AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE EM TRATORES AGRÍCOLAS
DE ESTEIRAS

RENATO KRAIDE SOFFNER
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiroz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia, Área de
Concentração: Máquinas Agrícolas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Setembro - 1993

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

S681a Soffner, Renato Kraide
Avaliação de confiabilidade em tratores agrícolas
de esteiras. Piracicaba, 1993.
76p.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Trator agrícola I. Escola Superior de Agricultura
Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.376

AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE EM TRATORES AGRÍCOLAS
DE ESTEIRAS

RENATO KRAIDE SOFFNER

Aprovado em : 10.11.93

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Luiz Geraldo Mialhe	ESALQ/USP
Prof. Dr. Luiz Antônio Balastreire	ESALQ/USP
Prof. Dr. Carlos Antônio Gamero	FCA/UNESP

Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE
Orientador

"Não há nada de novo debaixo do sol. Se é encontrada alguma coisa da qual se diz: "Veja: isto é novo", ela já existia nos tempos passados".

(Eclesiastes 1, 9-10)

À Minha Esposa e Filhos,
Aos Meus Pais e Irmãos,
Pelo Apoio.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Luiz Geraldo Mialhe e Luiz Antônio Balastreire, respectivamente Orientador e Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Máquinas Agrícolas, pela dedicação e apoio.

Aos Professores e Colegas do Setor de Mecânica e Máquinas Agrícolas do Departamento de Engenharia Rural da ESALQ/USP, pelos valiosos conselhos na elaboração desta.

Aos Funcionários do Setor, pela amizade e valorosa colaboração.

Ao Professor Rodolfo Hoffmann, do Departamento de Economia e Sociologia Rural, pelo inestimável apoio na programação das rotinas computacionais e na análise estatística.

À Usina Costa Pinto S/A - Açúcar e Alcool, na pessoa do Eng.º Agr.º João Batista Saccomano, pela cessão dos dados de operação e manutenção de tratores.

SUMARIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	vii.
LISTA DE TABELAS	viii.
LISTA DE QUADROS	ix.
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	x.
RESUMO	xii.
SUMMARY	xiv.
 1. INTRODUÇÃO	 1
2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	4
2.1. Quebras e falhas em máquinas agrícolas .	4
2.2. Confiabilidade	6
2.3. A distribuição de Weibull	12
2.4. Modelagem e simulação	15
2.4.1. Conceituação	15
2.4.2. O Método de Monte Carlo	19
2.4.3. Técnicas computacionais para simulação	 22
3. MATERIAL E MÉTODO	24
3.1. Material	24
3.1.1. Registro de quebras de máquinas em função do número de horas de operação para uma empresa agropecuária	 24

3.1.2. Rotina computacional para o ajuste dos dados empíricos à função de Weibull e posterior simulação probabilística	26
3.2. Método	26
3.2.1. Tratamento dos dados	27
3.2.2. Método para o cálculo da confiabilidade de tratores agrícolas	29
3.2.3. Validação do modelo	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. Rotina computacional	34
4.2. Equações de ajuste	35
4.3. Representação gráfica dos cenários da simulação	38
4.4. Discussão	45
5. CONCLUSÕES	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICES	58

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Os passos básicos da simulação de sistemas	17
Figura 2 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-1	39
Figura 3 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-2	39
Figura 4 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-3	40
Figura 5 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-4	40
Figura 6 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-5	41
Figura 7 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-6	41
Figura 8 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-7	42
Figura 9 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-8	42
Figura 10 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-9	43
Figura 11 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-10.....	43
Figura 12 Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-11.....	44

LISTA DE TABELAS

Página

Tabela 1	Parâmetros α e β de Weibull estimados para as máquinas sob análise	36
Tabela 2	Modelos matemáticos para quebras e falhas obtidos após o ajuste dos dados empíricos	37
Tabela 3	Estimativas de confiabilidade para os tratores estudados numa condição hipotética de planejamento (600 h)...	45

LISTA DE QUADROS

Página

Quadro 1	Marcas e modelos de tratores da empresa fornecedora de informações, ano de 1991	25
Quadro 2	Descrição dos tratores analisados ...	29

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

901 ... 910	- Código das máquinas na empresa
ASAE	- American Society of Agricultural Engineers
D6-1 ... D6-11	- Códigos das máquinas no estudo
Dest	- Destoca
EP391	- Engineering Practice 391 - ASAE
f	- Taxa de falha no tempo (1/h)
F(t)	- Função densidade cumulativa de Weibull
Gradel	- Gradeação leve
Gradep	- Gradeação pesada
ha	- Hectares
i, n	- Parâmetros da regressão linear
ln	- Logaritmo neperiano
log	- Logaritmo na base 10
n	- Número de partes ou componentes
q	- Probabilidade de quebra (%)
Q	- Quebra
$r_1 \dots r_2$	- Confiabilidade dos componentes individuais (%)
r^2	- Coeficiente de regressão linear
r_c	- Confiabilidade de um componente (%)
R_s	- Confiabilidade do sistema (%)
Sist	- Sistematização

Subsol	- Subsolação
Sulc	- Sulcação
y	- Número aleatório entre 0 e 1
t	- Tempo de operação (h)
α	- Parâmetro de escala de Weibull
β	- Parâmetro de forma do modelo
γ	- Parâmetro do menor valor de vida
τ	- Tempo médio entre quebras (h)

AVALIAÇÃO DE CONFIABILIDADE EM TRATORES AGRÍCOLAS DE ESTEIRAS

Autor: RENATO KRAIDE SOFFNER

Orientador: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

RESUMO

Este trabalho teve por objetivos a utilização do conceito de confiabilidade e sua determinação dentro de um sistema tratorizado agrícola, além da elaboração de metodologia de aplicação do modelo obtido.

Para isso foram testados ajustes de dados empíricos de quebras e operação de máquinas à função de Weibull, com posterior simulação probabilística pelo Método de Monte Carlo. Os diagramas de simulação gerados permitiram a estimação da confiabilidade de cada trator do grupo estudado.

Concluiu-se pelos resultados que a modelagem e simulação a partir de dados empíricos de quebras e operação de tratores agrícolas pode ser uma ferramenta eficiente na determinação da confiabilidade dos mesmos; além disso, a metodologia desenvolvida aplica-se à empresas agropecuárias possuidoras de sistema mecanizado.

As variações na confiabilidade encontradas

dentro do lote de máquinas estudados indicam que o planejamento otimizado da manutenção e operação das mesmas deve ser elaborado respeitando-se as individualidades, e não de forma global; ainda, quaisquer resultados devem ser restritos às condições operacionais e ambientais da amostra de tratores estudada, no período de tempo delimitado para o estudo, e de acordo com a definição de quebra/falha adotada.

RELIABILITY EVALUATION IN AGRICULTURAL CRAWLER TRACTORS

Author: RENATO KRAIDE SOFFNER

Adviser: Prof. Dr. LUIZ GERALDO MIALHE

SUMMARY

This research studied the reliability concept and its evaluation within an agricultural mechanised system, providing a methodology for further applications.

Failure and operation data were tested for the Weibull function, followed by stochastic simulation performed with the Monte Carlo Method. The simulation diagrams allowed the estimation of the reliability levels for each tractor under study.

It was concluded that the modelling and simulation from the failure/operation data may be an efficient tool for the reliability determination.

Variations found on the machines reliability suggest that the optimized maintenance and operation planning must take the individualities into account, and not the global conditions.

Any results are restricted to the sampling

operational and environmental conditions, in the period considered and according to the failure/breakdown definition adopted.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da influência de quebras e falhas de máquinas no planejamento do uso e na execução deste, dentro de um sistema tratorizado agrícola, é item prioritário no processo de gerenciamento dos recursos produtivos das empresas agropecuárias.

A importância do tema decorre da necessidade de se otimizar sistemas e processos na agricultura moderna, e mais especificamente manter sob gerenciamento otimizado o setor de mecanização agrícola das empresas. Para isso é necessário incrementar a capacidade do sistema com simultânea redução de custos, sejam estes devidos à operação, manutenção, pontualidade na execução das tarefas ou ociosidade do equipamento.

A pontualidade na execução das operações agrícolas é fator importante para a obtenção da produtividade máxima da cultura. As quebras e falhas de máquinas, especialmente nos períodos críticos da safra, causam atrasos que resultam em reduções da produção e utilização ineficiente da mão-de-obra. É evidente a influência desses fatores nos custos de produção.

As quebras de máquinas são consideradas

eventos aleatórios, e dessa forma podem ser tratadas do ponto-de-vista da Estatística Matemática, utilizando-se a ferramenta de Pesquisa Operacional denominada Simulação pelo Método de Monte Carlo.

O modelo a ser adotado, segundo KAPUR (1988), é o estocástico, já que fatores de probabilidade são levados em consideração. A validação do modelo de simulação pode ser testada com dados de manutenção de tratores obtidos junto a empresas agropecuárias.

O interrelacionamento do parâmetro "quebra de máquinas" com o planejamento operacional do sistema tratorizado agrícola se dá através do conceito de CONFIABILIDADE, que de acordo com a AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS-ASAE (1987) pode ser definida como "a probabilidade de que, sob condições operacionais específicas, uma parte, conjunto ou sistema de máquinas irá ter desempenho satisfatório por um período de tempo especificado". A variabilidade da confiabilidade das unidades individuais dentro de um lote de tratores influi no planejamento de manutenção e operação, por conseguinte a otimização do gerenciamento do sistema mecanizado agrícola depende da determinação desse parâmetro. Essa é a HIPÓTESE a ser verificada.

Para isso assumem-se os seguintes objetivos:

A) Desenvolver o conceito de confiabilidade em sistemas tratorizados agrícolas, estudando as características da quebra e manutenção corretiva;

B) Determinar a confiabilidade de determinada amostra de máquinas de uma empresa agropecuária, especificando-se as condições relacionadas à tal amostra e de que forma a confiabilidade varia dentro do grupo de máquinas em estudo;

C) Desenvolver metodologia de aplicação do modelo obtido nos sistemas mecanizados de empresas agropecuárias, a partir de algoritmo previamente formulado.

2. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

2.1. Quebras e falhas em máquinas agrícolas

A importância das quebras e falhas das máquinas agrícolas advém de sua influência no cumprimento do planejamento operacional dentro dos prazos estabelecidos para a cultura em questão , e do custo associado à manutenção dessas máquinas, no caso do tipo corretiva ou de reparação.

Do ponto-de-vista léxico FERREIRA (1986) define **quebra** como sendo o "ato ou efeito de quebrar", e **falha** como "falta, defeito".

Já PARKER (1984) considera a **falha** como "condição causada por colapso, quebra ou torção, de tal forma que uma estrutura ou elemento estrutural não pode mais cumprir seus propósitos".

