

ESTRATÉGIAS DE MANUTENÇÃO BASEADAS EM ANÁLISE DE CONFIABILIDADE: APLICAÇÃO EM UMA MÁQUINA AUTOMÁTICA DE MONTAGEM DE CAPACITORES

MAINTENANCE STRATEGIES BASED ON RELIABILITY ANALYSIS: APPLICATION IN A MACHINE AUTOMATIC CAPACITOR ASSEMBLY

Guilherme Saliba Minuzzo¹, Jairo José de Oliveira Andrade^{2,*}

RESUMO

Com a alta demanda por aumento de produtividade e redução dos custos de produção, a Engenharia de Confiabilidade tem se tornado grande aliada na tomada de decisão para redução das falhas associadas aos processos produtivos. Nesse contexto, este artigo apresenta a aplicação dos conceitos de confiabilidade para análise e priorização dos principais modos de falha incidentes em uma máquina de montagem automática de capacitores, em uma empresa do Rio Grande do Sul. Para este estudo foi realizado um acompanhamento do equipamento durante um período de 3 meses. Neste intervalo de tempo foram coletados dados de falha do equipamento e elaborados Diagramas de Pareto para análise das taxas médias entre falhas e os tempos médios de reparo. Com base nesses dados foram definidos os 4 modos de falha mais representativos. Estes modos de falha foram analisados através da distribuição de probabilidade mais adequada conforme testes de aderência para localização do modo de falha na curva da banheira. Foram propostas ações para redução da taxa de falhas, assim como definição de qual tipo de manutenção é mais adequada para os modos de falha observados. Os resultados encontrados após a execução das ações propostas foram o aumento de produtividade e eficiência global do equipamento.

Palavras-chave: Confiabilidade, manutenção Industrial, análise de falhas.

ABSTRACT

Considering the high demand for increased productivity and reduced production costs, the Reliability Engineering is important in order to reduce failures in production processes. In this context, this paper presents the application of reliability concepts for analysis and prioritization of the main failure modes incidents in an automatic capacitor assembly machine, in a company of Rio Grande do Sul, Brazil. For this study were performed a monitoring device during a period of 3 months. Based in failure data, the 4 most significant failure modes have been defined. These failure modes were analyzed by distributing more appropriate probability as compliance tests for location of the failure mode in the bathtub curve. Were proposed actions to reduce the failure rate, as well as definition of what kind of maintenance is most appropriate for the observed failure modes. The results after the execution of the proposed actions were increased productivity and overall efficiency of the equipment.

Keywords: Reliability engineering, maintenance, failure analysis.

¹Faculdade de Engenharia – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

²Professor Doutor. Faculdade de Engenharia – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS). Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil

*Autor para correspondência: jairo.andrade@pucrs.br

INTRODUÇÃO

Cada vez mais vem crescendo a demanda por processos produtivos de melhor desempenho e focado na redução de custos. Com isso, a necessidade de redução de falhas em linhas de produção (sejam elas falhas que aumentam os custos associados aos produtos ou falhas que possam gerar acidentes de trabalho), resultou numa ênfase crescente em sua confiabilidade. O estudo e conhecimento adquirido resultante da análise de falhas e da busca por sua redução, ou até mesmo total eliminação, geram uma grande quantidade de possibilidades de tratamento e redução da taxa de falhas nos quais surgem considerações acerca da confiabilidade (Moubray 2000; Birolini 1999).

As empresas e corporações cada vez mais tendenciam a adotar metas para seus funcionários nos diversos processos produtivos que constituem a organização, de forma a incentivar e aumentar os níveis de produtividade e lucratividade. São objetivos específicos que influenciam diretamente na tomada de decisão com as informações fornecidas, dentre eles as atividades de manutenção estão diretamente associadas ao aumento de eficiência e produtividade dos sistemas produtivos dentro da organização para o atingimento das metas. Recursos de produção disponíveis e baixos custos de manutenção são fundamentais para o sucesso e crescimento das empresas.

