma economia de combustível. É realizada uma análise para verificar a

possibilidade de se determinar as condições de serviço (potência média e rotação do motor) através do consumo médio.

No capítulo 6 será mostrado um estudo de caso. Através de dados obtidos junto a uma empresa de construção pesada, a FTA será aplicada na determinação de falhas em controles de abastecimento e de variações no consumo de combustível entre equipamentos de características semelhantes.

Finalmente, no capítulo 7 são mostradas as conclusões, com proposições e recomendações para uma maior economia de combustível, além de sugestões para trabalhos futuros.

## Capítulo 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o objeto de estudo do trabalho. Como o trabalho é focalizado em tratores, é feita uma revisão básica sobre fundamentos da mecânica de tratores, com as equações que descrevem os seus principais parâmetros. São também mostradas equações que servem para predizer o consumo de combustível de tratores, sendo que algumas delas são normas da Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas ASAE (American Society of Agricultural Engineers). Também é mostrada uma revisão sobre Árvore de Falhas. As informações apresentadas servirão de base para construção da FTA.

### 2.1 Comportamento mecânico de tratores

#### 2.1.1 Introdução

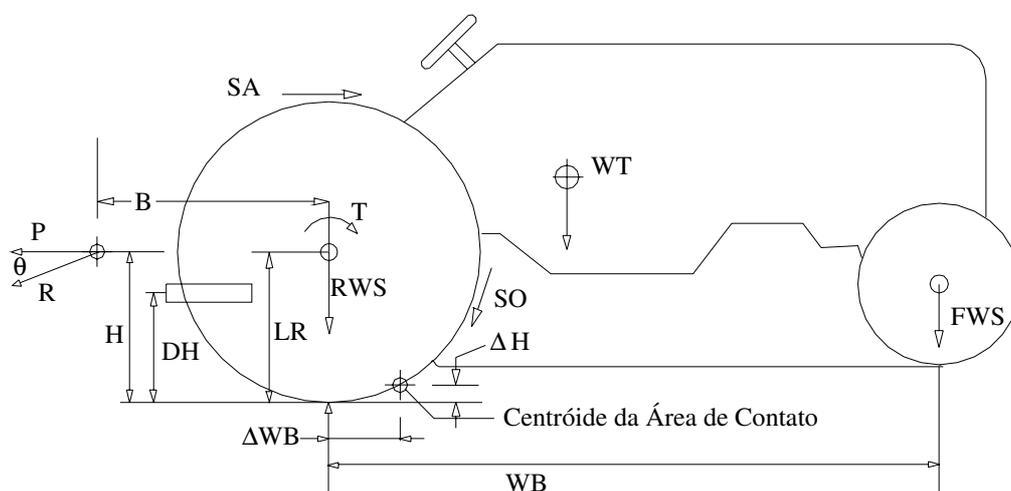
Como citado anteriormente, para a construção da FTA e determinação dos fatores que afetam o consumo de combustível em tratores, é necessário o conhecimento da mecânica envolvida no funcionamento do trator. Os fatores que determinam o desempenho do mesmo estão intimamente ligados ao consumo. De acordo com MCMILLAN (2002), o trator é uma máquina e, através da aplicação dos princípios gerais da mecânica no mesmo, pode-se obter um entendimento simples, porém fundamental, para uma otimização do desempenho através da operação. As perdas na interface entre solo-trator são responsáveis pela diferença entre o desempenho ideal e o desempenho real.

De acordo com ZOZ et al. (2003), solos onde tratores trabalham sofrem deformações devido às forças dinâmicas aplicadas pelo conjunto trator-implemento. Além disso os pneus do trator também sofrem deformações. Estas deformações absorvem grande parte da força de tração, reduzindo o desempenho global. Este fator é um agravante para a avaliação do desempenho de tratores. Nos casos onde o solo é mais duro, a eficiência de tração é maior. A eficiência máxima de tração é obtida em pista de concreto, uma vez que a mesma não sofre deformações significativas.

A função principal do trator é desenvolver trabalho útil na barra de tração, mas é sabido que nem toda a energia disponibilizada pelo motor é aproveitada como trabalho útil. Para um entendimento melhor deste processo serão definidas algumas maneiras de se avaliar

a quantidade de potência disponibilizada para desenvolver trabalho útil. A Eficiência de Potência Disponibilizada (*Power Delivery Efficiency - PDE*), é a relação entre a potência de saída útil (potência da barra de tração) e a potência de entrada (potência do motor ou tomada de força). Segundo TURNER et al. (1997), a *PDE* representa a porcentagem da potência disponibilizada pelo motor que está disponível na barra de tração como potência de tração. A *PDE* leva em conta as perdas na transmissão, nas rodas e no solo. Um outro conceito, segundo normas da ASAE (1995), é a Eficiência de Tração ou Eficiência do Pneu (*Tractive Efficiency - TE*) definida como a relação entre a potência de entrada e a potência de saída em um sistema de tração. Em tratores, é a relação entre a potência do eixo e a potência da barra de tração. O termo *PDE* é mais abrangente do que o *TE*, pois o mesmo considera as perdas na transmissão. Isto é bastante útil quando é necessário comparar o desempenho de tratores com transmissões diferentes (ZOZ et al., 2002).

Para o entendimento dos principais parâmetros envolvidos na mecânica de tratores será mostrado o caso mais simples onde a tração é aplicada somente no eixo traseiro. A Figura (2.1) ilustra as forças atuantes em um trator com tração traseira, cujas definições e equações estão apresentadas a seguir.



**FIGURA 2.1 – Diagrama de forças atuantes em um trator com tração traseira**

FONTE - ZoZ, 1970

Segundo ZOZ (1970), no diagrama de forças da Figura (2.1) podem ser encontrados parâmetros importantes para a avaliação do desempenho tais como: velocidade da roda (*SO*), velocidade atual ou real (*SA*), torque no eixo de tração (*T*), pesos estáticos: dianteiro (*FWS*) e

traseiro ( $RWS$ ), centro de gravidade ( $WT$ ), força de tração ( $P$ ), distâncias relevantes, como a distância entre eixos ( $WB$ ), raio da roda ( $LR$ ), altura da barra de tração ( $DH$ ), coordenadas horizontal e vertical do ponto de aplicação da força ( $H$  e  $B$ , respectivamente), dentre outros. É possível visualizar nesta figura a deformação vertical sofrida pelo solo ( $\Delta H$ ) durante a passagem do pneu e a centróide da área de contato dos pneus com o solo.

Existem na literatura, diagramas similares à Figura (2.1) para tratores com tração nas quatro rodas e com esteiras de borracha. ZOZ (1987) apresentou equações para a determinação do desempenho de tratores com tração traseira e tração nas quatro rodas, utilizando a tecnologia disponível nos computadores da época.

GRISSE et al. (2006a) desenvolveu um modelo empírico para o desempenho de tração de esteiras de borracha em solos agrícolas, onde são mostradas as forças atuantes e a nomenclatura utilizada. Resultados experimentais são comparados com o modelo, mostrando que o mesmo pode ser utilizado na predição do desempenho de esteiras de borracha em solos agrícolas. Neste trabalho será dada uma maior ênfase para sistemas de tração traseira, por ser o sistema mais utilizado na agricultura brasileira.

### 2.1.2 Definições

O comportamento mecânico do trator pode ser descrito através de uma série de parâmetros. Estes parâmetros servem para o projeto e caracterizam o desempenho do trator.

Todas as relações apresentadas foram retiradas de ZOZ (1970), motivo pelo qual suas unidades estão no Sistema Inglês. Portanto, para facilidade de padronização, adotou-se neste trabalho o mesmo sistema de unidades, assim como o mesmo sistema de simbologia das variáveis.

- **Peso dinâmico traseiro ( $RWD$ )**

É formado pela soma das forças horizontais, verticais e momentos atuantes na roda traseira. Quando o trator se movimenta para frente, por exemplo, o centro de gravidade do conjunto se desloca para trás. O peso dinâmico traseiro é função do peso estático traseiro ( $RWS$ ), da força na barra de tração ( $P$ ), das componentes horizontais ( $H$ ) e verticais ( $B$ ) do ponto de aplicação da força, da distância entre eixos ( $WB$ ) e do ângulo de aplicação da força ( $\theta$ ), traçado a partir da linha horizontal. De acordo com ZOZ (1970), o somatório destas forças resulta na Equação (2.1):

$$RWD = RWS + P \left[ \frac{H}{WB} + \left( 1 + \frac{B}{WB} \right) \tan \theta \right] \quad (2.1)$$

- **Coefficiente dinâmico de transferência de peso (*DWC*):**

A expressão entre colchetes na Equação (2.1) representa o coeficiente dinâmico de transferência de peso para as rodas traseiras (adimensional) que, multiplicado pela força de tração, determina a quantidade total de peso transferido.

$$DWC = \left[ \frac{H}{WB} + \left( 1 + \frac{B}{WB} \right) \tan \theta \right] \quad (2.2)$$

- **Razão dinâmica (*DR*):**

A razão dinâmica é definida como a razão entre a força na barra de tração (*P*) e o peso dinâmico das rodas (*RWD*) e pode ser representada através da Equação (2.3).

$$DR = \frac{P}{RWS + P \left[ \frac{H}{WB} + \left( 1 + \frac{B}{WB} \right) \tan \theta \right]} \quad (2.3)$$

De acordo com ZOZ (1970), a razão dinâmica é uma função primária da patinação das rodas de tração. Sua amplitude também depende da superfície do solo e de fatores relacionados aos pneus.

- **Eficiência de tração (*TE*):**

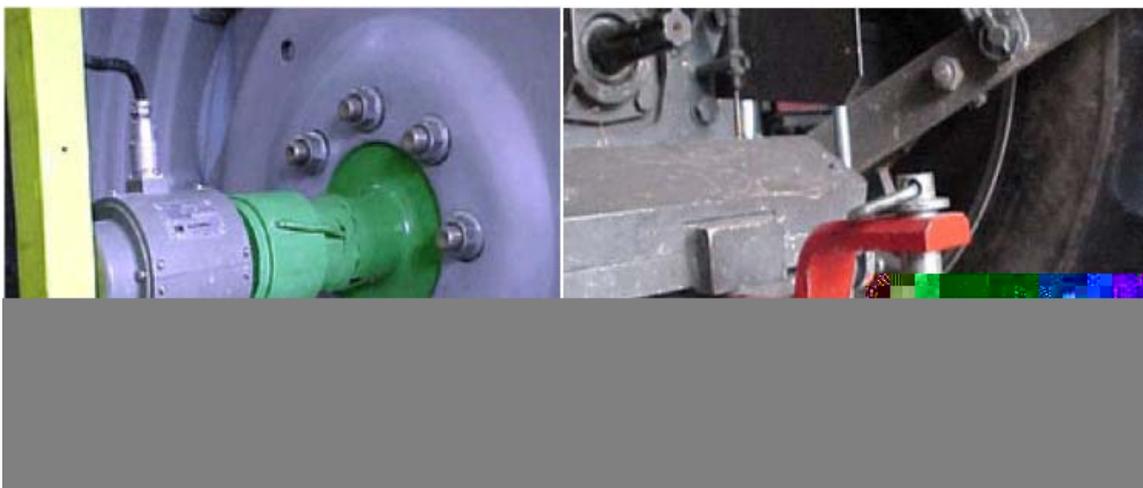
A eficiência de tração é a relação entre a potência que chega na barra de tração (*DBHP*) e a potência disponibilizada no eixo de tração (*AHP*). Ela representa a eficiência do pneu, ou seja, a parcela da potência que chega à barra de tração. A outra parte é perdida na interface entre o solo e o pneu, sob a forma da patinação e da resistência ao rolamento.

$$TE = \frac{DBHP}{AHP} \quad (2.4)$$

A potência da barra de tração (*DBHP*) é igual a velocidade atual (*VA*) do trator multiplicado pela força de tração na barra (*NT*). A potência no eixo (*AHP*) pode ser obtida através da velocidade teórica (*VT*) multiplicado pela força de tração bruta (*GT*). Dividindo-se o numerador e o denominador da equação pelo peso dinâmico (*Wd*), a Equação (2.4) assume a forma dada pela Equação (2.5), onde (*NTR*) e (*GTR*) são as razões de tração líquida e bruta, respectivamente.

$$TE = \frac{DBHP}{AHP} = \frac{VA \cdot NT}{VT \cdot GT} = \frac{NT/Wd}{GT/Wd} \cdot \frac{VA}{VT} = \left( \frac{NTR}{GTR} \right) \frac{VA}{VT} \quad (2.5)$$

Na Figura (2.2), podem ser visualizados um transdutor de torque e um transdutor de força de tração, utilizados para a medição da potência do eixo e da barra de tração, respectivamente.



**FIGURA 2.2 – Transdutores de torque e tração**

FONTE: Universiti Putra Malaysia

- **Potência no eixo (*AHP*):**

A potência no eixo pode ser determinada através do torque no eixo (*T*) e da rotação do mesmo (*ARPM*), de acordo com a Equação (2.6). A constante no denominador da Equação (2.6) representa um fator de conversão entre as unidades utilizadas.

$$AHP = \frac{T \times ARPM}{63025} \quad (2.6)$$

- **Potência na barra de tração (*DBHP*):**

A potência na barra de tração é função da força de tração (*P*) e da velocidade real (*SA*) do trator. Nota-se que o denominador da Equação (2.7) possui uma constante para o ajuste das unidades.

$$DBHP = \frac{P \times SA}{375} \quad (2.7)$$

- **Razão de velocidades (*TRA*):**

A razão entre a velocidade atual (*SA*) e a velocidade periférica (*SO*) da roda do trator é chamada de razão de velocidades. A razão de velocidades, utilizada na definição da patinagem, é dada pela Equação (2.8):

$$TRA = \frac{SA}{SO} \quad (2.8)$$

- **Patinagem (*TR*):**

A patinagem é o percentual de redução da velocidade, devido ao escorregamento das rodas, as deformações dos pneus e ao cisalhamento da estrutura do solo. Uma patinagem excessiva pode causar um aumento considerável no consumo de combustível. Ela é influenciada pelo tipo de terreno (duro, macio, arenoso, argiloso, etc.), pelas condições dos pneus, pelo peso dinâmico do trator e pela força de arrasto. De acordo com GRISSO et al. (2004), no ponto máximo de eficiência de tração a patinagem é de aproximadamente 7%. CORRÊA et al. (1998), utiliza o índice de 10% de patinagem como referência de máxima eficiência trativa em algumas condições de solos agrícolas. Para comparação de pneus em campo alguns autores utilizam um índice de 20% (WULFSOHN et al., 1998; DWYER e Febo, 1987; GEE-CLOUGH et al., 1977), expressando o coeficiente líquido de tração.

Segundo BARBOSA et al. (2005), o índice de 30% representa situação de extrema perda de energia pelo rodado, que não é impossível de ser encontrada em operações agrícolas.

A patinagem é obtida através da relação de velocidades, de acordo com a Equação (2.9).

$$TR = 100 \cdot \left( 1 - \frac{SA}{SO} \right) \quad (2.9)$$

- **Velocidade periférica da roda (SO):**

A velocidade periférica da roda pode ser estimada através da Equação (2.10), que tem como variáveis a rotação do motor (*Eng.RPM*), o raio efetivo da roda (*LR*), a razão de engrenamento (*GR*), e uma constante.

$$SO = \frac{(Eng.RPM) \cdot (LR)}{(GR) \cdot (168,1)} \quad (2.10)$$

### 2.1.3 Cronologia da mecânica de tratores

Após uma breve descrição das relações básicas envolvidas no processo de tração e na mecânica do trator, será apresentada uma análise cronológica da evolução das pesquisas sobre este assunto, de acordo com GRISSO et al. (2006).

Durante várias décadas, a experimentação e a utilização de tratores no setor agrícola contribuíram para uma melhoria no projeto das máquinas. A tração passou de 2WD para 4WD e MFWD (*Mechanical Front Wheel Drive*), os pneus diagonais passaram a radiais e as esteiras de aço para borracha. A habilidade de predizer e otimizar o desempenho de tratores em campo vem despertando interesses de cientistas, fabricantes e usuários.

ZOZ (1970) desenvolveu uma série de curvas baseadas em testes de campo. Nestes testes, as condições de solo foram variadas para tratores com tração traseira. Estes gráficos foram utilizados na determinação da força e da potência na barra de tração, velocidade de trabalho e patinagem em diferentes tipos de solo.

WISMER e Luth (1972) desenvolveram relações para a determinação da Força de Tração e Eficiência de Tração para tratores em função da patinagem sob condições de solo específicas. Através de dados do NTTL (*Nebraska Tractor Test Laboratory*), ZOZ e Brixius

(1979) desenvolveram equações similares para pista de concreto. Posteriormente, um programa computacional foi desenvolvido por ZOZ (1987) para a determinação do desempenho de tratores em pista de concreto.

BRIXIUS e Zoz (1987) revisaram as relações originalmente desenvolvidas por WISMER e Luth (1972) utilizando dados de milhares de testes de campo envolvendo dezenas de configurações de solo-pneu que já haviam sido medidas. Técnicas mais modernas de ajuste de curvas permitiram um maior índice de acerto nas predições. AL-HAMED et al. (2004) adaptaram as relações para desempenho de tratores utilizando pneus radiais.

Os resultados dos testes em tratores do laboratório de Nebraska também continham dados sobre o consumo de combustível dos tratores, além dos dados de desempenho em pista de concreto. Com uma crescente demanda por soluções para a redução no consumo de combustível, dados sobre consumo foram utilizados no ajuste de curvas, dando origem às primeiras equações. Tais equações englobam uma série de situações encontradas durante o serviço. No próximo tópico, serão mostradas as equações que foram desenvolvidas através dos ensaios deste laboratório para a predição do consumo de combustível.

#### 2.1.4 Formulações matemáticas para o consumo de combustível

De maneira análoga ao desempenho, foram realizadas pesquisas visando o consumo de combustível. As formulações matemáticas mostradas neste capítulo podem ser utilizadas na predição dos diversos tipos de consumo de combustível para tratores com motores ciclo Diesel.

Existem várias equações para o consumo de combustível para tratores (ASAE Standards, 2002a) e (ASAE Standards, 2002b). GRISSO et al. (2004), apresentam equações corrigidas que incorporam a evolução dos motores atuais, de acordo com dados do NTTL (*Nebraska Tractor Test Laboratory*), uma vez que se trata de uma estação de testes em tratores oficialmente designada pelo governo americano.

O Laboratório de Nebraska executa testes de acordo com as regras da OECD (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), organização que engloba cerca de 30 países membros ao redor do mundo. A OECD determina que os testes em tratores devem ser feitos no país em que são fabricados. Estas normas englobam testes de desempenho, segurança do motorista e medição de ruídos. Relatórios do ensaio podem ser obtidos através do site do NTTL. A aprovação nestes testes permite uma vantagem no

comércio internacional de tratores. Até a presente data, o Brasil ainda não possui laboratórios certificados pela OECD.

O consumo de combustível pode ser medido através da quantidade de combustível usado durante um intervalo de tempo específico. Esta quantidade pode ser volumétrica, geralmente medida em litros por hora [L/h], ou mássica, em quilogramas por hora [kg/h]. Devido à diferenças de temperatura, a densidade do combustível pode variar, causando uma variação no consumo medido. O poder calorífico é a quantidade de energia disponibilizada pela queima do combustível [kJ/kg]. Portanto, a medição mássica pode fornecer um valor mais preciso, pois leva em consideração a temperatura do combustível para a determinação da densidade do mesmo.

