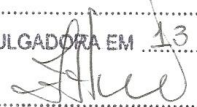


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR TALES RIBEIRO
MARTINS E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 13, 07, 2011

ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Tales Ribeiro Martins

**Estimativa de confiabilidade de motor diesel na
fase de desenvolvimento**

Campinas, 2011

Tales Ribeiro Martins

Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Automobilística.

Área de Concentração: Projetos

Orientador: Irany de Andrade Azevedo

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

M366e	Martins, Tales Ribeiro Estimativa de confiabilidade de motor diesel na fase de desenvolvimento / Tales Ribeiro Martins. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011. Orientador: Irany de Andrade Azevedo. Dissertação de Mestrado (Profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. 1. Confiabilidade (Probabilidade). 2. Motor diesel. 3. Produção - Controle de qualidade. I. Azevedo, Irany de Andrade. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.
-------	---

Título em Inglês: Estimation of diesel engine reliability on development phase

Palavras-chave em Inglês: Reliability (Probability), Diesel engine, Production -

Quality control

Área de concentração: Projetos

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Antonio Batocchio, Benedito Sá de Araújo Filho

Data da defesa: 13-07-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

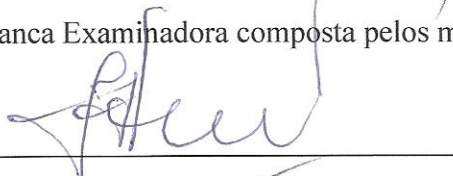
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

Estimativa de confiabilidade
de motor diesel na fase de desenvolvimento

Autor: Tales Ribeiro Martins

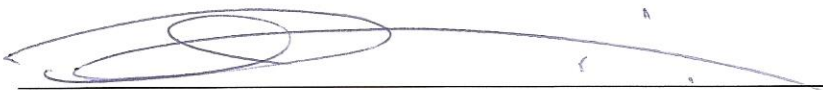
Orientador: Irany de Andrade Azevedo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



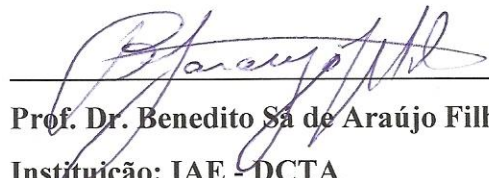
Prof. Dr. Irany de Andrade Azevedo

Instituição: ITA



Prof. Dr. Antonio Batocchio

Instituição: FEM - UNICAMP



Prof. Dr. Benedito Sá de Araújo Filho

Instituição: IAE - DCTA

Campinas, 13 de julho de 2011.

*Dedico este trabalho à minha esposa,
Roberta.*

Agradecimentos

Agradeço à Roberta pela paciência nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, meus irmãos e meus sogros pela compreensão e apoio.

Aos colegas da MWM *International*.

Ao professor Irany pela orientação e paciência tornando possível a elaboração deste trabalho.

Resumo

As empresas do ramo automotivo costumam empregar testes de durabilidade para confirmar o atendimento das especificações estabelecidas em projeto, já que existe a necessidade de garantia da qualidade do produto a ser comercializado. No trabalho é realizada uma estimativa da confiabilidade de um motor diesel na fase de desenvolvimento com o uso de uma ferramenta de gerenciamento de crescimento da confiabilidade. São apresentados os conceitos essenciais para a estimação do valor da confiabilidade e de seu crescimento, o processo típico de desenvolvimento do produto e seu ciclo de vida no mercado. É descrito o procedimento atualmente realizado por uma empresa do ramo automotivo com grande participação no mercado brasileiro e internacional, são descritos os testes de validação usados, e é apresentada uma proposta de melhoria no modelo atual. A proposta consiste em classificar as falhas encontradas no decorrer dos testes, identificar os sistemas mais suscetíveis à falha nas condições de uso previstas, e utilizar uma ferramenta de software baseada no modelo AMSAA-CROW para estimar o crescimento da confiabilidade, com base no MTBF e no parâmetro de forma β . A curva de crescimento da confiabilidade gerada indica a evolução do desenvolvimento até o objetivo a ser atingido. Com os dados de falhas identificadas no decorrer do desenvolvimento é plotada a curva de evolução da confiabilidade ao longo da fase de desenvolvimento. O modelo proposto possibilita a verificação, ao longo do período de desenvolvimento do produto, da eficácia das ações corretivas. Permite, ainda, determinar se a confiabilidade especificada para o produto já foi atingida e se a quantidade de recursos alocados ao desenvolvimento é suficiente. Os dados obtidos ao longo do processo permitem a formação de um banco de dados padronizado a ser usado em outros desenvolvimentos.

Palavras chave: Confiabilidade; Motor diesel; AMSAA-CROW; MTBF; Qualidade.

Abstract

Automotive companies involved in diesel engines development often use durability tests to confirm the achievement of the specifications established in a project, aiming to build the desired level of quality in a product being marketed. In this work a software based tool is used to estimate the reliability growth evolution through engine development phase. The essential concepts for the estimation of the value of reliability and of its growth, the typical process of product development and its life cycle in the market are considered. A procedure currently performed by an automotive company with significant market share in Brazil and abroad and the validation tests it uses is described. A new procedure is proposed aiming to improve the current model through development time reduction and early failures identification and correction. It consists in classifying the failures found during testing, identifying the systems more susceptible to failure in the conditions specified during operation, and applying a software tool based on the Crow-AMSAA model to estimate the reliability growth, based on the MTBF and the shape parameter β . The reliability growth curve is generated using the desired goal at the end of development, predicting the evolution of reliability throughout the development phase. The proposed model enables evaluation of the effectiveness of corrective actions; it is a tool that can be used to judge if the reliability goal has been reached and if the resources allocated to development are enough. The data obtained during the process allow the formation of a standardized database to be used in future developments.

Keywords: Reliability; diesel engine; CROW-AMSAA; MTBF; Quality.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Modelo de avaliação do crescimento da confiabilidade.....	16
Figura 2 - Modelo de avaliação do crescimento da confiabilidade com fabricação de componentes para itens onde ocorreram falhas.....	17
Figura 3 - Modelo de gerenciamento do crescimento da confiabilidade (Avaliação)	18
Figura 4 - Exemplo do planejamento do crescimento da confiabilidade e avaliações.....	19
Figura 5 - Gráfico típico de programa de confiabilidade: <i>Test-Fix-Test</i>	21
Figura 6 - Gráfico do programa de confiabilidade: <i>Test-Find-Test</i>	22
Figura 7 - Gráfico de um programa de confiabilidade: <i>Test-Fix-Test</i> com ações corretivas atrasadas.....	22
Figura 8 - Desenvolvimento da curva de crescimento planejada em uma fase por fase.....	23
Figura 9 - Determinação de análise global de curva de crescimento planejada.....	24
Figura 10 - Curva do monitoramento do crescimento da confiabilidade.....	25
Figura 11 - Confiabilidade projetada e extrapolada.....	25
Figura 12 - Comportamento do ciclo de vida no mercado.....	28
Figura 13 - Ciclo de vida no mercado - inclusão da fase de saturação	28
Figura 14- <i>Stage-Gate</i> Genérico	30
Figura 15 - Elementos do processo de revisão de fases.....	30
Figura 16 - Interface QFD/FMEA	37
Figura 17 - Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 1	46
Figura 18 - Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 2	48
Figura 19 - Ensaio acelerado por fadiga térmica	49
Figura 20 – Trinca na junta de cabeçote	50
Figura 21 - Diagrama do Processo de desenvolvimento do Produto	52
Figura 22 - Processo PDP e as etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade.....	52
Figura 23 - Divisão das etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade.....	53
Figura 24 - Curva de crescimento da confiabilidade	54
Figura 25 - Ocorrência de falhas nos diferentes sistemas do motor MWM.....	62

Figura 26 - Inserção de dados para planejamento de uma curva do crescimento da confiabilidade	64
Figura 27 - Comportamento esperado para a função confiabilidade	67
Figura 28 - MTBF obtido a partir dos dados de teste	68
Figura 29 - Inserção de dados para planejamento de uma curva do crescimento da confiabilidade	70
Figura 30 – MTBF obtido para a aplicação escolhida	74
Figura 31 - MTBF obtido com o uso dos dados de teste	75
Figura 32 - MTBF após o tratamento dos dados.....	76

Lista de Tabelas

Tabela 1- Produção decenal de veículos	12
Tabela 2 - Evolução da produção brasileira de veículos.....	12
Tabela 3 - Exemplo do ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 1	45
Tabela 4 – Ocorrência de falhas por sistema no desenvolvimento do novo motor.....	62
Tabela 5- Registro de ocorrência das falhas	69
Tabela 6 - Quantidade de falhas após análise dos comunicados.....	69

Lista de Abreviaturas e Siglas

Letras Gregas

λ - Taxa de Falha

β – Parâmetro de forma ou inclinação

.....

Abreviações e Siglas

APQP (*Advance Product Quality Planning*) - Planejamento Avançado da Qualidade do Produto

AMSAA (*Army Materiel Systems Analysis Activity*) – Atividades de análise de sistemas do exército americano.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de veículos automotores

COF - Comunicado de ocorrência de falha

DVP&R (*Design Validation Plan & Reliability*) – Plano de validação e confiabilidade do projeto

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) – Análise dos efeitos e modos de falha

FTA (*Fault Tree Analysis*) – Análise pela árvore de falha

IMTBF (*Instantaneous Mean Test Between Failure*) – tempo médio entre falhas num determinado intervalo de tempo

MTBF (*Mean Time Between Failures*) -Tempo Médio entre Falhas

MTTF (*Mean Time To Failure*) - Tempo Médio até a Falha

MTTR (*Mean Time To Repair*) - Tempo médio de reparo

PCP – Testes com pressão de combustão

PDP – Processo de desenvolvimento do produto

PMBOK (*Project Management Body of Knowledge*) – Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos

QFD (*Quality Function Deployment*) – desdobramento da função qualidade

RGA (*Reliability Growth and repairable system Analysis*) - Crescimento da confiabilidade e análise de sistemas reparáveis

RGM (*Reliability Growth management*) - Gestão do crescimento da confiabilidade

RSA (*Reliability Systems Analysis*) – Análise de Sistemas Reparáveis

SOP (*Start Of Production*) – Início da produção

ÍNDICE

Resumo.....	vi
Abstract	vii
Lista de Ilustrações.....	viii
Lista de Tabelas.....	x
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	xi
Índice.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Contexto e Motivação	1
1.2 Apresentação do problema.....	5
1.3 Objetivos gerais e específico.....	6
1.4 Estrutura do trabalho	7
2 REVISÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1 O motor diesel e sua indústria.....	9
2.2 Confiabilidade	12
2.3 Crescimento da confiabilidade (BROEMM; ELLNER; WOODWORTH; 2000)....	15
2.3.1 Fases do desenvolvimento de sistemas	19
2.4 Confiabilidade no desenvolvimento de motores	26
2.5 Processo de desenvolvimento do produto - Ciclo de vida do produto e do projeto...	26
2.6 Estudos Correlatos	33

3 PRINCIPAIS TESTES DE VALIDAÇÃO DINAMOMÉTRICOS	43
3.1 Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados – Tipo 1	44
3.2 Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados – Tipo 2	47
3.3 Teste de componentes auxiliares.....	48
3.4 Teste acelerado por fadiga térmica	49
3.5 Teste de aceleração livre	50
3.6 Teste de rotação em marcha lenta	50
4 ESTUDO DE REFERÊNCIA	51
5 PROPOSTA DE NOVO PROTOCOLO: EXEMPLO DE APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	56
5.1 A MWM International.....	56
5.2 Procedimento atual adotado	57
5.3 Proposta de alteração do procedimento.....	60
5.3.1 RGA - Reliability growth and repairable systems analysis	65
5.4 Aplicação dos dados no software RGA da ReliaSoft	66
5.5 Obtenção dos resultados.....	70
5.6 Requisitos considerados essenciais para a análise eficaz da confiabilidade:	72
6 CONCLUSÕES E DESDOBRAMENTOS	77
Referências	79
Anexo A – Exportação de veículos	82
Anexo B – Produção decenal de veículos	83
Anexo C - Tabela de ocorrência de falha.....	84
Anexo D – Gráfico MTBF em função do tempo – Fase 1	87
Anexo E - Gráfico MTBF em função do tempo – Somadas as fase 1 e 2	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e Motivação

Profundas modificações estão ocorrendo na vida das empresas brasileiras, vinculadas principalmente às transformações das relações sociais e trabalhistas que ocorrem entre os agentes envolvidos na vida das instituições, e aos avanços da ciência e da tecnologia.

Essas transformações acontecem em um universo globalizado e em ritmo acelerado, alterando a competitividade das empresas.

Neste cenário, importantes segmentos da sociedade, além das agências governamentais, discutem melhorias nas políticas industriais de tal forma que seu progresso possa sustentar o ritmo de desenvolvimento de que o país necessita.

Ao mesmo tempo, novos procedimentos são introduzidos regularmente no mundo empresarial destinados a identificar e a resolver problemas referentes à melhoria de seus produtos.

Um marco significativo na vida das empresas brasileiras está associado ao conceito de Engenharia da Qualidade que, segundo LINS (2000) :

“... é o conjunto das técnicas e procedimentos para estabelecer critérios e medidas da qualidade de um produto, identificar produtos que não estejam conformes a tais critérios, evitando que cheguem ao mercado, e acompanhar o processo de produção, identificando e eliminando as causas que levaram a não conformidades. O enfoque tradicional da engenharia da qualidade enfatiza o controle, seja através de inspeções de produto, seja através do controle do processo. Já uma visão mais moderna preocupa-se com as ações preventivas que possam garantir que a qualidade será alcançada, usando o controle apenas

como apoio, quando for indispensável, em um contexto de gestão total da qualidade, estendida a todas as atividades da empresa.”

Cabe à Engenharia da Qualidade adotar um conjunto de técnicas e procedimentos preestabelecidos, que resultem em critérios e medidas para a qualidade do produto que será desenvolvido e, caso o produto não corresponda a esses critérios, deve ser feito um estudo dessa eventual falha. São ações preventivas por parte da empresa produtora para que a qualidade seja alcançada (LINS 2000).

A noção mais moderna de qualidade como adequação ao uso, apesar de clara e concisa, não explicita algumas particularidades das atividades de produção, comercialização e atendimento pós-venda de um produto. Devem ser também associadas à qualidade outras características típicas da relação entre o fornecedor e o usuário, tais como a capacidade do fornecedor em se antecipar às necessidades do cliente, o seu tempo de resposta e o suporte oferecido.

A qualidade de um produto é, portanto, decorrente da qualidade do processo de produção. Para se obter um produto com qualidade é necessário acompanhar o seu ciclo de vida, desde o projeto até o uso, devendo ser identificados os atributos que irão determinar sua qualidade, de modo que o produto possa ser projetado atendendo tais atributos.

Não se consegue atingir a qualidade adequada se esta não for devidamente especificada.

Além de produzir um produto que atenda as especificações, deve-se acompanhar o seu uso, verificando se foi adequadamente projetado e corretamente produzido. A qualidade, portanto, é resultado do esforço empregado para desenvolver um produto que atenda a determinadas especificações.

Os consumidores esperam que os produtos adquiridos funcionem como anunciado pelo fabricante. Falhas operacionais resultam na insatisfação dos consumidores e elevação de custos com modificações de projeto, processos de fabricação, reparos e subsequente aumento dos custos de garantia, redução das vendas e danos à imagem corporativa.

O objetivo do fabricante é, em geral, desenvolver e comercializar produtos com custos competitivos, em curto espaço de tempo, e que satisfaçam as expectativas dos consumidores. A relevância do atendimento pós-venda para garantia da satisfação dos clientes, acha-se bastante contemplada nos itens 7 e 8 da NBR ISO 9001-2000, que regulamenta a sua consecução.

Falar em qualidade de um produto é falar em **confiabilidade**: capacidade de o produto desempenhar a função para a qual foi desenvolvido, por um período de tempo determinado.

A confiabilidade de um produto é uma medida: trata-se da **probabilidade** de o produto desempenhar satisfatoriamente a função requerida (por um período de tempo pré-fixado). Como tal, na prática o que fazemos é determinar uma estimativa desta probabilidade - falamos da estimativa da confiabilidade do produto.

A **confiabilidade** deve ser um atributo inerente a um produto. Nas etapas do período de projeto e de desenvolvimento de um produto, a estimativa da confiabilidade torna-se um elemento fundamental para as tomadas de decisão que possibilitarão definir as características de desempenho. Estas características são de tal importância que determinam a competitividade de uma organização empresarial.

Um gerenciamento da confiabilidade adequado trará aos consumidores produtos que funcionam como o anunciado pelo fabricante.

Falhas operacionais resultam em insatisfação dos consumidores, em elevação de custos com modificações de projeto e de processos de fabricação, com a identificação de defeitos e a realização de reparos, com o consequente aumento dos custos de garantia, e a possível redução das vendas e de danos à imagem corporativa.

Está provado que o investimento na melhoria do gerenciamento da confiabilidade por parte da empresa tende a consolidar ainda mais seu nome diante do mercado consumidor.

A preocupação constante com as falhas potenciais de um determinado item ou sistema visa adequar sua vida útil às aspirações do público alvo em questão, bem como posicionar o fabricante, de forma adequada, no mercado.

De acordo com Katia (CALVACA, 2000), a noção de confiabilidade é utilizada, mesmo sem o conhecimento técnico, no cotidiano de cada pessoa desde o início da civilização, gerando técnicas de adequação dos produtos disponíveis no mercado às necessidades do público consumidor. Em um sentido mais amplo, trata-se de uma medida de desempenho. Para averiguar se o produto é confiável é necessário quantificar a confiabilidade e para isso devem ser usadas as teorias de probabilidades e da estatística.

Na década de 50 estruturou-se o interesse e a necessidade do estudo mais profundo e específico da **confiabilidade**, em decorrência das preocupações com as falhas e disponibilidade dos sistemas na indústria eletrônica, especificamente as militares.

Em 1956 foi lançado o relatório TR-1100 *Reliability Stress Analysis for Electronic Equipment*, que estabeleceu modelos matemáticos para estimativa das taxas de falhas de componentes eletrônicos. Esse estudo serviu como base para a norma MIL-HDBK 217 *Reliability Prediction of Electronic Equipment*, durante muitos anos uma das principais referências nos estudos de confiabilidade, mas que tende a ser substituída por normas setoriais, menos conservadoras, específicas para as diferentes áreas industriais e de serviços.

Atualmente a confiabilidade assume um papel de inegável importância quando o assunto é desenvolvimento de produtos eletrônicos, já que o que se almeja são sistemas que atinjam a durabilidade e a vida útil especificadas.

Entende-se como durabilidade a capacidade de um item suportar, sem degradação operacional significativa, as cargas a que será submetido ao longo de sua vida no campo, até alcançar um estado em que seja recomendável sua substituição.

A razão da incorporação da confiabilidade em um produto pode ser resumida em “potencializar as principais práticas efetivas e aplicáveis para prover um processo de desenvolvimento focado em confiabilidade, resultando um produto robusto que atenda às

expectativas do cliente quanto ao seu funcionamento num determinado período de tempo” (CARLSON, *et al*, 2010). O conceito de produto robusto em engenharia significa que o produto mantém o desempenho esperado mesmo quando acontecem variações significativas no ambiente.

Apesar de, em geral, não serem tratados diretamente, os conceitos de **manutenabilidade** e **disponibilidade** estão relacionados ao conceito de confiabilidade. O primeiro refere-se ao estabelecimento dos procedimentos da manutenção, para que a probabilidade da manutenção possa ser completada num predeterminado período de tempo, e o segundo é usado para estimar a extensão de tempo durante a qual o consumidor provavelmente poderá utilizar o produto.

1.2 Apresentação do problema

O presente trabalho pretende contribuir para o estudo da confiabilidade dentro de uma empresa automobilística típica, considerando o valor da confiabilidade como um dado cada vez mais fortemente ligado ao conjunto de especificações do produto. A confirmação de atendimento da especificação de confiabilidade passa a ser a condição para início de produção.

Neste trabalho pretende-se, em um contexto específico, responder às questões:

- É possível monitorar o crescimento da confiabilidade durante o desenvolvimento do produto com aplicação sucessiva de testes de durabilidade de forma a acelerar o seu lançamento com segurança?
- A partir da aplicação de um estudo da confiabilidade em uma determinada família de motores diesel em sua fase de desenvolvimento, é possível ampliar a garantia oferecida aos clientes?

- É possível identificar quais os sistemas ou componentes mais suscetíveis a falhas, e que por esta razão devem ser objeto de análise de previsão de falha e estabelecimento de um conjunto de medidas de prevenção?

1.3 Objetivos gerais e específico

Objetivos gerais:

1. Analisar o procedimento de incorporação da confiabilidade a um projeto novo, em uma empresa típica fabricante de motores Diesel;
2. Analisar as ferramentas utilizadas na empresa, para realizar o crescimento da confiabilidade do motor, na fase de desenvolvimento;
3. Definir os testes de longa duração usados no levantamento dos dados de ocorrência de falha necessários à análise da confiabilidade do produto;
4. Avaliar a eficácia das ações corretivas decorrentes das falhas do produto considerando os resultados dos testes nas diferentes fases do desenvolvimento do produto;

Objetivo específico:

Propor um protocolo que permita comprovar a evolução da confiabilidade do produto na fase de desenvolvimento, permitindo o acompanhamento da evolução da confiabilidade atingida ao final de cada estágio bem como se as ações corretivas efetuadas no decorrer do desenvolvimento estão sendo efetivas.

Deve-se considerar que os resultados obtidos no estudo do comportamento da confiabilidade da família de motores em questão, dada a generalidade do procedimento

proposto, podem ser esperados quando da aplicação do procedimento a outras famílias de motores.

1.4 Estrutura do trabalho

O trabalho se compõe de seis capítulos.

O primeiro capítulo contempla a justificativa da escolha do tema e a relevância do assunto nos mercados geral e específico de produção de motores diesel. São apresentados o objetivo, a delimitação do problema e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo são apresentados a pesquisa bibliográfica e os conceitos relevantes para a estimação da confiabilidade e para a definição do processo de desenvolvimento do tipo de motor de interesse.

No terceiro capítulo estão descritos os principais testes que necessariamente devem ser feitos para a validação do motor diesel e, como consequência, para o estudo do crescimento da confiabilidade.

No quarto capítulo é apresentado o modelo usado por uma empresa fabricante de máquinas agrícolas, a John Deere, para o monitoramento do crescimento da confiabilidade.