A escolha do método e tipo de atividade de manutenção mais adequado para cada caso é uma tarefa que exige uma análise do impacto no processo produtivo e também a complexidade de implementação. Neste sentido, Waeyenbergh e Pintelon (2002) salientam a necessidade de primeiramente definir qual será a estratégia de manutenção, dentre as várias alternativas aplicáveis, visando o melhor custo benefício e efetividade técnica no contexto da operação, ressaltando o impacto direto no resultado da empresa os altos custos diretos e indiretos atrelados às atividades.

Pesquisas de métodos e estratégias de manutenção baseados na análise de confiabilidade cada vez mais vem crescendo no cenário industrial e se mostrando uma técnica eficiente na aplicação prática pois, auxilia na priorização do tipo de manutenção a ser realizada assim como direciona os pontos mais críticos dos equipamentos (Elsayed, 1996).

A confiabilidade deve ser tratada e considerada juntamente com os conceitos de qualidade. Apesar de em alguns casos os dois conceitos são tratados separadamente a qualidade do produto está diretamente associada à confiabilidade. Um processo produtivo com um nível de confiabilidade elevado já possui toda base estruturada para que o produto em questão tenha e mantenha a qualidade. Baseado nessa consideração, os dois temas devem ser tratados sempre em conjunto (Moubray, 2000). Segundo Jardine e Tsang (2013), as técnicas de confiabilidade podem ser aplicadas tanto em desenvolvimento de projetos para redução da complexidade ou redundâncias para assegurar tolerância à falha, como na gestão da produção para um melhor controle de materiais, métodos de trabalho e especificações. Além disso, Fogliatto e Ribeiro (2009) mencionam que a confiabilidade está diretamente relacionada aos conceitos de qualidade, manutenibilidade, confiança, disponibilidade e segurança, visando menor variabilidade dos processos produtivos e obtenção dos melhores métodos de manutenção.

Esse trabalho pode ser justificado sob diferentes pontos de vista. Considerando principalmente o ponto de vista dos autores, assim como o da empresa, o foco é o aumento de produtividade e redução de custos com a diminuição da taxa de falhas do equipamento. Desta forma, o objetivo principal deste estudo é definir uma sistemática de manutenção para cada modo de falha associado a uma máquina de montagem automática, tendo como principal ferramenta a análise de confiabilidade do equipamento. Como objetivos específicos podem ser citados: (i) classificar e analisar os principais modos de falha do equipamento; (ii) calcular a confiabilidade associada com os principais modos de falha; e (iii) propor ações de forma que eliminem ou resultem em uma redução na incidência dos modos de falha considerados mais críticos.

Para a realização do presente trabalho algumas delimitações foram impostas tais como: não foram considerados estudos de eficiência de máquina que possam estar relacionados com as ações realizadas. Não foram consideradas as paradas relacionadas com setup de máquina ou paradas programadas para o presente estudo, bem como não se realizaram análises de investimentos referentes à implementação das possibilidades de melhoria.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse tópico serão apresentados o método de pesquisa e o método de trabalho. O método de pesquisa classifica o tipo de estudo em quatro pilares: (i) natureza; (ii) forma de abordagem; (iii) objetivos e (iv) procedimentos técnicos. Já o método de trabalho explica como o trabalho será estruturado, definindo as etapas, compostas pelas suas respectivas atividades.

Em relação ao método de pesquisa deve-se citar que a metodologia abordada no presente trabalho consiste na coleta de dados dos principais eventos ocorridos durante a produção encontrados na máquina de montagem automática. Este trabalho pode ser considerado do ponto de vista de sua natureza como aplicado, pois através da análise dos dados pode-se aplicar soluções práticas na máquina onde foi realizado o presente estudo. A abordagem do problema será feita através da análise numérica e interpretação dos dados com modelos estatísticos, caracterizando dessa forma o estudo como quantitativo. O estudo será apresentado de forma descritiva e como o levantamento de dados numéricos consiste em uma análise quantitativa permite a aplicação prática posteriormente (Gil, 1991).