De acordo com GRISSO et al. (2004), a maneira mais comum de se medir a eficiência de um trator é através do Consumo volumétrico específico de combustível (*SVFC*), que é dado em unidades de [L/(kW.h)]. O *SVFC* não é afetado pelo tamanho do motor, e pode ser utilizado para comparar tratores de tamanhos diferentes e condições operacionais diversas. Valores típicos para o *SVFC* estão entre 0.244 e 0.57 [L/(kW.h)]. A eficiência de combustível volumétrica específica (*SVFE*) é o inverso do *SVFC* e possui unidades de [kW.h/L]. Seus valores variaram entre 2.36 e 4.1 [kW.h/L].

GRISSO et al. (2004), mostram que a eficiência de combustível aumentou nos últimos 25 anos, diante da queda de 4,8% na média anual do *SVFC* em comparação com os dados da ASAE (Associação Americana de Engenharia Agrícola) e desenvolvem novas equações para o consumo de combustível, utilizando dados dos testes do NTTL (*Nebraska Tractor Test Laboratory*). Este aumento se deve principalmente à evolução no projeto dos componentes dos tratores, ou seja, motores, transmissões e sistemas de tração.

A seguir serão mostradas a seguir equações que podem ser utilizadas para prever o consumo de combustível em tratores com motores diesel, inclusive para rotações reduzidas.

- **Consumo médio anual ( $Q_{avg}$ )**

De acordo com a norma ASAE (2002a), o consumo médio anual pode ser utilizado na estimativa de custos anuais com combustíveis para equipamento, sendo de grande valia para decisões e estimativas gerenciais. É função do tipo de combustível (no presente caso, Diesel) e da potência da tomada de força ( $P_{pto}$ ). Esta equação foi originalmente formulada para motores a gasolina. Como o consumo de motores a óleo diesel é cerca de 73% do

consumo de motores a gasolina, a equação é corrigida através da multiplicação pela constante (0,73). O consumo médio anual é calculado através da Equação (2.11).

$$Q_{avg} = 0,305 \times 0,73 \times P_{pto} = 0,223 \times P_{pto} \quad (2.11)$$

- **Consumo volumétrico específico de combustível (SVFC).**

O SVFC pode ser estimado para rotações nominais e fator de potência conhecido, de acordo com a norma ASAE D497.4 (2002b). Como o próprio nome diz, este consumo é volumétrico e específico, uma vez que é dividido pela potência da barra de tração. O consumo volumétrico específico de combustível em função do fator de potência ( $X$ ) é calculado através da Equação (2.12).

$$SVFC = 2,64 \cdot X + 3,91 - 0,203\sqrt{738 \cdot X + 173} \quad (2.12)$$

Durante rotações reduzidas, a eficiência de combustível sofre alterações, podendo aumentar ou reduzir. GRISSE et al. (2004) mostram que é possível comparar melhorias na eficiência de combustível ( $1/SVFC$ ) devido a redução na rotação do motor para cargas de 50% e 75% na barra de tração.

O decréscimo percentual no SVFC ( $SVFC_{Dec}$ ) é obtido comparando-se a seu valor para rotação máxima ( $SVFC_F$ ) com seu valor para rotações reduzidas ( $SVFC_R$ ), podendo estes parâmetros serem obtidos através dos dados do NTTL. Da mesma forma, a porcentagem de redução na rotação do motor pode ser calculada comparando-se as rotações máximas ( $RPM_F$ ) e reduzidas do motor ( $RPM_R$ ). As equações para o decréscimo no SVFC e para rotação do motor são mostradas a seguir, respectivamente.

$$SVFC_{Dec} (\%) = \left( \frac{SVFC_F - SVFC_R}{SVFC_R} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

$$N_{Red} (\%) = \left( \frac{RPM_F - RPM_R}{RPM_F} \right) \times 100 \quad (2.14)$$

- **Consumo de combustível para uma operação específica ( $Q_i$ ).**

Quando a potência para uma determinada operação ( $P_i$ ) e o *SVFC* são conhecidos, o consumo de combustível pode ser estimado através da norma ASAE EP496.2 (2002a), Equação (2.15).

$$Q_i = SVFC \times P_i \quad (2.15)$$

- **Consumo volumétrico de combustível para aceleração total**

GRISSO et al. (2004), propõem uma equação corrigida para os modelos mais recentes de tratores. A condição para esta equação é que o acelerador do trator deve estar totalmente pressionado (*Full Throttle*). Novamente, o fator de potência ( $X$ ) é utilizado. O termo entre parênteses é multiplicado pela potência da tomada de força ( $P_{pto}$ ), de acordo com a Equação (2.16):

$$Q_F = (0,22 \cdot X + 0,096) \times P_{pto} \quad (2.16)$$

- **Consumo de combustível para cargas parciais e rotações reduzidas**

Para rotações reduzidas, GRISSO et al. (2004) propõem uma equação que leva em consideração o fator de potência ( $X$ ) e a taxa de redução da rotação do motor ( $N_{Red}$ ). O consumo para rotações reduzidas é igual ao consumo ( $Q_F$ ) menos a redução no consumo de combustível devido a redução na rotação do motor ( $D$ ), Equação (2.17).

$$Q_R = (0,22 \cdot X + 0,096) \left( 1 - (-0,0045 \cdot X \cdot N_{Red} + 0,00877 \cdot N_{Red}) \right) \times P_{pto} \quad (2.17)$$

Nota-se que o segundo termo da equação acima se refere à redução no consumo de combustível devido à redução na rotação do motor ( $D$ ), Equação (2.18):

$$D = (-0,0045 \cdot X \cdot N_{Red} + 0,00877 \cdot N_{Red}) \times P_{pto} \quad (2.18)$$

- **Consumo de combustível para um trator específico ( $Q$ )**

Sabe-se que o consumo de combustível é função do modelo do trator. De acordo com testes realizados pelo laboratório de testes em tratores de Nebraska, foram encontrados coeficientes para a determinação do consumo de combustível para tratores de marcas e modelos específicos. Tais coeficientes correspondem as variáveis  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$  na Equação (2.19) e podem ser obtidos através das equações (2.20) a (2.27). Valores calculados para vários modelos específicos de tratores podem ser encontrados na página da Universidade de Virgínia (Virginia Tech, 2007).

$$Q = (a \cdot X + b) [1 + (c \cdot X \cdot N_{Red} - d \cdot N_{Red})] \cdot P_{pto} \quad (2.19)$$

$$a = (Q_{75F} - Q_{50F}) / [P_{pto}(X_{75F} - X_{50F})] \quad (2.20)$$

$$b = (Q_{75F}/P_{pto}) - a X_{75F} \quad (2.21)$$

$$c = [(f/h - e/g) / (X_{75F} - X_{50F})] \quad (2.22)$$

$$d = (c X_{50F}) - (f/h) \quad (2.23)$$

$$e = 1 - [(X_{75F} \cdot Q_{75R}) / (X_{75R} \cdot Q_{75F})] \quad (2.24)$$

$$f = 1 - [(X_{50F} \cdot Q_{50R}) / (X_{50R} \cdot Q_{50F})] \quad (2.25)$$

$$g = [(RPM_{75F} - RPM_{75R})100/RPM_{75F}] \quad (2.26)$$

$$h = [(RPM_{50F} - RPM_{50R})100/RPM_{50F}] \quad (2.27)$$

Os subscritos referem-se especificamente as condições dos testes: Aceleração total ( $F$ ), aceleração reduzida ( $R$ ) e os números ( $50$ ) e ( $75$ ) representam a porcentagem de carga na barra de tração.

- **Fator de potência ( $X$ )**

Devido a sua presença nas formulações mostradas anteriormente, achou-se interessante discutir um pouco mais sobre este parâmetro.

Para se medir a potência necessária para a operação pode-se medir o torque no volante do motor e a rotação do mesmo. O produto do torque e rotação fornece a potência de trabalho. Este procedimento não é muito prático para aplicações rurais, pois necessita de um investimento em equipamentos e um sistema de aquisição de dados. Outra maneira de se

estimar a potência de trabalho é através da variação da rotação do motor, em resposta ao torque aplicado durante o serviço. Segundo GRISSO et al. (2006), a rotação do motor durante o serviço pode fornecer uma estimativa do fator de potência que está sendo utilizado. Esta rotação deve ser medida com o acelerador totalmente pressionado (*HI*). A rotação do motor durante o serviço (*FES*) é então subtraída da rotação máxima do motor sem carga e dividida pela diferença entre a rotação máxima e a rotação nominal do motor (*Rated*), encontrada nos manuais do equipamento.

A Equação (2.28) representa a taxa de carga aplicada no motor em função da rotação de trabalho. Como a diferença entre rotação máxima e a nominal do motor é uma constante, o fator de potência será função da rotação de trabalho.

$$X = \frac{\{HI - FES\}}{\{HI - Rated\}} \quad (2.28)$$

Estimando-se o fator de potência é possível determinar uma redução percentual na rotação do motor através da escolha de uma marcha mais alta, mantendo a velocidade de trabalho do trator-implemento. Através da equação para o decréscimo no consumo de combustível, Equação (2.18), pode-se estimar qual será a redução no consumo de combustível devido à queda da rotação do motor. Tal comportamento será mostrado mais adiante, no capítulo 5.

#### 2.1.5 Métodos utilizados nas medições de desempenho de tratores.

O desempenho operacional do trator pode ser representado por uma série de parâmetros, tais como a potência na barra de tração, o consumo de combustível, a patinagem, dentre outros.

A medição deste desempenho pode ser feita basicamente através de sensores instalados em pontos estratégicos, dentre os quais podem ser destacados:

- 1) Transdutores de força: instalados na barra de tração e no sistema de três pontos.
- 2) Transdutores de torque: instalados nas duas rodas traseiras e nos eixos da tomada de força e motor;
- 3) Sensores de rotação: instalados na coroa do diferencial traseiro e no volante do motor.
- 4) Radar de efeito Doppler: instalado no chassi.

5) Medidores de vazão: instalados entre o filtro de combustível e a bomba injetora e na linha de retorno do excesso de combustível para o tanque.

Além destes sensores, também é utilizado um coletor de dados para gravação e transferência dos dados.

Alguns dos parâmetros utilizados para medição do desempenho encontram-se descritos a seguir.

- **Patinagem**

A patinagem, sendo função das velocidades da roda e do deslocamento real, pode ser determinada através destes parâmetros. A velocidade real do trator pode ser encontrada através do cálculo manual da distância percorrida pelo tempo, ou através de um radar instalado no trator. É usualmente medida com auxílio de um radar, mas alguns utilizam sistemas de posicionamento global (*GPS - Global Positioning Systems*) dentre outras técnicas.

A velocidade teórica é medida através do diâmetro da roda (perímetro eficaz), da rotação e do tempo. A rotação da roda pode ser determinada com o auxílio de sensores que podem ser do tipo indutivos, geradores de impulsos ou transdutores ópticos.

- **Consumo de combustível**

O consumo horário de combustível é usualmente medido através de medidores volumétricos ou de vazão. Dividindo-se o volume obtido pelo tempo tem-se o consumo horário. LOPES et al. (2003) utilizam uma solução para a medição do consumo de combustível em tratores baseada na utilização de um protótipo. No desenvolvimento do protótipo para a medição do consumo de combustível em tratores, foram utilizados tanques individuais para determinar o consumo de até três tipos de combustível, conforme mostrado na Figura (2.3). O consumo é determinado através da utilização de um medidor de fluxo montado em série com um sensor de temperatura. Através da temperatura, a densidade do combustível é determinada. O consumo volumétrico fornecido pelos medidores de vazão é convertido para consumo em [Kg/h]. A divisão do volume mássico pela potência na barra de tração fornece o consumo mássico específico, em unidades de [kg/(kW.h)] A vazão de combustível que entra no motor é obtida através de dois medidores de vazão, sendo que um é montado entre o filtro de combustível e a bomba injetora e o outro, montado na linha de

retorno de combustível para o tanque. Assim a diferença entre as medições fornece a vazão de combustível efetiva, que realmente é consumida pelo motor.



**FIGURA 2.3 – Esquema do protótipo para a medição do consumo de combustível em tratores**

FONTE: LOPES et al. (2003)

SILVEIRA et al. (2005) apresenta um sistema de aquisição automática de dados projetados para o gerenciamento de operações de campo. Baseado neste estudo, será apresentada uma cronologia sobre os avanços das pesquisas envolvendo medições de parâmetros operacionais em tratores.

- **Cronologia sobre avanços nas medições de desempenho de tratores**

De acordo com SILVEIRA et al. (2005), trabalhos de SCHUELLER (1992), BALASTREIRE (1994); SWINTON e Lowenberg-Deboer (1998) mostram sistemas utilizados para o monitoramento de colheitas mecanizadas.

CASTELLI e Mazzeto (1996) e MAZZETO (1996) desenvolveram um sistema que realiza o registro automático dos dados de campo, permitindo dispor de informações apropriadas para o planejamento e gerenciamento estratégico de todas as atividades e recursos da propriedade.

YULE et al. (1999) elaboraram o mapeamento de um trator no campo usando GPS. Determinaram a força de tração do implemento, consumo de combustível e declividade do terreno, caracterizando também os custos operacionais. Todos os dados eram processados e informados ao operador em tempo real, através de um mostrador. MAZZETTO e Lantdonio (1999), desenvolveram um sistema que caracteriza a posição do trator no campo usando GPS, determinando, também, velocidade de deslocamento, consumo de combustível e rotação do motor. Os dados processados são armazenados no trator e transferidos a um computador central através do uso de cartão usado para o armazenamento de dados.

SILVEIRA (2001), baseado no trabalho de MAZZETTO (1996), realizou experimentos estáticos e estudou os parâmetros de identificação do trator no campo, com o objetivo de determinar: velocidade de deslocamento, consumo de combustível e rotação do motor. STORINO et al. (2000) estudaram o desempenho do trator em agricultura de precisão como indicador do estado físico do solo. Determinaram os principais parâmetros operacionais como rotação do motor, consumo de combustível e velocidade de deslocamento, bem como a sua localização no campo, usando Sistemas de Posicionamento Global (*GPS*). PERRET et al. (2000) desenvolveram um equipamento eletrônico para a aquisição de dados embarcados em trator, determinando os mesmos parâmetros operacionais definidos por STORINO et al. (2000), segundo SILVEIRA et al. (2005).

Após esta cronologia baseada em SILVEIRA et al. (2005), pode-se concluir que um bom sistema de aquisição de dados em um trator deve ser capaz de fornecer uma série de parâmetros, tais como: rotação do motor, rotação da tomada de força, velocidade real de deslocamento, patinagem nos eixos de tração, área trabalhada, consumo horário de combustível, consumo de combustível por área trabalhada, área trabalhada por hora, combustível consumido, combustível restante, distância percorrida, força na barra de tração,

torque no eixo da tomada de força, torque no(s) eixo(s) de tração, reações horizontais e verticais do implemento, dentre outros. Devido ao grande número de variáveis, uma quantidade razoável de sensores deve ser utilizada. Uma placa de aquisição adequada e um computador portátil com softwares apropriados devem ser acoplados ao trator.

Sistemas integrados de monitoramento estão cada vez mais presentes e disponibilizados comercialmente. Neste trabalho será citado o sistema “Datatronic”, da MASSEY FERGUSON®. Segundo SERRANO et al. (2003), tais sistemas equipam opcionalmente tratores de tamanhos médios e grandes e funcionam como sistemas de apoio para a tomada de decisões pelos operadores em tempo real. Assim, o operador pode gerenciar o regime de funcionamento do motor ou da relação de transmissão da caixa de marchas, aplicando os princípios do GUTD (*Gear Up, Throttle Down*).

De acordo com SERRANO et al. (2003), uma desvantagem do sistema “Datatronic”, consiste na falta do registro dos dados para uma análise posterior, além de não medir a tração na barra, fundamental na avaliação da dinâmica do trator-implemento. Este problema foi resolvido pelo mesmo aproveitando os sinais dos sensores do sistema “Datatronic”, através de uma interface (placa de aquisição de dados), para um computador portátil instalado no trator. Para se medir a tração na barra foi instalada uma célula de carga na barra de tração.

Os parâmetros e informações apresentadas neste capítulo serviram de embasamento para a metodologia utilizada na construção da Árvore de Falhas, apresentada no próximo capítulo. Esta revisão bibliográfica mostrou os fundamentos que permitiram a análise e a construção da Árvore de Falhas. Porém, achou-se interessante incluir uma complementação desta revisão na própria metodologia, na medida em que os fatores responsáveis pelo consumo de combustível são mostrados.

## **2.2 Análise da Árvore de Falhas (FTA)**

A Análise da Árvore de Falhas (FTA) é focada na investigação das causas da falha, desde quando acontecem e/ou são prováveis de ocorrer. A aplicação da FTA permite a utilização de um método normalizado para a verificação de como as falhas ocorrem em um

determinado equipamento, de maneira a avaliar o status da confiabilidade de produtos e processos.

De acordo com HELMAN e Andery (1995), seu conceito teve origem em 1961, para avaliar o grau de segurança do sistema de controle de lançamentos de mísseis “Minuteman”. O conceito da Análise da Árvore de Falhas foi desenvolvido por H. A. Watson, do Bell Telephone Laboratories e posteriormente adaptado a outras aplicações, como projetos de máquinas e equipamentos, análise de processos industriais ou administrativos e investigação de falhas para a manutenção.

A seguir será apresentado um histórico das aplicações da FTA segundo ERICSON (1999).

A FTA foi concebida no ano de 1961, quando H. A. Watson, dos Laboratórios Bell, foi contratado para estudar o sistema de controle de lançamento Minuteman, em conexão com a Força Aérea Norte Americana. A Análise da Árvore de Falhas foi concebida com este propósito. Pouco depois, Dave Haasl, até então na Companhia Boeing, reconheceu o potencial desta ferramenta e liderou uma equipe que aplicou a FTA em todo o Sistema de Mísseis Minuteman. Outras divisões da Boeing perceberam os resultados do programa Minuteman e começaram a utilizar a FTA no projeto de aviões comerciais. Em 1965, a Boeing e a Universidade de Washington realizaram a primeira conferência de Sistemas de Segurança. Neste evento foram apresentados vários artigos relacionados às FTAs, fazendo com que esta ferramenta passasse a ser conhecida mundialmente.

Seguindo tendências da indústria aeroespacial, a indústria de Energia Nuclear descobriu as virtudes e benefícios da FTA e na década de 70 começou a utilizá-la no desenvolvimento de suas instalações. Segundo ERICSON (1999), a indústria de energia nuclear foi a indústria que mais contribuiu para a FTA, com o desenvolvimento de teorias e códigos computacionais. Muitos algoritmos de avaliação foram desenvolvidos, juntamente com os softwares que utilizam estes algoritmos. Na década de 80, mais algoritmos foram desenvolvidos e a FTA começa então a ser utilizada mundialmente. Uma grande quantidade de artigos técnicos foram escritos e os softwares de FTA passam a ser utilizados pela sociedade. Na década de 90, a FTA continuou a ser utilizada em vários sistemas em muitos países. Com o surgimento dos computadores pessoais e softwares de construção, a avaliação de FTAs de alta qualidade se tornou mais acessível. No final da década de 90 a FTA passa a ser utilizada também pela indústria Robótica.

ERICSON (1999), apresenta uma lista de indústrias e tecnologias que utilizaram a FTA em seu desenvolvimento. Dentre elas pode-se destacar: a) Indústria de aviação: com

aviões comerciais, de caça, bombardeios, helicópteros, UAV's (aviões não tripulados) e AWACS (Sistema de Aeronaves de Alerta e Controle); b) Sistemas de Energia: solar, elétrica e nuclear; c) Sistemas de Transporte: trens, MPRTs (Trânsito Pessoal Rápido), Sistema BART, dentre outros; d) Programas espaciais: Programa Apollo, Ônibus Espaciais, satélites, veículos de lançamento e a Estação Espacial Internacional; e) Outras aplicações: sistemas para robôs, sistemas automotivos, sistemas de mísseis, torpedos e plataformas de petróleo.