MIALHE (1974) relacionou os fatores associados com despesas em reparações de máquinas agrícolas; entre eles citam-se: a) fatores relacionados com o trator (qualidade do material de que é construído, controle de qualidade em todas as fases de sua fabricação, projeto

adequado para as condições onde deverá operar; b) fatores relacionados com a infra-estrutura regional (a existência de revendedores e oficinas especializadas, presença de bom suprimento de peças de reposição na proximidade dos locais de trabalho); e finalmente, c) fatores relacionados com o uso do trator (seleção criteriosa de máquinas e implementos a serem acoplados ao trator, operadores capacitados a manejar o trator com segurança, manutenção preventiva e periódica devidamente executada e controlada, etc.).

LARSON (1977) comenta que os custos de parada das máquinas devido às quebras pode ser de alto valor, devido aos reparos e à perda de produtividade. Essa afirmação é comprovada por HUNT (1986), que sugere que as diversas operações mecanizadas agrícolas sejam monitoradas a fim de obter as probabilidades de quebra associadas. O autor estudou a incidência de quebras e custo de reparo de várias categorias de máquinas e elementos dessas máquinas. Os dados indicam que componentes deviam ser estocados pelo fazendeiro e pelo revendedor, principalmente aqueles de baixo custo com alta incidência de reposição, de forma a reduzir os custos causados pelas paradas.

TUFTS (1985) concluiu em seu trabalho que a disponibilidade do equipamento aumenta com o aumento do tempo entre quebras (confiabilidade), mas a uma taxa decrescente. A razão de variação na disponibilidade aumenta ligeiramente quando o tempo de parada decresce, mas não há

variação substancial dentro da amplitude dos valores normais.

2.2. Confiabilidade

O conceito de confiabilidade já despertava o interesse dos pesquisadores e técnicos desde a década de 60, quando os primeiros trabalhos referentes ao tema foram publicados, estando relacionados com a engenharia e projetos de máquinas. O trabalho de ARCHER (1963) atesta tal afirmação. O autor discorre sobre o crescente interesse dos engenheiros no tema confiabilidade, nas áreas mais diversas do conhecimento humano, como eletrônica, mísseis, aviação, bens de consumo, e equipamento agrícola. A necessidade de se aliar alta confiabilidade com equipamento de alto investimento é indicada. A definição de confiabilidade é apresentada, e o autor enfatiza a importância de se medir e comparar dados resultantes de determinações efetuadas em equipamento agrícola, especificando-se no caso as condições de trabalho e de ambiente da máquina em estudo. Ainda, a definição de falha ou quebra deve estar clara.

Outro ponto importante discutido no trabalho de ARCHER (1963) é que a confiabilidade a ser determinada no campo para máquinas agrícolas pressupõe um equipamento com

níveis mínimos de confiabilidade no instante em que foi produzido na indústria. Para isso se enfatiza a real importância dos programas de controle de qualidade e de confiabilidade dos fabricantes de máquinas agrícolas.

Retornando-se às definições de campo, torna-se necessário, como já citado, determinar-se o tipo de trabalho de cada grupo de máquinas, as condições ambientais (solo, clima, etc.), o nível de demanda de potência exigido da máquina, o número de horas de uso por ano, estando todos estes dados relacionados com a vida útil das partes e da máquina como um todo.

Finalmente o autor cita a distribuição de Weibull como sendo ferramenta de extrema importância na análise estatística de dados empíricos de quebras de máquinas e posterior simulação das mesmas.

BOWERS (1970) ilustra através de gráfico a relação entre a confiabilidade da máquina e sua idade, para manutenção e reparos realizados de forma correta e imprópria, onde a máquina se torna menos confiável com o tempo de uso e com manutenção inadequada.

KUMAR et alii (1977) determinaram equações de previsão de confiabilidade para uma combinada, a partir de dados de operação e de paradas de seis unidades de mesma marca e modelo. Os autores concluíram que o conhecimento da confiabilidade das máquinas auxilia no planejamento das operações mecanizadas. Ainda, o método desenvolvido no

trabalho permite o emprego de dados de campo reais, sem modificações, para a estimação dos parâmetros de cálculo da confiabilidade do equipamento. É possível se prever uma falha particular, mesmo que em condições reais ela possa não ocorrer no momento exato em que foi sugerida. De qualquer forma a previsão é útil no momento de se planejar e dimensionar o sistema.

TUFTS & HITT (1983) estudaram as distribuições de tempo entre quebras e tempo para reparo de três tipos de tratores florestais. Detectaram considerável variabilidade entre máquinas de mesmo tipo, o que indica efeito do ambiente de trabalho, operador e práticas de manutenção. As causas de quebras também foram estudadas.

SHOUP (1983) apresenta discussão sobre a utilização do conceito de confiabilidade em sistemas de maquinaria agrícola, tanto para unidades em série como em paralelo. O autor identifica aplicações práticas das estimativas de confiabilidade na agricultura, e prevê seu efetivo emprego como ferramenta auxiliar de planejamento agrícola. A utilização da estimativa da confiabilidade nas operações mecanizadas agrícolas responderia à questões do tipo:

- Qual a porcentagem de tempo em que o sistema realmente trabalha?
- Qual máquina deveria ser substituída para se incrementar a confiabilidade?
- Uma máquina nova deveria ser adquirida ou pode uma usada prover a necessária confiabilidade?
- Se outras máquinas estão disponíveis, como isto afeta o desempenho?
- Quantas unidades de reserva são necessárias?
- O que é mais indicado - aluguel, compra ou "leasing" ?
- O sistema trabalhará se uma unidade falhar?
- Como o fator humano afeta a operação das máquinas?
- Quanto será ganho de eficiência de campo e capacidade de campo pelo aumento da confiabilidade?
- Que nível de confiabilidade é economicamente aceitável?

ALCOCK (1986) atribui ao gerenciamento da maquinaria uma considerável importância na redução do custo de produção da cultura. O autor cita outros pesquisadores para afirmar que acima de 30% do custo de produção das culturas pode ser atribuído à operação de máquinas.

Tendo tão grande importância nas planilhas de custo das culturas, a operação adequada das máquinas agrícolas deverá ser assumida como objetivo fundamental do bom gerenciamento agrícola. Os níveis de confiança do

gerente planejador em relação às máquinas serão indicados pelo grau de confiabilidade das mesmas. PARKER (1984) definiu a confiabilidade como sendo "a probabilidade de que um componente, parte, equipamento ou sistema desempenhará satisfatoriamente sua pretendida função sob dadas circunstâncias, como condições ambientais, limitações do tempo de operação, além da frequência e eficiência da manutenção num período específico de tempo.

BALASTREIRE (1987), citando a AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS (1983), afirma que a confiabilidade é dada por $1 - q$, onde q é a probabilidade de quebra da máquina. A confiabilidade de várias operações agrícolas para uma propriedade de 40 ha é apresentada em tabelas pela EP391 (ASAE, 1983). Essa fonte de dados esclarece que "a probabilidade de falhas, em um sistema mecanizado, eleva-se com um aumento no tamanho da propriedade agrícola".

HILLIER & LIEBERMAN (1988) apresentam definições e aplicações para o conceito de confiabilidade, inclusive com o emprego da simulação na análise dos dados.

WITNEY (1988) apresenta equações para cálculo das confiabilidades de um componente e do sistema completo. Assim,

$$r_c = 100 / e^{(f * t)}$$

(1)

onde:

r_c = confiabilidade de um componente;

f = taxa de falha por unidade de tempo (1/h), que representa o número de falhas no período de tempo;

t = tempo (h);

$$R_s = 100 (r_1 * r_2 * r_3 * \dots * r_n) / 100^n \quad (2)$$

onde:

R_s = confiabilidade do sistema;

$r_1 \dots r_n$ = confiabilidades dos componentes individuais;

n = número de partes ou componentes;

Tal diferenciação para "componentes" e "sistema completo" é vital dentro do conceito de sistema desenvolvido por BERTALANFFY (1975), pelo qual o sistema geral é influenciado pelas perturbações ocorridas nos sub-sistemas (ou componentes), de forma a se determinar de que modo os interrelacionamentos entre componentes alteram o sistema geral como um todo. O autor reafirma o teorema de que "o sistema é bem mais do que apenas a soma das partes".

2.3. A distribuição de Weibull

KING (1968) comenta o desenvolvimento de funções de probabilidade a partir de dados empíricos. O autor afirma que o uso de modelos empíricos é na verdade muito mais complicado do que a adoção de um modelo teórico para a resolução do problema em questão, inclusive para variáveis randômicas.

ACKOFF & SASIENI (1971) afirmam que é possível evitar-se os custos de falhas repentinas no item ou parte através da previsão de sua provável ocorrência, e dessa forma substituindo o item antes que a falha realmente se verifique. Às vezes a inspeção mostra que é possível operá-lo por mais algum tempo, mas que existe a possibilidade de falha próxima. É necessário conhecer-se a distribuição da probabilidade de falha em função do tempo de operação.

A escolha da distribuição de probabilidade mais adequada ao caso das quebras de componentes e máquinas foi motivo de estudo por parte de diversos autores.

ALCOCK (1986) comenta a função densidade cumulativa de Weibull, que é frequentemente usada em estudos de taxa de falhas, devido ao fato de ser uma distribuição de três parâmetros que mostra se a taxa de falhas é decrescente, constante ou crescente, dependendo dos valores

dos citados parâmetros. A função densidade cumulativa de Weibull é dada por

$$F(t) = 1 - \exp [-(t-\gamma)^{\beta}/\alpha] \quad (3)$$

onde:

α = parâmetro de escala;

β = parâmetro de forma do modelo;

γ = parâmetro que representa o menor valor de vida operacional da máquina.

t = tempo

Como para a maquinaria agrícola o valor γ é zero (já que a primeira falha pode ser esperada desde o momento em que a máquina é posta em serviço), a função torna-se

$$F(t) = 1 - \exp [-(t^{\beta})/\alpha] \quad (4)$$

Essa função de distribuição cumulativa pode ser analisada graficamente pelo duplo logaritmo natural, para dar uma equação linear:

$$\ln \ln \frac{1}{1 - F(t)} = \beta \ln t - \ln \alpha \quad (5)$$

Se os dados se ajustam à distribuição de Weibull, então o gráfico $\ln \ln \{1/[1 - F(t)]\} \times \ln \alpha$ dará uma linha reta. Os parâmetros α e β podem então ser determinados.

Os dados necessários são os tempos entre falhas. Estes podem ser plotados como um histograma do número de observações e tempos entre falhas.

O trabalho já citado de KUMAR et alii (1977) utilizou-se da distribuição de Weibull, obtendo os valores dos parâmetros $\alpha = 961,609$ e $\beta = 1,735$. Assim, a distribuição que prevê o tempo entre falhas para as colhedoras combinadas é dada por

$$F(t) = 1 - \exp [-t^{1,735}/961,609] \quad (6)$$

Deve-se notar que quando $\beta=1$, a taxa de falha é constante e a distribuição de Weibull se reduz à distribuição exponencial. Quando $\beta>1$, a taxa de falha cresce com o tempo.