O método de trabalho abordado foi baseado no programa DMAIC (definir, medir, analisar, melhorar e controlar). O método é conhecido por aprimoramento de processos e capacitação e orientação de pessoas para o atingimento dos resultados. As ferramentas da qualidade utilizadas foram o fluxograma para proporcionar uma melhor visualização e entendimento das etapas e o diagrama de Pareto para priorização dos resultados.

O estudo foi dividido em uma sequência de atividades, conforme apresentado no fluxograma na figura 1.



Figura 1. Fluxograma do método de trabalho

As atividades relacionadas a cada uma das etapas são:

i) Definição do problema: devido à necessidade de uma melhora nos indicadores de produtividade na empresa, escolheu-se uma linha de montagem para análise com oportunidades de melhoria;

ii) Coleta de dados: para que a análise e priorização dos modos de falha sejam possíveis foi então realizada a coleta de dados focada nas principais falhas encontradas no equipamento no período proposto;

iii) Estratificação dos dados: após a coleta de dados foi feita a estratificação dos dados para, através do gráfico de Pareto, definir os principais modos de falha associados à máquina que seriam objeto de investigação;

iv) Análise de confiabilidade: com base nos dados de tempos entre falhas obtidos nas etapas anteriores para os modos de falha escolhidos realizou-se uma análise a fim de se obter os principais parâmetros de confiabilidade (taxa de falha e MTBF) do equipamento;

v) Ações para melhoria de máquina e estratégias de manutenção: com base nos resultados da análise de confiabilidade pôde-se determinar a causa raiz dos modos de falha analisados e propor mudanças de projeto, assim como definir qual melhor estratégia de manutenção a ser adotada.

RESULTADOS

O trabalho foi realizado em uma empresa fabricante de componentes eletrônicos, que possui em seu quadro mais de 2000 funcionários e fornece produtos para diversos fabricantes do Brasil e também do exterior. A fábrica está localizada na região metropolitana de Porto Alegre, cujo foco do presente estudo é uma linha de montagem de capacitores destinados ao setor de iluminação, como mostra a figura 2.



Figura 2. Capacitor montado

Para este estudo foi feita uma análise de uma máquina automática de montagem de capacitores. Como o produto é muito específico, **não existe** disponível no mercado uma **máquina** para efetuar a montagem do produto em questão. Sendo assim, a máquina foi desenvolvida e construída dentro da própria empresa e foi colocada em operação recentemente há menos de dois anos. A função da máquina basicamente é receber as matérias primas e realizar as etapas do processo, conforme o fluxograma mostrado na figura 3.

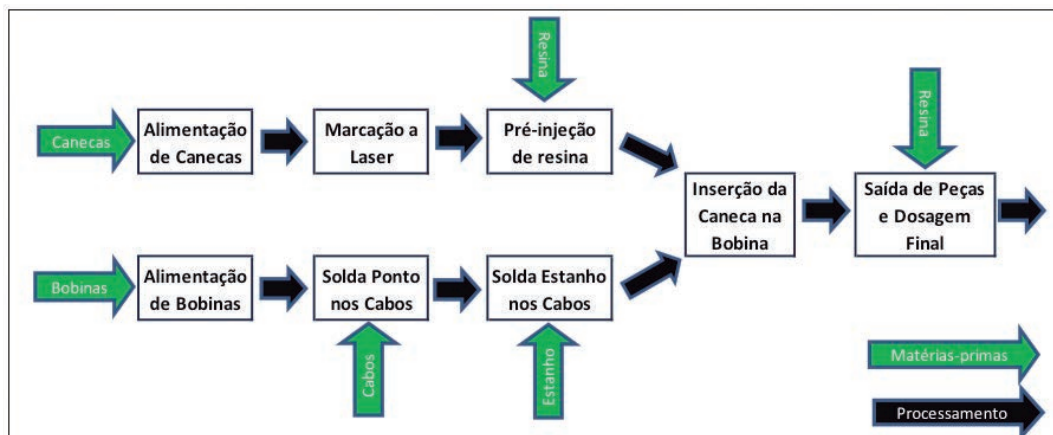


Figura 3. Fluxograma do processo de montagem do capacitor

A montagem é feita em série conforme as etapas descritas, onde as matérias-primas são agregadas em cada etapa do processo. Na figura 4 está apresentada uma vista explodida do capacitor objeto desse estudo.

