Produto & Produção, vol 17 n 2, p 44-52 , 2016

RECEBIDO EM 29/09/2014. ACEITO EM 01/06/2016.

Gustavo Silveira Oliveira

Universidade Federal de São Carlos – UFSCar

gustavo.oliveira@dep.ufscar.br

João Batista Turrioni

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

joabatu@gmail.com

Modelagem da confiabilidade utilizando dados de garantia: uma alternativa para resolver as limitações ao se trabalhar com dados de campo

RESUMO

Existem várias dificuldades quando se utiliza dados de campo para modelagem da confiabilidade de produtos. Nesse trabalho, ao se fazer uso de dados de garantia para a modelagem da confiabilidade de produtos eletrônicos, busca-se evidenciar e explorar possíveis soluções para essas dificuldades. O método de modelagem empírico descritivo é aplicado neste trabalho. Os resultados obtidos indicam que é possível acessar dados de confiabilidade a partir de dados de garantia, mas alguns cuidados devem ser tomados com relação à base de dados de falha e às demais fontes complementares de informação. Recomendações são feitas a respeito da base de dados para estudos de confiabilidade.

Palavras-chave: Confiabilidade; Garantia; Produtos Eletrônicos; Modelagem

ABSTRACT

There are plenty of limitations when using field data in order to access products reliability. In this study, the aim is to analyze and propose an alternative solution to these limitations based on existing literature. The research method was the empiric descriptive modeling. The results indicate that it is possible to access reliability information from warranty data but some care must be taken considering the data base and other alternative information source such as expert's opinion. Recommendations are made to improve data base quality to future reliability studies.

Keywords: Reliability; Warranty; Electronic Products; Modeling

1. Introdução

Consumidores necessitam ter certeza de que o produto que estão comprando está apto a desempenhar as funções a que se propõe. Esse pensamento tem encorajado as empresas a ter uma

preocupação maior com a qualidade dos produtos que colocam no mercado. Qualidade nesse contexto se refere a uma qualidade permanente, atemporal, que deve permanecer durante todo o período de uso para o qual o produto foi projetado (MURTHY, 2007).

Para os consumidores, essa dimensão da qualidade passou a ser um meio de comparação entre os diversos produtos oferecidos no mercado. Existe, porém, uma limitação clara na percepção da confiabilidade do produto pelo cliente no momento da compra, visto que confiabilidade não é uma característica perceptível momentaneamente. Para preencher essa lacuna, as empresas oferecem garantias como forma de convencer o cliente que o seu produto irá funcionar adequadamente.

O estabelecimento do período de garantia, porém, deve ser feito de maneira cautelosa uma vez que implica em custos de reparos de unidades que falham dentro do período de garantia. Além disso, o lançamento de produtos com alta taxa de falhas está intimamente ligado à perda de imagem junto aos clientes. Existem estudos (HUSSAIN e MURTHY, 2003) que se utilizam de dados coletados ainda na etapa de desenvolvimento do produto para definir o período de garantia adotado, reduzindo assim as perdas ocasionadas quando um produto pouco confiável é lançado no mercado. Confiabilidade, portanto, passa a ser vista como uma característica estratégica associada à conquista do mercado e à redução dos custos empresariais.

A crescente preocupação com a confiabilidade tem levado as empresas a desenvolverem sistemáticas para acessar a informação de confiabilidade de seus produtos. A instalação de laboratórios para realização de testes acelerados é geralmente cara e pode ser inviável para boa parte das empresas. A alternativa é a utilização de dados disponíveis em campo, de informações provenientes dos clientes. Alguns trabalhos (PAN, 2009; YANG, 2010, BAIK e MURTHY, 2008) tentam combinar a utilização de dados de campo com testes de vida acelerados ou com ensaios de degradação, muitas vezes, porém, a coleta de dados em campo é a única alternativa possível.