MIRSHAWKA (1979) utilizou-se do modelo de Weibull para cálculos de confiabilidade de sistemas. O autor comenta que a distribuição de Weibull têm sido empregada na determinação da confiabilidade de componentes eletrônicos, esferas de rolamentos, aparelhos com semicondutores, motores, organismos biológicos, resistência dos materiais à ruptura e desgaste, falhas por vazamento de baterias e pilhas, e análise de resistência à corrosão.

Posteriormente, MIRSHAWKA (1981) confirmou a utilidade do modelo de Weibull em problemas de confiabilidade, inclusive podendo ser aplicado à falhas com taxa crescente (devido à deterioração ou ao desgaste), que é o caso das máquinas agrícolas.

PERI & PLANETA (1985) apresentam um método baseado na teoria dos processos estocásticos e na função de densidade de probabilidade de Weibull a respeito do tempo entre falhas e tempo de reparo para maquinaria agrícola, a fim de se quantificar a confiabilidade de campo e parâmetros de manutenção.

2.4. Modelagem e simulação

2.4.1. Conceituação

A simulação é uma técnica de Pesquisa

Operacional que, segundo THIERAUF & GROSSE (1970), tem sido definida como a utilização de um modelo de sistema que apresenta as desejadas características da realidade a fim de reproduzir a essência de operações reais. Ainda, é uma representação da realidade através do uso de um modelo ou outro dispositivo o qual reagirá de maneira semelhante à realidade sob dado conjunto de condições.

Os autores apresentam ainda uma definição mais geral para a simulação: uma técnica quantitativa usada para se avaliar cursos alternativos de ação baseada em fatos e suposições num modelo matemático computadorizado, a fim de representar a tomada de decisão real sob condições de incerteza. Consideram ainda as técnicas de simulação como extremamente úteis já que nos permitem experimentar com um modelo do sistema ao invés do sistema real.

DENT & BLACKIE (1979) apresentam uma ponderada discussão sobre as vantagens e desvantagens do uso de simulação estocástica, quando comparada aos modelos determinísticos. A incerteza associada às variáveis exógenas de um modelo é o tema chave da discussão.

Segundo esses autores, a simulação de sistemas tem duas fases básicas; uma envolvendo a construção de um modelo e a segunda relacionada ao uso do modelo no desenvolvimento ou controle do sistema real. Os passos do processo geral de simulação podem ser apresentados como na Figura 1.

Figura 1 - Os passos básicos da simulação de sistemas.

Ainda de acordo com os autores, o primeiro passo na construção do modelo é a formulação do problema e reunião das informações necessárias. É indispensável a observação do sistema real e do problema a ser resolvido.

A partir do momento em que o modelo pode gerar "output" útil, é necessário efetuar sua verificação e validação. Determina-se o quanto o modelo é apropriado aos objetivos, já que a representação total e verídica do real é muito difícil de ser obtida.

A validação do modelo envolve comparação do

desempenho do mesmo com dados registrados do sistema e com um julgamento subjetivo do que deveriam ser os resultados.

Testes estatísticos são passíveis de serem realizados se existirem dados reais para comparação com o modelo. Citam-se entre eles: 1) Análise de regressão simples entre "outputs" do modelo e reais. Essa opção é indicada para modelos determinísticos; 2) Testes específicos para examinar a hipótese de que os resultados simulados e reais têm a mesma distribuição.

Finalmente, já na fase de aplicação dos modelos, três amplas funções podem ser distinguidas:

1. Prover base objetiva para acesso e assimilação de informação disponível sobre o sistema;
2. Dirigir a pesquisa para áreas importantes do sistema;
3. Auxiliar o gerenciamento ou desenvolvimento do sistema. Em agricultura significa sua aplicação a nível de produtor e extensionista ou mesmo direcionamento e monitoramento de políticas.

SHAPIRO & GROSS (1981) definem os termos modelo (uma idealização matemática que é usada como uma aproximação para representar a saída - "output"- de um sistema) e modelo estocástico (uma formulação matemática

para expressar em termos de probabilidades as várias saídas - "outputs" - de um sistema; usado nos casos em que a saída não pode ser expressa como função fixa das variáveis de entrada - "input").

Os modelos estocásticos, ainda de acordo com os autores, podem ser usados para trabalhar dados obtidos. Um método conveniente é achar um membro de uma família geral de distribuições que pode representar os dados. O modelo resultante pode então ser usado para extrapolação ou interpolação na determinação da probabilidade de ocorrência em alguns intervalos específicos de valores. É justamente a idéia associada à simulação.

Exemplos de simulação do problema de quebra e manutenção de máquinas são encontrados em trabalhos desenvolvidos por vários autores, como NAYLOR (1971), SHIMIZU (1975), SHIMIZU (1984), EHRLICH (1988), LEE et alii (1990) e MORGAN (1984).

2.4.2. O Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo, conforme sugerido por HAAN & BARFIELD (1973), pode ser usado na simulação probabilística ou estocástica a partir do modelo obtido. Esses autores conduziram uma revisão sobre técnicas de

geração de números randômicos a partir de distribuições de probabilidade e sobre aplicações destes números em modelos de componentes probabilísticos. Concluíram que modelos contendo componentes estocásticos são ferramentas poderosas na solução de problemas de Engenharia. São especialmente úteis no auxílio à determinação da probabilidade de sucesso ou falha de projetos.

CHORAFAS (1965) considera duas variantes para o emprego do Método de Monte Carlo. A primeira é o uso de amostras randômicas para a solução de equações através da construção de um sistema estatístico equivalente. A outra é a exploração de um sistema físico cujas propriedades são tais que a prescrição de amostragem aleatória descreve o sistema tão bem quanto ele possa ser ilustrado.

Esse autor apresenta os seguintes passos da aplicação do Método de Monte Carlo:

- a) Obtenção da distribuição dos dados;
- b) Obtenção da distribuição cumulativa dos mesmos;
- c) Geração de números aleatórios;
- d) Determinação da distribuição dos dados simulados;
- e) Comparações e utilização da simulação no problema em questão.

Já SOBOL (1974) considera o Método de Monte Carlo como sendo uma resolução aproximada de problemas matemáticos e físicos através da simulação de quantidades aleatórias. Torna possível a simulação de qualquer processo influenciado por fatores randômicos. Na verdade muitos problemas matemáticos que não envolvem probabilidade podem ser artificialmente resolvidos através de modelo probabilístico. O autor apresenta como exemplos vários problemas reais de resolução simulada, inclusive o cálculo de qualidade e confiabilidade de produtos.

SOFFNER et alii (1992) empregaram o Método de Monte Carlo para simulação estocástica da manutenção corretiva em oficina mecânica de uma usina de açúcar e álcool. O método mostrou-se eficiente na resolução dessa questão.

KUMAR et alii (1977) utilizaram o Método de Monte Carlo na simulação da probabilidade de falha para colhedoras combinadas. Os autores afirmam que a equação a ser utilizada na simulação é obtida quando se resolve a distribuição de Weibull para o tempo entre falhas - t , obtendo-se

$$t = [\alpha (-\ln(1-y))]^{1/\beta} \quad (7)$$

onde:

y = número aleatório entre 0 e 1 , selecionado a partir de uma distribuição uniforme;

2.4.3. Técnicas computacionais para simulação

NAYLOR et alii (1971) apresentam metodologia para a simulação em computadores, sejam os modelos determinísticos ou probabilísticos. Os autores listam programas de simulação disponíveis na época, entre eles GPSS, SIMSCRIPT, GASP, SIMPAC, DYNAMO e PROGRAM SIMULATE. A vantagem do uso de linguagens especiais seria a economia de tempo de programação. Os autores discutem amplamente a geração de variáveis estocásticas para simulação.

A utilização de linguagens de programação para a elaboração de rotinas de simulação também é uma alternativa, citando-se as linguagens BASIC, C, FORTRAN e PASCAL, dentre as mais utilizadas atualmente.

HOFFMANN et alii (1989) empregaram a linguagem de programação BASIC na simulação do custo de produção de produtos agrícolas, sendo que a ferramenta de simulação empregada foi o Método de Monte Carlo. Como resultados do trabalho são apresentados diagramas de

frequência relativa para itens componentes do custo de produção agrícola, gerados pela rotina de simulação probabilística. Tais informações são então utilizadas nas inferências decorrentes do trabalho.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Material

O material requerido para a realização do presente trabalho baseia-se em registros de quebras e horas de serviço de máquinas de uma empresa agropecuária, além dos recursos computacionais necessários para o processamento dos dados.

3.1.1. Registro de quebras de máquinas em função do número de horas de operação para uma empresa agropecuária

A empresa fornecedora de informações pertence à categoria Agroindústria de Açúcar e Alcool; localiza-se no Município de Piracicaba-SP, apresentando uma área de cultivo de cana-de-açúcar própria de aproximadamente 20.000 ha.

O parque de máquinas da empresa apresenta diversas marcas e modelos de tratores, apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Marcas e modelos de tratores da empresa fornecedora de informações, ano de 1991.

Tipo de máquina	Marca	Modelo
Colhedora de cana	DEDINI-TOFT	DM 6000 / DM 7000
Motoniveladora	CATERPILLAR	120 B / 140 B
Trator de pneus	CBT	1105
	CBT	2105
	CBT	2100
	CBT	2400
	MASSEY FERGUSON	65 X
	FORD	4600
	FORD	6600
	VALMET	65 ID
	VALMET	110
	VALMET	118
	CASE	2470
	CASE	4490
	CATERPILLAR	930
	CASE	580 H
	MASSEY FERGUSON	265
	MASSEY FERGUSON	290
	CATERPILLAR	966
	VALMET	85 ID
Trator de esteiras	FIAT	AD 7
	FIAT	AD 14
	CATERPILLAR	D6

Cada máquina da empresa apresenta um registros de controle com as horas de trabalho diário, o tipo de operação agrícola, as horas gastas em oficina, o

consumo de combustível total do período de controle, o consumo de combustível por hora, o consumo de óleo lubrificante e dados de troca desse mesmo óleo.

A partir destes registros de controle são obtidos os dados de quebras no período de operação estudado.

3.1.2. Rotina computacional para o ajuste dos dados empíricos à função de Weibull e posterior simulação probabilística.

Um programa de computador deverá ser desenvolvido para verificar o ajuste dos dados empíricos de quebra de máquinas à função de Weibull; em caso de ajuste, o modelo matemático obtido será utilizado em simulações que permitirão a estimativa da confiabilidade das máquinas.

3.2. Método

O método empregado para a realização dos objetivos deste trabalho podem ser divididos da seguinte forma:

3.2.1. Tratamento dos dados

As informações de quebras das máquinas devem representar um período compatível com o planejamento operacional da empresa, e devem apresentar o número de horas trabalhadas entre cada quebra, para condições de operação e de ambiente a serem especificadas. Apenas as paradas que influem no cumprimento do planejamento devem ser consideradas. WITNEY (1988) sugere que a condição de quebra ou falha seja caracterizada para um período de tempo sem serviço superior a meia hora.