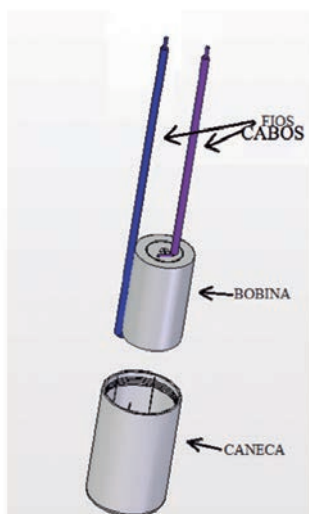


Figura 4. Vista explodida do capacitor

Para o presente estudo serão apresentados os principais modos de falha da máquina, encontrados através de análise e acompanhamento estatístico. O critério para escolha dos modos de falha foi em relação à severidade da falha associada ao impacto produtivo. Nesse caso enquadraram-se as falhas com uma taxa baixa e com tempo de reparo alto, as quais apresentam um grande impacto na produção. **Assim como** também foi levado em consideração modos de falha onde o tempo de reparo é baixo e o intervalo entre falhas também baixo como será apresentado e explicado posteriormente neste estudo a particularidade de cada caso.

Os registros dos dados de falha utilizados para viabilizar a análise de confiabilidade são referentes ao período de abril a junho de 2013, totalizando 491 dados de falha. O registro de todas as paradas do equipamento é feito pelo mecânico em planilha eletrônica detalhando o tipo de parada e o tempo de reparo. Para objeto de estudo foram consideradas apenas paradas relacionadas com falha do equipamento, não sendo analisados os tempos de *setup* e paradas programadas do mesmo.

Com a coleta de dados realizada foi possível iniciar a análise de falhas do equipamento. Os tempos de reparo são cruciais para a produtividade da máquina, visto que altos tempos de reparo podem comprometer a produção mesmo após o conserto, pois o equipamento deve voltar à velocidade de marcha e estabilização. Também foram percebidos casos em que o tempo entre falhas e o tempo de reparo é bem pequeno, associados com as chamadas microparasas que ocorrem com frequência elevada. Nesse contexto, é fundamental que o plano de manutenção esteja adequado para o equipamento, considerando as particularidades de cada máquina individualmente, fazendo-se necessária uma análise de confiabilidade para uma melhor eficácia do plano de manutenção.

Na figura 5 está representado o diagrama de Pareto mostrando os modos de falha mais incidentes na máquina analisada, e na figura 6 estão indicados os modos de falha que mais consumiram tempo para a realização dos reparos associados. Percebe-se que a quantidade de falhas nem sempre está relacionada ao pior caso, pois como pode-se ver as falhas no sistema de resina possuem menor quantidade de falhas, porém têm um impacto maior na produção, visto que este modo de falha é o que possui no somatório o maior tempo de reparo.