No quinto capítulo é explicado o procedimento adotado pela empresa MWM *International* e estabelece-se uma proposta de procedimento a ser adotado. Para isto é realizado o tratamento dos dados obtidos nos testes descritos no capítulo 3 que, inseridos no software RGA da *ReliaSoft*, permitem melhor compreensão dos resultados da análise. Neste capítulo é feita também a análise dos resultados, para tanto é identificada a melhoria resultante da aplicação da proposta ao estudo do crescimento da confiabilidade, apresentando seus benefícios e enfatizando a viabilidade de sua utilização.

No sexto capítulo são apresentadas a conclusão e a sugestão para desdobramentos do trabalho.

2 REVISÃO DO REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O motor diesel e sua indústria

Segundo Varella e Santos (2010, p.3-4) a ideia inicial seria a construção de um novo tipo de motor que aproveitasse a força expansiva dos gases resultantes da combustão de pólvora num cilindro fechado. Isso aconteceu bem antes de Diesel, no ano de 1652, em trabalho realizado pelo Padre Hautefoille, porém não há registros sobre suas ideias.

Foram diversas as descobertas e suas aplicações no decorrer dos anos. Alguns exemplos são: um motor que tinha como combustível a pólvora e funcionava com cilindro e pistão; um motor a vapor com sistema de resfriamento dos cilindros; a descoberta da equivalência entre calor e trabalho, aumentando com isso as possibilidades de cálculos sobre os motores; a patente de um motor de combustão, que funcionava tendo como princípio a expansão dos gases proveniente da combustão de uma mistura de ar e gás inflamado; e um motor de combustão que trabalhava com a mistura de ar e hidrogênio, e que foi realmente o primeiro motor a funcionar com sucesso.

Jean Etienne Lenoir, em 1858, tentou o seu primeiro motor fixo de explosão a gás, patenteado em 1860. A partir desse motor surge a ideia de transformar movimento retilíneo em movimento de rotação, com isso construiu um triciclo com motor a gás de hulha ou óleo leve (xisto ou alcatrão) vaporizado em carburador tipo primitivo de apenas 1,5 hp. Em gás comprimido no interior de um cilindro dava-se a combustão por intermédio de uma faísca elétrica. Não havia a mistura do combustível com o ar, só o combustível era comprimido no cilindro.

Gottlieb Daimler, em 1885, começou a construção de motores de combustão interna de dois tempos para automóveis e introduziu a ignição por centelha nos motores, tornando viável a futura construção dos automóveis.

Nikolaus August Otto (1876), alemão, caixeiro viajante e sócio de uma fábrica de motores a gás, foi quem construiu o motor que foi chamado de motor de ciclo OTTO silencioso e consistia no seguinte: movimentou o pistão manualmente até onde pode. Esse movimento do pistão resultou na compressão da mistura ar-combustível no cilindro. Feito isso, ligou a ignição e ocorreu a explosão seguida de rápidas rotações no volante do motor, desta forma concluiu que: a mistura ar-combustível deve ser admitida no primeiro movimento, onde ocorre o recuo do pistão; a mistura ar-combustível deve ser comprimida no segundo movimento; a expansão ocorre no terceiro movimento, com a combustão, que cria a força útil. A descarga ocorre no quarto movimento, que corresponde à volta do pistão à posição inicial, com a expulsão dos resíduos da combustão.

Em 1893 Rudolf Christian Karl Diesel, alemão, engenheiro, inventou o tipo de motor que hoje leva seu nome: motor diesel. Construiu um motor que explodiu após a primeira injeção de combustível, escapando por pouco de morrer. E após quatro anos conseguiu um motor operacional.

As diferenças básicas entre seu motor e o de Otto estão na forma de misturar o ar com o combustível e no processo para a ignição do motor. No Diesel a ignição se dá por compressão e no Otto por centelha elétrica.
--

Os motores de combustão interna são classificados em relação ao ciclo de funcionamento em dois tipos: ciclo OTTO e ciclo DIESEL. O ciclo de funcionamento é o conjunto de transformações na massa gasosa que ocorre no interior dos cilindros, desde sua admissão, até a eliminação para o meio ambiente.

Os ciclos OTTO e DIESEL podem ser completados em dois ou quatro cursos do pistão, resultando em um motor de dois ou de quatro tempos, respectivamente.

Quando se trata especificamente de motores Diesel tem-se que esse tipo de motor foi especialmente desenvolvido para rodar com óleo de origem vegetal, obtido na primeira fase de refino do petróleo bruto. Entre os anos de 1911 e 1912 seu inventor fez a seguinte afirmação:

“O motor a diesel pode ser alimentado por óleos vegetais, e ajudará no desenvolvimento agrário dos países que vierem a utilizá-lo... O uso de óleos vegetais como combustível pode parecer insignificante hoje em dia. Mas com o tempo irão se tornar tão importante quanto o petróleo e o carvão são atualmente.” (MOTOR A DIESEL)

Após a sua morte a indústria petrolífera passou a chamar de Diesel um tipo de óleo - óleo Diesel – bem mais barato que os demais combustíveis, o que contribuiu muito para a sua larga utilização pelo mundo todo.

“Foi esquecido, desta forma, o princípio básico que levou à sua invenção, ou seja, um motor que funcionasse com óleo vegetal e que pudesse ajudar de forma substancial no desenvolvimento da agricultura dos diferentes países. A abundância de petróleo aliada aos baixos custos dos seus derivados fez com que o uso dos óleos vegetais caísse no esquecimento.”¹ (MOTOR DIESEL)

A grande vantagem desse tipo de motor é que tem um alto rendimento térmico e aceita como combustível líquidos de baixo custo, como por exemplo, o óleo mineral (*gas oil* e *diesel oil*), o óleo residual do petróleo (*fuel oil*), óleo de alcatrão e os óleos vegetais (babaçu, amendoim, algodão, etc.).

O motor a diesel é um motor a combustão interna, em que a combustão acontece em razão do aumento de temperatura causado pela pressão do ar.

Dadas as características vantajosas do motor diesel pode-se entender porque a cada ano cresce o seu consumo no Brasil. Conforme publicação do anuário da indústria automobilística brasileira de 2010 (ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores, 2010) cujos dados estão apresentados nas Tabelas 1 e 2, o Brasil possui uma das maiores concentrações de marcas do mundo. Ao longo do tempo, com o aumento da produção e do mercado interno o País tornou-se o sexto maior produtor de autoveículos e o quinto maior mercado consumidor. Em virtude deste crescimento demonstrado nas tabelas abaixo e das diferentes marcas instaladas no Brasil (entre elas: Agrale, Ford, International, Iveco, MAN, Mercedes-benz, Scania, Volvo) resta clara a

¹ Vale ressaltar que atualmente essa preocupação voltou a tona e já se pensa no novo combustível, o biodiesel como alternativa.

importância do mercado brasileiro e a dificuldade (leia-se: competitividade) em que se encontra. Verifica-se, também, o crescimento constante da exportação de veículos diesel².

Tabela 1- Produção decenal de veículos³

Produção 1959 / 2009			
Ano	Caminhões	Ônibus	Total
1960 ... 1969	343.887	40.627	384.514
1970 ... 1979	722.395	91.490	813.885
1980 ... 1989	664.076	117.446	781.522
1990 ... 1999	546.931	195.596	742.527
2000 ... 2009	1.056.861	311.902	1.368.763

Tabela 2 - Evolução da produção brasileira de veículos

Produção 2005 / 2009			
Ano	Caminhões	Ônibus	Total
2000	71.686	22.672	94.358
2001	77.431	23.163	100.594
2002	68.558	22.826	91.384
2003	78.960	26.990	105.950
2004	107.338	28.758	136.096
2005	118.000	35.387	153.387
2006	106.644	34.474	141.118
2007	137.281	38.986	176.267
2008	167.330	44.111	211.441
2009	123.633	34.535	158.168

2.2 Confiabilidade

A confiabilidade é definida como “a capacidade de um item desempenhar determinada função, sob condições de trabalho específicas, de forma adequada, como previsto no projeto, sem falhas, durante um período de tempo pré-determinado”.

² Tabela constante do Anexo A

³ Dados obtidos da Tabela constante do Anexo B

O conceito de confiabilidade contém quatro ideias explícitas: é uma capacidade inerente ao item; só se aplica àquelas funções claramente especificadas; só tem sentido nas condições de trabalho indicadas; e é uma função do tempo de funcionamento sem falhas.

A quantificação da confiabilidade é realizada através de uma probabilidade, de vez que está diretamente associada a conceitos estatísticos. Pode ser calculada através da “frequência relativa”: números de casos favoráveis dividida pelo número de casos possíveis.

Nos estudos de confiabilidade são admitidas as diferentes possibilidades de falha do item, as chamadas falhas potenciais. Deve-se observar que o item pode apresentar qualquer grau de complexidade: pode ser um produto, um equipamento ou um sistema.

Em relação à componente do conceito relativa à função a ser desempenhada, fica implícita a existência de um patamar de admissibilidade abaixo do qual a função não é mais satisfeita.

As condições de trabalho (sobrecarga, alívio), devem ser analisadas em conjunto com as condições ambientais que geram as falhas (temperatura, vibrações, radiações, etc.), e com as condições de manutenção (reparo, substituição, etc.).

Os dados de período de tempo de funcionamento do item podem ser uma duração da missão em unidades de tempo de uso, em número de ciclos ou em quilometragem.

No que diz respeito à relação do produto com o consumidor, considerando a confiabilidade com o produto pronto, esta é uma função do tempo de operação, que decresce ao longo do uso, e pode ser alterada por ações de manutenção (corretiva, preventiva sistemática ou de condição).

Este comportamento da confiabilidade é diferente daquele durante a fase de desenvolvimento do produto que, no início do projeto acaba por apresentar confiabilidade baixa, a partir das decisões que vão sendo tomadas no projeto e na fase de testes, que

permitam implementar as ações corretivas intermediárias, que acabam por elevar a confiabilidade do produto.

O estudo da confiabilidade pode ser muito mais útil do que tem sido para a maioria das indústrias desde o período da pesquisa, passando pelo desenvolvimento e estando presente na fabricação do produto. Deve-se considerar que a confiabilidade é uma ferramenta essencial para o sucesso de um produto.

As empresas consideradas *best in class* em seu segmento, na maior parte das vezes, utilizam-se da abordagem do tema junto ao cliente final – o consumidor – caracterizando sua aplicação na fase de marketing. Nesta fase é usada para vender um produto que tenha índice de confiabilidade que atenda as expectativas (exigências).

Apesar de sua importância, a obtenção da confiabilidade, na prática, exige um procedimento detalhista e complexo, dado o grande número de variáveis a serem consideradas.

Alguns conceitos, no entanto, são amplamente usados no contato empresa-cliente:

Tempo Médio entre Falhas - MTBF (*Mean Time Between Failures*) – é o tempo médio entre falhas sucessivas de um produto reparável.

Tempo Médio até a Falha - MTTF (*Mean Time To Failure*) – é o tempo médio até a falha do produto não reparável, ou o tempo médio até a primeira falha de um produto reparável.

Tempo médio de reparo - MTTR – (*Mean Time To Repair*) - é o tempo médio que é despendido pela empresa para a execução do reparo no caso de falhas.

Taxa de Falha - λ – indica a taxa média de ocorrência das falhas (número das falhas em relação ao tempo durante o qual foram computadas).

Qualidade e confiabilidade são conceitos ligados, não tendo como se tratar da qualidade sem considerar a confiabilidade.

Qualidade pode ser conceituada como um produto ou serviço que atenda de forma confiável e acessível à expectativa do cliente.

A quantificação da confiabilidade resulta de estudos estatísticos, estudando-se as evidências quantitativas de que o produto irá operar com qualidade durante a vida útil esperada (atendendo a expectativa do cliente).

O resultado desse estudo pode ser explicado por um valor de confiabilidade e por um nível de confiança que pode ser aumentado, se for o caso, com maior amostragem de testes. Nível de confiança entende-se como o quão provável o valor estimado de confiabilidade está correto, ou seja, quanto maior o nível de confiança maior a certeza da estimativa da confiabilidade.

2.3 Crescimento da confiabilidade (BROEMM; ELLNER; WOODWORTH; 2000)

O crescimento da confiabilidade, na vida operacional, é a melhora decorrente de ações corretivas originadas pela ocorrência de modos de falhas apresentados pelo produto, tendo em vista que a partir dessa constatação é feita uma mudança no projeto ou no processo de produção.

Na maioria dos textos técnicos, a expressão crescimento da confiabilidade no projeto (*reliability growth* ou *reliability enhancement*) é usada para definir os ajustes que têm que ser feitos para trazer o valor da confiabilidade àquele especificado, através de atividades executadas antes do final do projeto em desenvolvimento.

A relevância do gerenciamento do crescimento da confiabilidade é que com base nesse estudo pode-se decidir por:

- Revisar o cronograma do programa;

- Adicionar estudos de elementos finitos;
- Avaliar necessidade de prototipagem rápida;
- Aumentar ou reduzir a quantidade de testes de validação;
- Adicionar recursos financeiros ou humanos para o desenvolvimento.

Vale ressaltar que o gerenciamento aqui exposto por si só não aumenta a confiabilidade do produto, mas serve como parâmetro para a equipe responsável pelo desenvolvimento no implemento de ações corretivas quando da ocorrência de falhas no produto em desenvolvimento.

O processo de crescimento da confiabilidade deve seguir um processo básico, e é o resultado de um processo de projeto iterativo. Com o amadurecimento do projeto, há uma investigação para identificar fontes atuais ou potenciais de falhas. Esforços adicionais são gastos nestas áreas com os problemas encontrados e podem ser aplicados ao projeto do produto ou ao processo industrial. O processo iterativo pode ser visualizado como um ciclo de avaliação simples, como aparece na Figura 1, que ilustra existirem três atividades essenciais envolvidas no objetivo crescimento da confiabilidade:

- Detectar fontes de falhas;
- Identificar problemas;
- Reprojetar considerando os problemas identificados.

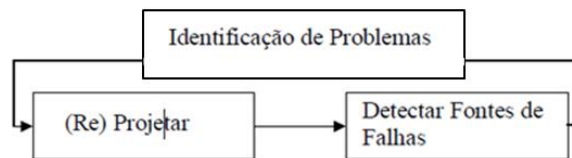


Figura 1 - Modelo de avaliação do crescimento da confiabilidade

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

Além disso, se as falhas são descobertas através de testes, um quarto elemento é necessário:

- Fabricação de componentes (para a substituição de itens que falharam).

Na sequência, é necessário reprojeter o sistema considerando as falhas detectadas e verificar sua eficácia, incluindo-se mais uma etapa:

- Verificação do reprojeto

Para um melhor entendimento a figura 2 ilustra a integração dessas novas atividades no processo iterativo.

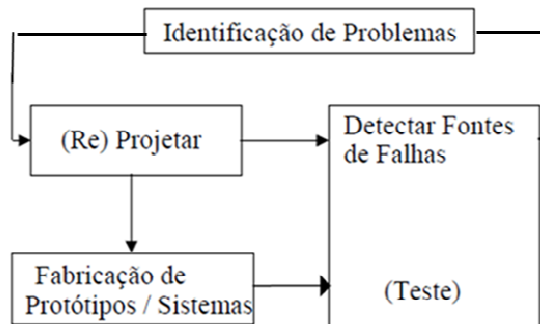


Figura 2 - Modelo de avaliação do crescimento da confiabilidade com fabricação de componentes para itens onde ocorreram falhas

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

A taxa segundo a qual a confiabilidade cresce depende de quão rapidamente pode ser realizada a conclusão das atividades, quão significativa é a identificação dos problemas e quão bem o reprojeto resolve os problemas identificados sem introduzir novos problemas.

Quaisquer dessas atividades podem se constituir em um gargalo, cuja intensidade e causa podem variar de um programa de desenvolvimento para outro; até mesmo dentro de um único programa, podem variar de uma fase de desenvolvimento para outra.

No que concerne ao gerenciamento do crescimento da confiabilidade no controle de processos, as Figuras 1, 2 e 3 ilustram a estrutura do processo de crescimento e dos passos de gerenciamento, que estão associados. Esse tipo de ilustração é usado de forma que as características universais destes processos possam ser encaminhadas. A representação de um programa atual, ou da fase de um programa, pode ser detalhada em maior profundidade. Os detalhamentos podem incluir contribuições específicas para: a produção, o processo de

crescimento, a eliminação de atividades adicionais e os fluxogramas de lógica de decisão mais explícitos.

Há dois métodos básicos pelos quais o coordenador pode avaliar o processo de crescimento da confiabilidade: utilizar avaliações quantitativas do estado de confiabilidade atingido (que são baseadas em informações da descoberta de fontes de falhas), ou monitorar as várias atividades no processo para assegurar que as atividades estão sendo realizadas de uma maneira adequada, e que o nível de esforço e a quantidade de trabalho estão conforme o planejamento. Cada um desses métodos complementa o outro no controle do crescimento do processo.

O gerenciamento do crescimento da confiabilidade difere do gerenciamento do programa de confiabilidade convencional de duas maneiras principais: primeiro, há um padrão de crescimento ao qual são comparadas as avaliações. Segundo, os métodos de avaliação usados podem fornecer avaliações mais precisas da confiabilidade do sistema. Uma comparação entre a avaliação e o valor planejado indicará se o programa está progredindo como planejado ou não. Se o progresso está decaindo, deveriam ser desenvolvidas estratégias novas e rápidas, que podem envolver a realocação de recursos para trabalhar em áreas com problemas identificados ou que podem resultar em ajuste do prazo. A Figura 4 ilustra um exemplo do crescimento de confiabilidade planejado e suas avaliações.

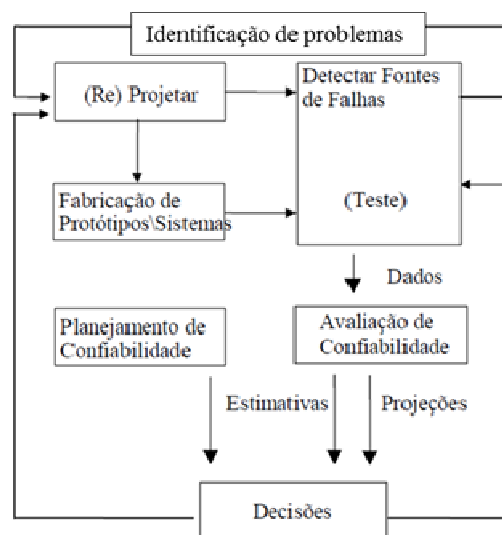


Figura 3 - Modelo de gerenciamento do crescimento da confiabilidade (Avaliação)

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

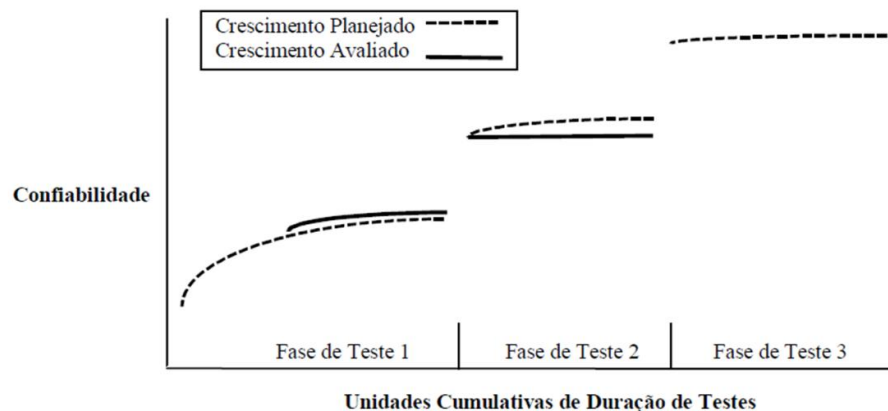


Figura 4 - Exemplo do planejamento do crescimento da confiabilidade e avaliações
 Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

2.3.1 Fases do desenvolvimento de sistemas

Qualquer programa de desenvolvimento de sistema é dividido em fases, as quais têm objetivos diferentes em cada uma. Os nomes e objetivos para cada fase de um determinado programa de desenvolvimento provavelmente não serão os mesmos mencionados aqui, mas seguem um modelo típico de desenvolvimento:

- **Proposta:** Não há nenhum hardware nesta fase; é a análise de engenharia e custos, de diferir soluções e propostas de projetos. Nesta fase a preocupação é com as exigências que poderão ser alcançadas e, nesse caso, como estimar os custos?
- **Conceitual:** Nesta fase, são construídos protótipos experimentais. Estes podem ter pouca semelhança ao sistema atual. Eles são destinados à prova de conceito.
- **Validação:** Após a definição do conceito, são construídos protótipos e estes são testados. Esta fase tenta alcançar o desempenho e os objetivos de confiabilidade para o sistema.
- **Desenvolvimento Completo:** Os sistemas são fabricados em nível de produção e são testados para verificar os últimos detalhes de projeto e procedimentos de manufatura.

O gerenciamento quantitativo do crescimento da confiabilidade pode ser usado durante a validação e o desenvolvimento completo do programa. Poderiam ser discutidas quais diferenças do andamento de testes nestas fases alterariam as taxas de crescimento, quão diferentes os tipos de testes são determinados e como eles serão tratados para criar uma curva de crescimento da confiabilidade.

Dentro da fase de desenvolvimento, é bastante provável que os testes sejam interrompidos, aumentando assim o período de teste. Cada período pode ser visto como uma fase. Também, dentro de uma fase de desenvolvimento, é bastante provável que mais de um tipo de teste aconteça, como os testes de desempenho. Esses outros testes, que não são específicos para verificação da confiabilidade, podem servir para incorporar ao banco de dados as informações coletadas referentes ao crescimento da confiabilidade. Essa fase é chamada de crescimento de confiabilidade, sendo esperado que a confiabilidade cresça de uma fase para outra. A curva do crescimento da confiabilidade deve refletir isso.

Em um sentido absoluto, qualquer mudança de projeto constitui uma nova configuração para o sistema, havendo um projeto específico para cada configuração nova, se houver uma mudança significativa, ou muitas mudanças pequenas no projeto, que causem uma taxa de falha diferente para o sistema. É possível que dois ou mais tipos de falha possam ser agrupados nas fases de testes para análise, baseadas na configuração testada nestas fases que estão substancialmente inalteradas. Também é possível que as revisões de projeto sejam tão efetivas quanto o crescimento da confiabilidade que uma configuração nova possa ter dentro de uma fase de teste. Também podem ser tomadas decisões sobre configurações de sistema com base em julgamentos. Obviamente, a configuração em teste tem grande influência na curva de crescimento.

A substituição de uma peça por outra idêntica é considerada como uma atividade de manutenção. Substituindo ou eliminando uma peça devido a uma mudança no projeto é considerado um conserto. A intenção dos consertos é reduzir a taxa de falha do sistema. Manutenções não fazem nenhuma mudança na taxa de falha do sistema. O tempo de inserção de um conserto afeta o padrão de crescimento de confiabilidade.