Neste trabalho, até onde se conseguiu pesquisar, a FTA será empregada pela primeira vez como uma ferramenta para a determinação dos fatores que afetam o consumo de combustível em tratores. Esta utilização permite a aplicação da FTA na indústria agrícola e na indústria de construção pesada, indústrias que utilizam tratores na sua produção.

A seguir, serão mostrados elementos básicos utilizados na construção da FTA.

### 2.2.1 Elementos básicos da Árvore de Falhas

Na árvore de falhas, as relações lógicas entre os eventos são representadas pelos mesmos símbolos utilizados em sistemas digitais. Estas relações, chamadas de portas lógicas, servem para permitir ou inibir a passagem de eventos para outras partes da árvore. O símbolo da porta representa o tipo de relação entre eventos de entrada e o evento de saída. O evento básico é representado por um círculo. Este evento constitui uma causa fundamental não podendo ser mais desenvolvido. O evento condicional informa às portas lógicas uma condição ou uma restrição específica. Este evento é representado por uma elipse. Um evento que não foi mais desenvolvido ou por falta de informações, ou por falta de importância para o sistema, é chamado de evento não desenvolvido e é representado por um losango ou “diamante”. Eventos que acontecem normalmente e são necessários no processo são simbolizados pela “casa”. Eventos intermediários são representados por retângulos e são falhas decorrentes de eventos que estão ligados por portas lógicas.

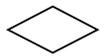
As portas mais comuns em árvores de falhas são as portas “e” e “ou”. Todas as outras portas são casos especiais derivadas destas duas. São representadas por um escudo com a base reta ou curva (portas “e” e “ou”, respectivamente).

A porta de inibição é representada por um hexágono. Ligada a ela deve existir um evento condicional que de acordo com a condição, a ligação entre o evento de entrada e saída é liberada.

À partir das relações mostradas anteriormente é possível descrever uma infinidade de sistemas. No caso específico deste trabalho, todas as portas foram do tipo “ou”, pois qualquer um dos fatores da árvore poderia causar um distúrbio no consumo. Alguns eventos não puderam ser totalmente desenvolvidos, devido à complexidade de variáveis e falta de informações na literatura.

Na Tabela (2.1) são ilustradas as principais simbologias utilizadas na construção da FTA.

**TABELA 2.1 – Simbologia utilizada na construção da árvore de falhas**

Símbolo	Tipo	Descrição
	Evento Básico	Causa fundamental que não pode ser mais desenvolvida
	Evento Condicional	Informa às portas lógicas uma condição específica
	Evento Não Desenvolvido	Evento sem informações ou contribuição irrelevante
	Evento Externo	Evento normalmente presente no processo
	Evento Intermediário	Falhas decorrentes de eventos ligados por portas lógicas
	Porta "E"	A falta na saída ocorre se ocorrerem todas as faltas na entrada
	Porta "OU"	A falta na saída ocorre se ocorrerem qualquer falta na entrada
	Porta "OU" Exclusiva	A falta na saída existe se e somente se existir uma falta na entrada
	Porta "E" Prioritária	A falta na saída existe se ocorrerem faltas na entrada, em uma determinada sequência
	Porta Inibição	A falta na saída ocorre se ocorrer a falta na entrada na presença de um evento condicional
	Porta Transferência Entrada	A ligação da transferência de entrada em uma porta irá conectá-la à respectiva transferência de saída
	Porta Transferência Saída	A porta de transferência de saída se conecta ao restante da árvore em outra folha

FONTE: VESELY et al. (1981).

VESELY et al. (1981), discute os conceitos necessários para a seleção e definição de eventos de árvores de falhas. Nesta metodologia são mostradas diferenças entre falhas de sistemas e componentes (*fault vs. failure*), ocorrência e existência da falha, componentes ativos e passivos, categorias de falhas em componentes (primária, secundária e de comando), mecanismo de falha, modo de falha e efeito de falha, o conceito de causa imediata, regras

básicas para a construção de FTAs, dentre outros conceitos. A seguir serão mostradas algumas regras básicas utilizadas na construção da FTA.

### 2.2.2 Regras básicas para a construção da FTA

De acordo com VESELY et al. (1981), árvores de falhas de sucesso são construídas através de algumas regras básicas (***Ground Rules***):

1. Escrever as indicações de falhas nas caixas de eventos; evidenciando qual a falha e quando ela ocorre.
2. Classificar cada evento como sendo uma falha de componente ou sistema, através da pergunta: “Esta falha é devida à falha de um componente?”;

Além destas regras, VESELY et al (1981) apresenta outras regras, essenciais para a construção da FTA:

3. Regra “sem milagres” (***no miracles rule***): “se o funcionamento normal de um componente propaga uma seqüência de falhas, então é assumido que o componente funciona normalmente.”
4. Regra “complete a porta” (***complete-the-gate rule***): “todas as entradas para uma porta particular devem ser completamente definidas antes que sejam feitas análises mais profundas.”
5. Regra “porta a porta” (***gate-to-gate rule***): “as entradas das portas devem ser eventos de falhas definidos corretamente, e portas não devem ser conectadas entre si diretamente.

Outros autores como, HELMAN e Andery (1995) relacionam algumas diretrizes para a implementação do método FTA, mostradas a seguir.

- Definição do Evento Principal (Falha): A definição do evento principal é a primeira diretriz a ser seguida. O evento principal também conhecido como evento topo, caracteriza a falha principal ou o efeito indesejado.
- Definição das causas que podem acarretar no evento principal: Após a definição do evento principal, é necessário encontrar as causas que podem acarretar no

evento principal. Nesta abordagem, deve-se fazer um estudo aprofundado do sistema em questão, entendendo o sistema e a influência dos parâmetros variáveis para se entender o sistema e encontrar as causas

- Separação das causas responsáveis pelos diversos eventos: De posse das causas responsáveis pelo evento principal, as mesmas devem ser separadas e agrupadas de acordo com os eventos correspondentes.
- Determinação das relações lógicas entre as falhas: As relações lógicas entre os diversos eventos são atribuídas aos eventos que até então estavam isolados. Estas relações lógicas são representadas pelas portas lógicas mostradas anteriormente, na Tabela (2.1)
- Eliminação das causas para eliminar o evento principal: Com a árvore definida e estruturada, as causas responsáveis pelo evento principal podem ser atacadas e o evento indesejado evitado.

Neste trabalho, utiliza-se a teoria da Análise da Árvore de Falhas para a determinação dos fatores que influenciam no consumo de combustível em tratores. Assim optou-se por uma revisão mais focada neste assunto. Para um estudo mais detalhado sobre a teoria e a construção da FTA é recomendável uma revisão bibliográfica mais específica. Uma relação de artigos e livros importantes para a FTA podem ser encontrados em ERICSON (1999).

No próximo capítulo, a modelagem matemática a teoria e a metodologia para a construção da FTA serão utilizadas na construção da FTA para a variação no consumo de combustível em tratores.

## Capítulo 3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Antigamente, a construção da FTA era mais uma arte do que uma ciência. Mas com os anos de prática foi percebido que árvores de falhas de sucesso foram construídas seguindo uma certa metodologia. Neste capítulo é mostrada a metodologia utilizada na construção da árvore de falhas onde são listados e explicados os passos percorridos na construção da mesma. É apresentada a árvore de falhas e discutidos os fatores responsáveis pela variação no consumo de combustível em tratores.

### 3.1 Aplicação da técnica da Análise de Árvore de Falhas

As diretrizes para a implementação da FTA mostradas no capítulo anterior servirão de base para o estudo do consumo de combustível em tratores. Segundo HELMAN e Andery (1995), o método FTA deve ser implementado através de algumas diretrizes, mostradas e comentadas a seguir.

#### 3.1.1 Definição do evento principal (efeito indesejado)

Durante medições do consumo de combustível para tratores no campo, em uma indústria de construção pesada, foram notadas grandes variações, inclusive para o mesmo equipamento. Objetivando responder a esta questão e explicar a origem dessa variação, utilizou-se a FTA como ferramenta para a determinação das causas responsáveis pela variação de consumo. Assim, o evento topo foi definido como “Variação no consumo de combustível”. Apesar da variação no consumo de combustível não ser necessariamente uma falha do equipamento, foi atribuído como tal para se aplicar à análise e detectar as causas dessa variação. Através deste artifício, os eventos responsáveis pela variação de combustível, de origens diversas, puderam ser determinados.

#### 3.1.2 Definição das causas que podem acarretar no evento principal

Nesta fase, procurou-se encontrar todos os fatores que poderiam influenciar na variação de consumo. Aplicando os fundamentos e as equações da modelagem matemática

(capítulo 2) foram relacionados alguns fatores responsáveis pela variação no consumo de combustível. Estes e outros fatores foram encontrados na literatura ou estão diretamente ligados ao sistema de combustível e ao sistema de medição do consumo. Dentre os itens encontrados pode-se citar: 1) Patinagem, 2) Operação, 3) Combustível, 4) Ambiente, 5) Equipamento, 6) Medição do consumo e 7) Segurança.

### 3.1.3 Separação de causas responsáveis por diversos eventos

As causas responsáveis pelos diversos eventos foram definidas, separadas e relacionadas aos eventos que a originaram. A partir destes fatores os eventos foram desenvolvidos. As causas foram definidas e foram obtidos os fatores principais: patinagem, operação, combustível, ambiente, equipamento, sistema de aquisição de dados e segurança. Os eventos secundários foram relacionados e agrupados nos devidos galhos da FTA.

### 3.1.4 Determinação das relações lógicas entre causas

Foi constatado que qualquer um dos eventos que ocorresse isoladamente poderia contribuir na variação do consumo. Assim, foi utilizada a porta lógica “ou” para todas as relações lógicas.

### 3.1.5 Eliminação das causas para evitar o evento principal

Como o evento principal é a variação no consumo, e não necessariamente uma falha, algumas causas não puderam ser eliminadas, sendo processos comuns e necessários ao funcionamento do trator. [Foi feita então uma adaptação para esta FTA. Assim, de posse das causas que podem afetar o consumo de combustível, medidas preventivas ou corretivas deverão ser tomadas para controlar estes fatores, objetivando uma redução nos valores de consumo.]

A árvore de falhas obtida através desta metodologia é apresentada no próximo tópico.

## **3.2 Apresentação da Árvore de Falhas**

A árvore de falhas para o evento “Variação no consumo de combustível” é mostrada na Figura (3.1)

Varição no Consumo de Combustível

□ Peracão — Combustivo

**FIGURA 3.1 – FTA para a variação no consumo de combustível**

Durante a construção da árvore foi buscada uma quantificação percentual da influência de alguns parâmetros no consumo, através da literatura existente. Mas alguns problemas não permitiram a inclusão destes parâmetros na árvore. O primeiro problema foi que alguns percentuais apresentaram valores diferentes de acordo com cada autor. O segundo problema foi que, para outros fatores, tais percentuais não foram encontrados, sendo necessário mais pesquisas sobre o assunto.

A seguir serão comentados os fatores utilizados na Figura (3.1).

### 3.2.1 Patinagem (TR)

A patinagem ocorre devido à deformação do sistema de tração (pneu), quando há um deslizamento entre o pneu e a superfície, ou quando há um cisalhamento interno no próprio solo. A patinagem é calculada pela Equação (2.9), apresentada no capítulo 2, onde  $SA$  é a velocidade atual e  $SO$  é a velocidade periférica.

A patinagem influencia a eficiência de tração ( $TE$ ), além do consumo de combustível. Quanto maior a patinagem, maior o consumo de combustível. Porém, a patinagem é necessária para garantir a força de tração. Assim devem ser buscados valores de patinagem que maximizem a eficiência de tração. A Figura (3.2) ilustra as curvas da eficiência de tração e das razões de patinagem, resistência ao movimento, empuxo e velocidades.

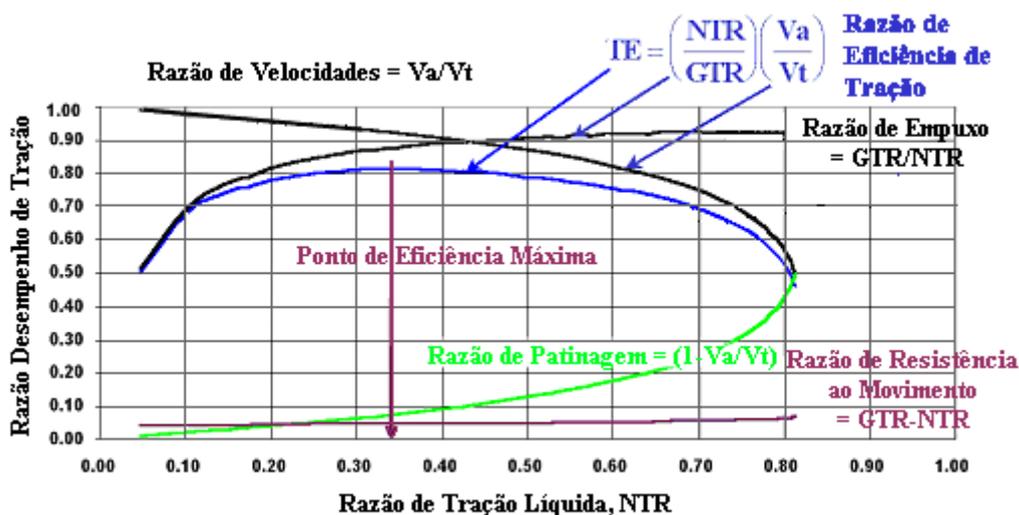


FIGURA 3.2 – Eficiências de tração, perdas de velocidade e de força de tração

FONTE - Zoz et al. (2002).

Através da Figura (3.2) observa-se a faixa onde a eficiência de tração assume valores máximos. Valores de patinagens entre 5% e 13% proporcionam uma maior *TE*. Nota-se que a patinagem é complementar a razão de velocidades. A razão de resistência ao movimento é a diferença entre a razão de tração bruta (*GTR*) e a razão de tração líquida (*NTR*) e não sofre grandes alterações com o aumento da razão de tração líquida. Para isto ocorrer, a razão de tração bruta (*GTR*) também deve aumentar. Portanto, a Eficiência de Tração (*TE*) é o resultado da multiplicação de duas curvas: a razão de empuxo e a razão de velocidades, conforme mostrado na Equação (2.5) do capítulo 2.

Alguns autores como GRAŠIS e Janulevičius (1999), UPADHYAYA et al. (1997) e JUN et al. (1998), citados em GIEDRA e Janulevicius (2005), consideram que para patinagens maiores que 18%, a estrutura do solo se deteriora e o consumo de combustível aumenta significativamente. Eles condenam a utilização de tratores de rodas em condições onde a patinagem é maior que 18%. Mais adiante, no item 0, será mostrada uma simulação da equação do consumo de combustível em função da patinagem.

Para se ter uma idéia da aplicabilidade da FTA, o evento patinagem foi desenvolvido separadamente, revelando-se uma segunda árvore. A patinagem é apenas uma das diversas ramificações da árvore. A determinação dos fatores que acarretariam na patinagem mostrou que a mesma depende de vários outros fatores. Inicialmente, a patinagem foi colocada na árvore como sendo um fator de operação. Mais tarde, foi constatado que este evento seria afetado também pelo equipamento e pelo ambiente. Assim, a patinagem passou a ser definida como um fator principal da árvore, sendo desenvolvida através da Equação (2.9).

O desenvolvimento da FTA para a patinagem, uma ramificação importante da FTA para a variação do consumo de combustível é mostrada na Figura (3.3). Conforme visto na Figura (3.1), o desenvolvimento do evento patinagem está representado através de uma porta de transferência de saída, que conecta o evento a uma porta de transferência de entrada, mostrada na Figura (3.3). Através da árvore de falhas para patinagem é possível visualizar a dependência das velocidades real e teórica. Fatores como pneus, solo e peso dinâmico influenciam a velocidade real. A rotação do motor, a razão de engrenamento e o diâmetro do pneu podem ser variáveis para a velocidade teórica. Devido a grande quantidade de ramificações, alguns eventos não estão completamente desenvolvidos, estando indicados por losangos, ou “diamantes”. Tais eventos poderão ser investigados em trabalhos futuros.

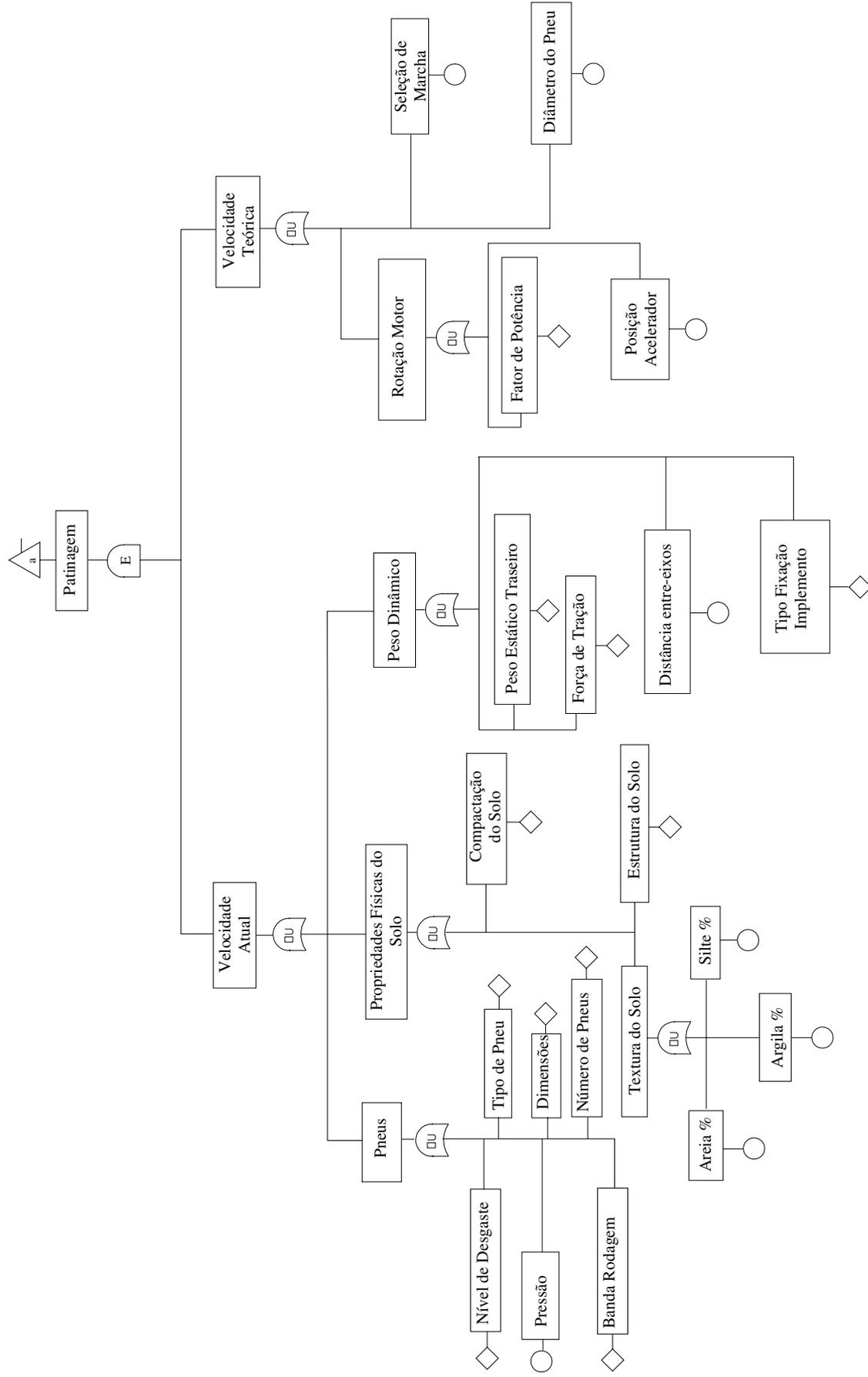


FIGURA 3.3 – Árvore de Falhas para a Patinagem

### 3.2.2 Fatores de operação

Os fatores de operação podem ser alterados pelo operador, podendo ser afetados por falhas de natureza humana, dentre as quais podem ser destacadas a rotação do motor/marcha de serviço.