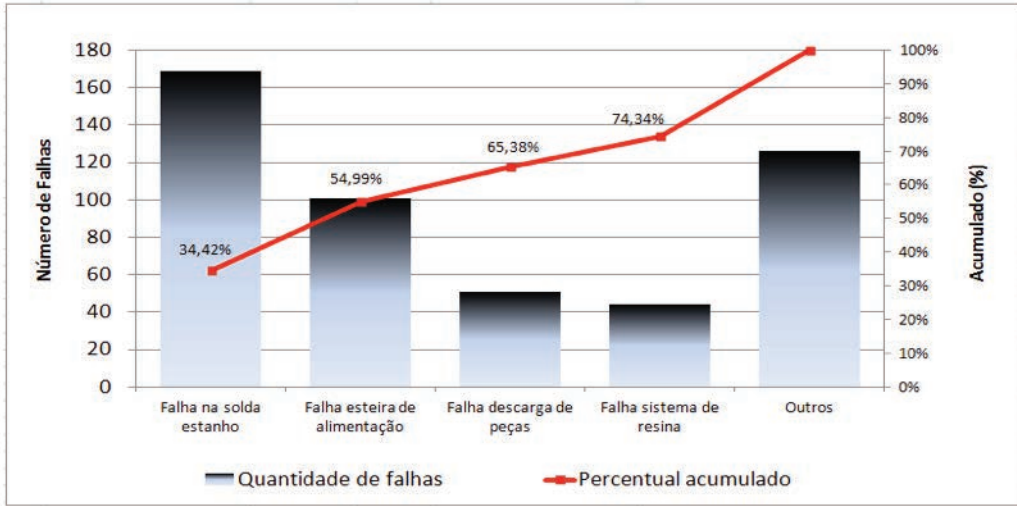


Figura 5. Diagrama de Pareto do número de falhas da máquina separado por modos de falha

Levando em consideração a quantidade de falhas, percebe-se que os modos de falha que mais se repetem podem ser considerados erros sistêmicos da máquina que não podem ser evitados, ou seja, a falha irá existir em determinado intervalo de tempo. Isto se reflete na falha da solda estanho, que é um modo de falha que ocorre basicamente devido ao desgaste acelerado da ponteira de solda. A máquina efetua em média de 4 a 5 mil soldas por turno de produção, que na prática é aproximadamente o tempo que uma ponteira de solda é substituída durante a operação da máquina. Nesse caso, como tempo de reparo é muito pequeno, não se aplica uma manutenção preventiva, pois o tempo da mesma seria praticamente o mesmo da corretiva.

Na figura 6 pode-se ver o impacto do somatório do tempo total de reparo associado a cada modo de falha.