Em um programa de *Test-Fix-Test* (Testar-Consertar-Testar), quando uma falha é observada durante o teste, este é interrompido até que a mudança de projeto seja implementada ao sistema. Quando o teste é retomado, estará com a confiabilidade incrementada. O gráfico de confiabilidade para essa estratégia de teste é uma série de passos crescentes e pequenos, com cada intervalo de tempo mais longo entre falhas. O gráfico pode ser representado por uma curva, conforme ilustrado na Figura 5.

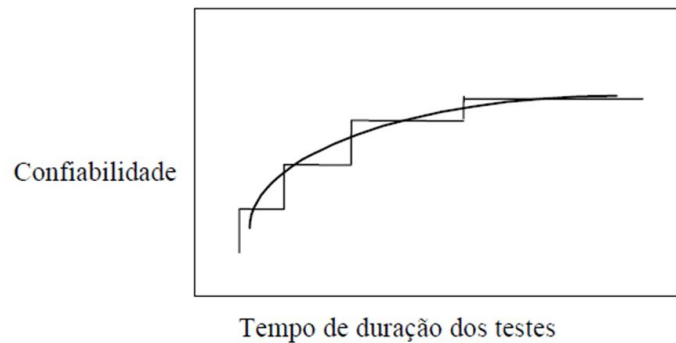


Figura 5 - Gráfico típico de programa de confiabilidade: *Test-Fix-Test*
Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

Um programa que utiliza o processo *Test-Fix-Test* não é prático na maioria das situações. É provável que algumas melhorias sejam implementadas mais tarde. Não obstante, se são implementadas as ações corretivas o mais cedo possível, e enquanto o teste ainda estiver em andamento, o passo do degrau assim como o aumento da confiabilidade fará com que a forma da curva e os degraus se aproximem, mas subirá a uma taxa mais lenta. Isso acontece em razão da confiabilidade, que permanece no mesmo nível que era quando a falha aconteceu, até que a ação corretiva seja implementada. Assim, os passos vão apresentando comprimentos mais longos, mas preservando a altura. Continuando os testes depois que a ação corretiva foi implementada, eles servirão para verificar a melhoria da mudança do projeto.

Durante um programa de *Test-Find-Test* (Testar-Achar-Testar), o sistema é testado também para determinar modos de falhas. Porém, é diferente do programa *Test-Fix-Test* porque as ações corretivas não são implementadas no sistema durante a fase de teste. No entanto, as ações corretivas são todas implementadas no sistema ao término daquela fase e

antes do próximo período de teste. Como um número grande de ações corretivas geralmente será implementado ao mesmo tempo no sistema, normalmente há um salto significativo na confiabilidade do sistema ao término da fase de teste, conforme ilustrado na Figura 6.

As ações corretivas implementadas no sistema entre fases de teste são chamadas de ações corretivas atrasadas.

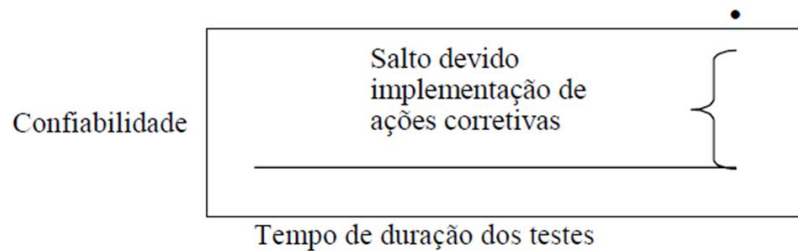


Figura 6 - Gráfico do programa de confiabilidade: *Test-Find-Test*

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

Há, ainda, a possibilidade de *Test-Fix-Test* com ações corretivas atrasadas⁴. O programa de teste geralmente usado durante o desenvolvimento, testa uma combinação dos dois tipos de implementação de ações corretivas discutido acima. Neste caso, parte das ações corretivas é implementada no sistema durante o período de teste, enquanto outras estão atrasadas e serão implementadas ao final desta fase. Por conseguinte, a confiabilidade do sistema geralmente será vista como um processo crescente durante a fase de teste e no final terá um salto devido a implementação de ações corretivas atrasadas, conforme ilustrado na Figura 7.

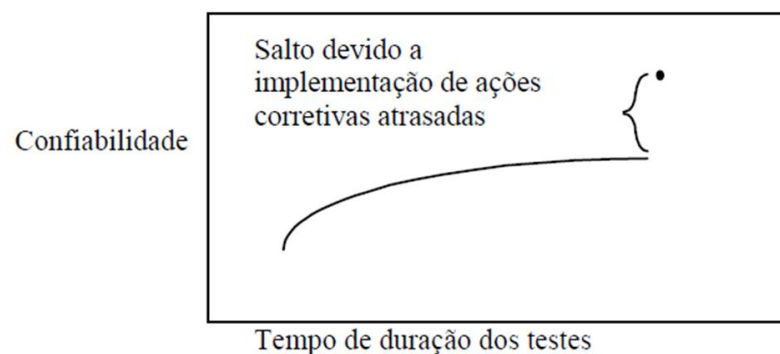


Figura 7 - Gráfico de um programa de confiabilidade: *Test-Fix-Test* com ações corretivas atrasadas

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

⁴ Também denominado de *Test-Fix-Find-Test* por Larry Crow. In *RGA7 Training Guide*.

Há algumas pequenas vantagens estatísticas distintas em um programa *Test-Fix-Test* completo:

- O valor calculado da confiabilidade em qualquer ponto ao longo da curva de crescimento é um valor instantâneo. Quer dizer, não é o cálculo da média das falhas provenientes de testes anteriores com configurações menos maduras.
- Enquanto o impacto dos saltos em confiabilidade que usa julgamento de engenharia pode ser avaliado através de cálculo direto, a estimativa de confiabilidade em um programa de *Test-Fix-Test* é somente baseada em dados.
- Em um programa de *Test-Fix-Test*, estão sendo avaliadas as melhorias das mudanças de projeto continuamente.

O planejamento da curva de crescimento é um quadro do crescimento da confiabilidade antecipado para todo o programa. É uma parte essencial da metodologia do gerenciamento do crescimento da confiabilidade e é importante para qualquer programa da área. Essa curva é construída geralmente no início do programa de desenvolvimento, antes dos dados de confiabilidade serem adquiridos com os testes. Seu propósito inicial é indicar a confiabilidade a ser esperada em qualquer fase, e fornecer uma base para avaliar o progresso atual do programa de confiabilidade em dados gerados. A curva de crescimento planejada pode ser construída fase a fase, como mostrado na Figura 8.

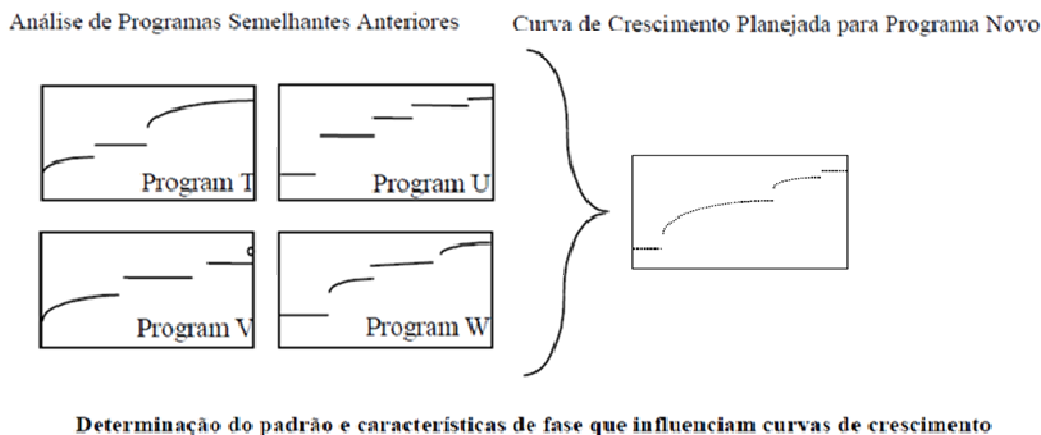


Figura 8 - Desenvolvimento da curva de crescimento planejada em uma fase por fase

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

Uma curva de crescimento idealizada é uma curva de crescimento planejada que consiste em uma única curva baseada em condições iniciais, a uma taxa de crescimento assumida, com estratégia de gerenciamento planejada.

Esta curva é uma função matemática rígida dos parâmetros de duração de teste (tempo, distância, tentativas, etc), recebendo, por isso, o adjetivo “idealizada”. Pode ser esperado que nenhum programa assuma essa forma matemática exata, mas é útil para estabelecer metas intermediárias (Figura 9).

O crescimento da confiabilidade pode ser monitorado através de uma curva, baseada em dados de uma fase ou de várias fases.

Qualquer período de teste é usado para formar um banco de dados; esta curva é a melhor representação estatística de uma família de curvas de crescimento da confiabilidade do sistema. Ela descreve a tendência de crescimento que foi estabelecida a partir dos resultados que estão no banco de dados.

Assim, se o banco de dados cobrir o programa inteiro, o ponto final desta curva demonstra a confiabilidade atingida, conforme ilustrado na Figura 10.

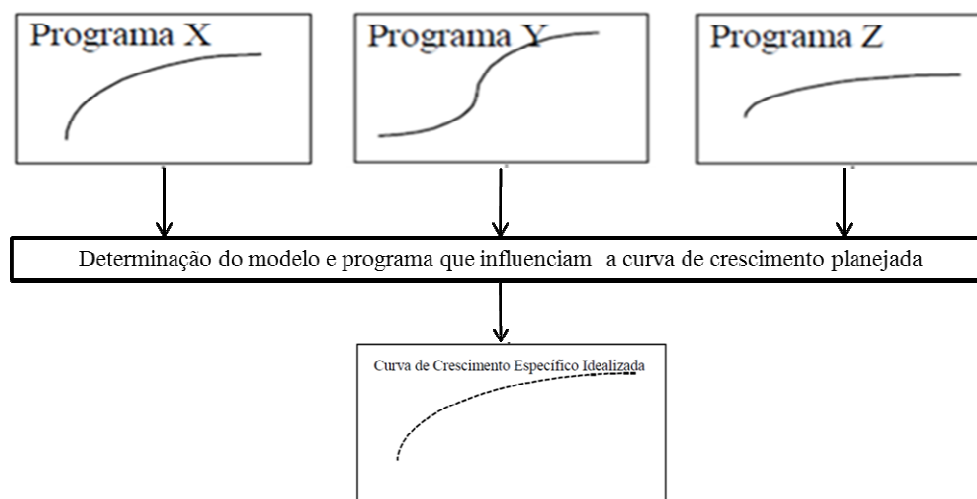


Figura 9 - Determinação de análise global de curva de crescimento planejada

Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

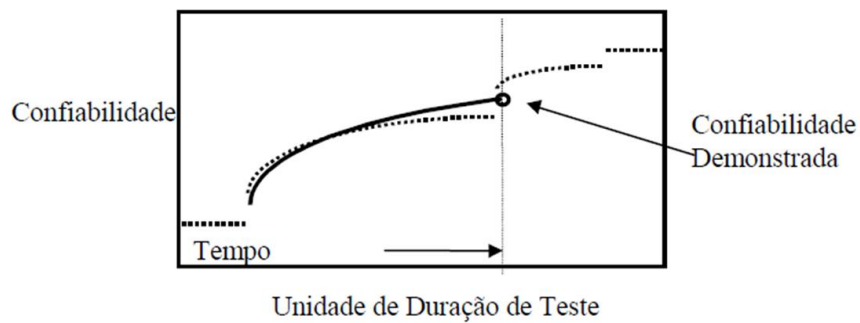


Figura 10 - Curva do monitoramento do crescimento da confiabilidade
 Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

A projeção da confiabilidade pode se dar de duas formas: confiabilidade extrapolada ou confiabilidade projetada (Figura 11).

A confiabilidade extrapolada resulta da extrapolação de uma curva de crescimento para além dos dados atuais disponíveis, e a confiabilidade final pode ser estimada em função da duração de testes adicionais; no entanto, essa estimativa será realista apenas se forem mantidas as condições de teste e o esforço de engenharia para melhorar a confiabilidade.

A confiabilidade projetada resulta de uma avaliação que pode ser antecipada para algum ponto futuro de confiabilidade a ser verificado no programa de desenvolvimento. A projeção está baseada no cumprimento dos prazos e das avaliações de projeto para as características dos programas futuros. A projeção é uma valiosa ferramenta de análise quando um programa estiver implementando ações corretivas.

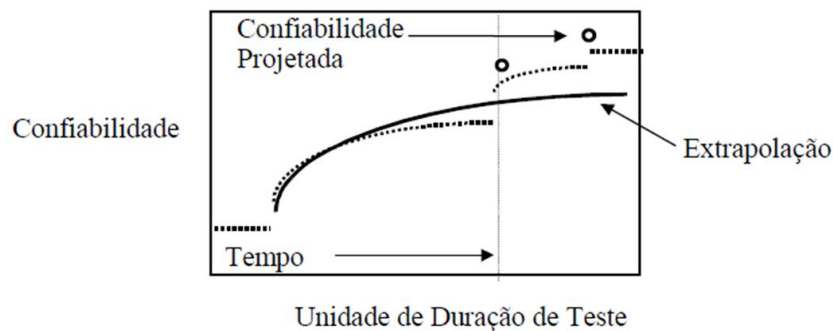


Figura 11 - Confiabilidade projetada e extrapolada
 Fonte: AMSAA RELIABILITY GROWTH HANDBOOK – 2000.

2.4 Confiabilidade no desenvolvimento de motores

A necessidade de aumento da confiabilidade decorre da crescente competitividade no mercado. É uma necessidade intrínseca às grandes empresas e, em especial, às do setor automobilístico, já que seus produtos têm um ciclo de vida cada vez mais curto e a exigência do mercado consumidor, no tocante à qualidade de seus produtos é cada vez maior.

A qualidade de um produto “é medida pelo conjunto de características capazes de atender as necessidades implícitas e explícitas do cliente” (SILVA; TIZZO; FERREIRA, 2009) . As necessidades explícitas podem ser definidas como sendo a procura por um produto específico que atenda aos critérios do cliente, que esteja compatível com o preço que pretende pagar e que a empresa lhe forneça garantias. As necessidades implícitas estão ligadas à expectativa que o cliente tem em adquirir um produto com qualidade. Daí a importância e a necessidade cada vez maiores de se ter um gerenciamento efetivo do crescimento da confiabilidade que resulte numa estimativa capaz de dar suporte à empresa produtora nos momentos de desenvolvimento e na tomada de decisão para iniciar as vendas daquele produto.

2.5 Processo de desenvolvimento do produto - Ciclo de vida do produto e do projeto

O “ciclo de vida do produto no mercado” descreve a evolução daquele produto ou serviço no mercado e costuma ser dividido em quatro fases: introdução, crescimento, maturidade e declínio. Outros estudiosos (NUNES, 2008) preferem acrescentar uma outra fase: saturação.

Cada fase apresenta características diferentes, exigindo estratégias também distintas.

A primeira fase, introdução, trata do período logo após o lançamento do produto. É caracterizada pelo crescimento nas vendas, elevado risco e baixo retorno financeiro para as

empresas. A estratégia, nesta fase, deve enfatizar a inovação e a qualidade apresentadas pelo produto.

A segunda fase, crescimento, se caracteriza pelo aumento da procura pelo produto, implicando em aumento do lucro das empresas e o possível aparecimento da concorrência. A estratégia, nesta fase, deve focar: qualidade, redução de custos, ampliação dos canais de distribuição, e lançamento de novas versões do produto para conquista de quota de mercado.

A maturidade se caracteriza pela diminuição de vendas, aumento da concorrência, “guerra” de preço e publicidade. Deve-se buscar o lançamento de novos produtos e de serviços complementares, para diferenciar o produto de outros oferecidos pela concorrência.

O declínio configura-se pela diminuição da procura pelo produto, os lucros diminuem e as empresas param de oferecer aquele produto. Deve-se, nessa fase, manter apenas os produtos que ainda são procurados no mercado.

O gráfico da Figura 12 ilustra o comportamento típico das vendas nas fases que o compõem.

Os que consideram a existência da saturação a posicionam entre a maturidade e o declínio, como ilustrado na Figura 13.

Outros autores consideram a existência da fase de Desenvolvimento do produto, que antecederia a fase de Introdução; a maioria, entretanto, considera que esta fase é anterior à entrada do produto no mercado, não podendo ser considerado como pertencente ao ciclo de vida, um período de vida de um produto ou serviço que ainda não nasceu (NUNES, 2008).

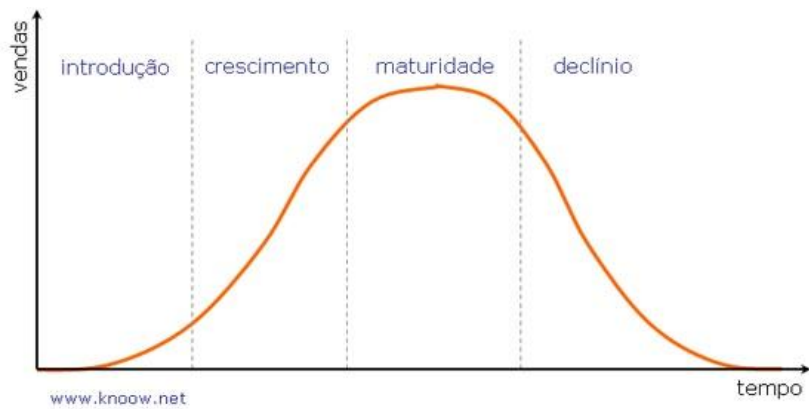


Figura 12 - Comportamento do ciclo de vida no mercado

Fonte: <http://www.knoow.net/cienceconempr/gestao/ciclovidaproduto.htm>

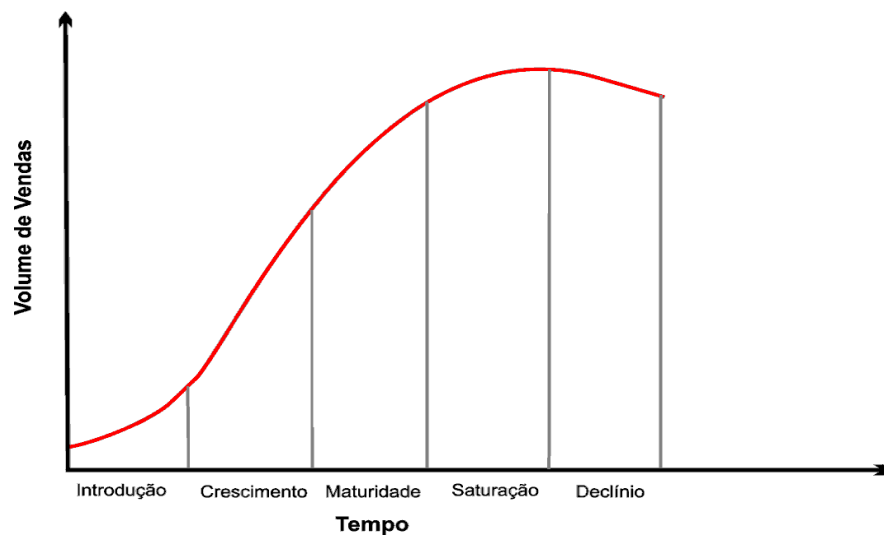


Figura 13 - Ciclo de vida no mercado - inclusão da fase de saturação

Fonte: <http://desenvolver.blogspot.com/2008/10/ciclo-de-vida-do-produto.html>

A análise do ciclo de vida do produto também se presta às análises para avaliar o melhor momento de realização de campanhas de revitalização ou de lançamento de substitutos.

Embora não explicitamente participante do ciclo de vida no mercado, considera-se a existência de um “ciclo de vida do projeto”, que pode ser considerado como visando melhores gerenciamento do projeto e tomadas de decisão no decorrer do desenvolvimento do produto.

O PMBOK (PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE, 2004, p.405) é um conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos que engloba as práticas já amplamente aplicadas e também as inovações descritas em trabalhos de circulação geral ou restrita.

Atualmente em terceira edição (2004) preconiza que o projeto deve ser dividido em fases, com pelo menos dois objetivos principais:

- Obtenção de melhor controle do desenvolvimento do produto;
- Análise do andamento do projeto, em particular nas mudanças de fase, através de uma verificação que indique se foram atingidas as metas pré-estabelecidas.

As avaliações são necessárias para que se obtenha um bom resultado ao final do projeto.

As metas pré-estabelecidas citadas acima são conhecidas como *Stage-Gate* (Estágio-Pontos de Decisão). Segundo COOPER (2008) esse processo é um mapa operacional para auxiliar uma ideia até o lançamento do produto e cada estágio do processo consiste nas atividades inerentes ao estágio do desenvolvimento, uma análise conjunta dos resultados dessas atividades e o agrupamento dos resultados, o que servirá como entrada no estágio-ponto de decisão (*gate*) com a possibilidade de se dar continuidade ou não para a próxima fase (autorizando a liberação de recursos). A Figura 14 ilustra o modelo *Stage-Gate* genérico.

A equipe que desenvolverá o projeto é subdividida e cada um desses blocos de profissionais executará as tarefas a eles pertinentes. Entre as fases de desenvolvimento são feitas revisões em cima dos dados já obtidos podendo resultar em continuar, ou não, o desenvolvimento daquele produto.

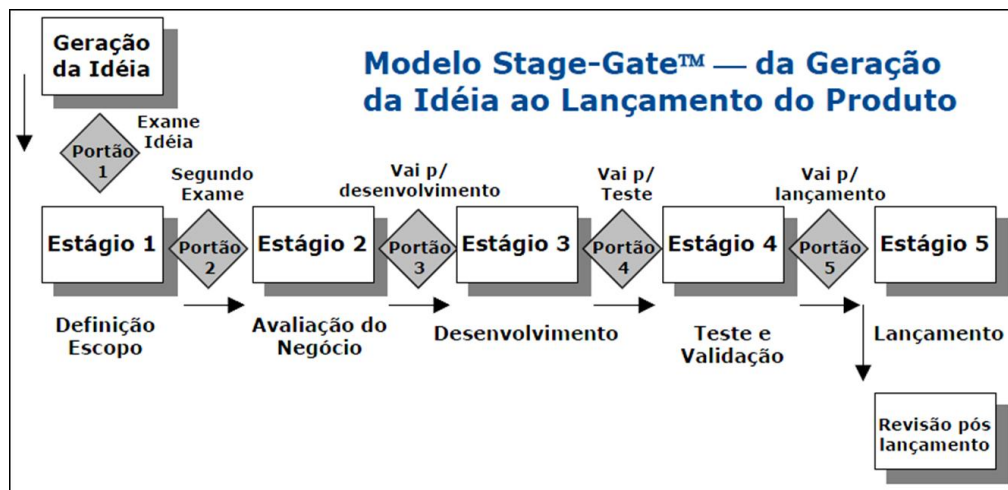


Figura 14- *Stage-Gate* Genérico

Fonte: SILVEIRA, 2006

Atualmente o *Stage-Gate* é composto por quatro fundamentos (BRIGANTINI, 2008):

- **Fluidez:** o processo é fluído e adaptável com fases sobrepostas para aumentar a velocidade;
- **Revisões flexíveis:** possibilita decisões de continuidade condicionais, dependentes de cada situação;
- **Foco:** consideram métodos de priorização de todo o portfolio e projetos, direcionando os recursos para os projetos mais importantes;
- **Flexibilidade:** possibilita a cada projeto seu próprio sistema personalizado.