Durante a operação do trator, a rotação do motor pode ser controlada pelo operador para uma faixa de menor consumo de combustível, ou seja, de maior eficiência energética do motor. Na curva de desempenho de motores é possível visualizar uma região onde o consumo específico de combustível é menor. As curvas de isoconsumo são regiões onde a combinação entre o torque, a rotação e a potência permite uma maior eficiência na queima do combustível. Na Figura (3.4), é mostrado uma curva de desempenho de um motor Diesel com as curvas de isoconsumo, segundo CAPPELLI (1990). Nota-se que o termo “RELATIVO” no gráfico é a relação entre os valores nominais de torque, potência e rotação do motor, e o valor medido no ensaio.

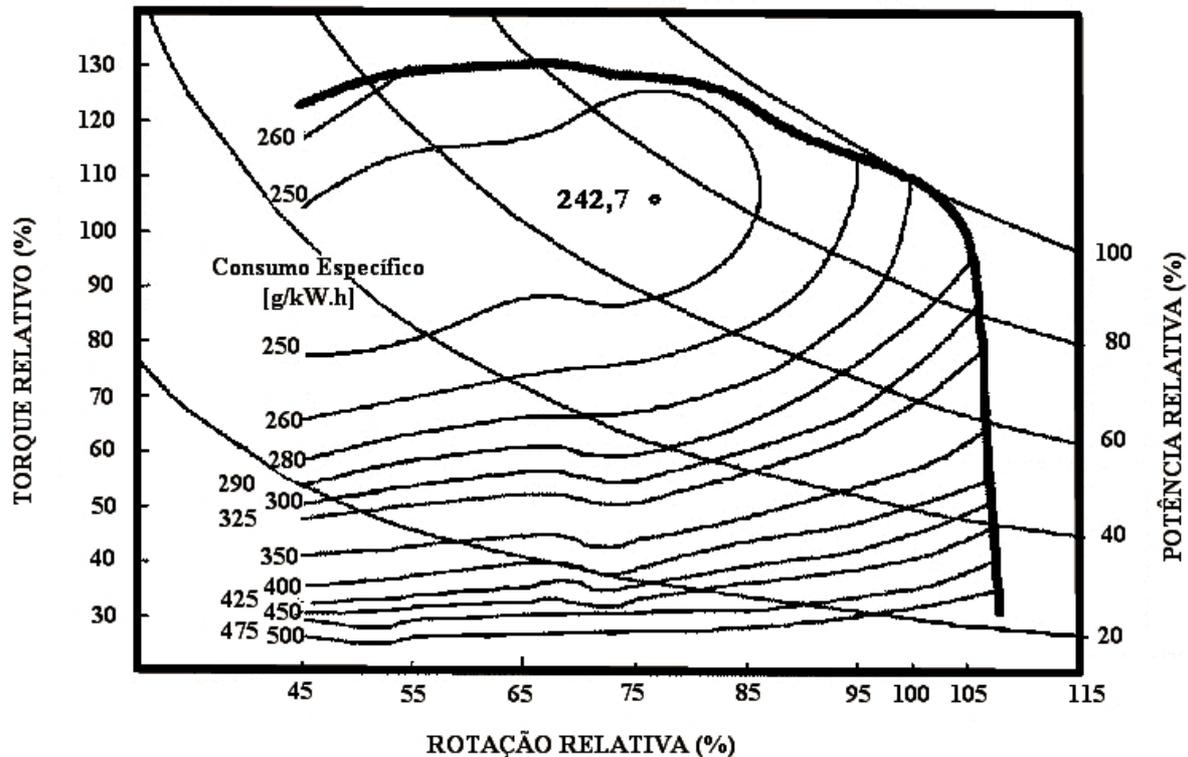


FIGURA 3.4 – Curva de desempenho de um motor Diesel e curvas de isoconsumo

FONTE: CAPPELLI (1990).

Para uma operação mais eficiente, o motor do trator deve ser operado próximo da região de menor consumo específico, ou seja, maior eficiência de combustível. Nota-se que para potências menores, a rotação relativa é menor. Para este motor, a região de menor consumo específico é obtida através da escolha do regime de trabalho no qual o motor trabalhe com torque máximo, rotação de cerca de 75% da rotação nominal e fator de potência entre 70% e 75%.

Muitas operações no campo não exigem a potência máxima do trator. Isto acontece, por exemplo, quando implementos mais velhos, projetados para tratores menores, são utilizados em tratores mais potentes, ou em operações de transporte, onde a velocidade pode ser maior e a força de tração é baixa. Neste caso, se o trator trabalhar na rotação nominal, haverá um desperdício de combustível. Isto acontece de maneira análoga ao se acelerar um automóvel e não trocar de marcha. Quando a potência necessária à barra de tração é menor que 65% da potência máxima do trator, é possível aplicar com sucesso os conceitos GUTD (*gear up, throttle down*), de acordo com (GRISSO e PITMAN, 2001).

Para operações mais leves, consegue-se uma economia de combustível apenas escolhendo-se uma marcha mais rápida e reduzindo a rotação do motor, mantendo a velocidade desejada de trabalho. De acordo com dados do NTTL (Nebraska Tractor Test Laboratory), com 50% de carga de trabalho e rotação reduzida, conseguiu-se uma queda de 18% em média para o consumo de combustível. Portanto, o operador precisa de bom senso para perceber a redução na demanda de potência e reajustar a marcha de maneira a se obter um menor consumo.

### 3.2.3 Falhas no combustível

O combustível, sendo o responsável pelo fornecimento de energia térmica para o motor, também está sujeito a falhas. Estas falhas logicamente poderão influenciar no consumo de combustível. Fatores responsáveis por falhas no combustível são relacionados a seguir.

- **Contaminação do combustível**

É comum acontecer contaminação do combustível por água ou outras impurezas. [Além de interferir no consumo de combustível, pode também causar sérios danos aos componentes do sistema de combustível, tais como bicos injetores, bomba injetora e outros,

especialmente em sistemas de combustível de luvas dosadoras, onde o próprio combustível é responsável pela lubrificação da bomba injetora.]

Além da água, de acordo com a publicação “O Diesel e o Motor Caterpillar” é comum a contaminação do combustível por outras impurezas, como sedimentos (ferrugem, escama, escória de solda, sujeira e outros detritos que podem entrar no tanque de combustível); borra e fibras; Pressão de Vapor Reid (Processo físico no qual o combustível evapora, causando uma interrupção na alimentação); asfaltenos (componentes do asfalto, constituídos por moléculas longas de alto peso molecular) e microorganismos (bactérias e fungos), que se desenvolvem na presença de água no combustível.

Para se evitar a contaminação do combustível pode-se tomar algumas medidas preventivas como a drenagem diária da água e dos sedimentos do tanque de combustível, troca periódica do filtro separador de água e dos filtros de combustível, a verificação da condição da tampa do reservatório de combustível, para que o mesmo não seja contaminado pela umidade do ambiente ou por outras impurezas; a instalação de alívios no tanque, e purgadores de vapor para pressões Reid acima de 20 psi. Estas recomendações estão de acordo com o manual de recomendações de fluidos para máquinas CATERPILLAR®, CATERPILLAR (2004) e na publicação “O diesel e o motor Caterpillar”.

- **Tipo de combustível**

O consumo de um equipamento pode variar em função do tipo de combustível que o mesmo utiliza. De acordo com (ASAE Standards 2002a, Section 6.3.2.1.2), um trator que utiliza diesel como combustível possui um consumo volumétrico 35% menor que o similar à gasolina. Já o motor a GLP possui um consumo volumétrico 20% maior, se comparado à gasolina. Com o advento do Biodiesel, o consumo certamente sofrerá variações, se comparado ao diesel comum. Algumas das equações mostradas no capítulo 2 foram obtidas inicialmente para motores a gasolina e adaptadas a motores diesel através da multiplicação por um fator de correção de 0,75, que representa a diferença de consumo entre os motores.

- **Combustível fora das especificações**

Combustíveis que contém misturas fora das especificações dos fabricantes podem variar o consumo. Por isso é recomendado garantir a procedência e a qualidade do combustível utilizado.

A norma Americana ASTM D975 (2005) especifica as propriedades para Combustíveis Diesel Destilados. Algumas propriedades para o óleo diesel serão mostradas a seguir e são baseadas nesta norma, ANEXO A.

Em condições normais de partida, os motores de injeção direta requerem um número mínimo de cetano de 40. Um número mais elevado de cetano poderá ser necessário nas operações em condições extremas, como baixas temperaturas e grandes altitudes.

O combustível armazenado por longos períodos pode formar sólidos devido a sua oxidação. A contaminação por água e sedimentos não deve ser superior a 0,01 %. O ponto de fluidez do combustível deve ser de pelo menos 6°C abaixo da temperatura ambiente de operação. Geralmente, aditivos são recomendados apenas sob condições especiais. Dentre os mais utilizados, destacam-se os melhoradores de cetano, agentes biocidas e antioxidantes.

A quantidade de enxofre no combustível afetará as emissões de partículas no escape. Além disso, um combustível com alto teor de enxofre irá contaminar o óleo do motor, causando uma redução nos períodos de troca. Durante o processo de combustão, o enxofre reage quimicamente, produzindo ácido sulfuroso e ácido sulfúrico; as superfícies metálicas são atacadas, provocando corrosão. É importante verificar as especificações dos combustíveis à cada entrega, principalmente informações sobre o percentual de enxofre.

#### 3.2.4 Fatores ambientais

Pode-se considerar como fatores ambientais todos os fatores não relacionados ao equipamento e ao operador, que influenciam na eficiência do trator e conseqüentemente, no consumo de combustível.

Fatores ambientais são responsáveis por grandes variações no consumo. Condições severas tendem a exigir um fator de potência maior, aumentando assim o consumo de combustível. Serão mostrados a seguir alguns fatores ambientais e suas conseqüências para a eficiência do motor e para o consumo de combustível.

- **Tipo de solo/dureza**

De acordo com o tipo de solo, a patinagem do trator e a eficiência de tração variam, ocasionando uma diferença no consumo de combustível. ZOZ et al. (2002) relacionam a

eficiência de tração e a patinagem em função da dureza do solo para pneus duplos 20,8R42 em três superfícies distintas, conforme mostrado na Figura (3.5).

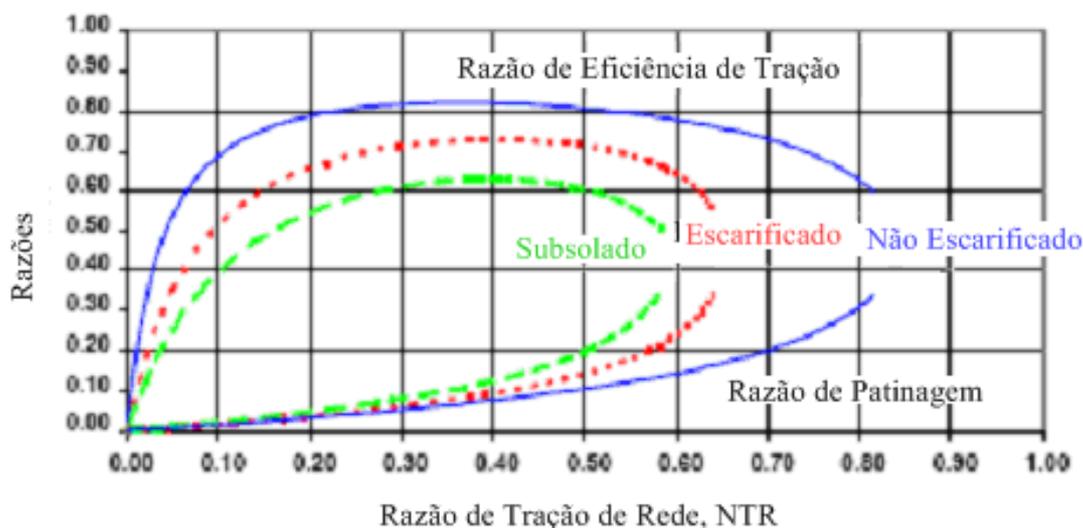


FIGURA 3.5 – Desempenho de tração de pneus duplos 20.8R42 em três superfícies

FONTE: ZOZ et al., (2002).

Através da Figura (3.5) pode-se notar que a eficiência de tração é maior nos solos mais compactados, ao contrário da patinagem que é maior nos solos mais macios.

Por outro lado, durante o tratamento de solos mais duros, a potência exigida é maior, ocasionando um consumo maior em relação a solos mais macios.

- **Potência de trabalho**

A potência é definida como o trabalho realizado durante um certo período de tempo. No trator, é encontrada multiplicando-se a força na barra de tração pela velocidade de deslocamento. A potência de trabalho é, sem dúvida, um dos fatores mais importantes que influenciam o consumo de combustível. A potência de trabalho está intimamente ligada ao tipo de serviço, ao tamanho do implemento, dureza do solo, e velocidade de deslocamento. Todo trator possui uma potência nominal, que é especificada pelo fabricante. A potência de trabalho é influenciada pelo tipo de solo, pela velocidade de trabalho, pela força na barra de tração ou pela potência na tomada de força consumida pelo implemento.

A relação entre a potência de trabalho ( $P_t$ ) e a potencia nominal ( $P_n$ ), chamada de fator de potência ( $X$ ), é utilizada na predição do consumo de combustível, de acordo com GRISSE et al. (2004). Esta relação pode ser representada através da Equação (3.1).

$$X = \frac{P_t}{P_n} \quad (3.1)$$

- **Temperatura do ar, umidade e pressão atmosférica:**

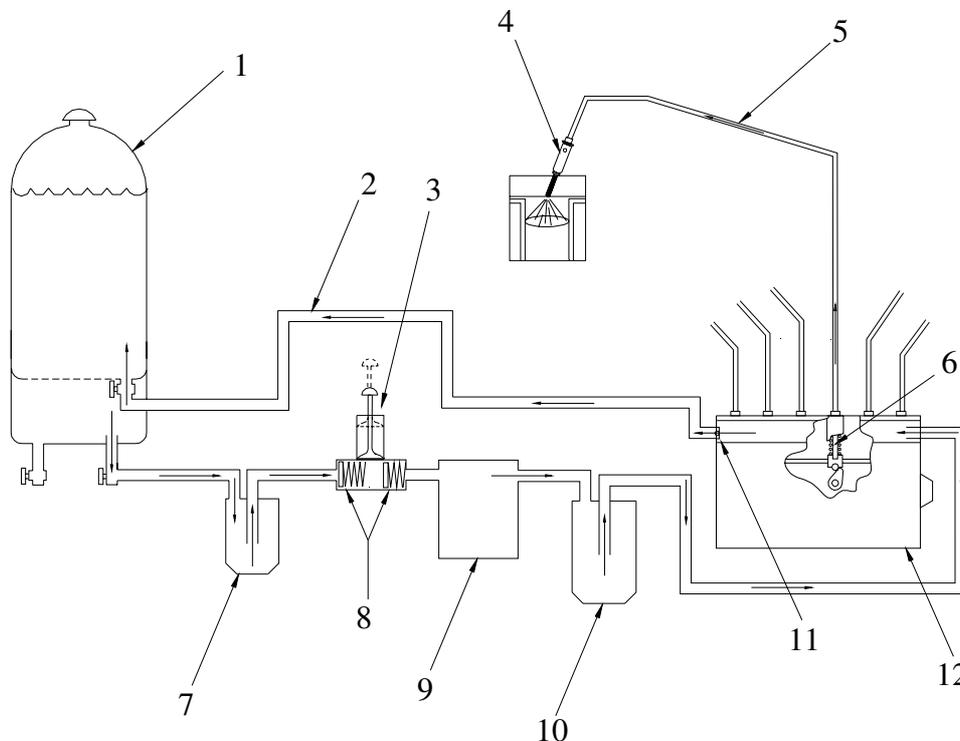
A temperatura do ar, juntamente com a umidade e a pressão atmosférica, influenciam a densidade do ar que entra na câmara de combustão, influenciando assim o consumo de combustível, potência desenvolvida pelo motor e emissões. Não foram encontrados trabalhos que quantifiquem o peso destes fatores no consumo de combustível.

### 3.2.5 Falhas do equipamento

Para encontrar os fatores responsáveis pela variação no consumo de combustível, relacionadas ao equipamento, é necessário entender o funcionamento do sistema de combustível utilizado em motores diesel. Na Figura (3.6), é mostrado o diagrama esquemático do sistema de combustível do motor 3306B, aplicado em uma Motoniveladora CATERPILLAR, modelo 140 H.

De acordo com o diagrama da Figura (3.6) a bomba de transferência de combustível (9) puxa o combustível do tanque (1) através do filtro de combustível primário (7) e das válvulas unidirecionais (8). Da bomba de transferência, o combustível é empurrado através do filtro de combustível secundário (10) para o distribuidor de combustível (12). A válvula de retorno (11) permite que o excesso de combustível volte para o tanque (1). De acordo com CATERPILLAR (1999), a válvula de sangria constante retorna uma mistura de combustível e ar para o tanque com uma vazão de aproximadamente 34 L/h, o que ajuda a manter o combustível frio e eliminar o ar da linha. A bomba de combustível (6) recebe combustível do distribuidor (12) e injeta o combustível em alta pressão pela a linha (5) para o bico injetor (4). O bico injetor contém pequenos furos na ponta, que pulverizam o combustível para dentro da

câmara de combustão. O sistema possui seis bombas individuais que fornecem o combustível para cada cilindro através do bico injetor.



**FIGURA 3.6 – Diagrama esquemático do Sistema de Alimentação de Combustível CAT 3306B**

FONTE: CATERPILLAR (1999).

Além dos fatores relacionados com o sistema de combustível, serão mostrados uma série de outros fatores que podem servir como diretrizes para a redução no consumo de combustível.

- **Idade do equipamento**

Segundo SIEMENS e Bowers (1999), dependendo do tipo de combustível e do tempo de uso de um trator ou máquina, os custos com lubrificantes e combustíveis irão, provavelmente, representar 16% a 45% dos custos totais da máquina.

Segundo GRISSO et al. (2004), dados do Laboratório de Testes de Tratores em Nebraska mostram que o consumo médio específico anual de combustível caiu cerca de 4,8% durante os últimos 20 anos. Isto se deve à evolução dos motores Diesel e dos sistemas de injeção eletrônica.

- **Regulagem da bomba injetora (tempo de injeção).**

O combustível injetado no tempo errado corre o risco de não ser queimado completamente. Sintomas de uma bomba injetora desregulada incluem excesso de fuligem nos gases do escapamento, perda de potência do motor e conseqüente aumento no consumo de combustível. Além disso, o motor pode apresentar dificuldade de partida e funcionamento irregular. A prática mostra que o monitoramento do teor de fuligem no escapamento pode ser útil no diagnóstico de problemas com a bomba injetora. Este monitoramento pode ser feito uma vez por mês, através da utilização de uma escala do tipo Ringemann. No caso da fumaça exceder os limites indicados na escala, é necessário revisar os elementos dos sistema de injeção, como bombas e bicos injetores.

- **Condição dos bicos injetores.**

Bicos injetores podem estar obstruídos, ou fora das especificações, ocasionando um mau funcionamento do motor, com perda de potência, diferença no consumo de combustível e emissões. Ainda não existem parâmetros para quantificar esta influência no consumo, mas como está diretamente ligado ao mesmo, achou-se importante a sua inclusão.