No caso de empresas agroindustriais de grande porte, cuja manutenção de campo é realizada por unidades móveis de mecânicos, essa condição de quebra ou falha não pode ser tão rígida, como o período de tempo de parada sugerido por WITNEY (1988), já que grande parte dos problemas mecânicos é resolvido no local e num tempo reduzido, que não comprometerá o cumprimento do planejamento operacional de médio e longo prazo, objeto de estudo deste trabalho. Como condição de quebra efetiva para os propósitos aqui discutidos, será assumido que a máquina deverá permanecer parada num intervalo de pelo menos uma jornada de trabalho. Assim, os registros de dados de operação de máquinas a serem consultados na empresa-alvo terão como unidade de contagem de tempo o período de 24 horas. Esta é, por sinal, a unidade de controle dos relatórios de

operação/manutenção do sistema mecanizado agrícola da empresa.

Dentre os diversos modelos de máquinas motoras componentes do sistema mecanizado agrícola da empresa sob estudo, optou-se pelo modelo CATERPILLAR D6 para a condução dos estudos de simulação e determinação da confiabilidade, devido ao número de unidades presentes (dez), que serão tratadas como repetições num estudo individual e particular, e como agregadas num tratamento de grupo de máquinas. Essa máquina "agregada" representará a categoria dos tratores Caterpillar D6 dentro do planejamento operacional agrícola.

Além disso, os tratores de esteiras têm aplicação em diversas tarefas agrícolas, sendo desse modo possível correlacionar-se o tipo de operação com a confiabilidade da máquina em determinado período.

O Quadro 2 descreve as unidades de tratores de esteiras CAT D6 alvos do estudo. A máquina "agregada" será representada como "D6-11".

O período de análise dos dados foi de um ano, correspondente a 1991, prazo padrão de planejamento agrícola da empresa.

Quadro 2 - Descrição dos tratores analisados*.

Código empresa	Código estudo	Operações no período**
901	D6-1	Subsol, gradel, gradep
902	D6-2	Subsol, gradel, gradep
903	D6-3	Sulc, subsol
904	D6-4	Sist, gradep, sulc
905	D6-5	Sulc, sist
906	D6-6	Dest, gradep, sist
907	D6-7	Dest, sist
908	D6-8	Subsol, sist
909	D6-9	Sist, sulc
910	D6-10	Sist, gradep

* Todos os tratores estudados são do mesmo ano de fabricação (1979), tendo mesmo nível de manutenção e operadores fixos.

** Subsol = subsolagem
 Gradel = grade leve
 Gradep = grade pesada
 Sulc = sulcação
 Sist = sistematização
 Dest = destoca

3.2.2. Método para o cálculo da confiabilidade de tratores agrícolas

O desenvolvimento de uma metodologia de determinação da confiabilidade para máquinas agrícolas, como a que este trabalho propõe, baseia-se na modelagem do fenômeno de quebras e falhas dos tratores em estudo, nas condições específicas de uso e ambiente, seguida de simulação probabilística pelo Método de Monte Carlo, tendo esta como resultado curvas de frequência acumulada que representam a probabilidade de quebra em função do número de

horas de uso das máquinas. A partir de dado número de horas de uso assumido como representativo do planejamento operacional em elaboração, é possível determinar-se a confiabilidade de cada grupo de máquinas para as correspondentes condições específicas de utilização e ambiente de trabalho, já que a confiabilidade foi definida anteriormente como sendo igual a $1-q$, onde q é a probabilidade de quebra.

Para a modelagem matemática citada, é necessário testar o ajuste de dados de quebras de máquinas obtidos a partir de registros operacionais e de manutenção de uma empresa agropecuária. Este teste de ajuste, de acordo com a bibliografia já revista, será efetuado através da função de distribuição estatística de Weibull, que tem ampla aplicação nos estudos de quebras e falhas de máquinas, conforme visto anteriormente.

A verificação estatística do ajuste se dá através do emprego de regressão linear e a determinação dos parâmetros da função é efetuada pela estimativa de máxima verossimilhança, de acordo com HOFFMANN¹, onde são obtidos os coeficientes α e β que compõem o modelo derivado da função de distribuição de Weibull. Para tanto é necessário desenvolver uma rotina computacional a partir de uma linguagem de programação, sendo que no presente trabalho

¹ HOFFMANN, R. (ESALQ/USP, Piracicaba) Comunicação pessoal, 1992

foi utilizada a linguagem BASIC. Esta rotina ajusta os dados empíricos de horas de serviço da máquina entre cada quebra observada a partir dos registros utilizados na modelagem, e verificará a convergência da estimativa de verossimilhança dos parâmetros da distribuição de Weibull. Na hipótese da convergência não se verificar, é necessário conduzir uma regressão linear de $\log\{\log[n/(n-i)]\}$ contra $\log(t)$. O valor de r^2 indicará a efetividade do ajuste, e em caso positivo os valores dos parâmetros alfa e beta são obtidos (HOFFMANN, 1987).

Tendo em mãos o modelo ajustado das quebras, é necessário conduzir simulações pelo Método de Monte Carlo, onde os números aleatórios gerados possibilitarão a obtenção de gráficos que representam a probabilidade de quebra em função do tempo de serviço, isto após a condução de milhares de simulações para cada condição específica. No presente trabalho o número de simulações é igual a 1000 para cada caso estudado.

Também neste caso deverá ser desenvolvida uma rotina computacional que viabilize a realização de tão grande número de simulações.

Na sequência da metodologia a ser desenvolvida viria a aplicação propriamente dita do que foi discutido anteriormente em dado grupo de máquinas da empresa fonte de informações, sendo que estas serão de mesmo modelo e aplicadas a diferentes tipos de serviço e condições

ambientais. O objetivo é a determinação da confiabilidade do grupo como um todo e de cada máquina separadamente, o que permitirá verificar a influência das quebras no planejamento operacional desta amostra específica, e como a confiabilidade varia dentro de um mesmo grupo de máquinas. A partir destes resultados são realizadas inferências que deverão ser de utilidade dentro do processo de gerenciamento do sistema tratorizado em estudo.

3.2.3. Validação do modelo

Duas formas de validação serão empregadas, a fim de se determinar a eficácia da modelagem e simulação.

A verificação da eficiência do ajuste dos dados empíricos à distribuição de Weibull é decorrência do próprio método de ajuste adotado; no caso do presente trabalho dois processos serão empregados, a Estimativa de Máxima Verossimilhança e a Regressão Linear; para a primeira, o fato de haver convergência das iterações já é sinal de que os dados se ajustaram à curva teórica; no caso da Regressão Linear, o valor de r^2 é indicador da qualidade das estimativas obtidas.

Uma segunda categoria de validação diz respeito ao modelo propriamente dito como representativo do

fenômeno de quebras real, observado no sistema mecanizado da empresa. Uma possibilidade de verificação é justamente através do confronto entre os valores de confiabilidade obtidos na simulação de Monte Carlo, que é realizada a partir do modelo, com estimativas reais de confiabilidade utilizadas pelo planejador da empresa, e mesmo valores que estejam disponíveis na Bibliografia.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos no presente trabalho abrangem:

- rotina computacional;
- equações de ajuste;
- gráficos de simulação.

4.1. Rotina computacional

A rotina computacional para ajuste dos dados empíricos à função de distribuição de Weibull foi escrita em BASIC; posteriormente foi o algoritmo de simulação pelo Método de Monte Carlo submetido à programação, também em linguagem BASIC. Os dois programas encontram-se listados nos Apêndices 1 e 2.

4.2. Equações de ajuste

A sequência natural do trabalho foi a de submeter os dados empíricos obtidos junto à empresa agroindustrial, relativos às horas de operação dos tratores de esteiras D6 no ano de 1991, às rotinas de ajuste de curvas e de simulação. Um total de 13.395 horas de operação foram analisadas. O Apêndice 3 mostra os dados empíricos de quebra no campo para cada unidade tratorizada. Deve-se comentar que existe uma grande variação nos dados, mostrando que, apesar de pertencerem ao mesmo grupo, as máquinas têm comportamento diferente em relação ao fenômeno de quebras e falhas no campo.

Tendo sido obtidos os parâmetros α e β da distribuição de Weibull para cada trator estudado, o modelo representativo do comportamento das máquinas em relação às quebras e falhas foi gerado.

A estimativa dos parâmetros α e β pela Máxima Verossimilhança demonstra o ajuste dos dados empíricos à função de Weibull.

Dessa forma, dos dez tratores estudados no período especificado, apenas um não obteve convergência dos dados para a Estimativa de Máxima Verossimilhança.

Deve ser recordado que outra forma de ajuste foi paralelamente tentada, a Regressão Linear já discutida na Revisão da Bibliografia. O Apêndice 4 apresenta os

resultados dos ajustes pela Máxima Verossimilhança e pela Regressão Linear.

Os dados dos dez tratores foram então submetidos juntos ao ajuste, representando uma máquina agregada que indicaria o comportamento do grupo (ou seja, a marca e modelo), e não apenas de cada unidade.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros α e β estimados pela Máxima Verossimilhança para os dez tratores analisados, mais a máquina agregada.

Tabela 1 - Parâmetros α e β de Weibull estimados para as máquinas sob análise.

Máquina	α	β
D6-1	1910,0564	1,3248
D6-2	176,3285	0,9919
D6-3	490,1095	1,1515
D6-4	75095,2145	1,8754
D6-5	27887016,3480	3,1511
D6-6	2556,6755	1,2607
D6-7	39602202721,8474	4,0267
D6-8	65,4888	0,8019
D6-9	273,1894	0,9104
D6-10 *	621218515233113,8000	5,1000
D6-11 (Agregada)	538,8607	1,0936

* Não convergiu; dados da regressão linear.

A partir dos parâmetros apresentados na Tab. 1, pode-se estabelecer os modelos matemáticos do comportamento das máquinas às quebras, durante a operação de campo. A Tabela 2 contém os modelos citados.

Tabela 2 - Modelos matemáticos para quebras e falhas obtidos após o ajuste dos dados empíricos.