A coleta dessas informações, portanto, deve ser bem estruturada para que o estudo de confiabilidade seja realizado de maneira adequada. Existem algumas dificuldades ao se trabalhar com dados de campo pela própria natureza e origem desses dados. A literatura há algum tempo discute esses problemas e propõe métodos para amenizá-los ou resolvê-los. No presente trabalho, busca-se, sobretudo, evidenciar esses problemas através de um caso: a modelagem da confiabilidade de um produto eletrônico. Além disso, busca-se propor, com base na literatura existente, uma solução para superar as dificuldades encontradas no caso de estudo.

O modelo aqui proposto trabalha com as seguintes suposições, comuns na literatura quando se trata de modelagem com dados de garantia:

- trata o produto como se fosse um só componente, sem ligações em série e paralelo entre componentes,
- trata os modos de falha como se fossem independentes uns dos outros.

O trabalho é dividido nas seguintes seções: a seção 2 apresenta uma revisão da literatura sobre a modelagem utilizando dados de garantia e sobre estimadores não paramétricos utilizados em confiabilidade, a seção 3 apresenta detalhes da metodologia utilizada, a seção 4 apresenta uma aplicação da modelagem da confiabilidade em uma indústria de produtos eletrônicos e finalmente a seção 5 conclui o artigo.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Utilização de dados de campo na modelagem da confiabilidade

É importante ressaltar algumas dificuldades ao se trabalhar com dados de garantia, uma vez que o método utilizado busca superar algumas dessas dificuldades. A primeira delas é a alta censura de dados.

Dados de campo têm origem principalmente em relatórios de assistência técnica dos produtos em garantia. A confiabilidade da coleta de dados depende muito da suposição de que a grande maioria dos clientes lesados por uma falha do produto aciona o setor de assistência técnica. Esse comportamento, porém, geralmente é observado somente para produtos que se encontram dentro do período de garantia.

A utilização de dados incompletos de falhas provenientes de produtos fora da garantia pode levar a conclusões erradas sobre a real confiabilidade do produto. Por esse motivo, quando se trata de dados de campo para modelagem de confiabilidade, utilizam-se dados de falhas limitados ao período de garantia do produto. Os dados de produtos que não falham dentro do período de garantia analisado são considerados dados censurados.

Santos (2008) apresenta uma proposta alternativa para trabalhar com a alta censura dos dados. O autor aplica um questionário para coletar opinião de especialistas sobre a probabilidade de falha do produto após o período de garantia. Com a função densidade de probabilidade encontrada, o autor simula tempos de falha para os demais produtos tornando possível a análise completa dos dados.

Existem situações onde a determinação do tempo até falha é difícil. Equipamentos que trabalham em intervalos intermitentes, em que eles são ligados e desligados de maneira aleatória podem apresentar dificuldades na determinação dos tempos até falha. Em alguns casos a falta do tempo até falha é uma característica marcante em uma base de dados. Coit e Jin (2000) propõe um modelo para estimar parâmetros de distribuições onde há dados faltantes de tempo até falha.

Em uma situação extrema, de zero defeitos durante o período de garantia, torna-se impossível a aplicação de métodos tradicionais de modelagem de confiabilidade. Para esses casos, Jiang et al. (2010) apresentam um método modificado de máxima verossimilhança, adaptado para estimação de parâmetros de confiabilidade sem a utilização de dados de falhas.

Outra dificuldade de se trabalhar com dados de garantia é a incapacidade de determinar, por causa da alta censura uma distribuição de probabilidades que modele os tempos até falha encontrados. A utilização de estimadores não paramétricos já foi proposta como solução para esse problema. Marcorin e Abackerli (2006) propõe a utilização do estimador não paramétrico de Kaplan Meier para sobrepor esse problema.

A utilização de dados de campo, porém tem benefícios que merecem ser mencionados. Em testes laboratoriais de confiabilidade tenta-se simular algumas condições de funcionamento do produto na prática. Por mais preciso que sejam os laboratórios e os procedimentos de teste, há sempre um erro que envolve a diferença entre as condições reais com as condições simuladas (FOGLIATTO, 2009)

Por outro lado, em laboratórios, quando se conduz testes acelerados, o experimentador pode escolher o fator de stress que se deseja testar, assim, o produto fica sujeito somente a um modo de falha por vez (FOGLIATTO, 2009). Sob condições reais, em campo, o que acontece é a presença de inúmeros modos de falhas, causados pela variação de diversos fatores, controláveis e não controláveis, simultaneamente. Cada modo de falha segue uma distribuição de probabilidade particular, que geralmente difere de outro modo de falha. Quando dois modos de falhas com distribuições diferentes são tratados de maneira conjunta, a dificuldade de se encontrar uma distribuição paramétrica que se ajuste aos dados é maior e a utilização de um estimador não paramétrico passa a ser uma alternativa interessante.