- **Filtro(s) de combustível**

A manutenção correta dos filtros de combustível garante uma maior vida útil dos sistemas de injeção. Um filtro entupido reduz consideravelmente a potência do motor e sobrecarrega a bomba injetora, pois restringe a passagem do combustível. Um dos principais sintomas desse entupimento é quando o motor começa a “ratear”. De acordo com dados da Construtora SERCEL (2007), custos referentes a revisões de bomba e bicos injetores foram reduzidos consideravelmente, através da inclusão destes elementos nos programas de manutenção preventiva.

- **Filtro(s) de ar**

O filtro de ar assegura o fornecimento de ar limpo para a combustão. Quando obstruído, a quantidade de ar estequiométrica não é atingida. Assim, apenas uma parte do

combustível é queimada e o restante sai juntamente com os gases do escapamento. Isto se reflete no aumento do consumo. De acordo com REIS et al. (1999), a restrição da passagem de ar pelo filtro, por reduzir a eficiência do elemento filtrante, pode levar o motor a perder potência, aumentar o consumo e provocar superaquecimento. É importante que o operador verifique diariamente o indicador de restrição do filtro de ar, para que seja efetuada a limpeza ou a troca, conforme a necessidade. Pode-se adotar um critério para a troca do filtro, por exemplo após a terceira limpeza. Mas não foram encontradas recomendações para o procedimento na literatura.

- **Pneus**

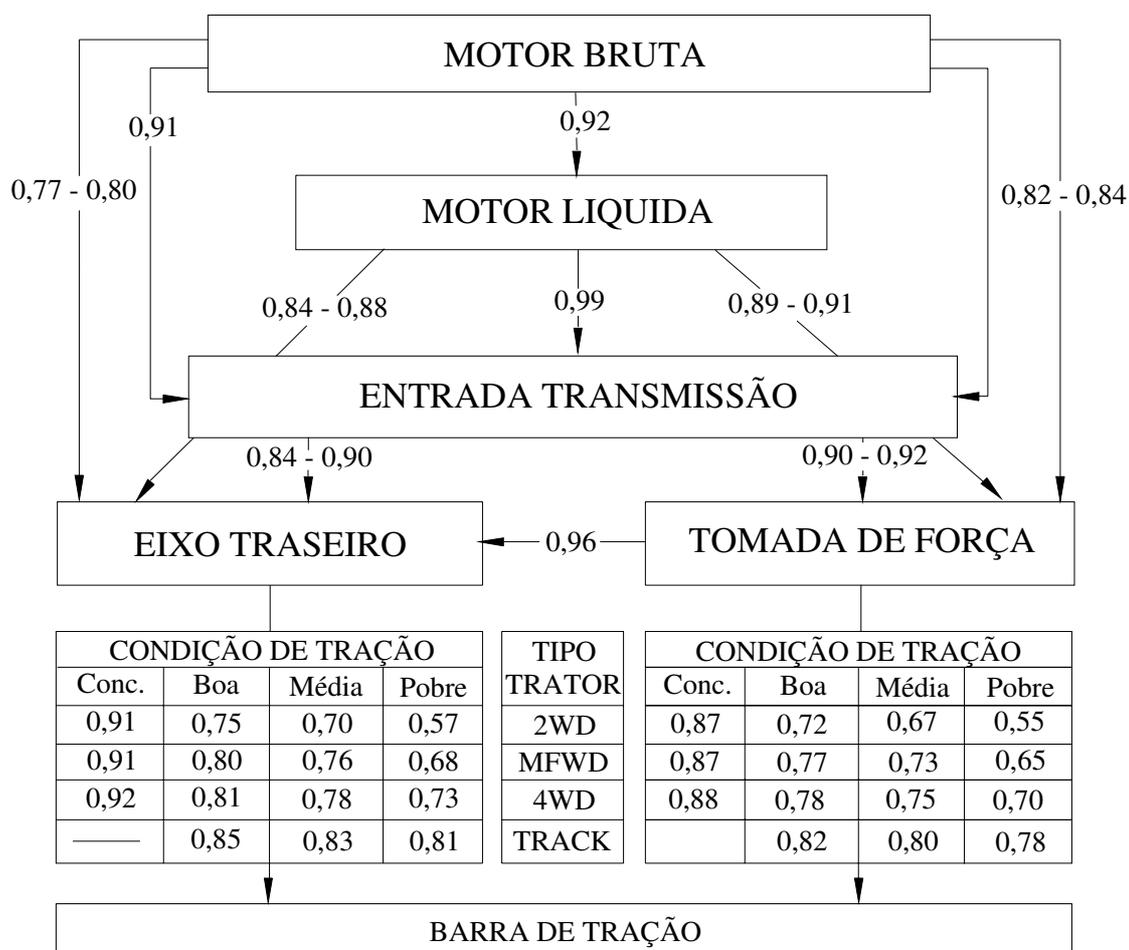
Os pneus influenciam diretamente na eficiência de tração. A pressão correta, o nível de desgaste do pneu, suas dimensões, número de pneus e a banda de rodagem são parâmetros que merecem atenção especial. De acordo com SUMMER e Sabanci (2005), a utilização de pneus radiais aumenta a eficiência de tração em 3,44%, e diminui o consumo específico em 3,08% em relação aos pneus diagonais. Quando tratores são operados com pneus duplos, a eficiência global aumenta em 14,73%, enquanto o consumo específico diminui em 12,77%.

Através da análise de tração, NEUJHR e Shlosser (2001), citados por BARBOSA (2005), foram avaliados pneus agrícolas radiais e diagonais em um solo de várzea utilizado no cultivo do arroz. Os resultados permitiram concluir que os pneus radiais apresentavam menor resistência ao rolamento (principalmente em velocidades maiores), menores índices de patinagem quando comparados aos pneus diagonais submetidos à mesma força de tração, menor consumo de combustível quando submetidos a forças de tração maiores que 20 kN, maior coeficiente dinâmico de tração e melhor desempenho em tração dentro dos limites de alta eficiência, ou seja, entre 5 e 20% de patinagem. LOPES et al. (2003) compararam o consumo de combustível de tratores em função do tipo de pneu, da lastragem e da velocidade de deslocamento, e concluíram que a utilização do pneu radial resultou em menor consumo específico. MIRANDA et al. (2000) analisaram o efeito isolado do desgaste dos pneus como efeito principal, sendo que os pneus novos foram superiores em todos os parâmetros avaliados. Segundo os autores, apenas o consumo horário de combustível não diferiu significativamente. A utilização dos pneus novos reduziu a patinagem dos pneus traseiros em 14,2% favorecido pela diferença de altura das garras em relação aos pneus usados com nível de desgaste de aproximadamente 37%. A economia de combustível por hectare observada foi

de 6,9%. Um experimento realizado por FRANZ (1988) demonstrou que pneus com maior altura de garras também apresentaram melhor desempenho. LANÇAS et al. (1996) realizaram experimentos mostrando que a pressão correta dos pneus reduziu o consumo de combustível em até 20%, para uma determinada operação, além de um aumento de 5% na produtividade.

- **Transmissão**

Valores típicos para eficiência de transmissão por engrenagens para tratores com pneus diagonais são mostrados no diagrama da Figura (3.7). A eficiência da transmissão varia entre 0,85 e 0,90 para a transferência de potência para o eixo de tração. De acordo com ZOZ (1987), valores entre 0,90 a 0,92 podem ser considerados para a tomada de força.



**FIGURA 3.7 – Relações de potência aproximadas para tratores agrícolas**

FONTE: Zoz (1987).

Durante todo o caminho percorrido, a energia mecânica que sai do motor sofre perdas até chegar ao(s) eixo(s) de tração. Estas perdas são função somente do equipamento. Do eixo de tração até a barra de tração, as perdas são função do tipo de trator e do tipo de solo, que caracteriza a condição de tração. Nota-se que tratores com esteiras possuem uma maior eficiência de tração (relação entre potência da barra de tração e do eixo traseiro) do que tratores tipo 2WD, MFWD e 4WD, especialmente para condições mais severas (solos macios)

A variação no consumo de combustível devido a eficiência da transmissão é função do tipo de transmissão (engrenagens, *Powershift*, CVT's, hidramática dentre outras). No caso da transmissão por engrenagens, a eficiência irá depender do contato entre os dentes.

- **Vazamentos na linha de combustível**

Devido à grande quantidade de tubulações e conexões, é possível ocorrer algum vazamento. Assim, inspeções no sistema de combustível são muito importantes. Ao se completar o tanque, não é recomendado encher totalmente o mesmo até o bocal, pois a dilatação volumétrica devido à exposição solar pode fazer com que ocorram vazamentos pelo próprio bocal. O ideal é que se faça o abastecimento no final do dia.

- **Lastragem**

Aumentando-se o peso do trator, aumenta-se a resistência ao movimento, mas a eficiência global de tração também aumenta. De acordo com ZOZ e Grisso (2003), o desenvolvimento de critérios de lastragem requer um entendimento adequado do objetivo da lastragem. Apesar de não haver um entendimento universal, para a maioria das situações encontradas, o objetivo é otimizar o tempo gasto perto da eficiência máxima de tração, maximizando o trabalho executado e minimizando o consumo de combustível. Um embasamento teórico para recomendações de lastragem pode ser encontrado em ZOZ (1995). Para operações onde a força na barra de tração é pouca, como em operações de transporte, o excesso de peso pode ser retirado diminuindo assim a resistência ao rolamento, a compactação do solo e o consumo de combustível.

### 3.2.6 Falhas no sistema de aquisição de dados

As falhas no sistema de aquisição de dados são de difícil quantificação. Apesar disto, provocam grandes variações no consumo. Na prática, variações no consumo devido a falhas no sistema de aquisição de dados chegaram a 300 %.

Na maioria das situações de campo, o produtor não possui os equipamentos necessários para uma medição precisa do consumo de seus tratores. Geralmente, a maneira mais prática de se determinar o consumo de combustível é através do controle de abastecimento. O responsável pelo abastecimento completa o tanque e anota o horímetro inicial ( $h_o$ ). Após o serviço a máquina é reabastecida, o volume de combustível ( $V_c$ ) e o horímetro final ( $h_f$ ) são anotados. O consumo médio pode ser obtido através da Equação (3.2):

$$Qm = \frac{(h_f - h_o)}{V_c} \quad (3.2)$$

- **Falha humana na aquisição**

Durante o reabastecimento, o fator humano não pode ser desprezado. A anotação dos horímetros e do volume de combustível deve ser feita com bastante atenção. A falha humana mais comum de acontecer, entretanto, está relacionada a não anotação dos dados.

- **Falha no funcionamento do horímetro**

Um horímetro em boas condições é fundamental para a determinação do consumo. Problemas com horímetros provocam grandes distorções nos valores medidos. Os horímetros devem estar sempre em bom funcionamento, pois além do consumo, servem também para indicar a necessidade de manutenções preventivas, baseadas no tempo.

- **Falha na medição do volume de combustível**

A falha na medição do consumo de combustível pode ser causada por uma falha no equipamento de medição. É importante que o medidor de vazão da bomba de abastecimento seja aferido periodicamente.

- **Retirada do combustível do tanque**

A retirada do combustível do tanque para outros fins, como lavagem de peças deve ser evitada. Porém, sempre que isto ocorrer, para um bom controle, é fundamental que seja anotado tal procedimento. A medição do volume de combustível retirado pode ser complicada. Porém, sabendo-se que tal procedimento ocorreu, deixa-se de confiar nos dados fornecidos durante aquele período.

O equipamento deve ser guardado em local seguro, onde se possa evitar a retirada do combustível do tanque.

## **Capítulo 4      RESULTADOS**

Nos capítulos 2 e 3 foram apresentadas equações que representam matematicamente o sistema em questão. Neste capítulo, serão mostradas inicialmente algumas simulações computacionais destas equações visando verificar a sua influência no consumo de combustível. Devido à dificuldade de se obter dados sobre a potência de serviço em tratores nacionais, em seguida, procurou-se através das equações de consumo fazer o caminho inverso, ou seja, analisar a potência de serviço e a rotação através do consumo médio, que é um dado de mais fácil obten

o comportamento do gráfico mostrado na Figura (4.1). De acordo com o gráfico, se a rotação de trabalho com aceleração máxima fosse de 2160 rpm, o fator de potência estimado para esta operação seria de 0,641. Através da Equação (2.16), para aceleração máxima ( $N_{red}=0$ ), tem-se então o consumo de combustível em função do fator de potência X, conforme mostrado no gráfico do consumo de combustível vs Fator de potência, Figura (4.2). Para o fator de potência de 0,6, tem-se o consumo de 20,49 [L/h]:

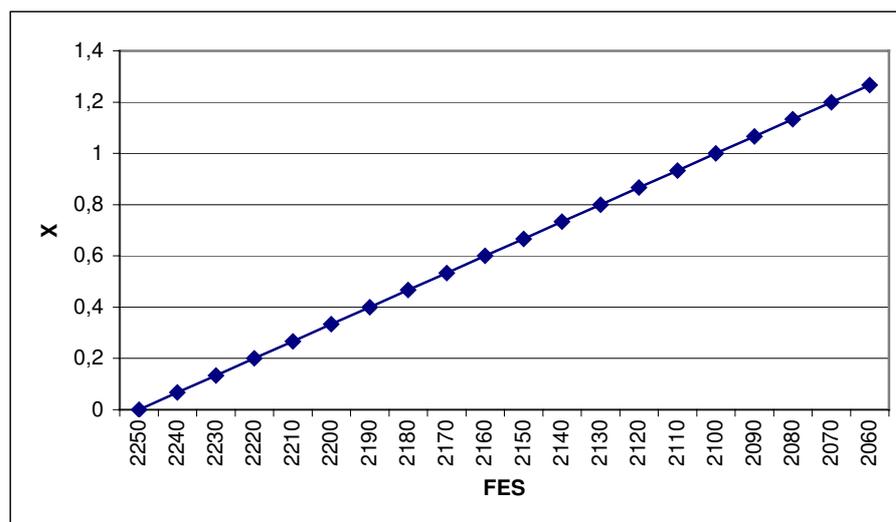


FIGURA 4.1 – Gráfico da estimativa do Fator de Potência

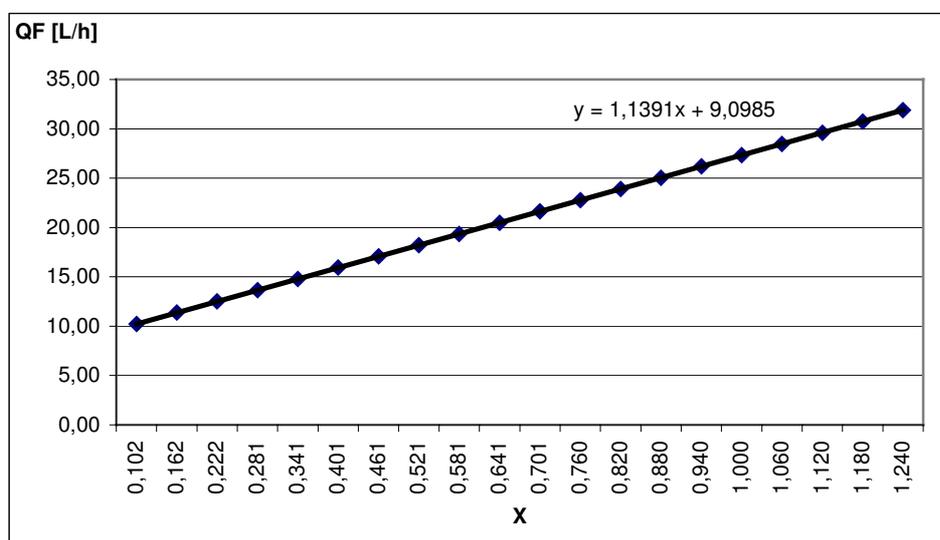


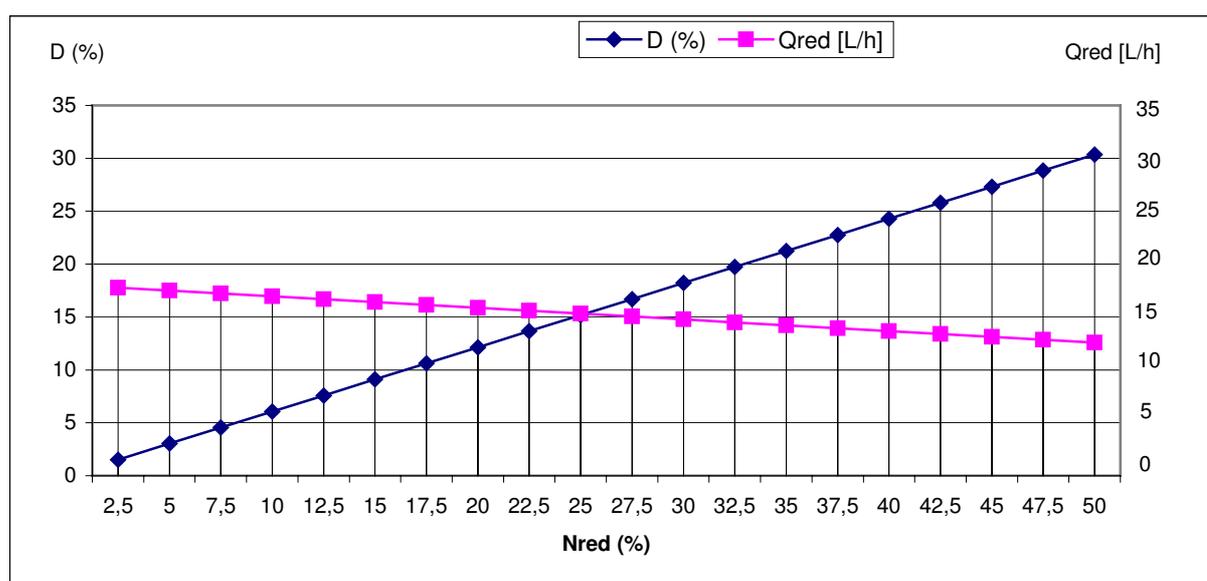
FIGURA 4.2 – Gráfico do consumo vs. fator de potência (aceleração máxima).

Através da Equação (2.18), pode ser estimanT17.008.02 331.859 lo6[(0,-)9.1(25,-)Tf0-11.1

consumo de combustível ( $D(\%)$ ) foram então obtidos e o consumo para rotações reduzidas e cargas parciais ( $Q_{red}$ ) foi estimado através da Equação (4.1):

$$Q_{red} = \frac{Q_f (100 - D)}{100} \quad (4.1)$$

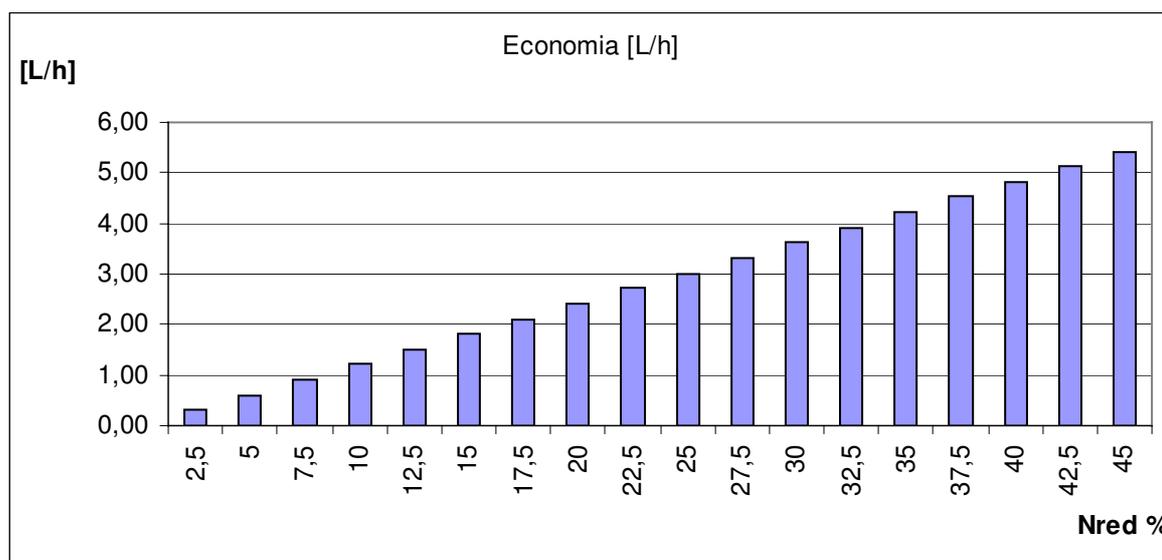
O consumo para rotações reduzidas e cargas parciais pode ser determinado, conforme a Figura (4.3):



**FIGURA 4.3 – Gráfico do consumo de combustível e decréscimo no consumo em função da taxa de redução da rotação do motor.**

Analisando-se o gráfico apresentado na Figura (4.3) pode-se notar que o consumo para aceleração máxima e fator de potência de (0,6) é de 18,11 [L/h]. Este valor pode ser reduzido através de uma redução na rotação do motor. Para uma redução de 15% na rotação do motor, o consumo passa para 16,47 [L/h], ou seja, uma economia de 1,64 [L/h]. No caso de uma redução de 25%, o consumo passa para 15,4 [L/h], com uma economia de 2,66 [L/h]. Portanto um trator que trabalha em média 200 horas mensais nas condições acima ( $N_{red}=25\%$ ) poderá economizar durante um ano cerca de 6377 litros de óleo Diesel. Um volume considerável, conseguido apenas com a mudança para uma marcha mais rápida e, conseqüente, redução na rotação de trabalho.