E a cada fase deve-se seguir o processo ilustrado na Figura 15.

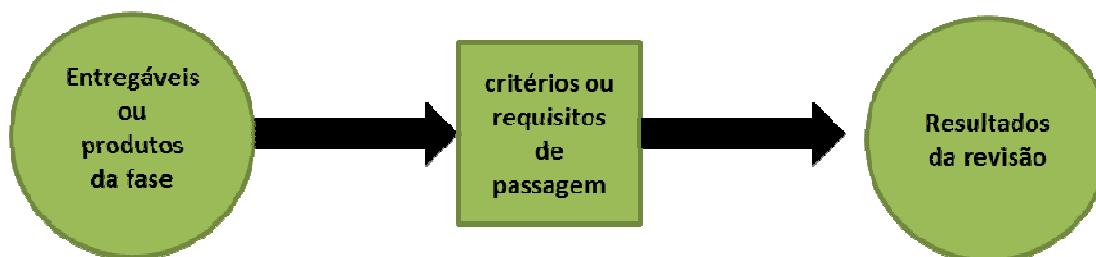


Figura 15 - Elementos do processo de revisão de fases

Fonte: BRIGANTINI, 2008

a. Fase de projeto⁵

Na fase de projeto no desenvolvimento de um produto algumas etapas precisam ser cumpridas para que o resultado obtido seja satisfatório, são elas:

a) Definição dos objetivos – Para que se tenha sucesso na consecução da confiabilidade estabelecida para o produto, deve-se estabelecer uma meta realista a ser alcançada. Para isto é necessário criar um banco de dados referente ao retorno de garantia de produtos semelhantes no mercado o que contribuirá para um novo desenvolvimento, já que por similaridade esses valores serão usados para traçar a meta, objetivando um produto mais robusto, com menores gastos no período em garantia.

b) Conceito – A engenharia de projeto, em função de uma imposição de mercado, deve atender a parâmetros pré-estabelecidos. A maioria dos parâmetros, criados pelo Poder Legislativo, como as leis ambientais que estabelecem níveis de emissão de gases poluentes ou de ruídos. É comum o uso de parâmetros advindos de empresas competidoras, que desenvolvam novas tecnologias e produtos mais econômicos na disputa por um melhor desempenho do seu produto. Estão neste caso o consumo de combustível e o período de garantia ampliado, que claramente interferem no projeto.

c) Projeto preliminar – A concepção de um novo projeto pode ocorrer através da realização de *brainstormings* entre diversas áreas da empresa que irão atuar junto à área de projetos para que seja evitada a repetição de erros já conhecidos, seja por terem sido detectados no campo como durante o processo de produção. A experiência adquirida no desenvolvimento de produtos similares tem se mostrado ser uma ferramenta indispensável quando se pretende o desenvolvimento de um produto novo.

⁵ Para a estruturação dessa fase adotou-se o procedimento estabelecido na tese de mestrado apresentada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul por Ismar Luis Schaedler em 2003, com algumas adequações realizadas pelo autor deste trabalho.

d) Revisão preliminar de projeto – Após uma primeira concepção do projeto, são reunidas diversas áreas da empresa, em uma primeira revisão de projeto, conhecida como *preliminary design review*⁶, visando a identificação e correção de possíveis falhas.

e) Re-projeto – O projetista poderá ser levado a refazer o projeto após a realização desta Revisão Preliminar do Projeto.

f) Protótipo – Nesta etapa são construídas unidades do produto a ser testado, que podem ser protótipos funcionais e não-funcionais. Os protótipos não-funcionais têm objetivos como, por exemplo, verificar a adequação do acesso de ferramentas para a montagem de componentes. Os protótipos funcionais são testados, em geral, em duas fases: a primeira é usada para a validação do conceito (poderá ser construído com peças retrabalhadas) e a segunda é usada na validação do design do projeto, diretamente realizada durante o processo de fabricação dos componentes (processo definitivo de fabricação com ferramenta de baixa produção).

g) Testes – Etapa que engloba toda a validação do produto seja através de testes específicos de cada componente, ou através de testes do produto final. Deverá ser conduzida pela área responsável pela liberação para produção.

b. Fase de produção (SCHAEDLER, 2003)

Também na fase de produção, algumas etapas precisam ser cumpridas para que o resultado obtido seja satisfatório; são elas:

a) Início de produção – nesta etapa costuma-se usar a sigla inglesa SOP (*start of production*). Esta etapa é normalmente caracterizada pelo acompanhamento por um grupo de auditores. Um primeiro lote do produto a ser desenvolvido é submetido a testes rápidos para verificar a qualidade de produção e para garantia da confiabilidade do produto, já que são

⁶ Termo utilizado para reunião interdepartamental para a discussão do projeto na MWM *International*.

analisados possíveis problemas de manufatura. Todos os desenhos e especificações técnicas devem estar liberados e o conceito aprovado, em ambos os casos pela engenharia responsável pelo desenvolvimento.

b) Mudança de projeto - toda e qualquer mudança de projeto deverá ser submetida a um controle sistêmico, seja pela engenharia da qualidade seja pela engenharia do produto corrente (pode variar conforme política da empresa). Deve ocorrer a mudança necessária no desenho do produto em desenvolvimento, que é rastreado pelo seu número de série. Com isto obtém-se a identificação de sua configuração, com as revisões de desenhos e a lista de peças.

c) Melhoria contínua – durante a produção oportunidades são estudadas e testadas para que seja possível uma melhoria no produto, seja para torná-lo mais robusto ou para que haja uma redução de custo, tornando-o mais competitivo.

c. Fase de suporte

Nessa fase são detectados os problemas de campo trazidos para a empresa pelos clientes no uso pleno do produto. Essas falhas são estudadas dentre as diversas áreas da empresa com o propósito de corrigir o problema reportado pelo cliente resultando em melhoria no produto em questão, mas também para os que estão em desenvolvimento. Pode gerar uma atualização do produto no campo.

2.6 Estudos Correlatos

Nesse subitem procurou-se mostrar a visão da literatura acerca da confiabilidade para colaborar no desenvolvimento do novo protocolo.

BRIGANTINI (2008) propôs uma melhoria do processo de desenvolvimento de produto de uma empresa fabricante de motores diesel em sua tese de mestrado no tocante ao

desenvolvimento de projetos. Para tanto realizou uma análise do processo de desenvolvimento de novos produtos da empresa, buscando identificar a situação do atual processo de desenvolvimento do produto.

No trabalho, estudou os procedimentos adotados na empresa e realizou entrevistas com profissionais envolvidos no desenvolvimento de produtos de outras empresas fabricantes de autopeças. O estudo privilegiou a estruturação do modelo do processo e a estrutura organizacional para o desenvolvimento de produto. Diante dos resultados foram elaboradas propostas de melhoria do processo.

O maior número de oportunidades identificadas relacionou-se à estruturação do processo e apenas duas oportunidades foram identificadas na estrutura organizacional. O autor propôs o acompanhamento e a implementação de algumas destas propostas, além da elaboração do plano de implementação de outras.

Não foi possível medir o impacto das práticas, devido à sua recente implementação e ao longo tempo do ciclo de desenvolvimento dos produtos da principal unidade de análise.

No trabalho foi possível realizar um diagnóstico adequado da empresa e conseguir um melhor entendimento de seu processo de desenvolvimento de produtos.

Concluiu o autor que a empresa estudada efetivamente realiza inúmeras das melhores práticas para o desenvolvimento do produto, tais como, utilização do modelo de fases e revisão de fases (*gates*), existência de um comitê de análise para a revisão de fases, fases paralelas para aumentar a velocidade, e revisões flexíveis, que possibilitam decisões de continuidade condicionais, dependentes de cada situação.

Entretanto apontou melhorias. A empresa deve focar nos projetos mais importantes, ter flexibilidade do processo, tornando-o personalizado, aplicar uma ferramenta para análise e desdobramento das necessidades e requisitos do mercado, desenvolver um projeto para manufatura e montagem, ter uma árvore de análise de falhas e criar uma plataforma de produtos.

Do estudo realizado pelo autor verificou-se que empresas do ramo têm as seguintes atitudes que devem ser consideradas no momento de implementação da melhoria: um processo documentado, com utilização de formulários pré-definidos, critérios para a passagem de fases, um comitê de análise dos projetos, um coordenador ou gerente de projetos, além de uma estrutura matricial.

A sugestão do autor para que haja melhoria baseia-se num processo diferenciado (flexibilidade), em que seja usada uma ferramenta para análise das necessidades de mercado, que a empresa conte com uma área específica para o gerenciamento do portfolio de projetos, podendo haver coordenadores de projeto nomeados desde a fase de prospecção e, por fim, que a empresa tenha uma estrutura matricial forte.

DROGUETT e MOSLEH (2006) apresentaram um método para a avaliação da confiabilidade de produtos em desenvolvimento. O método permitiu a utilização de diversas fontes de informação comumente encontradas nas etapas de desenvolvimento de um produto, tais como, dados de campo ou dados de garantia (na forma de taxas de falha), dados de teste e evidência subjetiva (opiniões de especialistas com relação ao impacto de modificações de projeto na confiabilidade do produto). O método possibilita a incorporação de evidência referente a revisões prévias do mesmo produto ou da mesma informação sobre produtos que são apenas semelhantes ao produto em desenvolvimento.

A aplicação do método foi realizada pela análise de confiabilidade de tubos de raios X de alta potência. Na aplicação foi possível verificar que a avaliação da confiabilidade de um novo projeto antes da execução de testes com unidades incorporando as modificações de projeto sugeridas, fornece ao fabricante uma relevante fonte de informações para tomadas de decisão referentes à efetiva implementação das modificações de projeto.

Característica importante deste método é a flexibilidade em usar informações de revisões anteriores do produto ou provenientes de produtos semelhantes. Estas informações podem ser total ou apenas parcialmente relevantes ao processo de avaliação da confiabilidade do produto em desenvolvimento. Já que o interesse está em estimar-se a confiabilidade de um produto reparável ao longo de seu processo de desenvolvimento.

O exemplo de aplicação usado pelo autor foi apresentado para ilustrar a avaliação da confiabilidade e acompanhar a sua evolução ao longo do processo de desenvolvimento do produto. A sequência seguida na análise da confiabilidade, entretanto, não é a única possível. Variações são possíveis dependendo, por exemplo, das características do produto e de quais tipos de dados estão disponíveis nas diferentes etapas do seu desenvolvimento. O procedimento de avaliação da confiabilidade proposto é geral quanto a este aspecto.

O método permite também o desenvolvimento de estimativas de confiabilidade para um novo projeto antes da realização de testes com unidades que incorporem a revisão do produto. Em particular, as estimativas atualizadas da confiabilidade com base nas opiniões de especialistas sobre o impacto de modificações de projeto fornecem ao fabricante uma fonte importante de informações para tomadas de decisão referentes à efetiva implementação das modificações de projeto sugeridas pela equipe de desenvolvimento. Isto beneficia o fabricante em áreas como a alocação de recursos durante o processo de desenvolvimento do produto. O método possibilita, ainda, a quantificação explícita da incerteza em torno de uma dada métrica de confiabilidade, auxiliando na tomada de decisões sob elevado nível de incerteza.

MAPA *et al* (2005) procuraram demonstrar a importância da confiabilidade para a competitividade empresarial, através de um estudo com a integração de duas ferramentas da qualidade para o gerenciamento da confiabilidade, já que o Desdobramento da Função Qualidade (QFD – *Quality Function Deployment*) e a Análise dos Efeitos e Modos de Falhas (FMEA – *Failure Mode and Effects Analysis*) são usados para aumentar a confiabilidade dos produtos durante a fase de planejamento e desenvolvimento.

O QFD, por ser uma ferramenta de planejamento, deve ser desenvolvido primeiro e, baseado nos resultados obtidos, a FMEA virá como uma ferramenta de melhoria da qualidade. Os autores demonstram através da figura abaixo o relacionamento entre as ferramentas de qualidade que auxiliam no gerenciamento da confiabilidade.

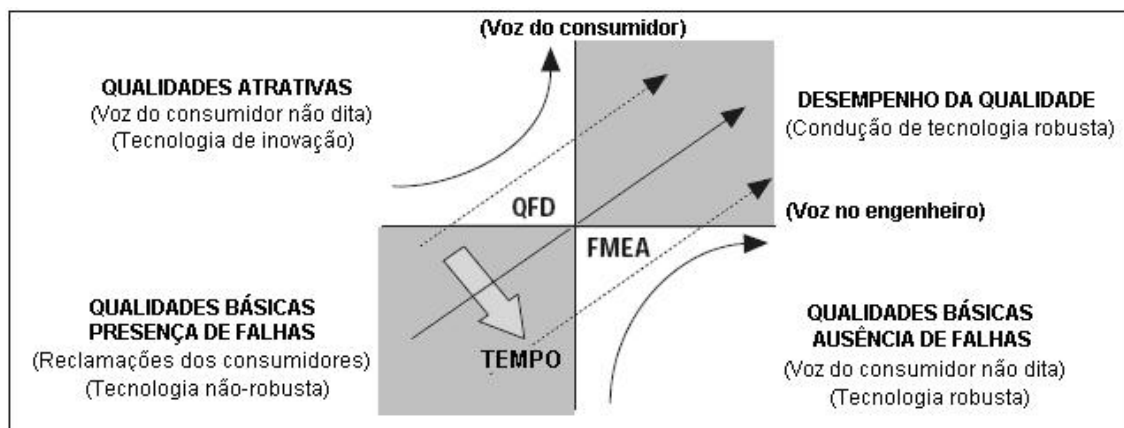


Figura 16 - Interface QFD/FMEA

Fonte: MAPA, *et al*, 2005

A Figura 16 estabelece posições opostas para QFD e FMEA. O QFD lida com qualidades atrativas ao consumidor e a FMEA as qualidades básicas que o produto deve apresentar. Demonstra-se com a figura que ambas ferramentas tem um caminho paralelo e constante quando o assunto é desempenho da qualidade. O que liga as duas ferramentas é uma equipe multidisciplinar. O tempo demonstrado na figura mostra que o que primeiro era qualidade almejada (QFD) se torna qualidade básica (FMEA).

Segundo MAPA *et al* (2005):

FMEA pode ser usada como uma ferramenta de projeto e planejamento, com apoio do QFD; enquanto QFD pode ser usado como uma ferramenta de resolução de problemas, com ajuda do FMEA. A adoção do QFD e FMEA de forma separada não é suficiente para dar suporte ao ciclo de desenvolvimento do produto.

Os autores chegam à conclusão de que com a aplicação conjunta dessas duas ferramentas da qualidade é possível que as empresas superem as deficiências comuns de planejamento da qualidade garantindo a confiabilidade do produto. Concluem, também, que a aplicação dessas ferramentas de forma separada não se mostra suficiente para garantir o desenvolvimento do produto com qualidade e confiabilidade.

MURAD (2005) apresenta a necessidade de aumento no período de garantia de veículos, já que a procura por qualidade e confiabilidade cresceu na mesma proporção que o

mercado brasileiro de motores. Argumenta que “aumentar a confiabilidade e a qualidade significa diminuição de custo com a garantia e maior possibilidade de venda, já que valor de compra baixo e alta confiabilidade têm sido fatores decisivos no momento da aquisição de produtos novos pelos consumidores”. No trabalho utiliza um modelo para descrever o comportamento de um produto e prever sua confiabilidade no campo. Parte dos dados de reclamações no período de garantia, mas considera os veículos que não apresentaram falhas no curso do período considerado. Obtém uma estimativa da confiabilidade do veículo ou subsistema e, a partir dos recursos gastos com falhas no período de garantia, propõe um modelo de análise, baseado nos conceitos da Teoria da Decisão, que permite avaliar o efeito da extensão da garantia sobre o valor monetário economizado do total reservado para os gastos com garantia. O estudo pretende apenas estabelecer a viabilidade de extensão da garantia de um veículo popular (conjunto motor e transmissão).

O autor conclui que a maior dificuldade para a implementação da extensão da garantia é o impacto causado pelo custo da garantia. Outra dificuldade seria o monitoramento dos veículos vendidos para análise após um ano de uso, que poderia ser um controle pela montadora e comprovante de inspeção mantido pelo cliente, que poderia ser o próprio manual do proprietário. Registra, ainda, as necessidades de treinamento em toda a rede de concessionárias, e de ampla divulgação ao público através dos mais diversos meios de comunicação.

A proposta do autor busca aumentar o período de garantia para 2 ou 3 anos, mas conclui que, apesar de possível, o modelo proposto mostrou-se discutível, pois os custos podem crescer para valores consideráveis. Propõe melhorar a qualidade dos componentes de maior impacto no cenário atual e mostra a necessidade de um novo Diagrama de Pareto para que se possa atualizar os componentes a serem trabalhados no produto atual.

O autor aponta alguns pontos a serem analisados quando do estudo da confiabilidade: a necessidade de um banco de dados confiável (a principal fonte de informação para a análise), a necessidade de se estabelecer um ponto de corte para a quilometragem acumulada anualmente por um cliente, e a desconsideração dos veículos com quilometragem muito acima desse valor.

O trabalho sublinha que o modelo utilizado para estudo pressupõe conhecimento tanto de confiabilidade como de ferramentas de engenharia e de teoria da decisão, não sendo de simples entendimento. Ressalta a conveniência do modelo que possibilita a identificação imediata dos itens a serem melhorados em cada um dos subsistemas e o impacto no valor dos custos com o período de garantia.

RICHTER et al (2004) investigaram o grau de relacionamento da confiabilidade com o ciclo de desenvolvimento de produtos previsto no APQP, indicando as ferramentas adequadas para cada fase, e usando o postulado de Duane e o modelo de Crow para gerenciamento de evolução da confiabilidade ao longo do desenvolvimento de produtos.

No trabalho, consideram o MTBF atingido em função do tempo de teste e buscam verificar se o tempo de teste estabelecido para um determinado programa será suficiente para atingir os objetivos propostos. Propõem um fluxograma de orientação para o gerenciamento da confiabilidade que permite a verificação da maturidade atingida pelo projeto, necessária ao avanço para etapas subsequentes como a construção de protótipo, início da montagem de lotes-piloto e início de produção.

Argumentam que empresas produtoras de bens têm no desenvolvimento de produtos um de seus processos mais importantes e que durante as várias fases deste processo a engenharia da confiabilidade deve se fazer presente para assegurar a satisfação dos clientes. O monitoramento e o gerenciamento da confiabilidade do produto é um sub-processo chave para se atingir este objetivo. O trabalho inclui um resumo das atividades relativas à engenharia de confiabilidade.

O trabalho evidencia a importância da confiabilidade de produtos para a competitividade empresarial, e o quanto esta se relaciona com o ciclo de desenvolvimento de produtos previstos pelas normas QS9000.

SCHALDLER (2003) privilegiou o tema do gerenciamento do crescimento da confiabilidade, no âmbito do desenvolvimento de novos produtos na indústria de máquinas agrícolas, e aborda o ciclo de desenvolvimento de um produto.

O objetivo principal o trabalho está em melhorar a confiabilidade das colheitadeiras da série 1100 através do gerenciamento do crescimento da confiabilidade, apresentando as técnicas de gerenciamento deste crescimento utilizadas pela empresa John Deere Brasil.

O uso de técnicas e softwares de confiabilidade para monitorar o desenvolvimento do projeto da colheitadeira foi fundamental para determinar o momento exato de lançar o produto no mercado. A análise das falhas existentes do produto, sugestões dos clientes e informações das áreas de suporte e serviços serviram de base para a introdução de diversas melhorias no novo modelo da empilhadeira. As principais atividades referentes à confiabilidade foram: previsão da confiabilidade; testes e planejamento do crescimento da confiabilidade; modelagem do crescimento da confiabilidade e análise dos dados obtidos nos testes de campo.

Os resultados obtidos com a implementação da metodologia de gerenciamento da confiabilidade permitiram que a alta administração – gerente e diretores – decidisse, juntamente com os responsáveis pelo projeto, o momento certo de lançar o novo produto no mercado, tomando como referência o objetivo da Confiabilidade Inicial – estabelecido no início do projeto – e a expectativa do cliente.

É possível afirmar que a implementação do Gerenciamento da Confiabilidade contribuiu para o estabelecimento de um processo adequado para comunicar as atividades referentes à confiabilidade e ações corretivas durante o desenvolvimento de novos produtos, fornecendo informações para que a empresa possa determinar se um novo produto está pronto ou não para ser introduzido no mercado, bem como no incremento significativo do IMTBF (*Instantaneous Mean Time Between Failure* – tempo médio entre falhas para um determinado intervalo de teste) em 12% no número de horas trabalhadas entre cada ocorrência de falhas, indo ao encontro com objetivo principal deste trabalho.

SOUZA (2009) propôs um método para se determinar a provisão dos custos relativos às falhas dos produtos de uma empresa fabricante de máquinas agrícolas durante o período de garantia, baseado na análise de confiabilidade destas máquinas. Os resultados obtidos aplicados a metodologia aos dados reais de quatro diferentes modelos de tratores da empresa AGCO do Brasil se mostraram promissores com erros totais abaixo de 10%, além de efeitos que podem ser utilizados pela área de Serviço para rastrear o desempenho da confiabilidade

das máquinas no campo em um espaço de tempo de apenas um mês. O autor sugere que novos estudos devam ser realizados abordando também a existência de riscos concorrentes nos dados utilizados aos dados de garantia da empresa. Sugere também a utilização dos dados deste estudo em novos testes para aumentar a confiabilidade dos produtos para diminuir falhas e custos para a empresa.

TEIXEIRA (2004) apresentou métodos que podem auxiliar a planejar e garantir os requisitos dos clientes, tendo como exemplo um estudo de caso aplicado à embreagem automotiva.