Na maioria dos estudos envolvendo dados de campo parte-se da suposição que só existe um modo de falha ou que as distribuições de todos os modos de falha são as mesmas, o que nem sempre é condizente com a realidade. Rand e McLinn (2010), apresentam um estudo que comprova a diferença de resultados quando se assume erroneamente um único modo de falha. Os autores afirmam que a suposição de que dados de campo assumem uma única distribuição com um único modo de falha não deve ser feita.

Huang e Askin (2003), propõe uma solução para esse problema. Os autores afirmam que quando há diversos modos de falhas agindo sobre um mesmo produto, pode-se modelá-los separadamente, calcular a confiabilidade do produto com cada modo de falha agindo separadamente e usar o modelo de *competing risks* para se chegar a confiabilidade global do produto. Santos (2008) aplica um modelo para previsão de confiabilidade considerando três modos de falhas.

Identifica-se, portanto, três grandes dificuldades ao se trabalhar com dados de campo: a alta censura de dados, a dificuldade de se ajustar uma distribuição paramétrica aos dados e presença de muitos modos de falha atuando simultaneamente sobre o mesmo produto.

Alguns autores propuseram soluções para mitigar essas dificuldades, algumas de peculiar interesse são utilizadas neste trabalho e detalhadas nas próximas seções.

2.2. Estimadores não paramétricos em confiabilidade

A utilização de estimadores não paramétricos em confiabilidade tem se tornado cada vez mais comum. O estimador Kaplan-Meier (Kaplan e Meier, 1958), também conhecido como estimador limite-produto estima de maneira singular a função confiabilidade. Considere que N produtos foram colocados a teste e que $t_1, t_2, t_3 \dots t_N$ são os tempos até falha de cada uma das N unidades. Para cada t_j , deixe n_j corresponder ao número de unidades em risco ainda funcionando e d_j corresponder ao número de unidades que falharam até t_j .

Considere também $\hat{R}(t_j^+)$ como sendo o estimador de Kaplan Meier para a probabilidade de um determinado produto sobreviver até um tempo imediatamente superior a t_j .

A equação 2.1 descreve o comportamento de $\hat{R}(t_j^+)$ em função do tempo:

$$\hat{R}(t_j^+) = \begin{cases} \frac{n_j - d_j}{n_j} & \text{se } j = 1 \\ \frac{n_j - d_j}{n_j} * \hat{R}(t_{j-1}^+) & \text{se } j = 2, \dots k \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.1})$$

No caso de haver censura de dados, n_j passa a ser o número de unidades em risco menos o número de unidades censuradas até o tempo t_j .

2.3. O modelo de *competing risks*

O modelo de *competing risks* é uma alternativa quando muitos modos de falha atuam sobre um mesmo componente. Esse modelo possibilita a modelagem de cada modo de falha de maneira separada, para posterior cálculo da confiabilidade do produto. A confiabilidade total passa a ser, segundo esse modelo, o produtório das confiabilidades parciais de cada modo de falha.

Considere que $m_1, m_2, m_3 \dots m_m$ são os modos de falha atuantes sobre um componente. Considere também que $R_1, R_2, R_3 \dots R_m$ são as confiabilidades calculadas utilizando-se as distribuições de cada modo de falha em separado. A confiabilidade total do componente é dada pela equação 2.2.

$$R_t = \prod_{j=1}^m R_j \quad (\text{Eq 2.2})$$

A expressão da equação 2.2 pressupõe modos de falhas independentes e que é necessário que somente um modo de falha ocorra para caracterizar uma falha no componente.