A economia de combustível atingida pelo Trator John Deere 7610 PowerShift, em função da taxa de redução da rotação de trabalho pode ser visualizada através da Figura (4.4).



**FIGURA 4.4 – Gráfico da economia de combustível em função da redução na rotação do motor, para um trator com  $P_{pto} = 86,47$  kW e fator de potência de 0,641.**

Durante a aplicação destes conceitos deve-se tomar uma precaução maior no intuito de não sobrecarregar o motor, ou seja, tentar produzir mais torque em baixas rotações do que ele foi projetado. Uma fumaça preta pode aparecer quando o motor é sobrecarregado. A resposta ao acelerador deve ser checada. Ao se pressionar o acelerador o motor deve responder com um aumento na rotação, caso isto não ocorra, uma marcha mais forte deve ser selecionada.

Segundo a norma OECD (2000), para testes em carga máxima e rotações variadas, o consumo horário, torque e potência são medidos em função da rotação do motor. Para a obtenção das curvas, a redução na rotação do motor deverá ser limitada. O teste deve ser realizado até que a rotação do motor fique 15% abaixo da rotação de torque máximo ou até que a rotação atinja 50% da rotação nominal, devendo-se adotar a opção que permitir menores rotações. No caso desta simulação, o decréscimo percentual na rotação do motor foi limitada a 45%.

## 4.2 Influência da patinagem no consumo de combustível

Durante o desenvolvimento da FTA para o consumo, foi constatado que a patinagem exerce uma forte influência sobre o mesmo. De acordo com GIEDRA e Janulevicius (2005), o consumo de combustível para a patinagem das rodas pode ser estimado em função da

potência do motor ( $P_e$ ), da Patinagem ( $TR$ ), da eficiência da transmissão ( $\eta_{tr}$ ) e do consumo específico volumétrico ( $SVFC$ ). A nomenclatura foi adaptada para ser utilizada no restante do trabalho para uma melhor padronização e também encontra-se apresentada na lista de nomenclatura para referências futuras. O consumo devido à patinagem pode ser calculado de acordo com a Equação (4.2).

$$Q_{TR} = P_e \cdot TR \cdot \eta_{tr} \cdot SVFC \text{ [L/h]} \quad (4.2)$$

A Equação (4.2) foi simulada para a verificação da influência da patinagem no consumo de combustível. A eficiência da transmissão foi definida em 90% e o consumo de combustível volumétrico específico foi de 0,25 [L/(kW.h)]. Estes valores foram escolhidos de maneira a se obter valores de consumo otimistas, gerando uma eficiência de 0,9. Valores de consumo em função da patinagem estão mostrados na Figura (4.5) para diversos níveis de potência do motor.

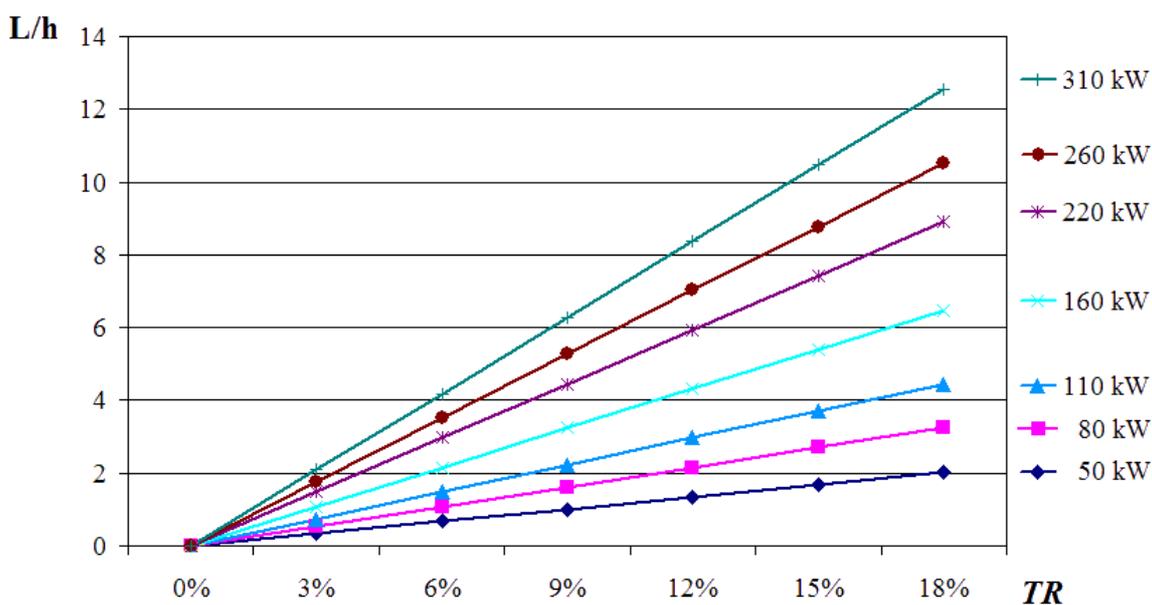


FIGURA 4.5 – Gráfico da patinagem vs consumo de combustível ( $\eta_{tr} = 0,9$  e  $SVFC = 0,250$  kg/kW.h).

Como citado anteriormente, para valores de patinagens maiores que 18% a estrutura do solo se deteriora, não sendo recomendado a utilização de tratores de rodas nestas situações. Portanto, a simulação foi limitada a valores de patinagens de até 20%. Por outro lado, sabe-se que é impossível conseguir condições eficientes de tração sem que ocorra este efeito.

Através da simulação pode-se concluir, por exemplo, que um trator com potência de 110 kW e patinação de 20%, consome cerca de 2,5 L/h a mais do que o mesmo trator com patinação de 10%.

Analisando a Figura (4.5) é possível obter uma estimativa da influência da patinação no consumo de combustível. Dados práticos para um trator com potência de 110 kW mostram um consumo médio de 20 L/h. De acordo com o gráfico, se a patinação for de 20%, o aumento no consumo devido a patinação é de 5 L/h. Logo, para uma patinação de 20%, o consumo aumentará cerca de 25%. Portanto, pode-se concluir que a influência da patinação no consumo de combustível é de até 25% (para patinações inferiores a 20%).

O valor encontrado para a influência da patinação no consumo de combustível está representado na FTA para o consumo de combustível de tratores (Figura (3.1)), apresentada no Capítulo 3, juntamente com a FTA para a patinação (Figura (3.3)).

### **4.3 Método para a escolha do sistema trator-implemento**

A escolha de um determinado trator para trabalhar com um implemento depende de uma análise técnica para uma melhor economia de combustível. GRISSO et al. (2006), propõem uma metodologia para o cálculo do consumo de combustível para tratores específicos, para cargas parciais e rotações reduzidas. Esta metodologia será utilizada neste trabalho para a predição do consumo de combustível para tratores agrícolas durante rotações reduzidas. O método apresentado pode ser utilizado para a seleção de implementos ou tratores para uma determinada aplicação, de maneira a se obter uma maior economia de combustível, através da escolha correta da potência do trator e da redução da rotação do motor para o serviço.

De modo a se ilustrar esta metodologia, é mostrada a seguir uma análise para a escolha da potência adequada do trator para um determinado serviço, visando uma melhoria no consumo de combustível.

Será feita a suposição de que o produtor possui duas opções de tratores e uma determinada potência para funcionar um determinado implemento. No primeiro caso, será utilizado um trator com 81,5 kW (TRATOR 1) e o outro com 128,36 kW (TRATOR 2) de potência nominal na tomada de força. A potência para o implemento será adotada como 80 kW. Neste caso, o TRATOR 1 irá trabalhar na potência perto da máxima e aceleração total. O outro poderá trabalhar com um fator de potência menor e rotações reduzidas. Apesar de

ter um motor mais potente, e consumir mais em rotação máxima, o trator 2 terá uma eficiência de combustível maior devido ao regime de trabalho. O Laboratório de Testes Nebraska fornece um resumo dos testes executados em vários tratores. Seus relatórios fornecem dados sobre testes de tratores em pista de concreto. Estes dados serão utilizados na simulação do consumo de combustível para tratores específicos, metodologia utilizada para a escolha no par trator-implemento. Os resultados dessa simulação podem ser visualizados na Tabela (4.2).

**TABELA 4.2 – Simulação do consumo de combustível para tratores específicos**

	TRATOR 1	TRATOR 2	Un.
Teste	5285	5396	
Fabricante	VALMET	JOHN DEERE	
Modelo	8150	8120	
<i>Ppto</i>	81,5	128,36	kW
<i>Preq</i>	80,0	80,0	kW
$X [Ppto/Preq]$	0,982	0,623	
Coeficientes			
<i>a</i>	0,0418	0,0408	
<i>B</i>	0,0233	0,0199	
<i>C</i>	0,007	0,0105	
<i>D</i>	-0,0165	- 0,0152	
<i>E</i>	-0,1418	- 0,1711	
<i>F</i>	-0,1586	- 0,2389	
<i>G</i>	12,8834	24,6793	
<i>H</i>	12,4569	24,878	
$Q_F$ [Eq. (2.19)]	7,03	7,8	Gal/Hr
$Q_F$	26,62	29,52	L/h
Q (Nred = 10%)		25,23	L/h
Q (Nred = 20%)		24,41	L/h
Economia (Nred = 10%)		14,53	%
Economia (Nred = 20%)		17,31	%

Na Tabela (4.2) é mostrado o código do teste realizado pelo Laboratório de Nebraska (OECD 1618 e OECD 1819) e as informações sobre os tratores tais como: fabricante, modelo, potência na tomada de força (*Ppto*). A potência requerida (*Preq*), o fator de potência (*X*) e os coeficientes para o cálculo do consumo de combustível para tratores específicos (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* e *h*) também estão relacionados. A Equação (2.19) é utilizada para o cálculo do consumo de combustível para tratores específicos.

Coefficientes para a equação de consumo para diversos modelos de tratores foram retiradas do site da Virgínia Tech (2007).

De acordo com a Tabela (4.2), o TRATOR 1 deverá trabalhar próximo da rotação nominal, na qual o motor produzirá sua potência nominal. O consumo calculado para esta operação é de 26,62 [L/h]. Nota-se que pelo fato da potência requerida ser muito próxima da potência nominal, uma redução da rotação de trabalho não é possível. Este trator foi escolhido de propósito, por ter uma potência próxima da potência de trabalho. Já o TRATOR 2 irá trabalhar com uma certa “folga”, pois a relação entre sua potência nominal e a potência requerida, ou seja, o fator de potência (X) será menor. Assim será possível a aplicação dos conceitos de GUTD, o operador poderá selecionar uma marcha mais alta, reduzindo a rotação do motor e mantendo a velocidade constante. Portanto, a escolha do TRATOR 2 implicará numa economia de combustível de aproximadamente 1,39 e 2,21 [L/h] (14,53% e 17,31%, respectivamente) com a rotação de trabalho reduzida em 10% e 20%, respectivamente.

Situações como esta são comuns na escolha de tratores para um determinado implemento e vice-versa. Através da escolha correta, é conseguida uma redução nos valores de consumo de combustível.

#### 4.4 Análise da potência de serviço / rotação através do consumo médio.

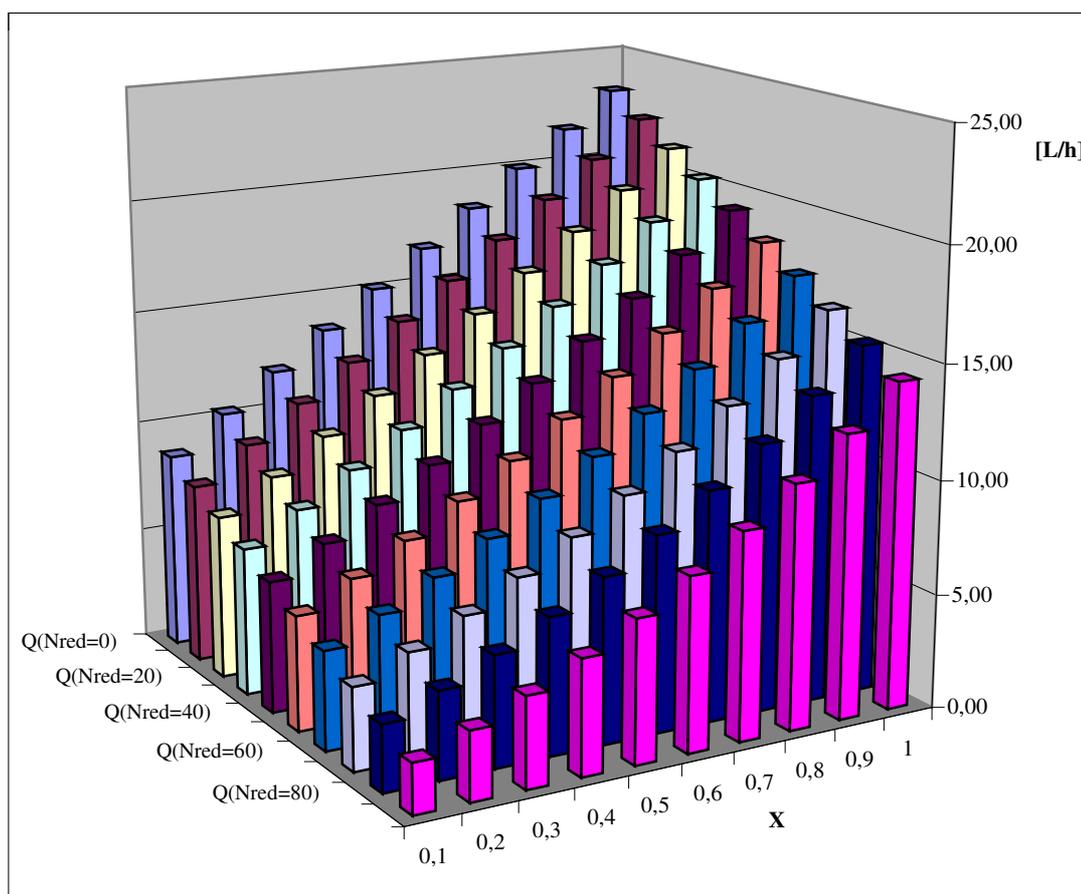
Através de dados de consumo de combustível em campo tentou-se determinar, de maneira inversa, o fator de potência e a rotação média na qual o trator estaria sendo submetido. Esta simulação foi buscada devido a facilidade de se obter informações sobre o consumo, aliado a dificuldade de se obter dados sobre a potência de serviço. Dados médios sobre consumo foram obtidos junto a uma empresa de construção pesada, que utiliza o trator na preparação de solos, conforme mostrado na Tabela (4.3).

**TABELA 4.3 – Especificações Técnicas Trator VALMET 128 4x4**

Prefixo	TP 22	Unidade
Fabricante	VALMET	
Modelo	128 – 4x4	
$P_E$	89,7	kW
$\tau$	0,82	
Ppto	73,55	kW

As equações de consumo utilizam a potência da tomada de força para o cálculo do fator de potência. ZOZ (1987) apresenta relações de potências aproximadas para tratores agrícolas. De acordo com o diagrama da Figura (3.7), eficiências entre 0,82 e 0,84 são comuns para a tomada de força. Neste caso foi adotado o valor de 0,82, que representa a pior das hipóteses.

De acordo com dados da empresa, o consumo médio de combustível medido após reabastecimento em 17/02/2006 foi de 12,6 [L/h]. Através de Equação (2.17), podem ser encontrados alguns valores para o consumo médio em função do fator de potência e da porcentagem de redução da rotação do motor, conforme mostrado na Figura (4.6). Os valores para a variável  $X$  (Fator de potência) foram variados de 0 a 1, com intervalos de 0,1. A variável  $N_{red}$  (porcentagem de redução na rotação do motor) foi variada de 0% a 90%, com intervalos de 10%.



**FIGURA 4.6 – Consumo de combustível (cargas parciais e rotações reduzidas): trator Valmet 128 4x4.**

Através do gráfico da Figura (4.6), pode-se visualizar a dependência do consumo de combustível com relação as variáveis: fator de potência e decréscimo percentual na rotação do motor. Para a condição de consumo máximo, isto é, fator de potência igual a um e rotação

máxima, foi encontrado um consumo de 23,24 [L/h]. Na condição de consumo mínimo, isto é para fator de potência igual a 0,1 e rotação reduzida em 90%, foi encontrado um consumo de 2,18 [L/h], valor que representa 9,38% do valor máximo encontrado.

Os valores mais próximos do consumo real são apresentados na Tabela (4.4). Estes demonstram que, se o trator estivesse trabalhando em regimes constantes, qualquer uma destas situações se aproximaria da realidade. Porém, sabe-se que durante um dia de serviço o trator passa por várias condições de serviço e de operação. Assim, esta metodologia pode estimar o fator de potência médio desde que se saiba qual a rotação média do motor.

**TABELA 4.4 – Valores próximos do consumo real**

X	Nred [%]	Q [L/h]	Qreal [L/h]	Diferença [%]
0,3	0	11,92	12,6	-5,40
0,4	10	12,59	12,6	-0,08
0,5	20	13,18	12,6	4,60
0,5	30	12,19	12,6	-3,25
0,7	40	12,70	12,6	0,79
0,7	50	13,22	12,6	4,92
0,7	60	12,19	12,6	-3,25
0,8	70	12,77	12,6	1,35
0,9	80	13,46	12,6	6,83
0,9	90	12,44	12,6	-1,27

#### 4.5 Estudo de Caso

Com o objetivo de apresentar um estudo de caso real, foi analisada uma empresa do setor de construção pesada. A Construtora Sercel LTDA é uma empresa de porte médio e possui atividades relacionadas a terraplenagem e obras de arte. O controle de consumo e das manutenções preventivas e corretivas é realizado pelo departamento de manutenção. Todas as atividades são registradas pelos apontadores e lançadas em uma planilha mensal de cada equipamento pelo controlador de manutenção. Nesta planilha, são lançados dados diários do horímetro, abastecimentos, reposições de lubrificantes diversos, filtros, materiais de desgaste, serviços executados e peças aplicadas pela manutenção corretiva. Na mesma planilha, o custo mensal do equipamento é calculado. Um relatório mensal do equipamento é então impresso e arquivado na pasta dos equipamentos, para fins de histórico.