Considera que as empresas enfrentam o desafio de desenvolver novos produtos em um espaço curto de tempo, com tecnologia superior à anterior e com custos reduzidos para garantir a sobrevivência do negócio. E o sucesso está diretamente atrelado aos requisitos exigidos pelos clientes, onde Qualidade, Confiabilidade, Entrega e Preço são o mínimo que se espera.

Aborda as metodologias utilizadas para o Planejamento e Garantia da Qualidade, utilizadas na fase de concepção do projeto do produto, onde nascem, em grande parte, a qualidade, a confiabilidade e o preço final do produto.

Propõe a análise da Embreagem Automotiva usando, inicialmente, a interação entre o Modelo de Kano, o QFD, o Custeio-Alvo e a Análise de Valor. Avalia o grau de atendimento aos requisitos do cliente e determina as funções cujos custos relativos estão acima das necessidades, oferecendo, portanto, potencial para otimização ou eliminação. Utiliza a Análise pela Árvore de Falhas (FTA) na identificação dos componentes críticos que oferecem maior risco de falha no sistema.

O trabalho tem como objetivo final realizar a análise de Confiabilidade e efetuar a Regressão dos resultados obtidos nos ensaios, para determinação da confiabilidade da embreagem em estudo, identificação dos componentes a serem melhorados, e criar uma metodologia para desenvolvimento de produtos otimizados.

O método proposto mostrou-se eficiente, permitindo avaliar desde os requisitos tangíveis e intangíveis dos clientes, até o desempenho final do produto, sempre buscando a melhor relação custo x benefício, pois em mercados consumidores sujeitos a intensas mudanças, não se espera produtos indestrutíveis, salvo itens de segurança. No trabalho foram considerados basicamente requisitos de desempenho.

3 PRINCIPAIS TESTES DE VALIDAÇÃO DINAMOMÉTRICOS

Hoje na indústria automotiva, mais especificamente na indústria de motor diesel, são muitas as possibilidades de validação dos componentes do motor: ensaios dinâmicos em bancada, simulações, análise de materiais. Porém para uma certificação do motor como um sistema completo deve-se realizar uma durabilidade em veículo, entretanto isto requer um grande investimento, e o que mais se aproxima do funcionamento real do veículo, são os testes de dinamômetros, uma ótima e acessível ferramenta utilizada atualmente.

Entre os principais testes realizados em dinamômetro encontram-se aqueles que têm como objetivo orientar e fornecer meios para simular, em banco de teste, a resistência de motores veiculares, ou de seus componentes.

Os itens sob teste são colocados em condições similares às que se espera que serão enfrentadas pelos clientes.

Tem-se como objetivo obter o funcionamento correto do motor, sem falhas. As respostas esperadas dos testes são: desempenho, que não deve decrescer mais de 5% da potência, e torque nominal. Ao final do teste os componentes não podem apresentar quebra, trinca ou desgaste excessivo. O monitoramento serve para que se detecte o mais breve possível uma anormalidade, como na temperatura de entrada do ar no motor, no ar de escape após o turbo, e a variação do fluxo de água no trajeto entrada/saída.

As principais características destes testes de durabilidade são apresentadas a seguir.

3.1 Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados – Tipo 1

O teste consiste em simular o funcionamento do motor o mais aproximadamente possível tal como ele opera no campo, porém forçando alguns eventos, como a parada do motor não programada e o sobreaquecimento, visando e verificar se é um motor robusto e sem falhas. Caso ocorram falhas, será necessário estudá-las com o objetivo de se conseguir melhoria em relação ao que foi desenvolvido até aquele momento. O objetivo principal é avaliar a robustez do projeto em desenvolvimento.

São realizados passos que constam de aquecimento e choques térmicos. O choque térmico é realizado utilizando-se um conjunto de válvulas que permitem que o motor trabalhe com o sistema de refrigeração do motor fechado, mantendo uma temperatura de trabalho crescente, e ao ser atingida uma temperatura próxima dos 90°C, o conjunto de válvulas seja acionado e uma bomba externa aplique água condicionada a 45°C por um período de tempo curto (poucos segundos). As válvulas retornam, em seguida, à condição anterior de funcionamento.

Caso ocorra quebra ou disfunção de algum componente no decorrer do teste, caberá à Engenharia determinar se o teste prosseguirá sem o componente definitivo, montando outro igual em seu lugar, enquanto aguarda a decisão de sua substituição por um componente diferente, buscando acumular horas de funcionamento para os demais componentes, para efeito de homologação. A Engenharia pode decidir que o teste será interrompido até a introdução do componente diferente, ou ainda, se o teste será abortado, com reprovação. Caso o teste prossiga com ou sem o componente definitivo poder-se-á obter a aprovação parcial do ensaio.

O ensaio será considerado completamente aprovado se, durante a execução não ocorrer “colapso” do motor, ou seja, não ocorrer qualquer falha ou disfunção de qualquer componente que acarrete em inoperância do motor, ou o *blow-by*⁷, ou a potência ou o torque do motor não

⁷ Vazamentos de gases resultantes da combustão pelas partes móveis para parte interna do motor, ex: entre pistões e anéis.

sofra alterações percentuais fora da margem predeterminada por projeto, em relação aos valores iniciais.

Este ensaio é, na empresa *MWM International*, usualmente programado para trabalhar em 1000 horas de duração, consiste de vários passos por ciclo, acontece em geral com o motor a plena carga, e em diferentes rotações, de acordo com a característica do motor em teste.

Vale ressaltar que o ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados pode ser composto de inúmeros ciclos. Cada ciclo é um conjunto de passos e poderá ser repetido várias vezes dependendo do teste em execução; será considerado um novo passo a situação em que ocorrer alteração no funcionamento do motor, como na rotação, na carga do dinamômetro, ou na temperatura de operação. Ao fim de cada ciclo outro é iniciado e, sempre que se julgar necessário, com as mesmas características, como ilustra a figura 17.

A situação ilustrada na Figura 17 pode ser detalhada como exemplificado na Tabela 3.

Tabela 3 - Exemplo do ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 1

Ciclo	Passo	tempo [min]	rotação [rpm]	carga [%]	temp. água [°C]
1	1	5	1800	100	95
	2	8	2000	75	95
	3	3	2600	100	95
	4	4	800	0	45
2	1	5	1800	100	95
	2	8	2000	75	95
	3	3	2600	100	95
	4	4	800	0	45
n...	1	5	1800	100	95
	2	8	2000	75	95
	3	3	2600	100	95
	4	4	800	0	45

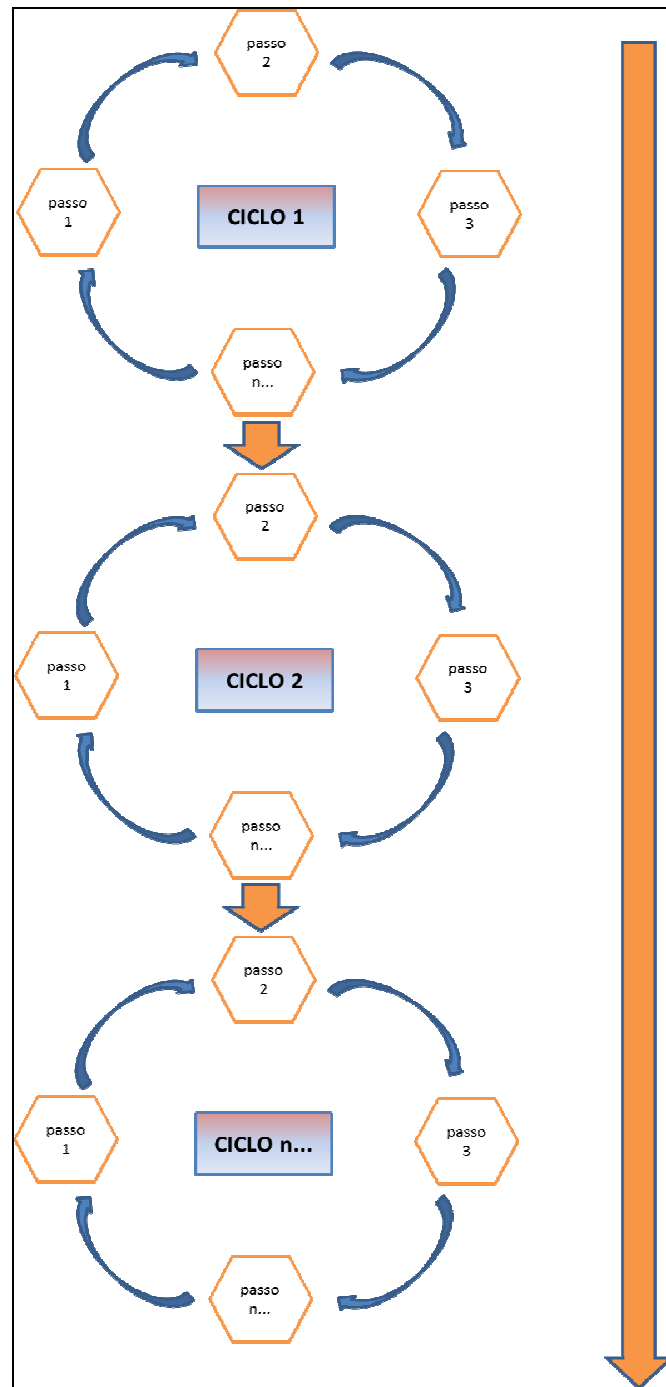


Figura 17 - Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 1

3.2 Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados – Tipo 2

O teste tipo 2 consiste em reproduzir a condição normal de uso, diferindo do Tipo 1 pelo fato de não ocorrerem intervenções previamente definidas, como superaquecimento e choque térmico. No Tipo 2 procura-se apenas reproduzir as condições de uso do veículo em campo. Seu objetivo é analisar a durabilidade do motor para avaliar a robustez do projeto.

Este teste é, na empresa MWM *International*, usualmente programado para durar 2.000 horas e consiste em alternar ciclicamente rotações em condições de cargas parciais e de plena carga. Por ser realizado em ciclos em que trabalha com cargas parciais e diferentes rotações do motor, é o teste que melhor representa a condição de uso veicular. Para melhor entendimento do ciclo foi montado um gráfico, conforme Figura 18.

O critério da aprovação neste teste é o mesmo utilizado no teste descrito anteriormente, ou seja, caso ocorra quebra ou disfunção de algum componente no decorrer do teste, este poderá prosseguir sem o componente definitivo, montando-se outro enquanto aguarda a nova proposta, buscando acumular horas de operação dos demais componentes, para efeito de homologação, podendo-se decidir ainda pela interrupção do teste até a introdução da nova proposta ou, ainda, ou decidir por abortá-lo, reprovando-o. Caso o teste prossiga com ou sem o componente definitivo poder-se-á obter a aprovação parcial do ensaio. O ensaio será considerado completamente aprovado se, durante a execução, não ocorrer “colapso” do motor.

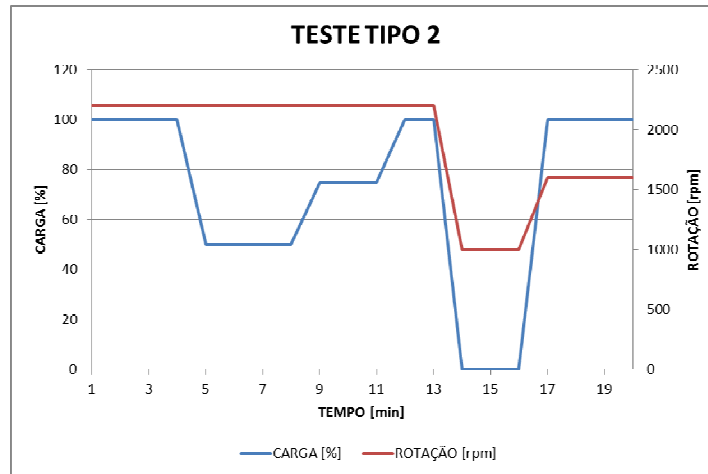


Figura 18 - Ensaio de longa duração com cargas e ciclos variados - Tipo 2

3.3 Teste de componentes auxiliares

Esse teste consiste em funcionar o motor no dinamômetro com todos os componentes periféricos instalados e funcionando. Seu principal objetivo é, ao final do teste, a avaliação do desempenho dos componentes auxiliares, como: alternador, compressor e correia quando existente, entre outros, e da influência que os mesmos irão exercer, tanto nos componentes internos do motor como no próprio conjunto do motor.

Na fase de desenvolvimento do motor são executados alguns ensaios de dinamômetro que podem ser usados para o acúmulo de horas de funcionamento para se “**obter o nível de confiança do motor**”, que pode ser considerado em sua validação, embora o objetivo principal do teste seja auxiliar no desenvolvimento do componente e não obter a confirmação da vida do mesmo. Os componentes do sistema auxiliar devem chegar ao final do teste sem apresentar falhas.

3.4 Teste acelerado por fadiga térmica

Esse teste consiste em colocar o motor operando em ciclos de choque térmico forçado conforme ilustrado no gráfico da Figura 19. Tem como objetivo principal avaliar o comportamento da junta de cabeçote quanto ao seu desempenho na vedação de água, de óleo lubrificante e de gases provenientes da combustão, para avaliar a resistência das camisas de cilindro ao desgaste em decorrência do fenômeno de cavitação, e para avaliar o pistão quanto a ocorrência de trinca na borda de câmara. A Figura 20 ilustra uma falha possível de ser encontrada através deste teste.

Nesse tipo de teste são também avaliados outros componentes do motor quanto ao desempenho em condições de trabalho com variação de temperatura no sistema de arrefecimento.

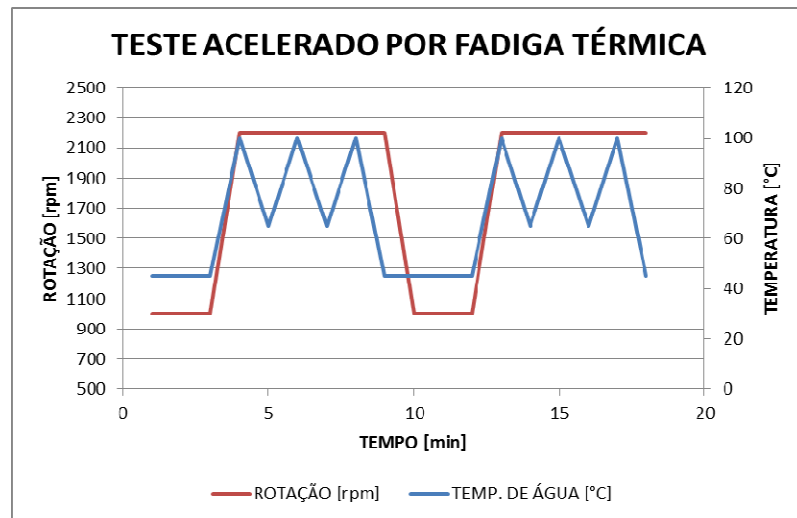


Figura 19 - Ensaio acelerado por fadiga térmica

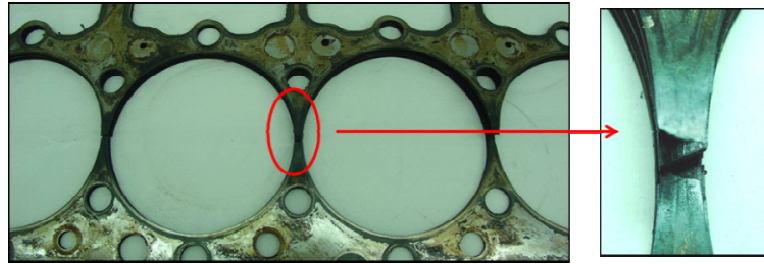


Figura 20 – Trinca na junta de cabeçote

3.5 Teste de aceleração livre

Esse teste consiste em colocar o motor em funcionamento com uma rotação constante, e tem como objetivo avaliar a durabilidade e a resistência dos componentes da parte estrutural do motor em condição de máxima rotação.

3.6 Teste de rotação em marcha lenta

Esse teste consiste em colocar o motor em funcionamento com uma rotação de marcha lenta, já que é nessa condição que é possível verificar a possível ocorrência do desgaste do brunimento da camisa e dos componentes de “trem de válvulas”. No teste, o óleo deverá estar à temperatura de 100° e não deverá ser realizada troca do óleo lubrificante durante o período de teste.

4 ESTUDO DE REFERÊNCIA

Para usar como referência de comparação com a proposta de procedimento apresentada neste trabalho, foi escolhido o procedimento usado na empresa John Deere, pelo fato de ser uma das poucas empresas que tem seu procedimento de análise da confiabilidade disponível.

A empresa fabrica máquinas agrícolas, e possui um Processo de Desenvolvimento do Produto (PDP) realizado em seis fases:

- Elaboração do planejamento estratégico do produto;
- Definição do programa;
- Avaliação e seleção do conceito;
- Desenvolvimento do programa;
- Confirmação e implementação;
- Produção e melhoria contínua.

As fases se relacionam entre si no decorrer do desenvolvimento, conforme mostrado na Figura 21.

Para facilitar o gerenciamento da confiabilidade a empresa utiliza o software *Reliability Growth Management* - RGM⁸, que é dividido em quatro módulos:

- Previsão da Confiabilidade;
- Teste e Planejamento do Crescimento da Confiabilidade;
- Modelagem do Crescimento da Confiabilidade;
- Análise de Sistemas Reparáveis.

A integração dessas ferramentas com o PDP da empresa está mostrada na figura 22.

⁸ Desenvolvido pela Empresa John Deere

O objetivo é superar a baixa confiabilidade inicial de protótipos e o pequeno crescimento da confiabilidade durante o desenvolvimento.

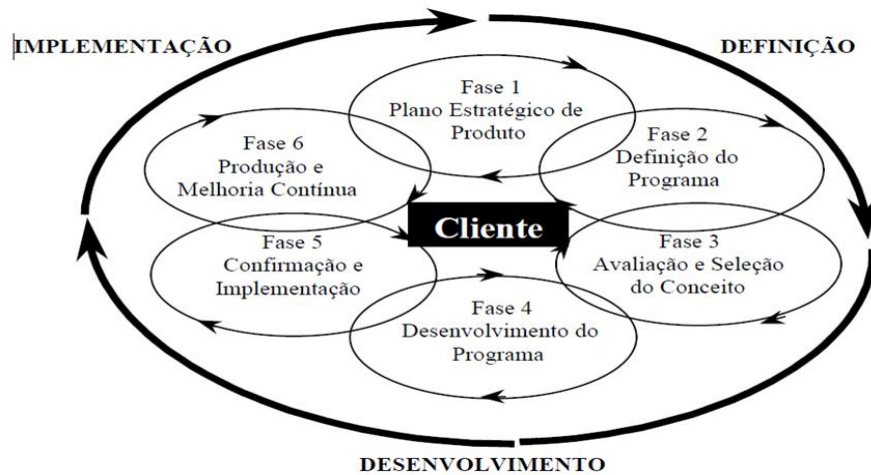


Figura 21 - Diagrama do Processo de desenvolvimento do Produto

Fonte: SCHALDLER, 2003

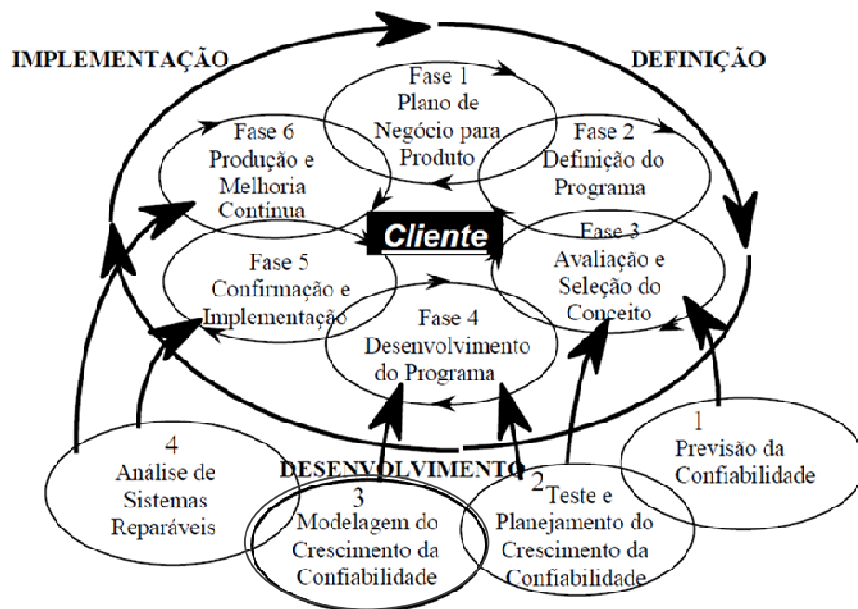


Figura 22 - Processo PDP e as etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade

Fonte: SCHALDLER, 2003

As quatro etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade são agrupadas em:

- **Planejamento**
 - Previsão de Confiabilidade e Teste;
 - Planejamento do Crescimento da Confiabilidade.
- **Análise de Dados**
 - Modelagem do Crescimento da Confiabilidade;
 - Análise dos Dados.

A Figura 23 ilustra a sequência de realização das etapas.

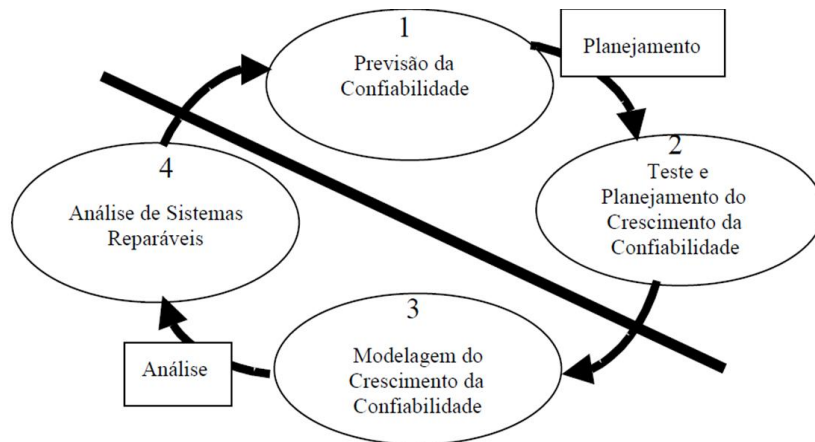


Figura 23 - Divisão das etapas do gerenciamento do crescimento da confiabilidade

Fonte: SCHALDLER, 2003

A Previsão da Confiabilidade é a estimativa de valor da confiabilidade que se espera alcançar ao final do desenvolvimento daquele produto. Como toda previsão em Engenharia, ela pode ser realizada por ser tecnicamente possível modelar o comportamento para a falha dos componentes usados naquele projeto. Por ser uma estimativa de valor da confiabilidade, é fortemente dependente do tempo estabelecido para a conclusão do desenvolvimento e do custo previsto para realizá-lo.