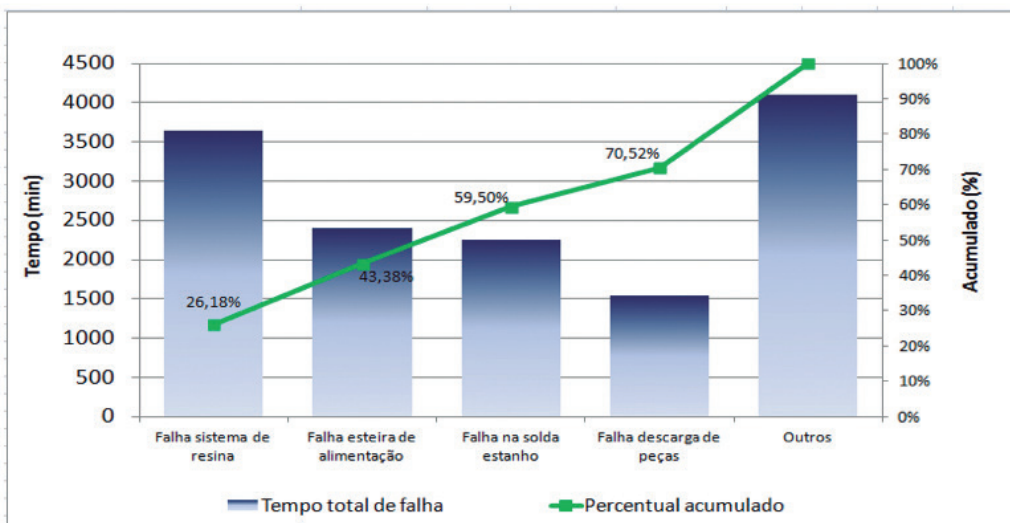


Figura 6. Total do tempo de parada (reparo) por modo de falha

As paradas referentes à falha no sistema de resina requerem o estabelecimento de procedimentos de manutenção mais intensos. Como a resina possui uma viscosidade muito alta, e também o catalisador (endurecedor) necessário para mistura com a resina tem a característica de cristalizar em contato com o ar, todo sistema de tubulações e o bico dosador sofrem entupimento, sendo necessária a desmontagem de todo conjunto para limpeza e desobstrução. Somente após a montagem de todo conjunto, o equipamento estará apto a entrar em operação novamente.

Foram coletados os dados de falha da máquina automática através dos registros apontados no computador pelo mecânico. Os principais modos de falha estão detalhados na tabela 1, na qual estão apresentados uma breve descrição da falha e também o impacto que representa na produção associado ao tempo de reparo.

Tabela 1. Modos de falhas, descrições e impacto produtivo na máquina analisada.

Modo De Falha	Descrição	Impacto Produtivo
Falha no sistema de resina	Falha ocorre quando o sistema não injeta quantidade correta de resina na mistura especificada, ou não dosa por falha mecânica.	Impacto grande, tempo de reparo alto devido a necessidade de desmontagem do equipamento para correção e desobstrução do sistema.
Falha na esteira de alimentação	Falha por falta de canecas por mau funcionamento do alimentador ou do transportador.	Intervenção rápida, geralmente ocasionado pela obstrução de alguma caneca no alimentador ou na esteira.
Falha na descarga de peças	Falha por incapacidade de transportar as peças prontas para o palete de saída.	Intervenção rápida, ocasionada pela falha na garra de saída de peças.
Falha na solda estanho	Falha na solda por defeito na ponteira ou no ferro de solda.	Necessita troca da ponteira de solda por estar furada, ou por desgaste acelerado.

Dos modos de falha descritos na figura 7 pode-se afirmar que a falha no sistema de resina é o mais crítico em relação à severidade, pois além de ter um alto tempo de reparo, tem um impacto grande na qualidade do produto. A quantidade de resina adicionada ao produto é fundamental para o correto funcionamento e durabilidade do mesmo, pois uma mistura na proporção incorreta dos componentes da resina pode gerar uma falha em campo. Os demais modos de falha estão relacionados diretamente com a produtividade e eficiência de máquina e impactam indiretamente na qualidade do produto.

Após a definição dos modos de falha realizou-se o teste de aderência para verificar qual das distribuições de probabilidade representaria mais adequadamente o conjunto dos tempos até a falha. Através do teste de aderência realizado no *software ProConf*, verificou-se que a distribuição de Weibull se ajusta adequadamente aos dados de falha, exceto para o modo falha na solda estanho, o qual apenas a hipótese do modelo Lognormal não foi rejeitada. O ajuste dos dados de falha através da distribuição de Weibull é adequado, pois tal modelo engloba outros modelos, como o normal, o exponencial e o Rayleigh, considerando também uma situação da presença de modos de falha concorrentes (Lewis 1995; Huang e Askin 2003). A distribuição de Weibull também foi empregada para avaliar a confiabilidade de capacitores que são empregados em aplicações aeronáuticas (Liu e Sampson, 2011). Os parâmetros associados aos modos de falha estudados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2. Cálculo dos parâmetros associados aos modos de falha

Modo de Falha	Quantidade de dados	Teste Analítico do χ^2		Weibull		Lognormal		MTBF (horas)
		χ^2	Nível de significância	γ	θ	μ	σ	
Falha sistema de resina	44	3,94	0,4136	2,066	58,92	-	-	51,85
Falha na esteira de alimentação	101	9,75	0,2831	0,7375	18,84	-	-	22,83
Falha na descarga de peças	51	3,41	0,6375	0,6425	31,20	-	-	43,77
Falha na solda estanho	169	9,71	0,4662	REJEITADA		2,03	1,10	13,96

Os valores das taxas médias entre falhas de um modo geral estão condizentes com a realidade. As descrições pormenorizadas referentes aos modos de falha estudados e as providências que podem ser tomadas para minimizar as causas dessas falhas serão apresentadas na sequência.