3. Metodologia

A metodologia de pesquisa utilizada neste artigo foi a modelagem e simulação, mais especificamente o modelo proposto por Bertrand e Fransoo (2002). Para esses autores, as pesquisas utilizando modelagem e simulação podem ser divididas em axiomáticas e empíricas. Pesquisas axiomáticas produzem conhecimento a respeito de uma variável com base em modelos já propostos na literatura. Já as pesquisas empíricas usam dados de campo e buscam desenvolvimento de modelos para resolução de um problema específico.

Bertrand e Fransoo (2002) ainda dividem as pesquisas utilizando modelagem e simulação em descritiva e normativa. Pesquisas descritivas visam descrever a relação causal entre as variáveis fazendo uso de um modelo matemático, para tal, enquanto as pesquisas normativas se preocupam em desenvolver políticas e ações para melhoria da situação atual. Os passos desta metodologia estão representados na figura 1.

Figura 1 – Representação das etapas da metodologia de Modelagem e Simulação
Fonte: Bertrand and Fransoo (2002)

Combinando as proposições do trabalho com as afirmações de Bertrand e Fransoo (2002) conclui-se que neste trabalho a metodologia que foi utilizada foi empírica descritiva. Nessa metodologia, o processo de Modelagem é central, não se preocupando com a geração do modelo conceitual, que geralmente é obtido na literatura. Também não há o interesse em resolver o modelo, o objetivo foi simplesmente obter o modelo que melhor representasse os dados coletados.

4. Análise de dados para modelagem de confiabilidade

4.1. Caracterização do sistema

O sistema analisado foi um produto eletrônico portátil. Para efeito de análise o produto foi tratado como se fosse um único componente.

Toda falha de qualquer componente, desde que comprometesse o funcionamento do produto foi considerada como falha do produto e entrou na base de dados de falha utilizada na análise. Não foi feita diferenciação de falhas com relação ao componente na qual ela ocorreu a não ser para efeito de análise de modos de falhas predominantes.

Assim sendo, o produto não foi analisado em forma de sistema em série ou paralelo e os modos de falha foram considerados independentes um do outro.

4.2. Análise de dados de garantia

Os dados coletados consistem basicamente dos tempos até falha de produtos que ainda estavam em garantia. Foram observadas 100.958 unidades e somente 23.998 dessas unidades apresentaram falhas neste período. A figura 2 mostra o histograma de frequência dos dados coletados, os tempos de falha são apresentados em semanas.

Testes de hipótese foram conduzidos para identificar a distribuição amostral. Foram testadas as principais distribuições de probabilidade, sempre com P-value abaixo do índice de significância adotado.

Uma possível causa para a não aderência as principais distribuições é a atuação simultânea de muitos modos de falha. Utilizando o método apresentado em Huang e Askin (2003), tentou-se modelar os modos de falha individualmente. Os principais modos de falha atuantes estão na tabela 1.

Figura 2- Histograma de dados de garantia

Tabela 1 – Principais modos de falha atuantes

Descrição da Falha	Número de Falhas	% do Total de Falhas	% acumulado
Display Intermitente	9705	41%	41%
Não Liga	4791	20%	61%
Liga, mas não funciona	1444	6%	67%
Ferrugem	1091	5%	72%
Desliga Automaticamente	844	4%	76%
Falha no Teclado	713	3%	79%
Sem som	631	3%	81%

A modelagem utilizando a separação por modo de falha não obteve sucesso e os modos de falha dominantes não puderam ser modelados pelas principais distribuições de probabilidade utilizadas em confiabilidade.

4.3. Incorporando a opinião de especialistas no modelo

Para solucionar o problema da alta censura dos dados, seguindo o método proposto por Santos (2008), um questionário direcionado foi aplicado a um grupo de especialistas com o intuito de acessar a informação relativa às falhas do produto após o período de garantia. Através deste questionário pretende-se traçar um perfil de falhas que ocorrem após o período de garantia ter terminado.

Através das respostas dos especialistas levantou-se o perfil de falhas apresentado a tabela 2.