Para realizar a previsão, a John Deere avalia os seguintes aspectos: detecção de problemas potenciais associados à redução da confiabilidade, rápido *feedback* dos referidos problemas para as equipes de Projeto e Desenvolvimento, e reprojeção baseado nos problemas identificados.

De acordo com o Princípio de Pareto, são considerados apenas os modos de falha críticos. A modelagem dos comportamentos para a falha é realizada a partir dos conhecimentos da resistência dos materiais e da análise de estresse em cada componente.

A confiabilidade prevista deve ser ao menos 25% maior que o objetivo estabelecido pela empresa, já que se sabe que um novo produto apresenta confiabilidade, ao fim da fase de Desenvolvimento, inferior à especificada, em função das escolhas realizadas ao longo do processo.

Finda a fase de Desenvolvimento, é necessária a realização de testes que permitirão estimar a confiabilidade atingida. Passa-se à fase de Teste e Planejamento do Crescimento da Confiabilidade, e a primeira medida tomada pelo engenheiro da confiabilidade é estabelecer a curva de crescimento da confiabilidade (total de horas de testes x desempenho do produto), que permite estimar o tempo necessário para a obtenção da confiabilidade desejada. A Figura 24 mostra um comportamento típico para essa fase.

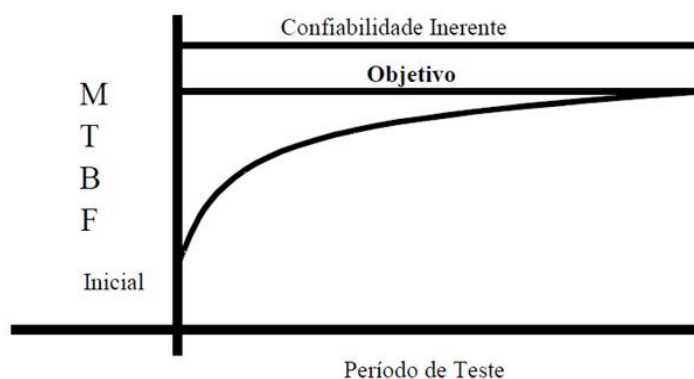


Figura 24 - Curva de crescimento da confiabilidade

Fonte: SCHALDLER, 2003

Na fase de Modelagem do Crescimento da Confiabilidade são analisados os dados de teste obtidos dos protótipos na fase de desenvolvimento, traçando-se uma curva de avaliação

do crescimento da confiabilidade. Nessa fase as curvas do crescimento da confiabilidade e do planejamento do crescimento são comparadas a fim de se saber se o desenvolvimento daquele produto está seguindo sua diretriz ou se está se desviando de seus objetivos iniciais, caso em que serão necessárias ações corretivas.

Finalmente chega-se à última fase, de **Análise de Sistemas Reparáveis (RSA)** em que serão obtidos dados que possibilitam avaliar a confiabilidade alcançada.

Estimar a confiabilidade real do equipamento é o ponto de partida para as empresas no que diz respeito às economias de tempo e de dinheiro, e à melhora das condições de concorrência; é uma forma de otimizar o processo de desenvolvimento do produto, tornando-o mais rápido e mais econômico, o que pode resultar num produto mais robusto.

Começar a colecionar dados de confiabilidade permite que a empresa adote um gerenciamento da confiabilidade eficiente. Para que no futuro o desenvolvimento de seus produtos seja célere e a atuação da engenharia seja pontual quando da ocorrência de falhas, ou quando se perceber que o objetivo previsto não será atingido com o desenvolvimento.

Uma estimativa da confiabilidade dos produtos em desenvolvimento feita de modo recorrente permite gerar um banco de dados que aperfeiçoa o gerenciamento da confiabilidade tornando o desenvolvimento e a produção mais eficientes, permitindo atingir níveis de confiabilidade cada vez mais altos, e tornando a empresa mais competitiva no mercado.

5 PROPOSTA DE NOVO PROTOCOLO: EXEMPLO DE APLICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados: (a) o procedimento atualmente em uso pela empresa MWM International, que servirá como referência para comparação de resultados; (b) uma proposta de alteração do procedimento visando maior controle da evolução da confiabilidade de um novo produto ao longo de seu desenvolvimento; (c) aplicação do protocolo proposto, modificando aquele atualmente em uso; e (d) a análise dos resultados da aplicação.

5.1 A MWM International

A MWM International Motores, subsidiária da norte-americana Navistar International, é uma das principais fabricantes de motores diesel do mundo, e é líder em tecnologia e desenvolvimento de motores diesel da América Latina.

Tem a experiência de mais de 3,6 milhões de motores produzidos em 56 anos de história (motores de 2,5 a 9,3 litros e de 50 a 375 cv de potência). Seus motores cumprem as mais rígidas normas de emissão de poluentes, e atendem os segmentos veicular, agrícola, industrial e marítimo.

Conta com um Centro de Tecnologia e de Negócios em São Paulo, e três unidades industriais, instaladas em São Paulo (Capital), Canoas (RS) e Jesus Maria (Córdoba, Argentina) e exporta para mais de 30 países, das Américas do Sul, do Norte e Central, da Europa e da Oceania.

5.2 Procedimento atual adotado

A validação dos motores diesel na fase de desenvolvimento do produto na MWM *International* segue três etapas:

- Testes de durabilidade de longa duração – que podem variar de 1000 a 2000 horas contínuas em bancada (dinamômetro) buscando reproduzir a condição de uso externo. Nesta etapa, procura-se replicar as condições previstas para ocorrer durante o uso do veículo, como: temperatura de admissão de ar, temperatura de trabalho do óleo lubrificante, temperatura de trabalho do líquido de arrefecimento, pressão de combustão no cilindro, temperatura do óleo diesel e calibração.
- Testes especiais com fatores de *stress* mais severos, como temperatura e fadiga. Nesta etapa, são usados:
 - Temperaturas de trabalho mais elevadas, da água e do óleo, aplicando “choques térmicos” de água fria, que correspondem a estresses que podem levar à fadiga térmica os componentes do motor;
 - Testes com pressão de combustão (PCP) acima da condição normal de uso acelerando o processo de fadiga dos componentes de transmissão de força e de vedação entre bloco e cabeçote do motor;
 - Fatores de stress de vibração para verificação da frequência de ressonância do componente.
 - Teste de campo, em que o veículo é colocado em condição real de uso em estrada e campos de prova para rodagem com o objetivo de acumular quilometragem e verificar possíveis falhas dos sistemas e seus respectivos componentes.
- Teste veicular – determinado número de veículos, definido na especificação do projeto, é colocado para rodar com uma carga predefinida e numa rota conhecida.

Os sistemas do motor na MWM *International* são subdivididos em nove grupos:

- Sincronismo
- Lubrificação
- Arrefecimento
- Estrutural
- Combustível
- Elétrico
- Transmissão de potência (*Power Kit*)
- Gerenciamento de ar
- Auxiliar

O procedimento de validação de um novo motor diesel é realizado através da verificação da família de motor anterior ou similar, identificando-se os componentes em comum e os novos.

A seguir é realizada uma FMEA do motor. Através dela são identificados os componentes mais críticos e suscetíveis à falha; após o que, com a *expertise* de especialistas em subsistemas do motor, é elaborado o plano de validação do motor, identificado pela sigla DVP&R (*Design Validation Plan & Reliability* – Plano de Validação e Confiabilidade do Projeto).

Definido o DVP&R tem início a validação dos componentes. A depender do andamento dos testes, e com a ocorrência de eventuais falhas, são realizados os registros dessas falhas com o uso de uma ferramenta denominada COF (Comunicado de Ocorrência de Falha).

Em seguida é realizada uma análise preliminar de cada ocorrência, com objetivo de esclarecer se o problema procede e se as informações iniciais acerca do projeto sob análise estão devidamente preenchidas:

- Em que fase do desenvolvimento o projeto se encontra;
- O número de série do motor em questão;
- A descrição e o número de identificação do componente que apresentou a falha;

- O tempo acumulado até o momento da ocorrência da falha do componente e do motor;
- O procedimento de teste a que o motor está sendo submetido;
- Identificação do líder do projeto;
- Uma breve descrição da ocorrência.

Completada essa análise, que é feita pelo gestor do projeto, caso a falha seja real, é designada ao engenheiro responsável para que seja solucionada através do método 8D. É preciso confirmar se não se trata de um equívoco por parte de quem realizou o respectivo comunicado.

O método 8D consta das seguintes atividades:

- **D1 – Definição do time de trabalho** – São escolhidos o time e seu líder, que devem possuir conhecimento, experiência, tempo e autoridade para solucionar o problema, bem como implementar ações corretivas adequadas;
- **D2 – Descrição do problema.** O problema é descrito de maneira técnica, que possa ser quantificada. Nesta e nas atividades subsequentes, as ações podem e devem ser direcionadas ao time de trabalho pré-definido, cujas ações deverão ser monitoradas e rastreadas. Outras informações pertinentes ao processo de análise da falha podem ser anexadas à ferramenta;
- **D3 – Ação de contenção.** É realizada, quando cabível, para que possa se dar continuidade ao teste até que uma solução definitiva possa ser implementada;
- **D4 – Análise da falha.** É verificado se o modo de falha está identificado na FMEA do motor, e é definido o destino do componente falhado, que deverá ser analisado internamente, pelo fornecedor do mesmo, ou por ambos, e todo material e recursos são disponibilizados para confirmação da causa-raiz da falha;
- **D5 – Plano de ação.** É definido um plano de atividades, que é monitorado para solução da causa-raiz da falha, e que não deve trazer nenhum efeito colateral ao motor;

- **D6 – Ação corretiva.** São implementadas e validadas ações definitivas para assegurar que a causa-raiz da falha seja eliminada;
- **D7 – Prevenção de recorrência da falha.** São feitas a identificação e a implementação de ações destinadas a prevenir a recorrência;
- **D8 – Fechamento e conclusão.** Finalização do COF com a chegada a uma conclusão sendo a experiência reportada a toda as áreas envolvidas no desenvolvimento de novos produtos visando evitar a repetição de erros no projeto.

A ferramenta 8D praticada no COF na MWM *International* é sistêmica, está acessível na intranet e todos os funcionários do departamento de engenharia de desenvolvimento podem abrir um comunicado de falha bem como consultar o banco de dados de falhas decorrentes dos testes de validação. O andamento das análises é acompanhado através de reuniões semanais. Um índice de criticidade é gerado para cada uma das falhas de cada família de motores.

Os ciclos de teste em dinamômetro permitem levantar todas as ocorrências de falha dos mesmos e iniciar o tratamento dos dados. Caso seja confirmada a ocorrência de uma falha, é iniciada sua classificação, através do processo 8D, que permite obter as respostas às questões:

- Foi determinada a causa-raiz da falha?
- Houve alteração de projeto?
- Foi trocado o componente no motor?
- O componente responsável pela falha foi alterado nos outros motores?

5.3 Proposta de alteração do procedimento

O processo atualmente em uso tem como foco validar o produto dos testes realizados, detectar as falhas documentadas e resolvê-las.

Aplicadas as **atividades adicionais** previstas nesta proposta, ter-se-á um banco de dados de procedimentos adicionais que, no futuro, será importante fonte de consulta e base para novos projetos. Atualmente a estimativa da confiabilidade e a evolução de seu comportamento no decorrer de seu desenvolvimento não é registrado, deixando de render frutos adicionais às empresas automobilísticas.

No procedimento proposto, a sequência de atividades permitirá o registro dos dados de confiabilidade em qualquer momento do desenvolvimento do programa, o que representa ganho de valor na tomada de decisão, que ocorre em cada passagem de fase do desenvolvimento do produto. A decisão sobre liberar recursos adicionais, necessários para garantia de continuidade no desenvolvimento do produto, pode ser tomada de forma mais objetiva e segura.

Obtidos os dados dos testes, propõe-se realizar a seguinte sequência de atividades:

- (1) Agrupar os resultados dos testes realizados no desenvolvimento, devendo-se:
 - somar os tempos de teste em cada fase;
 - computar o tempo total de todas as fases.
- (2) Identificar as ocorrências de falhas por sistema, possibilitando a identificação dos sistemas mais suscetíveis à falha.

Dentro do conjunto de testes de validação do motor encontram-se os ensaios de durabilidade para uma família específica de motor, apresentados na tabela 4⁹.

Os mesmos dados estão apresentados na Figura 25, que mostra o percentual de falhas apresentado por cada um dos sistemas do motor, tornando mais fácil a identificação dos sistemas mais suscetíveis à falha.

⁹ Dados obtidos da Tabela constante do Anexo C.

(3) Classificar as ocorrências de falha. Essa classificação é necessária quando se pretende calcular a confiabilidade com o uso do software proposto (já que as informações são requeridas conforme essa classificação).

Tabela 4 – Ocorrência de falhas por sistema no desenvolvimento do novo motor

motor	Qde Ocorrências	Arrefec	Lubrificação	Estrutural	Eletrico	Sincronização	Combustivel	Ger. Ar	Transm Pot	Transm Pot
1	1			1						
2	17	3	1	6		4	1	1	1	
3	0									
4	6	1		1		3		1		
5	2			1			1			
6	11	1	1	2		4	2		1	
7	0									
8	16	1	7	5	1	1			1	
9	10	1	8	1						
10	6		1	1		2		1	1	
11	2						1	1		
12	5		1	2	1		1			
13	1	1								

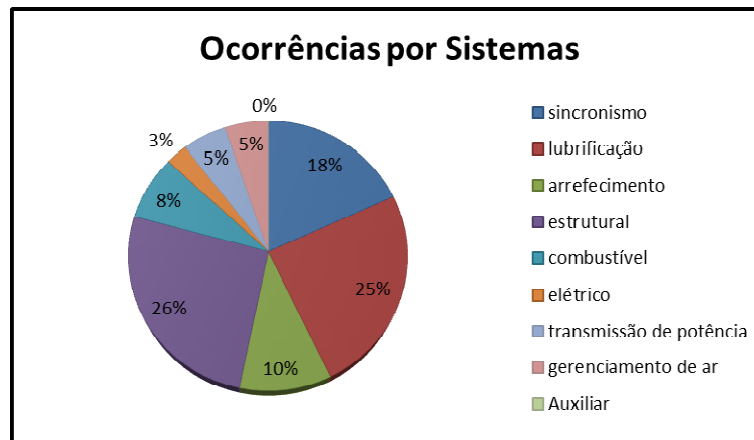


Figura 25 - Ocorrência de falhas nos diferentes sistemas do motor MWM

Nesta etapa, preparatória para o início de uso do software escolhido, são determinados os tempos acumulados por fase, e o tempo médio gasto, por fase, para correção das falhas.

A classificação deverá ser realizada usando um conjunto de indicadores, que aparecem detalhados no quadro a seguir.

BD_ Item corrigido com uma ação de contenção e ao final do teste iniciará um estudo para resolver o problema (modo de falha), implementando-se a correção do problema em definitivo;

A _ Item corrigido com uma ação de contenção, mas ao final do teste não se pretende resolver o problema (modo de falha), a produção do motor terá início sem essa correção em definitivo;

BC _ Item em falha foi corrigido no momento da ocorrência com uma revisão do projeto;

Q _ Falha ocorrida devido a problema de qualidade;

P _ Não ocorreu uma falha, mas houve problema de *performance*;

N _ Ocorrência de falha não procede (não ocorreu falha no componente / motor);

F _ Falha.

(4) Levantados os dados, estes devem ser inseridos num software criado para a análise do crescimento da confiabilidade. Para o presente estudo optou-se pela utilização do software comercial RGA (*Reliability growth and repairable system analysis*) da empresa Reliasoft (RGA: SOFTWARE PARA A ANÁLISE DO CRESCIMENTO DA CONFIABILIDADE E SISTEMAS REPARÁVEIS), adequado para esse procedimento, com o qual é realizado o estudo do crescimento da confiabilidade no decorrer do projeto.

Uma tela resultante desse procedimento está mostrada na Figura 26.

A1	Phase 1		
	Phase Name	Cumulative Phase Time	Average Fix Delay
1	Phase 1	9000	1200
2	Phase 2	15000	1200
3	Phase 3	21000	1200

Figura 26 - Inserção de dados para planejamento de uma curva do crescimento da confiabilidade

(5) Análise de confiabilidade – O acompanhamento do comportamento da confiabilidade ao longo do desenvolvimento mostrará se o tratamento das falhas está sendo realizado de forma eficaz.

Para tanto são utilizados o MTBF instantâneo e o parâmetro de forma β , que neste estudo é trabalhado conforme o modelo de Crow-AMSAA.

O MTBF instantâneo consiste em se reduzir o intervalo de análise das falhas, para constantemente avaliar sua evolução ao longo do programa, a medida que as melhorias no projeto forem sendo incorporadas ao novo produto.

Os modelos de Duane e Crow-AMSAA são os modelos de crescimento mais utilizados quando se trata de confiabilidade. Ambos fazem uso da relação linear entre o MTBF acumulado e tempo de prova cumulativa. No entanto, o modelo de Duane não possibilita observar as mudanças do MTBF ao longo do desenvolvimento. O modelo de Crow-AMSAA permite tais avaliações. Além disso, o Crow-AMSAA permite o desenvolvimento de procedimentos de testes de hipóteses para determinar a presença de crescimento nos dados em que:

$\beta < 1$ indica crescimento do MTBF;

$\beta = 1$ indica MTBF constante;

$\beta > 1$ indica MTBF decrescente.

Além disso, o modelo de Crow-AMSAA vê o processo de crescimento da confiabilidade como probabilística, enquanto o modelo de Duane como determinista.

Observa-se, ao se adotar esse modelo, que as ações que vão sendo realizadas ao longo do desenvolvimento produzirão valores a serem utilizados como dados de entrada na passagem de fase do modelo *Stage-Gate*, já adotado na empresa.

A Figura 27 mostra o comportamento esperado para os resultados, ilustrando o crescimento da confiabilidade, e servirá como base para a análise dos resultados (após inserção dos dados de falha decorrentes dos testes no desenvolvimento do produto).

Na Figura 28 estão representados os comportamentos dos MTBFs, instantâneo e acumulado, construídos a partir dos dados das falhas identificadas no decorrer do desenvolvimento do motor. Da figura é possível constatar que o MTBF instantâneo apresenta valor superior ao MTBF acumulado, comprovando que as ações corretivas decorrentes das falhas no período de teste estão sendo eficazes.

Os passos propostos podem ser reunidos em um protocolo que permita comprovar a evolução da confiabilidade do produto na fase de desenvolvimento, permitindo o acompanhamento da evolução da confiabilidade atingida ao final de cada estágio.

5.3.1 RGA - Reliability growth and repairable systems analysis

O *software* RGA, sigla em Inglês para a expressão em Português “Análise do crescimento da confiabilidade e de sistemas reparáveis” permite analisar o crescimento da confiabilidade durante a fase de desenvolvimento no projeto de um produto e a evolução da confiabilidade dos sistemas reparáveis, quando da ocorrência de falhas e seus respectivos reparos.

Durante a fase de desenvolvimento, o software permite o uso de métodos avançados para projeções, planejamento e gerenciamento do crescimento da confiabilidade.

Para os sistemas que já se encontram em operação no campo, o RGA permite determinar o tempo ideal para realização de substituições (*overhaul*), além de uma série de resultados detalhados que normalmente são utilizados para a análise de um sistema reparável.

5.4 Aplicação dos dados no software RGA da ReliaSoft

Neste tópico é mostrado o procedimento passo-a-passo para a inserção dos dados no software RGA conforme a proposta apresentada.

Como primeiro passo, as ocorrências de falhas são separadas e tratadas, conforme mostrado nas tabelas 5 e 6; entretanto verificou-se que 36 falhas resultavam de componentes que ainda não possuíam uma versão final, e por não serem componentes representativos do projeto foram descartadas para que não induzissem a erro de interpretação durante o estudo.