Máquina	Modelo Matemático
D6-1	$F(t) = 1 - e^{[-t^{1,3248}/1910,0564]}$
D6-2	$F(t) = 1 - e^{[-t^{0,9919}/176,3285]}$
D6-3	$F(t) = 1 - e^{[-t^{1,1515}/490,1095]}$
D6-4	$F(t) = 1 - e^{[-t^{1,8754}/75095,2145]}$
D6-5	$F(t) = 1 - e^{[-t^{3,1511}/27887016,3480]}$
D6-6	$F(t) = 1 - e^{[-t^{1,2607}/2556,6755]}$
D6-7	$F(t) = 1 - e^{[-t^{4,0267}/39602202721,8474]}$
D6-8	$F(t) = 1 - e^{[-t^{0,8019}/65,4888]}$
D6-9	$F(t) = 1 - e^{[-t^{0,9104}/273,1894]}$
D6-10	$F(t) = 1 - e^{[-t^{5,1000}/621218515233113,8000]}$
D6-11 (Agregada)	$F(t) = 1 - e^{[-t^{1,0936}/538,8607]}$

4.3. Representação gráfica dos cenários da simulação

Como comentado anteriormente, foi possível na sequência utilizar-se do Método de Monte Carlo para prever o tempo entre falhas, tendo os parâmetros de Weibull sido estimados.

As Figuras 2 a 12 mostram os diagramas de distribuição cumulativa obtidos a partir das simulações, que representam a probabilidade de quebra ou falha após determinado número de horas de operação.

Sendo a confiabilidade definida por $1-q$, onde q é a probabilidade de quebra da máquina, obtida a partir dos diagramas da simulação, é possível calcular quão confiável cada máquina em estudo é, para um determinado número de horas de trabalho, a ser definido pelo planejador que se utiliza do presente algoritmo de cálculo de confiabilidade.

Para o caso dos tratores em estudo, dentro das especificações que se aplicam a este cenário de inferências, é possível se determinar dois tipos de dados; o primeiro se refere ao tempo médio de ocorrência de quebra- τ , indicado abaixo de cada gráfico; se o intervalo de tempo que representa a amplitude do planejamento imaginado for dividido por este tempo médio, teremos o número teórico de quebras que ocorrerão dentro deste período. A outra possibilidade é a de utilizar o gráfico da simulação para a

Figura 2 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-1 ($\tau = 272,74$ horas).

Figura 3 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-2 ($\tau = 182,20$ horas).

Figura 4 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-3 ($\tau = 203,94$ horas).

Figura 5 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-4 ($\tau = 350,14$ horas).

Figura 6 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-5 ($\tau = 205,10$ horas).

Figura 7 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-6 ($\tau = 463,88$ horas).

Figura 8 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-7 ($\tau = 386,50$ horas).

Figura 9 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-8 ($\tau = 205,14$ horas).

Figura 10 - Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-9 ($\tau = 489,52$ horas).

Figura 11- Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-10 ($\tau = 728,18$ horas).

Figura 12- Distribuição cumulativa de tempo entre quebras para o trator D6-11 ($\tau = 300,40$ horas).

determinação da confiabilidade de cada trator; para isso é necessário traçar uma linha a partir do número de horas assumidas como representativas do planejamento operacional, até que a mesma encontre a curva da simulação; tendo este ponto como origem, deve-se verificar a sua intersecção com o eixo Y, que determina a probabilidade de quebra do trator para aquele tempo de operação, para as condições específicas consideradas como suposições. Sendo a confiabilidade calculada por $1-q$, e tendo sido q determinado no gráfico, obtém-se finalmente a estimativa da confiabilidade da máquina.

Como exemplo de cálculo de confiabilidade, supondo-se que o gerente responsável determinou que o período de planejamento será de 600 horas, teremos os resultados agrupados na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativas de confiabilidade para os tratores estudados numa condição hipotética de planejamento (600 h).

Trator	Probabilidade de quebra (%)	Confiabilidade (%)	Número de quebras no período (600 / τ)
D6-1	93	7	2,2
D6-2	97	3	3,3
D6-3	97	3	2,9
D6-4	89	11	1,7
D6-5	100	0	2,9
D6-6	72	28	1,3
D6-7	98	2	1,6
D6-8	93	7	2,9
D6-9	71	29	1,2
D6-10	24	76	0
D6-11 (Agregada)	87	13	2,0

4.4. Discussão

Observa-se pelos resultados da Tab.1 uma grande variabilidade nos valores estimados para os

parâmetros α e β ; esse fato foi também observado por KUMAR et alii (1977) que, trabalhando com colhedoras combinadas, verificaram que o fenômeno de quebras por sub-sistemas dessas máquinas apresentou ampla variação nos valores de α e β , atingindo 298430,8671 para α e 2,2037 para β ; os menores valores foram de 583,2434 e 1,1191 , respectivamente para α e β .

Os maiores valores obtidos para o parâmetro α e β referem-se aos tratores D6-5, D6-7 e D6-10; deve-se lembrar que os parâmetros α e β para o trator D6-10 foram obtidos a partir da Regressão Linear, já que os dados de ajuste não convergiram para a Estimativa de Máxima Verossimilhança. A máquina "agregada" e as demais apresentaram valores condizentes com os apresentados na Bibliografia.

O número de quebras de cada trator, levantados a partir dos dados empíricos, também mostra grande variação, como indicado no Apêndice 3. O trabalho de KUMAR et alii (1977) indica igualmente essa tendência, com variações desde 2 em 235 horas de operação até 31 em 1800 horas de uso. Deve-se lembrar, entretanto, que a definição de falha/quebra assumida pelos autores não equivale à adotada pelo presente trabalho.

Os dados da Tab.3 evidenciam a forma pela qual a confiabilidade variou dentro do grupo de tratores de esteiras, para o período de tempo considerado.

Uma amplitude de variação de 0 a 76% foi determinada, revelando que não seria possível utilizar-se destes resultados para a elaboração do planejamento de uso dos tratores como sendo de um mesmo grupo homogêneo; Nestas condições cada unidade teria que ser analisada individualmente. Já o trator "agregado" seria empregado como representante do grupo. Neste caso a unidade de planejamento operacional mecanizado seria o próprio "agregado".

Como se depreende da observação do Quadro 2, não se evidenciou qualquer relação entre o tipo de tarefa e a confiabilidade da máquina. Mesmo tratores alocados à serviços menos exigentes apresentaram baixa confiabilidade, como é o caso da unidade D6-7, que apesar de trabalhar em sistematização apresenta confiabilidade baixa (2%) para o período de tempo estipulado.

O trabalho de TUFTS & HITT (1983) apresenta curvas de probabilidade de quebra em função do tempo de uso bem semelhantes às obtidas no presente estudo. Ainda, a mesma variabilidade observada na confiabilidade dos tratores D6 deste trabalho é confirmada pelos autores para tratores florestais ("feller bunchers", "skidders" e "chippers").

Considerando-se as condições preliminares relatadas no sub-título 3.2.2, ficou evidente a importância de se especificar tais condições, no estudo de confiabilidade de máquinas agrícolas, devido às variações decorrentes do ambiente de trabalho, dos operadores das máquinas, dos

níveis e frequência de manutenção e das operações agrícolas às quais as máquinas estejam alocadas. A grande variação observada nos resultados, inclusive comprovada pelas informações contidas na Bibliografia , atesta essa exigência.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos possibilitam as seguintes conclusões:

- Os resultados aqui obtidos se restringem às condições operacionais e ambientais da amostra de tratores estudada, no período de tempo delimitado para o estudo, e de acordo com a definição de quebra/falha adotada; essas suposições não deverão ser extrapoladas para outros grupos de máquinas em qualquer estudo posterior;

- O conceito de confiabilidade pode ser utilizado no estudo da influência das quebras e falhas de máquinas no desempenho de dado sistema mecanizado agrícola;

- O fenômeno das quebras e falhas de máquinas agrícolas em operação no campo pode ser modelado matematicamente através de modelo estocástico obtido a partir de dados empíricos; a função de distribuição de Weibull pode ser empregada na modelagem do processo;

- A simulação probabilística pelo Método de Monte Carlo demonstra ser ferramenta de utilidade para a geração de cenários operacionais relacionados com quebras e falhas de máquinas agrícolas;

- A confiabilidade de lotes de máquinas agrícolas pode ser determinada através do algoritmo e dos recursos computacionais desenvolvidos neste trabalho;

- O modelo explicativo das quebras e falhas de tratores agrícolas mostrou-se válido tanto em relação à informação obtida na Bibliografia como numa situação real de empresa agroindustrial;

- A hipótese do presente trabalho foi confirmada, já que as variações encontradas dentro do lote de máquinas, para a confiabilidade, indicam que o planejamento otimizado da manutenção e operação das mesmas deve ser elaborado respeitando-se as individualidades, e não de forma global.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKOFF, R.L. & SASIENI, M.W. *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos/EDUSP, 1971. 523 p.

Agricultural Machinery Management-ASAE EP391, 1983-1984. In: AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *Yearbook of standards 1983*. St. Joseph, ASAE, 1983. 853 p.

ALCOCK, R. *Tractor-implement systems*. Westport, AVI Publishing Company, 1986. 161 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. *Yearbook of standards 1987*. St. Joseph, ASAE, 1987. 614 p.

ARCHER, R.C. Reliability engineering: its application to farm equipment. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 44(10): 542-544, out. 1963.

BALASTREIRE, L.A. *Máquinas agrícolas*. São Paulo, Manole, 1987. 310 p.

BOUTON, P.M. & MA, F. On Monte Carlo simulations of dynamic systems. *Simulation*, San Diego, 54(6): 267-273, jun. 1990.

BOWERS, W. *Modern concepts of farm machinery management*. Champaign, Stipes Publishing Company, 1970. 60 p.

CHORAFAS, D.N. *Systems and simulation*. New York, Academic Press, 1965. 503 p.

DENT, J.B. & BLACKIE, M.J. *Systems simulation in agriculture*. London, Applied Science Publishers, 1979. 180 p.

EHRlich, P.J. *Pesquisa operacional*. 6 ed. São Paulo, Atlas, 1988. 316 p.

FERREIRA, A.B. de HOLANDA. *Novo dicionário Aurélio da Língua Portuguesa*. 2 ed. Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1986. 1838 p.

HAAN, C.T. & BARFIELD, B.J. Data simulation from probability distributions. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 16(2): 374-377, jan./fev. 1973.

- HILLIER, F.S. & LIEBERMAN, G.J. *Introdução à pesquisa operacional*. Rio de Janeiro, Editora Campus/EDUSP, 1988. 805 p.
- HOFFMANN, R.; NORONHA, J.F. de; LATAPIA; M.X.I.C. *Simulação de custo de produção de produtos agrícolas (Simula 5)*. Piracicaba, Departamento de Economia e Sociologia Rural - ESALQ/USP, 1989. 17 p. (Série Manual N.º 20).
- HOFFMANN, R. & VIEIRA, S. *Análise de regressão. Uma introdução à econometria*. 2 ed. São Paulo, HUCITEC, 1987. 379 p.
- HUNT, D.R. *Engineering models for agricultural production*. Westport, AVI Publishing Co., 1986. 260 p.
- KAPUR, J.N. *Mathematical modelling*. New Delhi, Wiley Eastern, 1988. 259 p.
- KING, W.R. *Probability for management decisions*. New York, John Wiley & Sons, 1968. 372 p.
- KUMAR, R.; GOSS, J.R.; STUDER, H.E. A study of combine harvester reliability. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 20(1): 30-34, jan./fev. 1977.