A seguir serão mostradas algumas formas práticas de se medir o consumo de combustível através de um estudo de caso baseado nos dados da construtora SERCEL. Logo

após, a árvore de falhas obtida para o consumo, será aplicada na identificação de falhas em controles de abastecimento reais desta empresa.

#### 4.5.1 Determinação prática do consumo de combustível

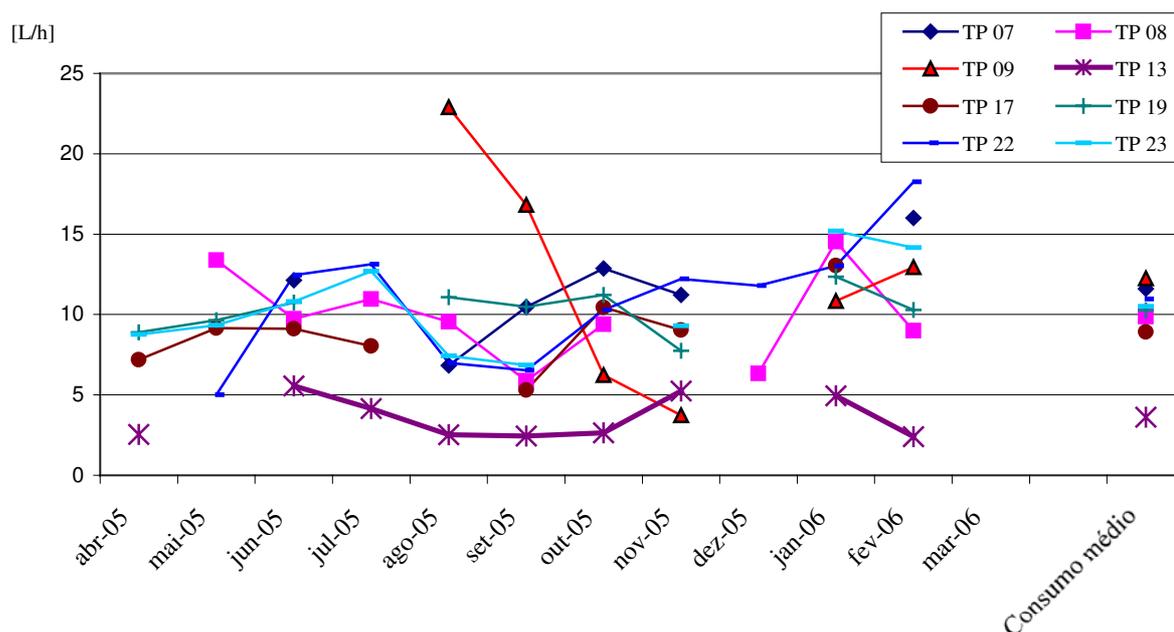
A medição do desempenho de tratores requer uma certa instrumentação, além de uma mão de obra qualificada para a instalação, monitoramento e interpretação dos dados obtidos nos controles. Esta realidade ainda encontra-se distante dos locais onde tratores operam.

Em situações reais, a técnica mais simples e mais utilizada na determinação do consumo de combustível para tratores é o consumo medido entre abastecimentos. A hipótese fundamental deste método é que o tanque deve ser reabastecido completamente. Após a jornada de trabalho da máquina, a mesma é abastecida e o volume de combustível é dividido pelo tempo de trabalho. O resultado é um consumo médio, obtido entre dois abastecimentos consecutivos.

Uma média mensal também pode ser obtida dividindo-se a quantidade de combustível consumida no mês pela quantidade de horas trabalhadas durante o mês. Este consumo é chamado de CMM (Consumo Médio Mensal). Este tipo de consumo é um consumo médio que permite ter uma base do comportamento mensal do equipamento.

#### 4.5.2 Aplicação da FTA nos controles de abastecimento.

Os consumos médios mensais entre os meses de abril de 2005 a fevereiro de 2006 foram monitorados para os equipamentos localizados em uma determinada obra da empresa. De acordo com os relatórios de consumo de alguns equipamentos, os valores para o consumo apresentaram grandes variações, colocando em dúvida a eficácia e a aplicabilidade dos relatórios mensais. Na Figura (4.7) é mostrado o monitoramento do consumo de combustível de diversos tratores, sendo que todos são da marca VALMET e modelo 128. Os tratores foram utilizados acoplados a implementos diversos, tais como: grades de arrasto, grades hidráulicas e vassouras mecânicas. A legenda do gráfico mostra os prefixos dos tratores, associando-os às linhas de consumo.



**FIGURA 4.7 – Monitoramento do consumo médio mensal para tratores agrícolas**

FONTE: Construtora SERCEL LTDA

De acordo com o gráfico da Figura (4.7), os valores de consumo médio mensal para cada trator apresentaram um comportamento aleatório. Alguns tratores apresentaram baixos valores para o consumo, enquanto outros apresentaram um consumo muito alto.

O CMM (Consumo Médio Mensal) do Trator de Pneu VALMET 128 4x4, prefixo TP 09 foi de 22,89 [L/h] no mês de agosto de 2005, enquanto o CMM de outro trator de mesmo modelo e prefixo TP 13 foi de 2,52 [L/h]. Se os equipamentos possuem motores idênticos, como seria possível uma variação tão grande no consumo?

Para se fazer uma análise do consumo, é necessário conhecer os fatores responsáveis por esta variação. A árvore de falhas da Figura (3.1) pode ser utilizada como uma importante ferramenta no diagnóstico da falha. Através da FTA, pode-se concluir que fatores como ambiente, combustível, operação e equipamento não poderiam influenciar tanto no consumo. De acordo com a simulação realizada no item 4.1, o valor máximo para o consumo deste equipamento seria de 23,24 [L/h] (rotação e fator de potência máximos). Pode-se formular duas hipóteses principais para o alto valor de consumo encontrado, conforme detalhamento apresentado a seguir.

- 1ª Hipótese: Falha no sistema de aquisição de dados.

De acordo com esta falha, o valor encontrado para o consumo não representa a situação real. Durante alguma etapa na coleta de dados houve uma ou mais falhas no processo. Falhas no horímetro, na anotação e no volume de combustível medido poderiam estar influenciando o resultado.

- 2<sup>a</sup> Hipótese: Falha na segurança.

Uma falha na segurança poderia afetar o consumo medido, pois o combustível poderia estar sendo retirado do tanque durante a noite, podendo ser uma hipótese plausível, pois a máquina não era guardada em um local seguro.

Ao se analisar o relatório mensal do TP 09 constatou-se que o horímetro entre 18/08/2006 e 27/08/2006 não sofreu alteração, conforme mostrado na Tabela (4.5). Porém, vários abastecimentos foram registrados neste período.

**TABELA 4.5 – Planilha de abastecimentos do trator agrícola TP 09 – Agosto/05**

DATA	HORÍMETRO	HORAS DIA	ACUM EQUIP	DIESEL
31/7/05	3541			41
01/08/05	3543	2	3543	48
02/08/05	3545	2	3545	71
03/08/05	3549	4	3549	46
04/08/05	3552	3	3552	
05/08/05	3556	4	3556	
06/08/05	3560	4	3560	
07/08/05	3560	0	3560	
08/08/05	3563	3	3563	93
09/08/05	3563	0	3563	22
10/08/05	3564	1	3564	
11/8/05	3566	2	3566	79
12/8/05	3570	4	3570	35
13/8/05	3570	0	3570	
14/8/05	3570	0	3570	
15/8/05	3570	0	3570	
16/8/05	3573	3	3573	105
17/8/05	3579	6	3579	43
18/8/05	3579	0	3579	
19/8/05	3579	0	3579	51
20/8/05	3579	0	3579	37
21/8/05	3579	0	3579	
22/8/05	3579	0	3579	44
23/8/05	3579	0	3579	63
24/8/05	3579	0	3579	87
25/8/05	3579	0	3579	78
26/8/05	3579	0	3579	12
27/8/05	3579	0	3579	37
28/8/05	3583	4	3583	15

DATA	HORÍMETRO	HORAS DIA	ACUM EQUIP	DIESEL
29/8/05	3583	0	3583	
30/8/05	3583	0	3583	
31/8/05	3585	2	3585	
TOTAL		44		1007

FONTE: Construtora SERCEL LTDA

A falha no horímetro foi constatada, e sua troca foi providenciada pelo departamento de manutenção. O consumo mensal para este trator não pôde ser determinado pelo controle, pois houve uma falha no sistema de aquisição de dados.

Ao se analisar a Figura (4.7), nota-se que o equipamento de prefixo TP 13 obteve o menor consumo entre os tratores. O fator de potência, neste caso, foi o que determinou o seu consumo, pois este trator estava ligado a uma vassoura mecânica, um implemento que necessita de pouca potência. O valor médio para o consumo neste caso foi 3,64 [L/h].

Muitas vezes, durante medições de consumo de combustível em algum equipamento, é comum aparecerem variações nos valores de consumo, principalmente no caso do consumo medido em litros por hora. A interpretação destes resultados, que a princípio parecem aleatórios, pode ser feita com a ajuda da árvore de falhas para a variação do consumo de combustível. O desenvolvimento de uma ferramenta que permita esta interpretação de maneira fundamentada foi uma das principais motivações para o desenvolvimento deste trabalho. Neste estudo de caso, houve uma dificuldade maior de interpretação devido a falta de dados sobre parâmetros tais como: a potência na barra de tração e patinagem. Mesmo assim, as grandes variações apresentadas puderam ser justificadas.

## Capítulo 5 CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões deste estudo, algumas proposições para serem utilizadas na redução do consumo de combustível e algumas sugestões para trabalhos futuros. Diante dos objetivos propostos e dos resultados obtidos, algumas conclusões foram obtidas e são mostradas a seguir.

### 5.1 Conclusões

Através da aplicação da FTA foi realizado um estudo sobre a variação do consumo de combustível de tratores. As equações utilizadas na predição do consumo foram apresentadas e seu comportamento foi estudado através de simulações.

Os parâmetros necessários para a construção da FTA foram levantados. O evento “Variação no consumo de combustível” foi desenvolvido através do estudo da literatura existente, juntamente com sub-eventos da FTA.

De acordo com os resultados levantados através da FTA, conclui-se que a potência de serviço é o fator que mais influencia no consumo de combustível em tratores. De acordo com a potência de serviço, os valores para o consumo apresentaram uma variação de até 160%.

Pode-se concluir também que valores de patinagem de até 20% podem influenciar o consumo de combustível em até 25%. Para condições de patinagens maiores que 18% não é recomendado o uso de tratores de pneus.

A árvore de falhas para o evento patinagem mostrou os fatores responsáveis pela variação da mesma. Os fatores principais que influenciam a patinagem são as velocidades real e teórica. Dentre os fatores que influenciam a velocidade real pode-se destacar: pneus, características físicas do solo, razão dinâmica, razão de engrenamento ou marcha selecionada e diâmetro do pneu, conforme apresentado no capítulo 4.

Através da literatura existente, buscou-se uma quantificação percentual da influência de cada parâmetro utilizado na FTA. Alguns parâmetros tiveram valores bastante diferentes de acordo com cada autor como, por exemplo, a patinagem. Outros fatores não puderam ser quantificados devido a falta de trabalhos sobre o assunto. Por estes motivos, foram apresentadas faixas de variação apenas para os parâmetros encontrados. Para os demais parâmetros não quantificados, serão necessárias mais pesquisas, ou mesmo, testes. Para os parâmetros encontrados, pode-se ver que a patinagem (limitada a 18%) é responsável por até

25% na variação do consumo. A operação é responsável por uma variação de até 15%, o combustível, até 55%, sendo que o fator responsável por esta variação é o tipo de combustível utilizado (gasolina, diesel ou GLP). O fator ambiental é o maior responsável pela variação no consumo de combustível, haja visto que a potência de serviço pode provocar variações de até 160% no consumo médio.

Durante a aquisição de máquinas e equipamentos é importante a escolha correta do trator-implemento para uma produção satisfatória e uma economia de combustível. Através das equações para o consumo de combustível e das simulações foi mostrada uma metodologia que pode ser utilizada na escolha do par trator-implemento de maneira a se obter uma maior economia de combustível. Através de uma análise mais simplificada, recomenda-se que a potência de serviço esteja entre 60 e 70% da potência nominal do trator. Assim, é possível aplicar os conceitos de GUTD com maiores ganhos no consumo.

A metodologia mostrada no trabalho pode ser adaptada para o treinamento de operadores, especialmente no que se refere aos fatores de operação, apresentados na FTA para o consumo de combustível. Através do conhecimento da mecânica do trator e dos fatores responsáveis pela variação no consumo de combustível, os operadores poderão tomar medidas visando um aumento de eficiência na queima do combustível e nas condições operacionais. Os conceitos de GUTD (Gear Up Throttle Down) devem ser amplamente conhecidos e aplicados por todos os responsáveis pela operação, pois consiste na maneira mais simples e fácil de se buscar uma redução no consumo de combustível. Um plano de operação será mostrado mais adiante.

A árvore de falhas foi aplicada na identificação de falhas em controles de abastecimentos de tratores,

deste trabalho seria a quebra deste paradigma. Se a técnica da FTA pode ajudar a explicar sistemas mecânicos complexos, nada impede que a mesma seja aplicada na descrição dos mais diversos sistemas.

Através dos resultados obtidos neste estudo, juntamente com outras recomendações consagradas no setor agrícola, serão mostradas a seguir algumas recomendações para a redução no consumo de combustíveis em tratores.

## **5.2 Diretrizes para economia de combustível em tratores**

Diante do que foi apresentado, achou-se importante a inclusão de algumas diretrizes, sobretudo para se atingir uma melhoria nos índices de consumo em tratores. Estas diretrizes destinam-se aos mantenedores, operadores, gerentes e controladores e são apresentadas a seguir em forma de planos de manutenção e operação.

### 5.2.1 Manutenção

#### **Plano de Manutenção:**

- **Realizar as manutenções periódicas indicadas no manual do fabricante do trator.**  
Verificar com mais atenção itens relacionados ao consumo, como:
  1. Nível e estado do óleo da Transmissão
  2. Filtros de ar
  3. Filtros de combustível
  4. Óleo e filtro do motor
  5. Bombas e bicos injetores
- **Realizar análises periódicas em todos os lubrificantes da máquina, a cada 500 horas.**  
Verificando assim a ocorrência de desgastes nos componentes ou contaminações no óleo.
- **Inspecionar diariamente os indicadores de restrição dos filtros de ar.**  
O indicador de restrição irá indicar a troca ou reparo do filtro de ar. O excesso de sujeira irá diminuir a potência disponível, aumentar o consumo de combustível e as emissões.
- **Trocar os filtros de combustível a cada 250 horas de funcionamento.**

Filtros usados podem ser cortados ao meio e examinados para se verificar a presença de sujeira ou outros contaminantes. Se a análise do filtro indicar a presença de sujeira, o combustível utilizado no trator pode estar sofrendo contaminação no tanque ou em uma etapa anterior. Neste caso, o período de troca deverá ser reduzido para 200 horas.

- **Os pneus devem ser calibrados de acordo com as informações contidas no manual do proprietário, e checados semanalmente, ou a cada 50 horas.**

Estudos mostram que tratores com pneus calibrados corretamente apresentaram uma redução no consumo de combustível de cerca de 20%, além de um aumento de 5% na produtividade (LANÇAS et al. (1996)).

- **Inspecionar desgaste dos pneus a cada 250 horas, substituir se necessário.**

Para operações em solos mais macios, a banda de rodagem do pneu deverá estar em boas condições, garantindo assim uma maior eficiência de tração;

- **No caso de uma substituição, dê preferência aos pneus radiais.**

A utilização deste tipo de pneu proporciona maior economia de combustível se comparado aos pneus diagonais.

- **Inspecionar e eliminar possíveis vazamentos nas linhas de combustível do trator, no comboio de abastecimento, nos tanques de armazenamento diariamente.**

Os vazamentos nas linhas de combustível, além de prejudicarem o meio ambiente e a segurança operacional, são responsáveis por um aumento no consumo.

- **Garantir a procedência do combustível, evitando possíveis contaminações por água e outras impurezas.**
- **Evitar o enchimento do tanque até a boca.**

O combustível necessita de espaço para se dilatar dentro do tanque. No caso de uma dilatação, o combustível poderá transbordar do tanque.

- **Pintar os tanques de armazenamento com cores claras.**

Reduzindo a absorção da luz solar e conseqüentemente a dilatação e evaporação do combustível.

- **Aferir periodicamente as registradoras de combustíveis.**

As registradoras de combustíveis devem ser aferidas periodicamente para garantir assim uma maior confiabilidade dos dados nos controles de abastecimento.

- **Inspecionar níveis de fumaça do escapamento mensalmente.**

A medição do teor de fumaça negra do escapamento pode ser realizada com o auxílio de uma escala do tipo *Ringelmann*. No caso de teores acima do permitido, deve-se revisar os

elementos do sistema de injeção como bombas e bicos injetores. Em alguns casos, pode-se utilizar aditivos para a limpeza de bicos, adicionados ao combustível.

- **Executar manutenção periódica nas bombas de abastecimento.**

O combustível deve ser filtrado antes do abastecimento, ainda na bomba. Deste modo, o filtro da bomba deverá estar em boas condições.

- **Lubrificar semanalmente os implementos e manter suas ferramentas de corte em boas condições.**

- **Buscar, nos implementos, modificações que reduzam o número de passes necessários para o serviço, para reduzir o consumo por área e aumentar a produtividade.**

### 5.2.2 Operação

O fator operação constitui numa das maneiras mais práticas de se reduzir níveis de consumo. Será apresentado a seguir um plano de operação visando uma economia de combustível.

#### **Plano de Operação:**

- **Evitar a operação do trator em altas rotações.**

Aplicar uma marcha mais alta para reduzir a rotação o motor, mantendo a velocidade de trabalho constante, sempre que possível.

- **Evitar arrancadas, acelerações e freadas bruscas.**

No caso das arrancadas, a embreagem poderá apresentar desgaste prematuro e nas acelerações bruscas o consumo de combustível será prejudicado. No caso das freadas bruscas, o sistema de freios será mais requisitado, causando também desgaste prematuro em seus componentes. Além disso, parte da energia gasta para acelerar o trator será dissipada pelo sistema de freios, piorando os níveis de consumo.

- **Evitar que o motor funcione em marcha lenta por longos períodos.**

Apesar deste procedimento causar uma redução no consumo médio medido em litros por hora, a energia do combustível não está sendo convertida em trabalho útil. Nestes casos, é preferível desligar o motor e ligar novamente quando necessário. No início do dia, não é necessário esperar para que o motor “esquente”. Pode-se começar devagar e com uma

marcha mais lenta até o motor atingir sua temperatura normal de serviço. No final do dia, não é necessário ficar esperando muito tempo na marcha lenta para desligar o motor. Uma vez que o indicador acusar a queda de temperatura, o motor poderá ser desligado.

- **Procurar manter os pneus sempre calibrados de acordo com as informações contidas no manual da máquina.**
- **Dar preferência aos pneus radiais, pois os mesmos apresentam menor consumo de combustível se comparado aos diagonais.**
- **Recomendações para a Lastragem:**

A lastragem deverá ser função do tipo de serviço que será executado:

**1. Operações de transporte:**

As velocidades são maiores: Contra-pesos poderão ser retirados, reduzindo assim o peso do trator.

**2. Operações com maior força de tração:**

Adicionar contra-pesos, tomando-se cuidado para que não ultrapassar o limite máximo de peso de trabalho do trator, o que poderá ocasionar desgaste prematuro da transmissão e outros componentes, afetando a confiabilidade do equipamento. Tomar cuidado para não compactar demasiadamente o solo que irá ser trabalhado.

- **Considerações sobre a Patinagem:**
  1. **Manter a patinagem entre 5% e 13% (faixa para economia de combustível).**
  2. **Evitar a utilização de tratores de pneus onde a patinagem for maior que 18%.**

No último caso, a patinagem pode ser responsável por um aumento no consumo de combustível de até 25%.