Tabela 2 – Resposta dos especialista - % acumulado de falhas

Tempo "t" em SEMANAS de uso	Percentual de produtos que falham até "t"
78 semanas (1 ano e meio)	5,00%
104 semanas (2 anos)	10,24%
130 semanas (2 anos e meio)	18,00%
156 semanas (3 anos)	23,03%
182 semanas (3 anos e meio)	48,00%
208 semanas (4 anos)	65,03%
234 semanas (4 anos e meio)	76,00%
260 semanas (5 anos)	100,00%

Realizando os devidos testes de aderência, identificou-se que o perfil de falhas segue uma distribuição de Weibull com parâmetros de forma valendo 2,74 e o de escala valendo 217,47.

Através dessa distribuição, os dados faltantes de falha foram simulados para gerar uma base de dados não censurada. Ainda seguindo Santos (2008), os dados simulados foram agregados a base de dados de garantia formando uma base de dados completa de tempo até falha.

4.4. Cálculo da confiabilidade do produto

O cálculo da confiabilidade do produto foi feito fazendo-se uso da base de dados completa. Devido à presença de muitos modos de falha, como já identificado, decidiu-se por adotar a solução de Marcorin e Abackerli (2006) e utilizar um estimador não paramétrico em conjunto com o método de reamostragem *bootstrap* para a modelagem e para o cálculo dos intervalos de confiança.

A curva de confiabilidade do produto pode ser visualizada na figura 9.

Figura 9 – Função confiabilidade do produto

Após a modelagem foi possível determinar o tempo médio até falha no valor equivalente a 155 semanas. Nota-se uma pequena descontinuidade na curva, próximo à semana 52. Essa descontinuidade se deve a diferença entre os dados coletados e a opinião dos especialistas para o período. Por mais acurada que seja a opinião dos especialistas, sempre haverá uma pequena distorção com o que acontece na prática. Por esse motivo, outros métodos de se acessar a confiabilidade do produto devem ser utilizados pela empresa que busca desenvolver uma base adequada para estudo de confiabilidade, alguns deles são expostos nas conclusões deste trabalho.

Por fim, a figura 10 mostra os intervalos de confiança para o tempo médio até falha calculados segundo o modelo de Marcorin e Abackerli (2006).

Figura 10 – Teste de adequação – tempo médio até falha

5. Conclusões

Os principais problemas de se trabalhar com dados de campo, apontados pela literatura, foram evidenciados na prática deste estudo. Algumas das soluções apontadas pela literatura foram implementadas com sucesso, outras, pela característica da base de dados, não. Após a condução da pesquisa onde se enfrentaram as dificuldades de se trabalhar com dados de garantia, pode-se concluir

primeiramente que só é possível conduzir uma análise de confiabilidade se houver uma base de dados dimensionada e voltada para esse propósito.

Uma das dificuldades ao se trabalhar com dados de garantia foi justamente a falta de informação sobre falhas após o período de garantia. Se a empresa possuísse um sistema de garantias estendidas e um banco de dados que possibilitasse a coleta de dados de produtos em garantia em diferentes estágios de sua vida útil a análise de confiabilidade seria mais adequada. Em outras palavras, um banco de dados estruturado e voltado para confiabilidade poderia fornecer dados confiáveis de garantia para produtos em diferentes estágios de sua vida útil, mesmo após o término da garantia, eliminando a necessidade de se utilizar a opinião de especialistas, que apesar de útil, é subjetiva.

O uso da opinião de especialistas se torna limitado e a qualidade da informação fica prejudicada. Identificou-se no trabalho uma descontinuidade nas funções ligadas a confiabilidade. Essa descontinuidade teve origem justamente na divergência entre a opinião de especialistas e os dados de falhas efetivas coletadas em campo.

Outra consideração diz respeito aos modos de falhas presentes e a incapacidade de modelá-los separadamente. Geralmente, ao modelar modos de falhas isoladamente, deveria ser possível que alguma distribuição paramétrica de probabilidade se adequasse aos dados.

No presente trabalho, curiosamente, não foi possível modelar os modos de falha separadamente com distribuições paramétricas conhecidas. Isso pode ter acontecido por contaminação nos dados. Ao conduzir uma investigação para apuração do motivo pelo qual esse fato ocorreu, descobriu-se que muitas vezes os modos de falha não eram apurados de maneira adequada por despreparo da equipe técnica e falta de treinamento em confiabilidade.