LARSON, D.L. Farm machinery repair and maintenance. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 58(4): 38, abr. 1977.

LEE, S.M.; MOORE, L.J. & TAYLOR, B.W. *Management science*. 3 ed. Needham Heights, Allyn and Bacon, 1990. 901 p.

MIALHE, L.G. *Manual de mecanização agrícola*. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1974. 301 p.

MIRSHAWKA, V. *O modelo de Weibull e aplicações à confiabilidade*. São Paulo, 1979. 239 p. (Mestrado-IME/USP).

MIRSHAWKA, V. *Aplicações de pesquisa operacional. Vol.3*. São Paulo, Nobel, 1981. 308 p.

MORGAN, B.J.T. *Elements of simulation*. London, Chapman and Hall, 1984. 351 p.

NAYLOR, T.H.; BALINTFY, J.L.; BURDICK, D.S.; CHU, K. *Técnicas de simulação em computadores*. Rio de Janeiro, Vozes/EDUSP, 1971. 402 p.

PARKER, S.P. (editor). *McGraw-Hill dictionary of scientific and technical terms*. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 1984. 1846 p.

PERI, G. & PLANETA, A. Field reliability and maintainability of farm machinery. *Rivista di Ingegneria Agraria*, Palermo, 16(4): 203-210, jul. 1985.

SHAPIRO, S.S. & GROSS, A.J. *Statistical modeling techniques*. New York, Marcel Dekker, 1981. 367 p.

SHIMIZU, T. *Simulação em computador digital*. São Paulo, Edgard Bluecher/EDUSP, 1975. 109 p.

SHIMIZU, T. *Pesquisa operacional em Engenharia, Economia e Administração; modelos básicos e métodos computacionais*. Rio de Janeiro, Guanabara dois, 1984. 360 p.

SHOUP, W.D. Predicting performance reliability of machinery systems. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, 64(12): 19-22, dez. 1983.

SOBOL, I.M. *The Monte Carlo method*. Chicago, The University of Chicago Press, 1974. 65 p.

SOFFNER, R.K.; MIALHE, L.G.; PERES, F.C.; SACCOMANO, J.B.

Manutenção corretiva: análise e simulação em tratores agrícolas. *Engenharia Rural*, Piracicaba, 2(2): 64-84, dez. 1991.

THIERAUF, R.J. & GROSSE, R.A. *Decision making through operations research*. New York, John Wiley & Sons, 1970. 570 p.

TUFTS, R.A. Failure frequency and downtime duration effects on equipment availability. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 28(4): 999-1002, jul./ago. 1985.

TUFTS, R.A. & HITT, J.A. Failure cause, frequency, and repair for forest harvesting equipment. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 26(6): 1673-1677, nov./dez. 1983.

TULLBERG, J.N.; RICKMAN, J.F.; DOYLE, G.J. Reliability and the operation of large tractors. *The Agricultural Engineer*, Silsoe, 39(1): 10-13, Spring 1984.

WITNEY, B. *Choosing and using farm machines*. Harlow, Longman Scientific & Technical, 1988. 412 p.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Listagem do programa de ajuste dos dados empíricos.

```

10 .....
20 '          PROGRAMA DIWEIBI
30 '   LE ARQUIVO COM DADOS INDIVIDUAIS, CALCULA
40 '   ESTIMATIVAS DE MAXIMA VEROSSIMILHANCA DOS
50 '   PARAMETROS DA DISTRIB. de WEIBULL E FAZ GRAFICO
60 '
70 .....
80 DEFINT H-N:DEFDBL A-G,O-Z
90 DIM CL(102),FC(102),DF(102),X(1000),AH(11),FE(102)
100 CLS:PRINT"  PROGRAMA DIWEIBI - AJUSTA DISTRIBUICAO de WEIBULL"
110 PRINT"      ESALQ/USP - JANEIRO de 1992"
120 INPUT" NOME DO ARQUIVO DE DADOS=";FONTE$
130 OPEN "I",#1,FONTE$:INPUT#1,T$
140 INPUT#1,N ' N=NUMERO DE OBSERVACOES
150 SX=0#:QX=0#:XMA=-999999999#:XMI=999999999#
160 FOR I=1 TO N:INPUT#1,X(I)
170 IF X(I)>XMA THEN XMA=X(I)
180 IF X(I)<XMI THEN XMI=X(I)
190 SX=SX+X(I):QX=QX+X(I)*X(I)
200 NEXT I
210 '
220 '   ORDENACAO DOS VALORES (ORDEM CRESCENTE)
230 '
240 M=N-1
250 K=0
260 FOR I=1 TO M
270 IF X(I)<=X(I+1) THEN GOTO 300
280 SWAP X(I),X(I+1)
290 K=1
300 NEXT I
310 IF K=1 THEN 250 ELSE 320
320 PRINT" VALORES FORAM COLOCADOS EM ORDEM CRESCENTE "
330 '
340 LPRINT"  PROGRAMA DIWEIBI - LE ARQUIVO COM DADOS INDIVIDUAIS, CALCULA "
350 LPRINT"  ESTIMATIVAS DE MAXIMA VEROSSIMILHANCA DOS PARAMETROS DA DISTRIB."
360 LPRINT"  DE WEIBULL e FAZ GRAFICO -      F(t)=1-EXP(-(t**BETA)/ALFA)  "
370 LPRINT"      ESALQ/USP - JANEIRO de 1992 "
380 LPRINT:LPRINT T$:PRINT T$:PRINT:LPRINT
390 EN=N:XM=SX/EN:S2=(QX-SX*SX/EN)/EN:S=SQR(S2)
400 G7$=" ####.#####"
410 LPRINT"   NUMERO DE OBSERVACOES=";N
420 LPRINT"       MEDIA DOS DADOS=";:LPRINT USING G7$:XM
430 LPRINT"   VARIANCIA DOS DADOS=";:LPRINT USING G7$:S2

```

```

440 LPRINT" DESVIO PADRAD DOS DADOS=";LPRINT USING 67%;S:LPRINT
450 LPRINT" VALORES EM ORDEM CRESCENTE "
460 66%=" #####.###"
463 INPUT"IMPRIMIR DADOS COLOCADOS EM ORDEM CRESCENTE - SIM (S) ou NAO (N)";PZ%
464 IF PZ%="S" GOTO 470 ELSE IF PZ%="N" GOTO 480 ELSE GOTO 463
470 FOR I=1 TO N:LPRINT USING 66%;X(I);:NEXT I:LPRINT:LPRINT
480 PRINT
490 AX=0#:AY=0#:XY=0#:BX=0#:BY=0#
500 FOR I=1 TO N
510 D=LOG(X(I)):Y=LOG(LOG(EN/(EN-I+.5)))
520 AX=AX+D:BX=BX+D^2:AY=AY+Y:BY=BY+Y^2:XY=XY+D*Y
530 NEXT I
540 QX=BX-AX*AX/EN:QY=BY-AY*AY/EN:XY=XY-AX*AY/EN
550 B0=XY/QX:A0=(AY-B0*AX)/EN:SRO=QY-B0*XY:QMO=SRO/(EN-2#):R2=B0*XY/QY
560 ALO=EXP(-A0):SBO=QMO/QX:OM=AX/N:SAO=(1#/N+OM*OM/QX)*QMO
570 LPRINT" ESTIMATIVAS PRELIMINARES DE ALFA e BETA com BASE NA REGRESSAO"
580 LPRINT" de LOG(LOG(n/(n-i))) CONTRA LOG(t) "
590 LPRINT
600 LPRINT"      BETA,s,t    -LOG(ALFA),s,t      ALFA      R**2 "
610 644%=" #####.#####.#####.#####.#####.#####.###.#####"
620 LPRINT USING 644%;B0,A0,ALO,R2
630 LPRINT USING 644%;SBO,SAO
640 TBO=B0/SBO:TAO=A0/SAO
650 LPRINT USING 644%;TBO,TAO
660 LPRINT
670 "
680 " DETERMINACAO DAS ESTIMATIVAS DE MAXIMA VEROSSIMILHANCA "
690 "
700 B=B0:KIT=0
710 A11=0#:A12=0#:A22=0#:C1=0#:C2=0#
720 FOR I=1 TO N
730 A11=A11+X(I)^B:A12=A12+(X(I)^B)*LOG(X(I)):A22=A22+(X(I)^B)*(LOG(X(I)))^2
740 C2=C2+LOG(X(I))
750 NEXT I
760 A=A11/EN:C1=EN/A-A11/(A^2):C2=A12/A-EN/B-C2
770 A11=EN/(A^2)-2*A11/(A^3):A12=A12/(A^2):A22=-EN/(B^2)-A22/A
780 DE=(A11*C2-A12*C1)/(A11*A22-A12*A12)
790 COB=ABS(DE):IF COB<.0000001 GOTO 840
800 KIT=KIT+1:IF KIT>90 GOTO 830
810 PRINT KIT,B,DE
820 B=B+DE:GOTO 710
830 LPRINT" A ESTIMATIVA DE BETA NAO CONVERGIU APDS 90 ITERACOES":GOTO 1920
840 LPRINT" ESTIMATIVAS DE MAXIMA VEROSSIMILHANCA PARA ALFA e BETA"
850 LPRINT"      BETA,s,t      ALFA,s,t      "
860 LPRINT USING 644%;B,A
870 DET=A11*A22-A12*A12:V11=-A22/DET:V12=A12/DET:V22=-A11/DET
880 SA=SQR(V11):SB=SQR(V22):TA=A/SA:TB=B/SB
890 LPRINT USING 644%;SB,SA
900 LPRINT USING 644%;TB,TA