### 5.2.3 Gerência e Controladores:

Além dessas recomendações para a operação e manutenção, outras recomendações podem ser direcionadas ao pessoal responsável pela gerência e pelos controles:

- **Garantir e procedência e a qualidade do combustível utilizado.**

A procedência e a qualidade do combustível utilizado deverá ser avaliada. Verificar a cada entrega se o combustível está dentro das especificações. Evitar fornecedores “sem bandeira” ou combustíveis de procedência duvidosa.

- **Apurar diariamente os controles de abastecimento do comboio, levantar o consumo diário de cada equipamento e garantir a confiabilidade do sistema de aquisição utilizado.**

Nos casos em que a coleta de dados for feita manualmente, é importante que a pessoa responsável tenha um mínimo de instrução para fazer as anotações corretamente, além de calcular o consumo e identificar possíveis problemas rapidamente. O controle de consumo deve ser monitorado diariamente, pois no caso de uma falha (valores acima da média), medidas corretivas poderão ser tomadas mais rapidamente.

- **Utilizar a metodologia para a escolha do par trator-implemento.**

A aplicação da metodologia para a escolha do trator em função do implemento ou vice-versa permite uma economia de combustível significativa durante toda a vida do trator, evitando também possíveis sobrecargas no trator ou implemento.

- **Tratores antigos podem ser substituídos por modelos mais novos, com motores alimentados eletronicamente e transmissões variáveis (CVTs, IVTs)**

Os motores alimentados eletronicamente permitem uma economia de combustível de cerca de 5%. As Transmissões Continuamente Variáveis CVTs permitem o funcionamento do motor nas faixas ótimas de eficiência. Alguns fabricantes relatam uma economia de combustível de até 15% através da utilização de CVTs.

Como esta prática pode acarretar num maior investimento inicial, é recomendado fazer um estudo sobre a viabilidade econômica da troca.

Através das medidas mostradas anteriormente, uma redução nos níveis de consumo de combustível poderá ser alcançada. A aplicação da FTA permitiu explicitar a maioria dos fatores responsáveis por variações no consumo de combustível. Além da redução nos custos de produção, tem-se também outro benefício que poderá ser atingido com a utilização destes critérios: a redução das emissões por trator, e conseqüente redução dos gases responsáveis pelo efeito estufa. Este trabalho não apresenta uma solução definitiva para o problema, entretanto, pode ser bastante útil diante da forte utilização destes combustíveis. A seguir, serão mostradas algumas sugestões para pesquisas e trabalhos nesta área.

### **5.3 Sugestões para trabalhos futuros**

A FTA para a variação no consumo de combustível de tratores mostrou uma série de fatores que são responsáveis por variações no consumo. Diante da literatura consultada,

estudos mostraram a influência de alguns fatores em percentuais. Porém, outros fatores não puderam ser determinados, pois não foram encontrados trabalhos que relacionassem tais fatores ao consumo.

Dentre os fatores que não puderam ser determinados, serão destacados alguns que poderão servir como inspiração para trabalhos futuros:

#### **1. Fatores ambientais:**

- Influência do tipo de solo no consumo de combustível,
- Influência da umidade do ar, temperatura do ar, pressão atmosférica no consumo de combustível

#### **2. Fatores relacionados ao equipamento:**

- Influência do estado do filtro de combustível no desempenho de tratores
- Influência do filtro de ar no consumo.
- Influência estado da bomba injetora e bicos injetores.

#### **3. Fatores relacionados ao sistema de aquisição de dados:**

- Desenvolvimento de um sistema de aquisição automática de dados de baixo custo para o controle da patinagem e do consumo de combustível em frotas de tratores agrícolas.

Com relação à Árvore de Falhas para o evento patinagem, os fatores apresentados poderão ser expandidos e suas influências para a patinagem e para o consumo de combustível buscadas.

#### **4. Fatores relacionados aos pneus.**

#### **5. Fatores relacionados às características físicas do solo.**

#### **6. Fatores relacionados a distribuição de peso do trator.**

Além da FTA, poderão ser verificadas outras técnicas para a análise do consumo de combustível, dentre elas: Análise dos Modos de Falhas e Efeitos - FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*), Análise da Causa Raiz da Falha – RCFA (*Root Cause Failure Analysis*), Gráfico de Pareto, dentre outras.

Os resultados mostrados nas simulações foram obtidos através de planilhas eletrônicas. Através da metodologia apresentada, pode ser desenvolvido um programa para

estimativa do consumo de combustível em tratores, inclusive com dados de tratores disponíveis no mercado nacional. Além disto, as equações ao longo do texto estão no sistema inglês. As mesmas poderão ser adaptadas para o Sistema Internacional (SI).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL-HAMED, S.A. and R.D. Grisso, F.M. Zoz and K. Von Bargaen. 1994. Tractor performance spreadsheet for radial tires. *Computers and Electronics in Agriculture*. 10:45-62
2. ASAE Standards, 1995. S296.4. Uniform terminology for traction of agricultural tractors, self-propelled implements, and other traction and transport devices. St. Joseph, Mich.: ASAE.
3. ASAE Standards, 49<sup>th</sup> Ed. 2002a. EP 496.2. Agricultural machinery management. St. Joseph, Mich.: ASAE.
4. ASAE Standards, 49<sup>th</sup> Ed. 2002b. D497.4 JAN98. Agricultural machinery management data. St. Joseph, Mich.: ASAE.
5. ASTM D975 “Standard Specification for Diesel Fuel Oils”. ASTM, January 27 2005
6. BALASTREIRE. L.A. Aplicação localizada de insumos, um velho conceito novo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23, 1994, Campinas. Resumos. Campinas: SBEA/UNICAMP, 1994. p.248.
7. BARBOSA, J. A.; Vieira, L. B.; Dias, G. P., 2005. “Desempenho Operacional de Um Trator Agrícola Operando Alternadamente com Pneus Radiais e Diagonais”. *Eng. Agríc.*, Jaboticabal, v.25, n.2, p.474-480.
8. BRIXIUS, W.W. and F.M. Zoz. 1987. Traction prediction equations for bias ply tires. ASAE Paper No. 87-1622, St. Joseph, MI: ASAE
9. CAPPELLI, N. L. Sistema de informação ao operador do trator agrícola (SITA). Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola. Campinas, SP: [s.n.], 1990. 225 p.

10. CASTELLI, G.; Mazzetto, F. Automatic system for monitoring and recording farm field activities. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4., 1996, Cancun, Mexico. Anais... Michigan: ASAE, American Society of Agricultural Engineering, p.548-556. 1996.
11. CATERPILLAR. Manual de Operação e Manutenção. Recomendações de fluidos para máquinas Caterpillar. SPBU6250-13. Outubro 2004.
12. CATERPILLAR. Systems Operation Testing and Adjusting. 3306B Engine for Caterpillar Built Machines. SENR5594-03. April 1999.
13. CORRÊA, I.M.; Maziero, J.V.G.; Milan, M. Tração dianteira auxiliar: desempenho em função do pneu dianteiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27., 1998, Poços de Caldas. Anais... Lavras: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 1998. p.154-6.
14. DWYER, M.J.; Febo, P. *Handbook of agricultural tyre performance*. Silsoe: Institut of Engineering Research, 1987. 16 p. (report, 47. AFRC)
15. ERICSON, C., 1999. "Fault Tree Analysis – A History" Proceedings of The 17<sup>th</sup> International System Safety Conference. The Boeing Company; Seattle, Washington. 9p.
16. FRANZ, C. A. B., 1988. "Avaliação do Desempenho de Pneumáticos para Tratores Agrícolas com diferentes níveis de desgaste". Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 93 p. Dissertação Mestrado.
17. GEE-CLOUGH, D.; Mcallister, M.; Everden, D.W. Tractive performance of tractor drive tires II. A comparison of radial and cross-ply carcass construction. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, v.22, n.4, p.385-95, 1977.
18. GIEDRA, K.; Janulevicius, A. "Tractor Ballasting in Field Transport Work". *TRANSPORT*, Vol XX, No 4, 146–153, 2005.

19. GRAŠIS, V.; Janulevičius, A. "Mode and means of automatic adjusting of tractor driving wheel lead". Kaunas-Akademija, 1999. 32 p. (in Lithuanian), apud GIEDRA et al. (2005).
20. GRISSE, R. D.; Perumpral, J.; Zoz, F. M. , 2006a. "An empirical model for tractive performance of rubber-tracks in agricultural soils" *Journal of Terramechanics* 43 (2006) p 225–236.
21. GRISSE, R.D.; Korcher, M. F.; and Vaughan, D.H., 2004. "Predicting tractor fuel consumption". *Applied Eng. in Agriculture* 20(5): 553-561.
22. GRISSE, R. D.; Vaughan, D. H.; Roberson, G. T., 2006. "Method for Fuel Prediction for Specific Tractor Models"; ASABE Meeting Presentation, Paper Number 061089. Portland, Oregon.
23. GRISSE, R. D. and Pitman, 2001. "Gear up and Throttle down - Saving Fuel". Virginia Cooperative Extension Publication 442-450, Virginia Tech, Blacksburg, VA, <http://www.ext.vt.edu/pubs/bse/442-450/442-450.pdf>
24. HELMAN H., Andery, P. R. P. *Análise de Falhas. Aplicação de FMEA e FTA*. Belo Horizonte: Editora Fundação Cristiano Ottoni, 156 p., 1995.
25. JUN, H.; Kishimoto, T.; Way, T. R.; Tauiguihi, T. "Three-directional contact stress distributions for a pneumatic tractor tire in soft soil". *Transactions of ASAE*, Vol 41, No 5, 1998, p. 1237-1242.
26. KRISPER, G.; Schimmel, J. "Electronic driver information and automatic shifting system for tractors". Paper 85051. Presented: International Symposium on Automotive Technology & Automation, Vienna, Austria 1985, ISATA.
27. LANÇAS, K. P. ; Upadhyaya, S. K. ; Sime, M. ; Shafii, S. . Overinflated Tractor Tires Waste Fuel, Reduce Productivity. *CALIFORNIA AGRICULTURE, CALIFORNIA, EUA*, v. 50, n. 2, p. 28-31, 1996.

28. LOPES, A.; Furlani, C. E. A.; Silva, R. P. (2003) “Desenvolvimento de um protótipo para a medição do consumo de combustível em tratores”. *Revista Brasileira de Agroinformática*, v.5, n.1, p. 24-31, 2003.
29. MACMILLAN, R. H. “The Mechanics of Tractor – Implement Performance”. University of Melbourne, ePrints Repository. December 2002, 165p.
30. MAZZETTO, F. L’acquisizione dei dati aziendali in tempo reale. *Genio Rurale*, Milano, v.12, n.1 p.20-30,1996.
31. MAZZETTO, F.; Landonio, S. Hardware and software developments applied to a system for the automatic organisation of computerised notebooks. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2., 1999, Odense. Anais... Odense: SCI Agriculture and Environment Group, 1999. v.1, p.53-54.
32. MIRANDA, N. O.; Oliveira, M.; Nunes, R. L., 2000. “Desempenho Operacional de Trator com Tração Dianteira Auxiliar na Subsolação de um Inceptisol”. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.4, n.1, p97-102.
33. NEUJHR, E.B.; Schlosser, J.F. Comportamento de pneus agrícolas radiais e diagonais em relação à tração [1]. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.21, n.2, p.180-9, 2001.
34. NTTL (*Nebraska Tractor Test Laboratory*) <http://tractortestlab.unl.edu/>, acessado em 19/06/2006.
35. O diesel e o Motor Caterpillar. <http://www.revistaelo.com.br/downloads/diesel.pdf>, acessado em 18/12/2006.
36. OECD. “Prediction of drawbar test performance.” (Note by the secretariat – Code AGR/TS (87)(22)). Paris, OECD, 1987. 11p.
37. OECD 1610. “Summary of OECD Test 1618—Nebraska Summary 285. Valmet 8150 Diesel.”36 SPEED

38. OECD 1819 – Resumo Nebraska 396 – JOHN DEERE 8120
39. OECD CODE 1. “Standard Code for the Official Testing of Agricultural and Forestry Tractor Performance” Organisation for Economic Co-operation and Development, March 2000. 56 p.
40. PERRET, S.; Pirot, R.; Barret, D.; Deurveilher, D. Etude de définition d’ un appareillage électronique d’ acquisition de données embarqué. Montpellier: Cirad SAR, 2000. 35p.
41. REIS, A.V.;Machado, A.L.T.;Tillmann, C. A.C.; Moraes, M. L. B. “Motores, tratores, combustíveis e lubrificantes.” Pelotas: UFPel, 1999. 315 p.
42. SCHUELLER, J.K. A review and integrating analysis of Spatial- Variable Crop Control of crop production. Fertilizer Research, The Hague, v.33. p.1-34, 1992.
43. SERCEL, Construtora LTDA. “Redução de Falhas em Bombas e Bicos Injetores após a implementação da Manutenção Preventiva”. Documento interno, 2007.
44. SERRANO, João. M.; Peça, J. O.; Pinheiro, A.; Carvalho, M.; Nunes, M.; Ribeiro, L.; Santos, F. Condução eficiente do tractor agrícola em tracção; Manutenção;, Associação Portuguesa de Manutenção Industrial, Nº 77, p.14-20; 2º Trimestre de 2003.
45. SIEMENS, J. C. and Bowers, W. W. Machinery Management: how to select Machinery to fit the real needs of farm managers. Farm Business Management (FMB) series, John Deere Publishing, East Moline, JL., 1999.
46. SILVEIRA, G. M.; Storino, M.; Filho, A. P.; Hanai, K.; Bernad, J. A. “Sistema de aquisição automática de dados para o gerenciamento de operações mecanizadas”. Bragantia, Campinas, v. 64, n. 2, p. 305-310, 2005.
47. SILVEIRA, G.M. Sistema informativo de operação em campo, baseado na aquisição automática de dados. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.2, p.365-368, 2001.

48. STORINO, M.; Pirot, R.; Tisseyre,B.; Sevila, F. Performance du tracteur comme indicateur de l'état du sol en agriculture de précision: première approach en riziculture camarguaise. In: AGRICULTURE DE PRECISION: AVANCÉES DE LA RECHERCHE TECHNOLOGIQUE ET INDUSTRIELLE, 1., 2000, Dijon. Anais Dijon: Cemagref- ENESAD, 2000. v.1, p.103-115.
49. SÜMMER, S. K.; Sabanci, A., 2005. "Effects of Different Tire Configuration s on tractor Performance". Turk J. Agric. For. 29(2005) P. 461-468.
50. SWINTON, S.S.; Lowenberg-Deboer, J. Evaluating the profitability of site-specific farming. Journal of Production Agricultura, Madison, v.11, n.4, p.439-46, 1998.
51. TURNER, R. J.; Shell, L.R.; and Zoz, F., 1997. Field performance of rubber belt and MFWD tractors in Texas soils. In Belt and Tire Traction in Agriculture Vehicles, 65-73, SAE SP-1291. Warrendale, Pa.: Society of Automotive Engineers.
52. UPADHYAYA, S.; Sime, M.; Radhuashi, N.; Adler, B. "Semi-empirical traction prediction equations based on relevant soil parameters". J. Terramechanics, 1997, 34 (3), p. 141-154.
53. UNIVERSITI PUTRA MALAYSIA, "A Tractor Data Acquisition System for Field Power and Energy Demand Mapping" [http://www.datataker.com/public\\_domain/PD30a Tractor Data Aquistion System.pdf](http://www.datataker.com/public_domain/PD30a%20Tractor%20Data%20Acquisition%20System.pdf), acessado em 15/09/2006.
54. VESELY, W. E.; Goldberg, F. F.; Roberts, N. H. and Haasl, D. F. "Fault Tree Handbook". Systems and Reliability Research, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission. Washington, D. C. 20555. January 1981, 209p.
55. Virgínia Tech (2007). [http://filebox.vt.edu/users/rgrisso/Pres/Fuel\\_Consumption\\_Parameters.pdf](http://filebox.vt.edu/users/rgrisso/Pres/Fuel_Consumption_Parameters.pdf), acessado em 14/02/2007.

56. WISMER, R. D. and Luth, H. J ., "Off-Road Traction Prediction of Wheeled Vehicles", ASAE Paper No. 72-619, December 1972.
57. WULFSOHN, D.; Upadhyaya, S.K.; Chancellor, W.J. Tractive characteristics of radial ply and bias ply tyres in a California soil. *Journal of Terramechanics*, Great Britain, v.25, n.2, p.111-34, 1988.
58. YULE, I.J.; Kohnen, G.; Nowak, M. In field mapping of tractor performance. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE., 2., 1999, Odense. Anais... Odense: SCI Agriculture and Environment Group, 1999. v.1, p.20.
59. ZOZ, F. M., 1970. "Predicting Tractor Field Performance". ASAE Paper No. 70-118, July 1970.
60. ZOZ, F. M. and Brixius, W. W., "Traction Prediction for Agricultural Tires on Concrete", ASAE Paper No. 79-1046, June 1979
61. ZOZ, F. M., 1987. "Predicting Tractor Field Performance (Updated)". ASAE Paper No.87-1623, December 1987.
62. ZOZ, F. M., Wiley, J. C., 1995. "A Theoretical Basis for Tractor Ballasting Recommendations". Proceedings of the 5th North American ISTVS Conference/Workshop Saskatoon, SK, Canada, May 10-12, 1995.
63. ZOZ, F. M.; Turner, R. J.; Shell, L. R., 2002. "Power Delivery Efficiency – A Valid Measure of Belt and Tire Tractor Performance". Transactions of ASAE, Vol. 45(3). 509-518.
64. ZOZ, F. M., Grisso, R D., 2003. "Traction and Tractor Performance" ASAE Distinguished Lecture Series. Publication No. 913C0403. St. Joseph, MI, USA, 48p., February 2003.

## ANEXO A

## A.1 Norma ASTM D975

Características	Unidade	Especificações (1)				Métodos	
TIPOS	.	A	B	C	D	ABNT	ASTM / IP
		(2) (*)	(3) (6)	(6) (*)	-6		
<b>Aparência</b>							
Aspecto	..	Límpido e isento de impurezas				Visual	Visual
Cor ASTM, máx.	.	3	3	3	3	MB-351	D-1500
<b>Composição</b>							
Enxofre, máx.	% m/m	1	0,5	0,3	0,2	MB-902	D-1552,
							D-2622 ou
							D-4294
<b>Volatilidade</b>							
<b>Destilação</b>						NBR-9619	D-86
- 50% recuperados	°C	245-310	245-310	245-310	245-310	.	.
- 85% recuperados	°C	370	370	360	360	.	.
Ponto de Fulgor	°C						
Densidade	..	0,82	0,82	0,82	0,82	NBR-7148	D-1298 ou D-4052
a 20/4 °C		a 0,88	a 0,88	a 0,88	a 0,87		
<b>Fluidez</b>							
Viscosidade 40°C	CSt	1,6 - 6,0	1,6 - 6,0	1,6 - 6,0	1,6 - 6,0	NBR-10441	D-445
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	-4	-4	-4	-4	.	IP-309
<b>Corrosão</b>							
Corrosividade ao cobre (3h a 50°C) máx.	.	2	2	2	2	MB-287	D-130
<b>Combustão</b>							
Cinzas, máx.	% m/m	0,02	0,02	0,02	0,02	NBR-9842	D-482
RCR, nos 10% finais da destilação, máx.	% m/m	0,25	0,25	0,25	0,25	MB-290	D-524
Número de Cetano, mín.	..	40 (5)	40 (5)	42 (5)	42 (5)		D-613
<b>Contaminantes</b>							
Água e sedimentos	% v/v	0,05	0,05	0,05	0,05	.	D-1796