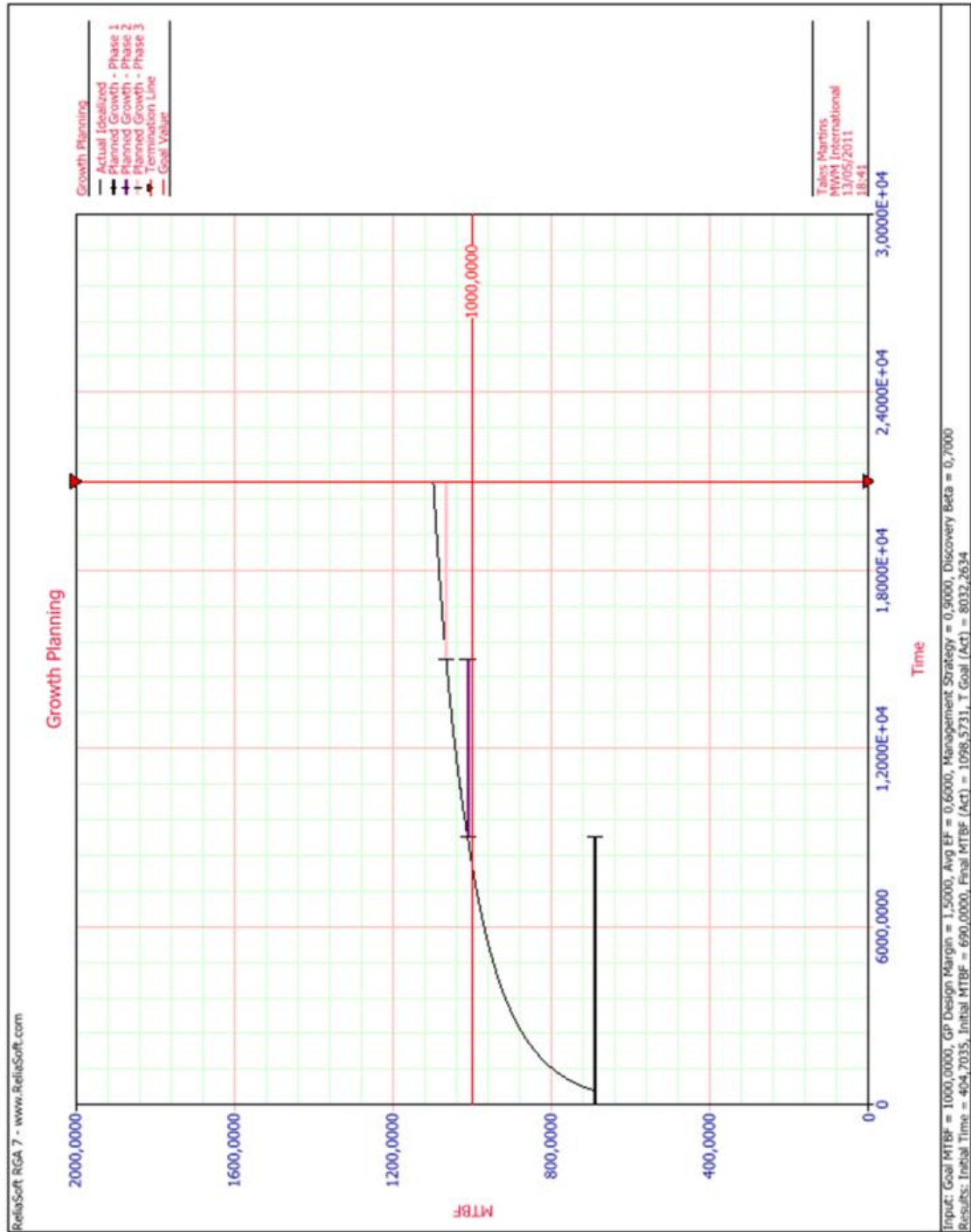


Figura 27 - Comportamento esperado para a função confiabilidade

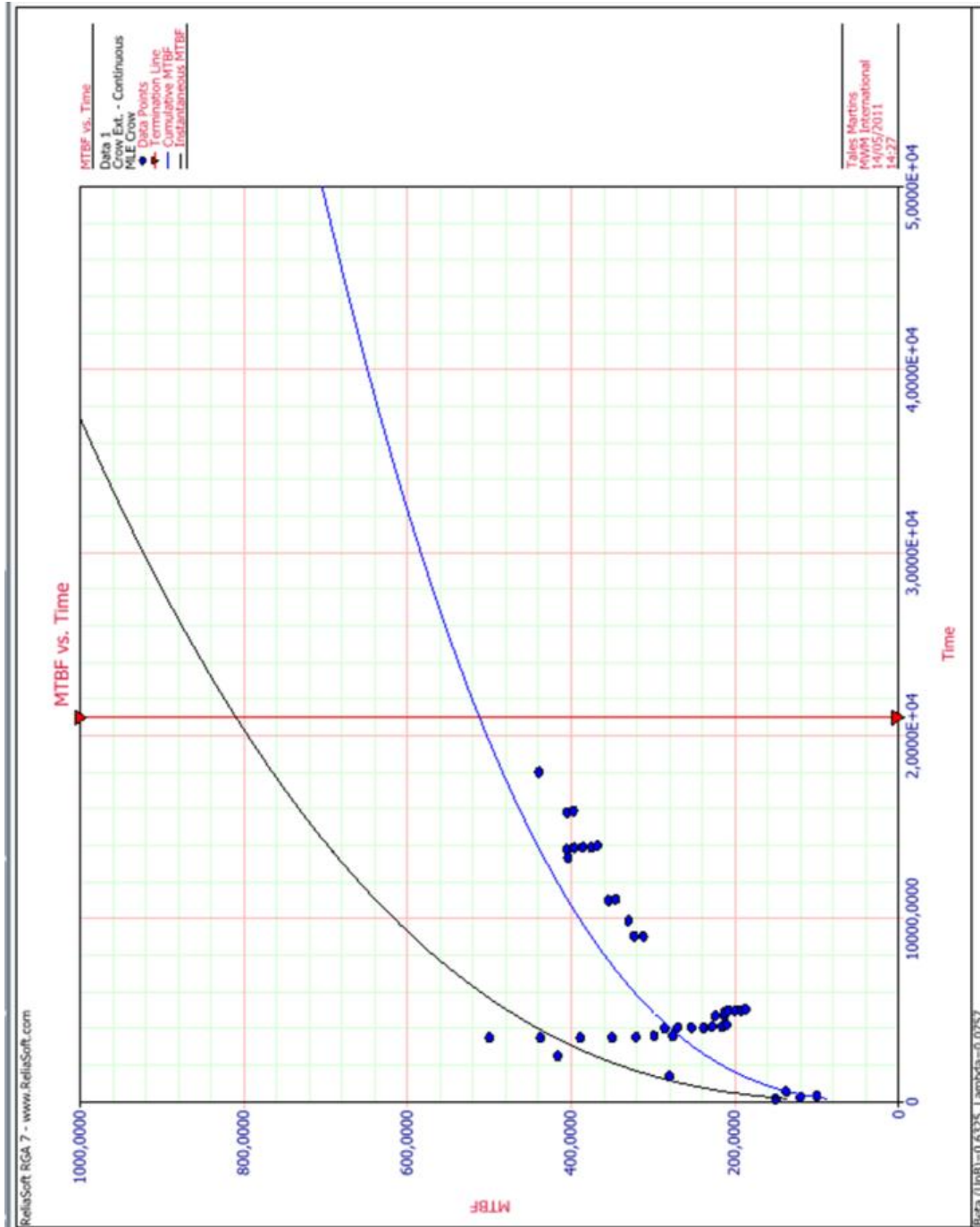


Figura 28 - MTBF obtido a partir dos dados de teste

Outros comunicados não associados a falhas do produto revelaram que alguns componentes apresentaram um aspecto físico não esperado, mas uma análise mais aprofundada mostrou tratar-se de uma característica normal do componente, não afetando sua função e suas propriedades.

Mesmo não contribuindo para a análise da confiabilidade, os comunicados que não estavam associados a uma falha do produto mostravam, em alguns casos, a existência de um problema no processo de desenvolvimento, contribuindo para sua melhoria.

Tabela 5- Registro de ocorrência das falhas

Sistemas	Qtde Ocorrências
sincronismo	14
lubrificação	19
arrefecimento	8
estrutural	20
combustível	6
elétrico	2
transmissão de potência	4
gerenciamento de ar	4
Auxiliar	0
total	77

Tabela 6 - Quantidade de falhas após análise dos comunicados

Sistemas	Qtde Falhas
sincronismo	5
lubrificação	11
arrefecimento	4
estrutural	14
combustível	2
elétrico	1
transmissão de potência	2
gerenciamento de ar	2
Auxiliar	0
total	41

Após o tratamento e tabulação dos dados, realiza-se a inserção na ferramenta RGA do tempo acumulado de cada fase e do tempo aproximado para correção da falha, como mostrado na Figura 29. Vale ressaltar que o tempo acumulado de 21.000 horas (obtido ao final da 3ª fase) é resultante da soma de horas dos testes de durabilidade nos 13 motores utilizados para o estudo.

A1 Phase 1			
	Phase Name	Cumulative Phase Time	Average Fix Delay
1	Phase 1	9000	1200
2	Phase 2	15000	1200
3	Phase 3	21000	1200

Figura 29 - Inserção de dados para planejamento de uma curva do crescimento da confiabilidade

5.5 Obtenção dos resultados

O resultado do processamento dos dados pelo *software* pode ser apresentado como na Figura 30, onde é possível gerar o comportamento desejado para a evolução da confiabilidade (curva planejada), que serve de referência para avaliar a adequação do desenvolvimento do produto.

O valor do MTBF obtido na aplicação foi de aproximadamente 1098 horas.

O passo seguinte consiste na inserção dos dados do instante de ocorrência da falha, com as respectivas ações corretivas, e do instante em que foi concluída a implementação da ação corretiva. Resultou que o parâmetro não foi alcançado já que o MTBF demonstrado foi de 809 horas. Entretanto, o valor obtido para β (0,6325) foi menor que 1, o que indica que a confiabilidade cresceu ao longo do período de desenvolvimento considerado.

O comportamento descrito aparece mostrado na Figura 31.

Para que o MTBF estipulado fosse alcançado seria necessário aumentar o tempo de teste, mas isso muitas vezes não é interessante para a empresa em função do custo e da necessidade de lançamento rápido do produto, por questão estratégica, por multa contratual por atraso ou por uma norma do governo.

Com o objetivo de focalizar o resultado nas falhas que podem ocasionar a parada do motor, é feito um novo tratamento dos dados, eliminando-se do conjunto as falhas de solução simples, considerando-se como tal aquelas falhas que podem ser corrigidas de forma rápida, e que possibilitam a melhora funcional do componente. Como exemplo de tal tipo de falha, pode-se considerar a solda da presilha que prende o conjunto de cabos elétricos a um ponto fixo qualquer.

No novo tratamento de dados são consideradas apenas aquelas falhas que podem gerar maior transtorno ao cliente como: vazamento de combustível ou de óleo lubrificante, perda de desempenho e uma quebra de componente, falhas que, isoladamente, obrigam à parada do motor. Os resultados obtidos com o tratamento desse conjunto de dados de maior relevância, ajuda a melhorar as tomadas de decisão.

Na aplicação sob análise, o resultado obtido com esse procedimento possibilitou a verificação de que o MTBF projetado acabou sendo superado em cerca de 18 % (dezoito por cento), pois o resultado foi um MTBF de 1340 horas, superando o objetivo de 1098 horas. O comportamento do MTBF ao serem consideradas apenas as falhas relevantes aparece na Figura 32.

O *software* utilizado foi escolhido, entre outras características, por possibilitar a análise da evolução da confiabilidade no decorrer do processo de desenvolvimento do produto. Aplicando-o, foi possível verificar o comportamento crescente no decorrer do desenvolvimento, ao final de cada fase:

1ª Fase - MTBF demonstrado resultou decrescente e o valor de β foi 1,128¹⁰;

2ª Fase (somado o tempo das fases 1 e 2) - MTBF demonstrado resultou quase constante e o β ficou muito próximo de 1 ($\beta=0,9769$)¹¹;

3ª Fase (somado o tempo das fases 1, 2 e 3) - MTBF demonstrado resultou crescente e $\beta < 1$ ($\beta=0,6325$), resultados que indicam o crescimento da confiabilidade comprovando a eficácia das ações corretivas decorrentes da identificação das falhas.

O protocolo proposto mostrou propiciar uma mudança no comportamento do desenvolvimento, que em sua primeira fase mostrava deterioração, passou a apresentar uma taxa de falha quase constante, e, finalmente, com o implemento de melhorias no produto, especificamente no que diz respeito à falha apresentada, mostrou o incremento na confiabilidade do motor.

Os resultados obtidos com a consideração apenas das falhas relevantes mostra a vantagem da utilização conjunta do conhecimento técnico do produto e das ferramentas de análise da confiabilidade: se o desenvolvimento do produto tivesse sido paralisado ao final da fase 2 não teria sido possível comprovar a melhora do produto.

5.6 Requisitos considerados essenciais para a análise eficaz da confiabilidade:

- os requisitos de operação do motor devem estar bem estabelecidos antes do início do desenvolvimento do produto;
- os resultados esperados devem considerar os recursos disponíveis na empresa e no mercado (prazo e orçamento para o desenvolvimento);
- o processo de crescimento da confiabilidade deve ser realista e flexível para que possa se adequar à realidade de cada momento;

¹⁰ conforme pode ser verificado na figura constante do anexo D, p. 85

¹¹ conforme pode ser verificado na figura constante do anexo E, p. 86

- o planejamento detalhado e sua execução são igualmente importantes, sob pena de serem gerados dados inadequados que, usados na proposta, podem levar a resultados não satisfatórios;
- a admissão de que os dados parciais são suficientes para alcançar o objetivo estabelecido (no afã de economizar tempo e recursos) implica em relaxar o cuidado no seu agrupamento e tratamento forma sistêmica;
- o gerenciamento adequado das decisões de projeto que influenciam a confiabilidade é essencial, já que os tempos alocados para execução dos testes devem ser aproveitados para a coleta do máximo de informações possíveis;
- a medição da eficácia da solução para as falhas apresentadas pelo motor no momento em que ocorrem permite a verificação contínua do comportamento da confiabilidade do motor ao longo do processo de desenvolvimento;
- a documentação da solução para as falhas apresentadas pelo motor no momento em que ocorrem permite a criação de um banco de dados para uso em futuros desenvolvimentos.

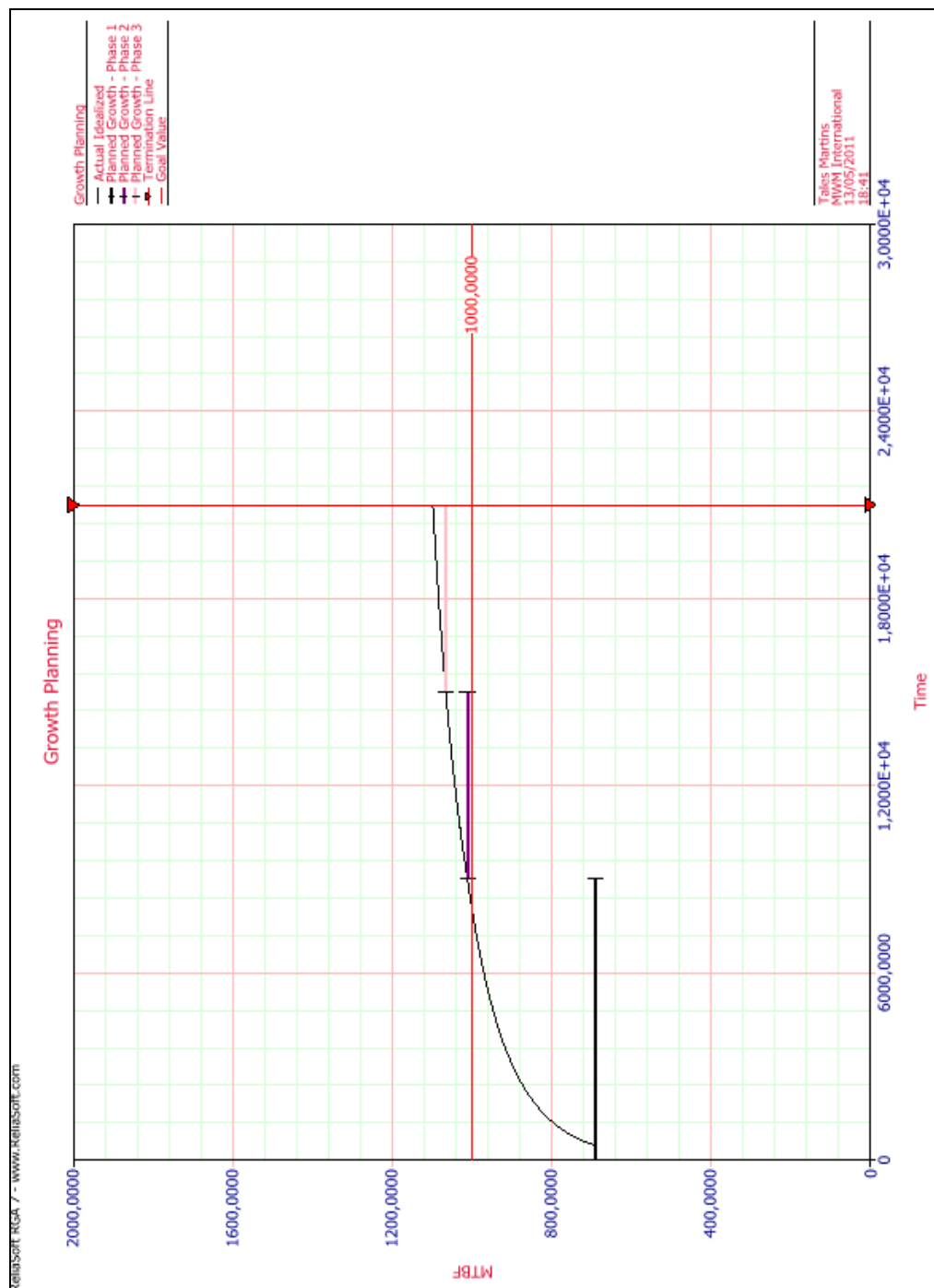


Figura 30 – MTBF obtido para a aplicação escolhida

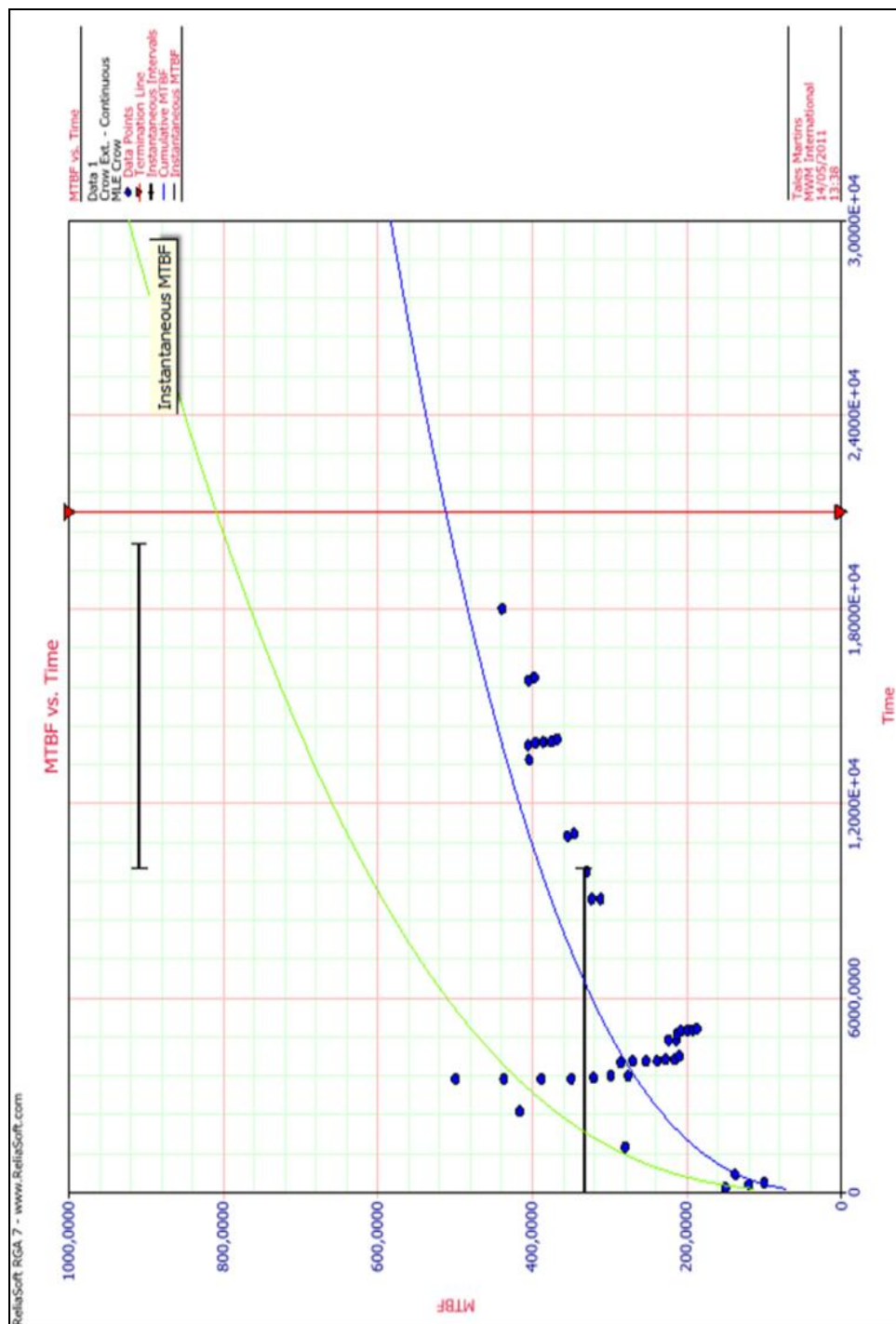


Figura 31 - MTBF obtido com o uso dos dados de teste

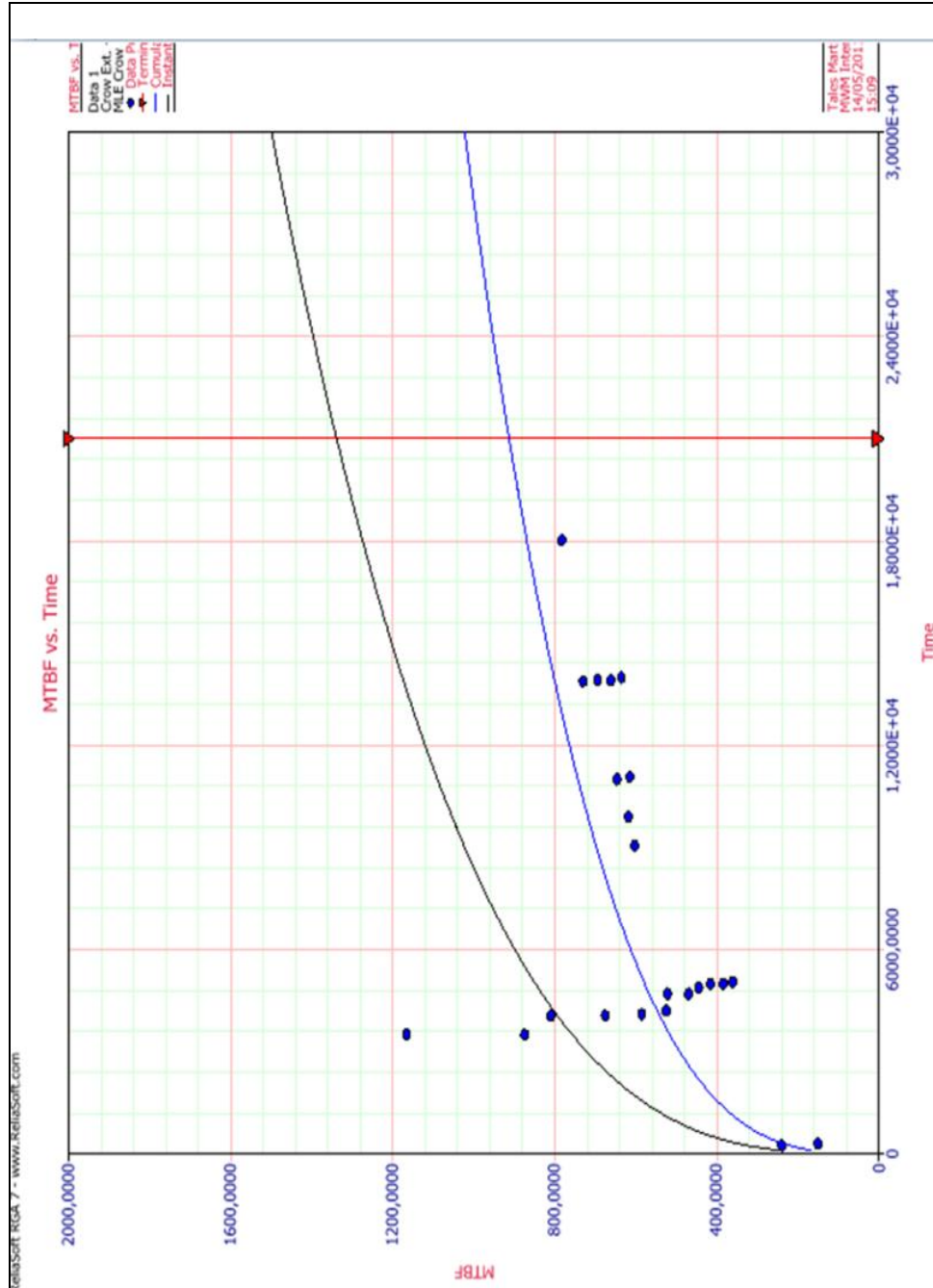


Figura 32 - MTBF após o tratamento dos dados

6 CONCLUSÕES E DESDOBRAMENTOS

Com o trabalho realizado evidencia-se que a monitoração do crescimento da confiabilidade durante o processo de desenvolvimento de um motor, em condições de fabricação reais, pode ser realizada, desde que haja a conjugação: dos esforços de pessoal tecnicamente capacitado e da aplicação sucessiva de testes de durabilidade, com o uso de uma ferramenta que permita o acompanhamento da evolução da confiabilidade.