```

```

910 PRINT"          VALOR MINIMO DE X=";XMI
920 PRINT"          VALOR MAXIMO DE X=";XMA
930 INPUT" LIMITE INFERIOR PARA HISTOGRAMA=";XI
940 INPUT"          INTERVALO DE CLASSE=";ACR
950 INPUT"  NUMERO DE INTERVALOS(MAX.=100)=";LL
960 LL=LL+1
970 FOR L=1 TO LL:CL(L)=XI+ACR*(L-1):FC(L)=0#:NEXT L
980 FOR I=1 TO N
990 IF X(I)<CL(1) GOTO 1000 ELSE 1010
1000 PRINT"ERRO - VALOR DE X MENOR QUE LIMITE INFERIOR":GOTO 670
1010 FOR L=2 TO LL:J=L-1
1020 IF X(I)<CL(L) GOTO 1050 ELSE 1030
1030 NEXT L
1040 PRINT"ERRO - VALOR DE X MAIOR QUE LIMITE SUPERIOR DA ULT. CLASSE":GOTO 670
1050 FC(J)=FC(J)+1
1060 NEXT I
1070 G1$=" #####.##":G3$=" #####.#####
1080 FF=0#:FAX=0#
1090 FOR L=2 TO LL:J=L-1:FF=FF+FC(J):NEXT L
1100 ENE=0#
1110 FOR L=2 TO LL:J=L-1:FR=FC(J)/FF:DF(J)=FR/ACR
1120 IF DF(J)>FAX THEN FAX=DF(J)
1130 DRV=(CL(L)-CL(J))/10#:SH=0#
1140 U=(CL(J)^(B-1#))/A:AH(1)=(B*U)*EXP(-U*CL(J))
1150 FOR H=2 TO 11:R=CL(J)+(H-1#)*DRV:U=(R^(B-1#))/A
1160 AH(H)=(B*U)*EXP(-U*R)
1170 SH=SH+DRV*(AH(H)+AH(H-1))/2#
1180 NEXT H
1190 FE(J)=SH*EN:ENE=ENE+FE(J)
1200 NEXT L
1210 INPUT" IMPRIMIR TABELA DE DISTRIB. DE FREQUENCIAS - SIM (S) OU NAO (N)";UZ$
1220 IF UZ$="S" GOTO 1230 ELSE IF UZ$="N" GOTO 1410 ELSE GOTO 1210
1230
1240 " IMPRESSAO DA TABELA DE DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS
1250
1260 LPRINT
1270 LPRINT" TABELA DE DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS (INTERVALOS FECHADOS A ESQUE
ADA)"
1280 LPRINT STRING$(76,"=")
1290 G11$=" #####.## #####.## #####.##### #####.## #####.## #####
#####.##"
1300 G12$=" #####.## #####.## #####.## #####.##"
1310 LPRINT" LIM.INF. LIM.SUP. FREQUENCIA FREQ.REL. FR.REL.AC. FREQ.
ESPERADA"
1320 LPRINT STRING$(76,"=")
1330 ACU=0#
1340 FOR L=2 TO LL
1350 J=L-1:FR=FC(J)/FF:ACU=ACU+FC(J):FRA=100#*ACU/FF:FR=100#*FR
1360 LPRINT USING G11$;CL(J),CL(L),FC(J),FR,FRA,FE(J)
1370 NEXT L

```

```

1380 LPRINT STRING$(76,"=")
1390 LPRINT"          TOTAL          ";LPRINT USING 612%;FF,1000,ENE
1400 LPRINT STRING$(76,"=")
1410 LPRINT:LPRINT
1420 '
1430 '  CONSTRUCAO DO HISTOGRAMA DA DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS '
1440 '  E TRACADO DA FUNCAO DE DENSIDADE AJUSTADA '
1450 '
1460 XII=XI:XSS=CL(LL)
1470 PRINT
1480 PRINT"          X MINIMO=";PRINT USING 63%;XII
1490 PRINT"          X MAXIMO=";PRINT USING 63%;XSS
1500 PRINT"          ORDENADA (Y) MINIMA=";PRINT USING 63%;0
1510 PRINT" ORDENADA (Y) MAXIMA OBSERVADA=";PRINT USING 63%;FAX
1520 PRINT" A TELA TEM 200 PONTOS PARA X e 640 PONTOS PARA Y"
1530 INPUT"          VALOR MINIMO DE X A SER CONSIDERADO =";XMN
1540 INPUT"          ABSCISSA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA =";XTI
1550 INPUT"          VALOR MAXIMO DE X A SER CONSIDERADO =";XMX
1560 INPUT"          ABSCISSA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA =";XTM
1570 INPUT" ACRESCIMO NO VALOR DE X ENTRE MARCAS NO EIXO =";DX
1580 PRINT
1590 PRINT"          VALOR MINIMO DE Y A SER CONSIDERADO =";0
1600 INPUT"          ORDENADA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA =";YTI
1610 INPUT"          VALOR MAXIMO DE Y A SER CONSIDERADO =";YMX
1620 INPUT"          ORDENADA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA =";YTM
1630 INPUT" ACRESCIMO NO VALOR DE Y ENTRE MARCAS NO EIXO =";DY
1640 AY=(YTM-YTI)/(YMX-YMN):AX=(XTM-XTI)/(XMX-XMN):DXT=DX*AX:DYT=DY*AY
1650 CLS:SCREEN 2:KEY OFF
1660 LINE (YTI,XTI)-(YTM,XTM),,B
1670 KY=INT((YTM-YTI)/DYT)
1680 FOR K=0 TO KY:YK=YTI+DYT*K:LINE (YK,XTI-2)-(YK,XTI)
1690 LINE (YK,XTM)-(YK,XTM+2)
1700 NEXT K
1710 KX=INT((XTM-XTI)/DXT)
1720 FOR K=0 TO KX
1730 XK=XTI+DXT*K:LINE (YTI-3,XK)-(YTI,XK):LINE (YTM-3,XK)-(YTM,XK)
1740 NEXT K
1750 FOR L=2 TO LL:J=L-1
1760 YT=YTI+AY*DF(J):X1=XTI+AX*(CL(J)-XMN):X2=XTI+AX*(CL(L)-XMN)
1770 LINE (YTI,X1)-(YT,X2),,B:NEXT L
1780 KF=INT(XTM-XTI)
1790 FOR I=0 TO KF
1800 XX=XMN+K/AX:IF XX<=0# GOTO 1830
1810 EU=(XX^B)/A:FD=(B*EU/XX)*EXP(-EU)
1820 XXT=XTI+K:YYT=YTI+AY*FD:PSET (YYT,XXT)
1830 NEXT K
1840 A$=INKEY$:IF A$="" THEN 1840
1850 SCREEN 0:KEY ON
1860 LPRINT"          VALOR DE X NO INICIO DA ESCALA =";XMN
1870 LPRINT"          VALOR DE X NO FIM DA ESCALA =";XMX
1880 LPRINT"          ACRESCIMO NO VALOR DE X ENTRE MARCAS NO EIXO =";DX
1890 LPRINT"VALOR DE Y=DENSIDADE de FREQ. REL. NO INICIO DA ESCALA =";0
1900 LPRINT"          VALOR DE Y NO FIM DA ESCALA =";YMX
1910 LPRINT"          ACRESCIMO NO VALOR DE Y ENTRE MARCAS NO EIXO =";DY
1920 END

```

APENDICE 2: Listagem do programa de simulação (Monte Carlo).

```

10 .....
20      PROGRAMA  SIWEIB
30      SIMULA DADOS DE DISTRIBUICAO de WEIBULL
40      E CONSTROI HISTOGRAMA COM RESPECTIVA FUNCAO de DENSIDADE
50 .....
60 DEFINT H=N:DEFDBL A-F,D-Z
70 DIM X(1000),CL(102),FC(102),DF(102)
80 CLS:SCREEN 0
90 PRINT"  PROGRAMA SIWEIB -  SIMULACAO DE DADOS DE DISTRIBUICAO de WEIBULL"
100 PRINT"          F(t)=1-EXP(-(t**BETA)/ALFA)
105 PRINT
110 INPUT"  TITULO=";TIT$
120 INPUT"          NUMERO DE SIMULACOES=";M
130 INPUT"          PARAMETRO ALFA=";AL
140 INPUT"          PARAMETRO BETA=";BE
145 INPUT" NUMERO DE CASAS DECINAIS PARA ARREDONDAMENTO (MAX. 4)=";KR
147 RA=10**KR
150 S=0#:SQ=0#
160 RANDOMIZE
170 NI=0:XMA=0#:XMI=10000000#
180 FOR H=1 TO M
210  U=RND(H)
220  X(H)=(AL*LDB(1#/(1#-U)))^(1#/BE)
225  IT=INT(X(H)):DEC=X(H)-IT:DEC=RA#DEC:DEC=CINT(DEC):DEC=DEC/RA:X(H)=IT+DEC
230  X(H)=RA#X(H):X(H)=CINT(X(H)):X(H)=X(H)/RA
240  IF X(H)>XMA THEN XMA=X(H)
250  IF X(H)<XMI THEN XMI=X(H)
260  S=S+X(H):SQ=SQ+X(H)*X(H)
270  NI=NI+1:IF NI<100 GOTO 290 ELSE 280
280  BEEP:PRINT"ESPERE-ESTOU COMPUTANDO-SIMULACAO NUMERO ";H:NI=0
290 NEXT H
292 EM=M
300 XME=S/EM:VRD=(SQ-S**2/EM)/(EM-1#):DP=SGR(VRD)
310 LPRINT"PROGRAMA SIWEIB - SIMULACAO DE DISTRIBUICAO de WEIBULL"
313 LPRINT"          F(t)=1-EXP(-(t**BETA)/ALFA)
320 LPRINT
330 PRINT TIT$:LPRINT TIT$
340 G2$=" #####.#####":G6$=" #####.###"
370 LPRINT"          PARAMETRO ALFA=";:LPRINT USING G2$;AL
380 LPRINT"          PARAMETRO BETA=";:LPRINT USING G2$;BE
390 G1$=" #####.##"
400 LPRINT

```

```

410 LPRINT"NUMERO DE SIMULACOES REALIZADAS=";M
420 LPRINT"          X MEDIO CALCULADO=";LPRINT USING 62%;XME
430 LPRINT"    DESVIO PADRAO DE X ESTIMADO=";LPRINT USING 62%;DP
440 PRINT
450 LPRINT
460 INPUT" IMPRIMIR OS VALORES SIMULADOS - Sim (S) ou Nao (N)";GR$
470 IF GR$="S" GOTO 480 ELSE IF GR$="N" GOTO 530 ELSE GOTO 460
480 LPRINT"  VALORES SIMULADOS"
490 FOR H=1 TO M:LPRINT USING 66%;X(H);:NEXT H:LPRINT:LPRINT
500 LPRINT"  X MINIMO=";LPRINT USING 66%;XMI
510 LPRINT"  X MAXIMO=";LPRINT USING 66%;XMA
520 LPRINT
530 INPUT"FAZER TABELA DE DISTR.de FREQ.e HISTOGRAMA- Sim (S) ou Nao (N)";GA$
540 IF GA$="S" GOTO 550 ELSE IF GA$="N" GOTO 1280 ELSE GOTO 530
550 PRINT"    X MINIMO=";XMI
560 PRINT"    X MAXIMO=";XMA
570 PRINT
580 PRINT:INPUT" LIMITE INFERIOR PARA HISTOGRAMA=";XI
590     INPUT"                ACRESCIMO=";ACR
600     INPUT"  NUMERO DE INTERVALOS(MAX.=100)=";LL
610 XSS=XI+ACR*LL:LL=LL+1
620   FOR L=1 TO LL:CL(L)=XI+ACR*(L-1):FC(L)=0#
630   NEXT L
640 LPRINT"LIMITE INFERIOR PARA CONSTRUCAO DO HISTOGRAMA=";XI
650 LPRINT"                ACRESCIMO=";ACR
660 LPRINT"          NUMERO DE INTERVALOS NO HISTOGRAMA=";LL-1
665 LPRINT"          OS INTERVALOS SAO FECHADOS A ESQUERDA "
670 LPRINT
680 FOR H=1 TO M
690   IF X(H)<CL(1) GOTO 700 ELSE 710
700   PRINT"ERRO- X MENOR QUE LIMITE INFERIOR":GOTO 580
710   FOR L=2 TO LL:J=L-1
720     IF X(H)<CL(L) GOTO 760 ELSE 730
730     NEXT L
740     PRINT"ERRO- X MAIOR DO QUE LIMITE SUPERIOR DO ULT.INTERVALO"
750     GOTO 580
760     FC(J)=FC(J)+1
770   NEXT H
780 FOR L=2 TO LL:J=L-1:FF=FF+FC(J):NEXT L
790
800   IMPRESSAO DA TABELA DE DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS
810
820 PRINT"TABELA DE DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS PARA X"