A classificação errada de um ou outro modo de falha causa grandes danos a base de dados. Quando esta classificação é realizada sem propriedade a modelagem por modo de falha fica comprometida, não havendo outra alternativa a não ser trabalhar o produto como sofrendo efeito somente de um modo de falha, o que torna difícil a modelagem.

Para estudos futuros sugere-se a estruturação de uma base de dados que venha a suprimir os problemas encontrados no presente trabalho. A identificação correta dos modos de falha na base de dados é de extrema importância para que o cálculo da confiabilidade seja feito de maneira adequada. Outra recomendação seria o fornecimento de garantias estendidas gratuitas a clientes escolhidos para que se tenha acesso a informação de falhas do produto mesmo após o período de garantia tradicional. Mesmo com poucos dados de falhas reais, é possível fazer uso de algumas técnicas para se calcular a confiabilidade do produto, sem ser necessária a utilização de uma segunda fonte de dados, como a opinião de especialistas.

A identificação correta do componente onde ocorreu a falha também é interessante em uma base de dados para estudo de confiabilidade. Assim pode-se avaliar, dentre dois componentes com a mesma função, qual seria o componente menos susceptível a falha a fim de melhorar a confiabilidade dos novos produtos que estão em estágio de desenvolvimento.

Por fim, a utilização de estimadores não paramétricos se mostrou útil para a modelagem da confiabilidade sendo uma solução interessante nos casos onde um ou mais modos de falha, tratados separadamente ou em conjunto, não puderem ser modelados por distribuições paramétricas.

Referências

BAIK, J.; MURTHY, D. *Reliability assessment based on two-dimensional warranty data and an accelerated failure time model*. International Journal of Reliability and Safety , v. 2, n. 3, p. 190-208, 2008.

BERTRAND, J.; FRANSOO, J. *Modelling and Simulation: Operations Management Research Methodologies using Quantitative Modeling*. International Journal of Operations & Production Management, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

COIT, D.; JIN, T. *Gamma distribution parameter estimation for field reliability data with missing failure times*. IIE Transactions , v. 32, p. 1161-1166, 2000.

FOGLIATTO, F. *Confiabilidade e Manutenção Industrial*. São Paulo: Elsevier, 2009.

HUANG, W.; ASKIN, R.G. *Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation*. Quality and Reliability Engineering International, v. 19, p. 241-254, 2003.

HUSSAIN, A.; MURTHY, D. *Warranty and Optimal Reliability Improvement through Product Development*. Mathematical and Computer Modelling, v. 38, p. 1211-1217, 2003.

JIANG, P.; LIM, J.; ZUO, M.; GUO, B. *Reliability Estimation in a Weibull Lifetime Distribution with Zero-failure Field Data*. Quality and Reliability Engineering International, v. 26, p. 691-701, 2010.

KAPLAN, E.L.; MEIER, P. *Nonparametric estimation from incomplete observations*. Journal of American Statistics Association, v. 53, n. 282, p. 457-481, 1958.

MARCORIN, A.; ABACKERLI, A. *Field Failure Data: an Alternative Proposal for Reliability Estimation*. Quality and Reliability Engineering International, v. 22, p. 851-862, 2006.

MURTHY, D. N. *Product Reliability and Warranty: an overview and future research*. Produção, v. 17, n. 3, p. 426-434, 2007.

PAN, H. *A Bayes Approach to Reliability Prediction Utilizing Data from Accelerated Life Tests and Field Failure Observations*. Quality and Reliability Engineering International, v. 25, p. 229-240, 2009.

RAND, D.; McLINN, J. *Analysis of Field Failure Data When Modeled Weibull Slope Increases with Time*. Quality and Reliability Engineering International, v. 27, p. 99-105, 2010.

SANTOS, G. *Modelo de Confiabilidade Associando Dados de Garantia e Pós-Garantia a três Comportamentos de Falhas*, Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

YANG, G. *Accelerated Life Test Plans for Predicting Warranty Cost*. IEEE Transactions on Reliability, v. 59, n. 4, p. 628-634, 2010.