O procedimento proposto permite a obtenção de dados que auxilia a tomada de decisão quanto a considerar aceitáveis os resultados do desenvolvimento, e acelerar o lançamento do produto no mercado, o que pode ser confirmado pelas curvas de crescimento.

O procedimento proposto mostra-se também ser recomendável identificar, já durante o processo de desenvolvimento, quais os sistemas ou componentes mais suscetíveis a falhas, para que sejam objeto de estudos voltados à previsão e à prevenção, o que vai impactar positivamente a confiabilidade do produto.

O trabalho contribui para reforçar o pressuposto de que o valor da confiabilidade deve ser considerado um dado cada vez mais fortemente ligado ao conjunto de especificações do produto.

O software escolhido demonstra ser adequado ao acompanhamento da evolução da confiabilidade do produto, ao longo do seu desenvolvimento. Vale ressaltar que qualquer software, de uso geral ou especificamente desenvolvido com esta finalidade, pode ser utilizado.

Um software, com as características adequadas para simular as diferentes condições de operação no campo, permite a estimativa da variação da confiabilidade ao longo do tempo, contribuindo para estabelecer um período adequado de oferecimento de garantia de fábrica, com risco aceitável.

Apenas com o resultado obtido no presente estudo não se é capaz de aumentar o período de garantia, vez que para que se decida nesse sentido o custo envolvido decorrente da falha deve ser analisado, bem como a imagem do produto perante ao cliente. Deve-se, ainda, ter não só o tempo médio entre falha como o tempo médio de reparo, além de um levantamento dos componentes mais caros, bem como todo o custo envolvido no processo de reparo, para apenas então, com o tempo médio entre falhas mais todas as informações citadas, realizar uma análise de risco para o aumento do tempo de garantia. Sendo assim, pretende-se que o presente trabalho contribua como sendo um dos fatores capazes de integrar a análise para um possível aumento do tempo de garantia.

Como desdobramento do protocolo proposto, a ser considerado em trabalhos complementares, pode-se considerar:

- A incorporação de outros dados e/ou procedimentos que permitam estimar e minimizar o custo de aplicação do protocolo a diferentes produtos industriais;
- Estimativa da confiabilidade de um produto com o objetivo de se obter maior garantia possível em termos de custo para o fabricante, porém relacionando dados de retorno de garantia.

Referências

ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores), 2010. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira – 2010**. São Paulo: ANFAVEA.

BERGAMO FILHO, Valentino. **Confiabilidade. Métodos para avaliar ou prever a qualidade de produtos ou sistemas ao longo do tempo, aproveitando os resultados como vantagem competitiva. Básica e prática**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997, 108 p.

BRIGANTINI, José Aníbal D. **Proposta para melhoria do processo de desenvolvimento de produto de uma empresa fabricante de motores diesel**. 2008. 161 f. Dissertação (mestrado profissional em engenharia automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2008.

BROEMM, W. J.; ELLNER, P. M.; WOODWORTH, W. J. 2000. **AMSAA Reliability Growth Handbook**. AMSAA (Army Materiel Systems Analysis Activity), 2000.

CAVALCA, Kátia L. **Confiabilidade em Engenharia**. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000.

CARLSON, C., *et al.* 2010. **Best Practices for Effective Reliability Program Plans**. Disponível em: http://www.reliasoft.com/pubs/2010_RAMS_best_practices_for_effective_reliability_program.pdf. Acesso em: 18/06/2010.

COOPER, Robert G. **Perspective: The Stage-Gate Idea-to-launch Process – Update, What's new and Nex-Gen Systems**. Disponível em: http://www.stage-gate.net/downloads/working_papers/wp_30.pdf. Acesso em: 10/05/2011.

DROGUETT, Enrique L.; MOSLEH, Ali. **Análise Bayesiana Da Confiabilidade De Produtos Em Desenvolvimento**. In *Gestão & Produção*, vol.13, n.1, pg.57-69, jan.-abr., 2006

LINS, Bernardo. **Breve histórico da engenharia da qualidade**. Disponível em: www.dcce.ibilce.unesp.br/~adriana/ceq/.../histquali.pdf Acesso em 21/10/2010.

MAPA, Sílvia Maria S.; SILVA, Carlos Eduardo S.; MELLO, Carlos Henrique P. **Garantia da confiabilidade nas fases de planejamento e desenvolvimento de produtos apoiada por técnicas de qualidade**. Artigo publicado no VII Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP, Bauru, 2005. Disponível em:

www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_12/copiar.php?arquivo=Mapa_SMS_Garantia%20da%20confiabi.pdf . Acesso em 12/01/2011.

Motor a diesel. In: Portal São Francisco. Disponível em: <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/motor-diesel/motor-diesel.php>. Acesso: 24/03/2011.

Motor diesel. In: Biodieselbr. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/motor-diesel/motor-diesel.htm>. Acesso em: 24/03/2011.

MURAD, Carlos Alberto. **Extensão da garantia de veículos: aplicação para motor e transmissão.** Tese de mestrado em Engenharia Automotiva da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

NUNES, Paulo. **Conceito de ciclo de vida do produto.** Disponível em: <http://www.knoow.net/cienceconempr/gestao/ciclovidaproduto.htm> Acesso em 05/10/2010.

PROJECTMANAGEMENT INSTITUTE, INC. **Guia PMBOK - Um Guia do Conjunto de Conhecimentos em Gerenciamento de Projetos.** 2004.

RGA: Software para a Análise do Crescimento da Confiabilidade e Sistemas Reparáveis. Disponível em: <http://www.reliasoft.com.br/rga/index.htm> Acesso em: 25/03/2011.

RGA7 Training Guide. Disponível em: http://www.reliasoft.com/pubs/rga7_training.pdf Acesso em: 12/01/2011.

RICHTER, P.E. et DIAS LOPES, L.F. **A confiabilidade relacionada ao desenvolvimento de produtos e à gestão da qualidade total.** XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção - Florianópolis, SC, Brasil, 03 a 05 de nov. de 2004.

SCHALDLER, Ismar Luis. **Gerenciamento do crescimento da confiabilidade. Um estudo aplicado no setor de máquinas agrícolas.** Dissertação de Mestrado Profissional Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.

SILVA, Eduarda. M.; TIZZO, Suzana. A.; FERREIRA, Valdivina. A. **As principais vantagens da utilização da gestão da qualidade pelas empresas como diferencial competitivo.** Disponível em: <http://mundocompetitivo.blogspot.com/2009/03/as-principais-vantagens-da-utilizacao.html> Acesso em: 30/03/2011.

SILVEIRA, André L. C. ***Stage-Gate aumente as chances de sucesso de seus produtos.*** Disponível em: <http://www.expleo.com.br/pdf/stage-gate.pdf>. Acesso em: 10/05/2011.

SOUZA, Rodrigo S. **Provisão de Custos de Garantia Anual baseado em Análise de Confiabilidade de Máquinas Agrícolas.** Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

Springer Handbook of Engineering Statistics. Piscataway: Springer.

TEIXEIRA, Carlos Adriano R. **A confiabilidade como fator de valor na melhoria de produtos. Estudo de caso: sistema de embreagem automotiva.** 2004. 110f. Tese (Mestrado profissional) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

VARELLA, Carlos Alberto Alves e SANTOS, Gilmar de Souza. **Noções básicas de motores diesel.** 1ª ed., Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 2010.

Anexo A – Exportação de veículos

Exportações - 1961/2009

Exports - 1961/2009

					Unidade
ANO YEAR	AUTOMÓVEIS CARS	COMERCIAIS LEVES LIGHT COMMERCIALS	CAMINHÕES TRUCKS	ÔNIBUS BUSES	TOTAL TOTAL
1961	-	-	-	380	380
1962	-	-	-	170	170
1963	-	-	-	-	-
1964	-	-	-	57	57
1965	-	-	9	120	129
1966	-	-	3	207	210
1967	-	-	3	32	35
1968	-	-	7	2	9
1969	3	-	4	18	25
1970	52	201	122	34	409
1971	656	600	364	32	1.652
1972	6.611	2.849	3.136	932	13.528
1973	13.891	4.662	5.754	199	24.506
1974	47.591	9.275	6.896	916	64.678
1975	52.629	11.167	7.968	1.337	73.101
1976	62.079	8.281	9.032	1.015	80.407
1977	56.636	3.332	8.347	1.711	70.026
1978	77.388	7.023	10.129	1.632	96.172
1979	76.486	12.874	14.270	2.018	105.648
1980	115.482	20.235	18.977	2.391	157.085
1981	157.228	32.661	18.662	4.135	212.686
1982	120.305	46.581	5.400	1.065	173.351
1983	132.804	31.903	3.660	307	168.674
1984	151.962	35.476	7.024	2.053	196.515
1985	160.626	36.631	8.945	1.438	207.640
1986	138.241	31.655	11.769	1.614	183.279
1987	279.530	44.570	17.342	4.113	345.555
1988	226.360	72.654	15.948	5.514	320.476
1989	164.885	68.853	15.429	4.553	253.720
1990	120.377	53.579	8.371	4.984	187.311
1991	127.153	53.282	6.416	6.297	193.148
1992	243.126	80.683	8.915	9.176	341.900
1993	249.607	62.913	11.049	7.953	331.522
1994	274.815	79.996	14.532	8.284	377.627
1995	189.721	58.489	8.700	6.134	263.044
1996	211.565	70.951	8.545	5.212	296.273
1997	305.647	91.712	12.438	7.075	416.872
1998	291.788	87.743	14.550	6.163	400.244
1999	204.024	57.789	8.498	4.488	274.799
2000	283.449	72.529	9.293	6.028	371.299
2001	321.490	55.700	6.762	6.902	390.854
2002	369.925	42.250	5.475	6.765	424.415
2003	440.957	72.883	12.820	9.320	535.980
2004	603.052	117.138	25.650	12.947	758.787
2005	684.260	155.603	38.312	18.969	897.144
2006	635.851	153.803	37.457	15.726	842.837
2007	588.346	144.799	41.325	14.901	789.371
2008	558.207	122.022	38.665	15.689	734.583
2009	373.747	78.178	13.504	9.896	475.325

Nota/Note: Esta tabela inclui autoveículos montados e desmontados (CKD). / This table includes assembled and CKD vehicles.

Anexo B – Produção decenal de veículos

Produção - 1957/2009

Production - 1957/2009

					Unidades / Unit
ANO YEAR	AUTOMÓVEIS CARS	COMERCIAIS LEVES LIGHT COMMERCIALS	CAMINHÕES TRUCKS	ÔNIBUS BUSES	TOTAL TOTAL
1957	1.166	10.871	16.259	2.246	30.542
1958	3.831	26.480	26.998	3.674	60.983
1959	14.495	41.959	36.657	3.003	96.114
1960	42.619	48.735	37.810	3.877	133.041
1961	60.205	54.886	26.891	3.602	145.584
1962	83.876	67.648	36.174	3.496	191.194
1963	94.764	55.397	21.556	2.474	174.191
1964	104.710	54.503	21.790	2.704	183.707
1965	113.772	46.456	21.828	3.131	185.187
1966	128.821	60.735	31.098	3.955	224.609
1967	139.260	54.421	27.141	4.665	225.487
1968	165.045	66.984	40.642	7.044	279.715
1969	244.379	63.073	40.569	5.679	353.700
1970	306.915	66.728	38.388	4.058	416.089
1971	399.863	73.840	38.868	4.393	516.964
1972	471.055	92.329	53.557	5.230	622.171
1973	564.002	110.810	69.202	6.362	750.376
1974	691.310	126.935	79.413	8.262	905.920
1975	712.526	128.895	78.688	10.126	930.235
1976	765.291	125.370	83.891	12.059	986.611
1977	732.360	73.637	101.368	13.828	921.193
1978	871.170	92.235	86.269	14.340	1.064.014
1979	912.018	110.065	93.051	12.832	1.127.966
1980	933.152	115.540	102.017	14.465	1.165.174
1981	585.834	105.306	76.350	13.393	780.883
1982	672.589	130.197	46.698	9.820	859.304
1983	748.371	106.398	35.487	6.206	896.462
1984	679.386	129.430	48.497	7.340	864.653
1985	759.141	134.413	64.769	8.385	966.708
1986	815.152	145.418	84.544	11.218	1.056.332
1987	683.380	148.847	74.205	13.639	920.071
1988	782.411	196.108	71.810	18.427	1.068.756
1989	730.992	205.008	62.699	14.553	1.013.252
1990	663.084	184.754	51.597	15.031	914.466
1991	705.303	182.609	49.295	23.012	960.219
1992	815.959	201.591	32.025	24.286	1.073.861
1993	1.100.278	224.387	47.876	18.894	1.391.435
1994	1.248.773	251.044	64.137	17.435	1.581.389
1995	1.297.467	239.399	70.495	21.647	1.629.008
1996	1.458.576	279.697	48.712	17.343	1.804.328
1997	1.677.858	306.545	63.744	21.556	2.069.703
1998	1.254.016	247.044	63.773	21.458	1.586.291
1999	1.109.509	176.994	55.277	14.934	1.356.714
2000	1.361.721	235.161	71.686	22.672	1.691.240
2001	1.501.586	214.936	77.431	23.163	1.817.116
2002	1.520.285	179.861	68.558	22.826	1.791.530
2003	1.505.139	216.702	78.960	26.990	1.827.791
2004	1.862.780	318.351	107.338	28.758	2.317.227
2005	2.011.817	365.636	118.000	35.387	2.530.840
2006	2.092.003	379.208	106.644	34.474	2.612.329
2007	2.391.354	412.487	137.281	38.986	2.980.108
2008	2.545.729	458.806	167.330	44.111	3.215.976
2009	2.575.418	449.337	123.633	34.535	3.182.923

Anexo C - Tabela de ocorrência de falha

Item rga	Sistema	Modo	Ação	Evento
1	Estrutural	55	A	N
2	Sincronização	7	A	N
3	Sincronização	19	A	N
4	Estrutural	8	A	N
5	Estrutural	5	BC	F
6	Estrutural	16	BC	F
7	Estrutural	17	BD	F
8	Estrutural	11	A	N
9	Estrutural	11	A	N
10	Sincronização	4	BD	F
11	Gerenciamento de Ar	15	A	N
12	Arrefecimento	13	BD	Q
13	Estrutural	11	A	N
14	Sincronização	4	BD	F
15	Combustível	7	A	N
16	Gerenciamento de Ar	18	A	N
17	Sincronização	12	A	N
18	Arrefecimento	2	BD	F
19	Estrutural	17	BD	F
20	Arrefecimento	9	BD	F
21	Arrefecimento	13	BD	Q
22	Combustível	10	A	N
23	Sincronização	14	BD	Q
24	Sincronização	1	A	N
25	Lubrificação	3	BD	F
26	Trans. Potência	6	A	N
27	Estrutural	24	A	Q
28	Sincronização	25	A	N
29	Estrutural	24	A	Q
30	Elétrico	26	BD	P
31	Estrutural	37	A	Q
32	Lubrificação	41	BD	F
33	Lubrificação	20	A	N
34	Estrutural	40	BC	Q

35	Lubrificação	41	BD	F
36	Lubrificação	41	BD	F
37	Lubrificação	20	A	N
38	Lubrificação	20	A	N
39	Lubrificação	20	A	N
40	Lubrificação	41	A	N
41	Lubrificação	41	A	N
42	Lubrificação	41	A	N
43	Arrefecimento	35	A	N
44	Estrutural	32	BC	F
45	Lubrificação	21	BC	F
46	Combustível	39	A	N
47	Lubrificação	41	A	N
48	Lubrificação	38	BD	F
49	Combustível	27	A	N
50	Estrutural	28	A	N
51	Trans. Potência	29	A	N
52	Sincronização	30	A	N
53	Sincronização	30	A	N
54	Sincronização	30	A	N
55	Arrefecimento	31	A	N
56	Estrutural	40	BC	Q
57	Lubrificação	22	BD	F
58	Trans. Potência	34	BD	F
59	Lubrificação	22	BD	F
60	Lubrificação	36	BD	F
61	Estrutural	40	BC	Q
62	Arrefecimento	33	A	N
63	Sincronização	23	A	N
64	Estrutural	51	BC	F
65	Combustível	52	BD	F
66	Lubrificação	53	BD	F
67	Arrefecimento	47	A	N
68	Sincronização	46	BC	Q
69	Sincronização	46	BC	Q
70	Lubrificação	54	BD	F
71	Gerenciamento de Ar	45	BD	F
72	Combustível	50	BD	F
73	Gerenciamento de Ar	42	BD	F
74	Elétrico	44	A	N
75	Trans. Potência	48	BC	Q
76	Estrutural	43	BC	Q
77	Estrutural	49	BD	F

Os dados de comunicado de falha da tabela acima foram identificados a partir do sistema do motor ao qual pertencem e classificados conforme os seguintes indicadores:

BD_ Item corrigido com uma ação de contenção e ao final do teste iniciará um estudo para resolver o problema (modo de falha), implementando-se a correção do problema em definitivo;

A _ Item corrigido com uma ação de contenção, mas ao final do teste não se pretende resolver o problema (modo de falha), a produção do motor terá início sem essa correção em definitivo;

BC _ Item em falha foi corrigido no momento da ocorrência com uma revisão do projeto;

Q _ Falha ocorrida devido a problema de qualidade;

P _ Não ocorreu uma falha, mas houve problema de desempenho;

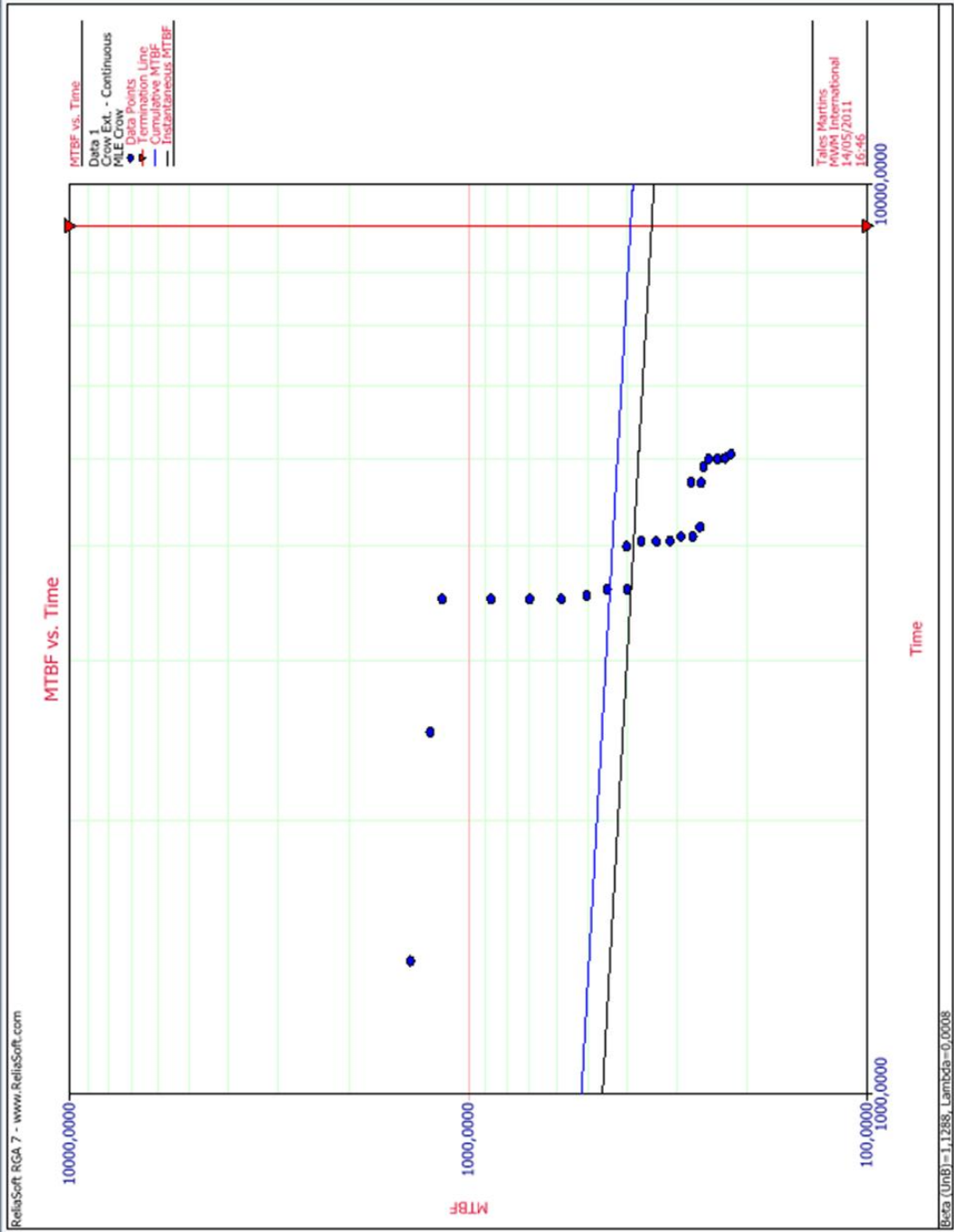
N _ Ocorrência de falha não procede (não ocorreu falha no componente / motor);

F _ Falha.

Para então serem inseridos no software de análise de crescimento da confiabilidade. Serviu também como base de dados da tabela 4 e a consequente elaboração da Figura 26 - página 63.

Para estimar a confiabilidade do produto para o período de garantia utilizou-se apenas os testes de longa duração, por se tratar de testes que reproduzem o funcionamento normal em campo.

Anexo D – Gráfico MTBF em função do tempo – Fase 1



Anexo E - Gráfico MTBF em função do tempo – Somadas as fase 1 e 2