```



```

830 LPRINT"          TABELA DE DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS PARA X"
840 PRINT STRING$(62,"-")
850 LPRINT STRING$(61,"-")
860 PRINT"    LIM.INF.  LIM.SUF.  FREQUENCIA  FREQ.REL.  FR.REL.ACUM."
870 LPRINT"    LIM.INF.  LIM.SUF.  FREQUENCIA  FREQ.REL.  FR.REL.ACUM."
880 PRINT STRING$(62,"-")
890 LPRINT STRING$(61,"-")
900 ACU=0#:FAX=0#
910 FOR L=2 TO LL
920 J=L-1:FR=FC(J)/FF:DF(J)=FR/ACR:ACU=ACU+FC(J)
930 IF FR>FAX THEN FAX=FR
940 FRA=100##ACU/FF:FR=100##FR
950 PRINT USING 61%;CL(J),CL(L),FC(J),FR,FRA
960 LPRINT USING 61%;CL(J),CL(L),FC(J),FR,FRA
970 NEXT L
980 PRINT STRING$(62,"-")
990 LPRINT STRING$(61,"-")
1000 PRINT"          TOTAL      ";;PRINT USING 61%;FF,100#
1010 LPRINT"          TOTAL      ";;LPRINT USING 61%;FF,100#
1020 PRINT STRING$(62,"-")
1030 LPRINT STRING$(61,"-");LPRINT CHR$(12)
1040 '
1050 '    CONSTRUCAO DO HISTOGRAMA DA DISTRIBUICAO DE FREQUENCIAS
1051 '
1052 CLS
1053 PRINT"          X MINIMO=";;PRINT USING 61%;X1
1054 PRINT"          X MAXIMO=";;PRINT USING 61%;XSS
1055 PRINT" ORDENADA (DENS.de FREQ. RELAT.) MAXIMA=";;PRINT USING 61%;FAX
1056 PRINT:PRINT" A TELA TEM 200 PONTOS PARA X E 640 PONTOS PARA A ORDENADA"
1057 INPUT"    VALOR MINIMO DE X A SER CONSIDERADO=";XMN
1058 INPUT"    ABOISSA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA=";XTI
1059 INPUT"    VALOR MAXIMO DE X A SER CONSIDERADO=";XMX
1060 INPUT"    ABOISSA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA=";XTM
1061 INPUT"ADRESCIMO NO VALOR DE X ENTRE MARCAE NO EIXO=";DX
1062 PRINT
1063 INPUT" PONTO DA TELA CORRESPONDENTE A ORDENADA 0 =";YTI
1064 INPUT"    VALOR MAXIMO DE Y A SER CONSIDERADO=";YMX
1065 INPUT"    ORDENADA DO RESPECTIVO PONTO NA TELA=";YTM
1066 INPUT"ADRESCIMO NO VALOR DE Y ENTRE MARCAE NO EIXO=";DY
1067 AY=(YTM-YTI)/(YMX);AX=(XTM-XTI)/(XMX-XMN);DXT=DX*AX;DYT=DY*AY
1080 CLS:SCREEN 2:KEY OFF
1085 LINE (YTI,XTI)-(YTM,XTM),,B
1087 LX=INT((XTM-XTI)/DXT):LY=INT((YTM-YTI)/DYT)
1090 FOR L=0 TO LX

```

```

1100 XL=XTI+DXT*L:LINE (YTI-3#,XL)-(YTI,XL):LINE (YTM-3#,XL)-(YTM,XL)
1120 NEXT L
1130 FOR L=0 TO LY
1140 YL=YTI+DYT*L:LINE (YL,XTI)-(YL,XTI-2#):LINE (YL,XTM+2#)-(YL,XTM)
1160 NEXT L
1210 FOR L=2 TO LL:J=L-1
1220 XT1=XTI+AX*(CL(J)-XMN):XT2=XTI+AX*(CL(L)-XMN)
1230 YT=YTI+AY*DF(J):LINE (YTI,XT1)-(YT,XT2),,B
1232 NEXT L
1238 NP=XTM-XTI
1240 FOR I=0 TO NP
1244 XT=XTI+I:XX=XMN+I/AX:IF XX<=0# GOTO 1250
1246 EU=(XX*BE)/AL:YY=(BE*EU/XX)*EXP(-EU)
1247 YT=YTI+AY*YY
1248 PSET (YT,XT)
1250 NEXT I
1260 A$=INKEY$:IF A$="" THEN 1260
1270 SCREEN 0:KEY ON
1290 PRINT" DIGITE 0 PARA REFAZER O GRAFICO"
1300 PRINT"      1 PARA PROSSEGUIR "
1310 PRINT"      2 PARA IMPRIMIR ESCALA E PROSSEGUIR"
1320 INPUT KC:IF KC=0 GOTO 1050 ELSE GOTO 1330
1330 IF KC=1 GOTO 1410 ELSE IF KC=2 GOTO 1340 ELSE GOTO 1290
1340 LPRINT"          VALOR DE X NO INICIO DA ESCALA =" ;XMN
1350 LPRINT"          VALOR DE X NO FIM DA ESCALA =" ;XMX
1360 LPRINT"      ACRESCIMO NO VALOR DE X ENTRE MARCAS NO EIXO =" ;DX
1380 LPRINT"VALOR DE Y=DENSIDADE de FREQ. REL. NO FIM DA ESCALA =" ;YMX
1390 LPRINT"      ACRESCIMO NO VALOR DE Y ENTRE MARCAS NO EIXO =" ;DY
1400 LPRINT:LPRINT
1410 END

```

APÊNDICE 3: Dados empíricos de operação no campo e quebras dos tratores estudados.^(*)

D6-1: 75 Q 475 Q 71 Q 194 Q 560 = 1375

(Grade pesada, subsolagem)

D6-2: 10 Q 81 Q 246 Q 26 Q 220 Q 171 Q 538 = 1292

(Grade pesada, subsolagem)

D6-3: 8 Q 244 Q 105 Q 303 Q 384 = 1044

(Sulcação, adubação)

D6-4: 83 Q 556 Q 268 Q 511 = 1418

(Sistematização)

D6-5: 318 Q 172 Q 102 Q 245 Q 192 = 1029

(Sulcação, adubação)

D6-6: 322 Q 1108 Q 346 Q 92 = 1868

(Sistematização)

D6-7: 425 Q 227 Q 506 = 1158

(Terraplenagem, destoca)

D6-8: 64 Q 17 Q 260 Q 30 Q 784 Q 112 = 1267

(Subsolagem, sistematização)

D6-9: 24 Q 887 Q 562 = 1473

(Terraplenagem, sistematização)

D6-10: 848 Q 623 = 1471

(Terraplenagem)

(*) Os números indicam as horas de operação contínuas, e a letra "Q" a ocorrência de quebra.

APÊNDICE 4: Determinação dos parâmetros da distribuição de Weibull.

Trator = D6-1
Número de observações = 5
Média dos dados = 275.0000
Desvio padrão dos dados = 204.6470

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 610.9292$$

$$\beta = 1.1180$$

$$r^2 = 0.8554$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 1910.0564$$

$$\beta = 1.3248$$

Trator = D6-2
 Número de observações = 7
 Média dos dados = 184.5714
 Desvio padrão dos dados = 167.5332

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-1)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 86.4087$$

$$\beta = 0.8499$$

$$r^2 = 0.9737$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 176.3285$$

$$\beta = 0.9919$$

Trator = D6-3
 Número de observações = 5
 Média dos dados = 208.8000
 Desvio padrão dos dados = 135.5749

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 49.0350$$

$$\beta = 0.7045$$

$$r^2 = 0.8906$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 490.1095$$

$$\beta = 1.1515$$

Trator = D6-4

Número de observações = 4

Média dos dados = 354.5000

Desvio padrão dos dados = 191.2387

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 2436.7374$$

$$\beta = 1.2912$$

$$r^2 = 0.9395$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 75095.2145$$

$$\beta = 1.8754$$

Trator = D6-5

Número de observações = 5

Média dos dados = 205.8000

Desvio padrão dos dados = 72.4331

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 3442375.6021$$

$$\beta = 2.7623$$

$$r^2 = 0.9877$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 27887016.3480$$

$$\beta = 3.1511$$

Trator = D6-6
Número de observações = 4
Média dos dados = 467.0000
Desvio padrão dos dados = 383.1357

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 1054.6444$$

$$\beta = 1.1138$$

$$r^2 = 0.9374$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 2556.6755$$

$$\beta = 1.2607$$

Trator = D6-7
Número de observações = 3
Média dos dados = 386.0000
Desvio padrão dos dados = 117.1922

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 10691297.2527$$

$$\beta = 2.6588$$

$$r^2 = 0.9532$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 39602202721.8474$$

$$\beta = 4.0267$$

Trator = D6-8

Número de observações = 6

Média dos dados = 211.1667

Desvio padrão dos dados = 268.4948

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 70.3851$$

$$\beta = 0.8166$$

$$r^2 = 0.9282$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 65.4888$$

$$\beta = 0.8019$$

Trator = D6-9

Número de observações = 3

Média dos dados = 491.0000

Desvio padrão dos dados = 355.8773

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 33.6657$$

$$\beta = 0.5562$$

$$r^2 = 0.9069$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 273.1894$$

$$\beta = 0.9104$$

Trator = D6-10
 Número de observações = 2
 Média dos dados = 735.5000
 Desvio padrão dos dados = 112.5000

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(\log(n/(n-i)))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 621218515233113.8000$$

$$\beta = 5.1001$$

$$r^2 = 1.0000$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

α = não foi possível ser estimado

β = não foi possível ser estimado

Trator = D6-11
 Número de observações = 44
 Média dos dados = 304.4318
 Desvio padrão dos dados = 261.1028

Estimativas preliminares de α e β com base na regressão de $\log(n/(n-i))$ contra $\log(t)$

$$\alpha = 375.5470$$

$$\beta = 1.0292$$

$$r^2 = 0.9812$$

Estimativas de máxima verossimilhança para α e β

$$\alpha = 538.8607$$

$$\beta = 1.0936$$