Para a falha no sistema de resina foram plotados os gráficos do papel de probabilidade, como mostra a figura 7, para verificar a aderência da distribuição de Weibull aos dados de falha, assim como a taxa de falhas (Figura 8) para verificar em qual ponto da curva da banheira se encontra o modo de falha.

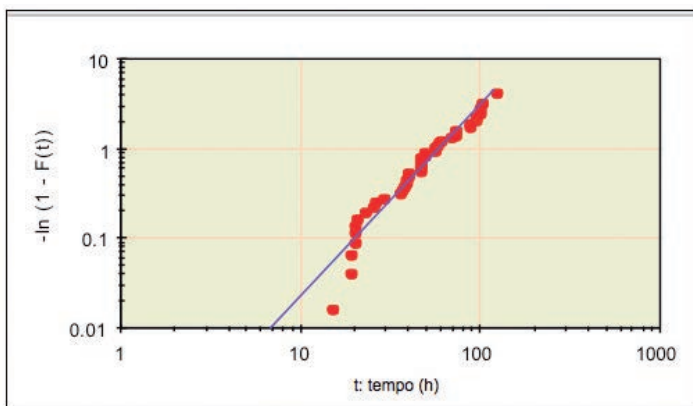


Figura 7. Gráfico de probabilidade normal ajustado por Weibull para a falha do sistema de resina

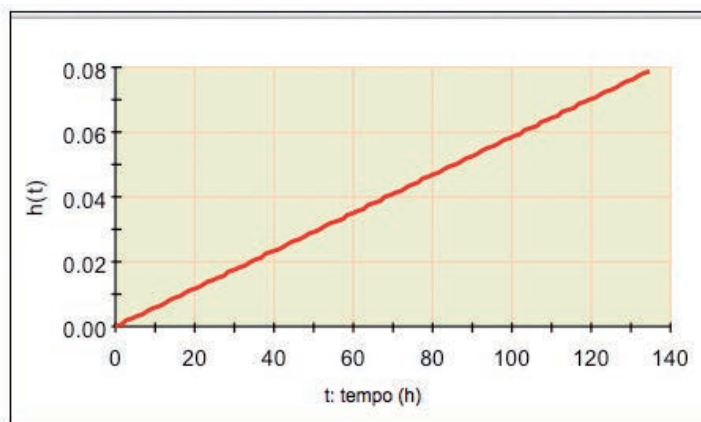


Figura 8. Taxa de falhas em função do tempo

Levando-se em consideração o valor do **parâmetro** de forma ($\gamma = 2,07$) observado para esse modo de falha, percebe-se que o mesmo está associado com a etapa de desgaste da curva da banheira. Porém o sistema de resina tem uma particularidade, quando fica parado por um longo período de tempo, seja por falta de ordens de produção, alguma outra falha de equipamento, *setup* de máquina ou sem mão de obra (durante os domingos e feriados), ocorre o entupimento do sistema de dosagem e mau funcionamento dos mecanismos, de forma que é necessária a desmontagem para sanar o problema, como já foi comentado anteriormente. Também ocorrem falhas aleatórias durante o andamento da produção as quais são de origem eletrônica (sensoreamento).

Para sanar as falhas relacionadas com o entupimento do sistema após longas paradas foi

construído um conjunto reserva do dispositivo de dosagem (Figura 9). Dessa forma, pode-se desmontar o conjunto trancado, substituir pelo conjunto reserva e colocar a máquina em operação rapidamente. Só após a máquina iniciar a operação é que então se faz a limpeza e manutenção do conjunto obstruído, deixando o mesmo em condições de efetuar o mesmo *setup* rápido após a próxima parada de longa duração e assim sucessivamente.

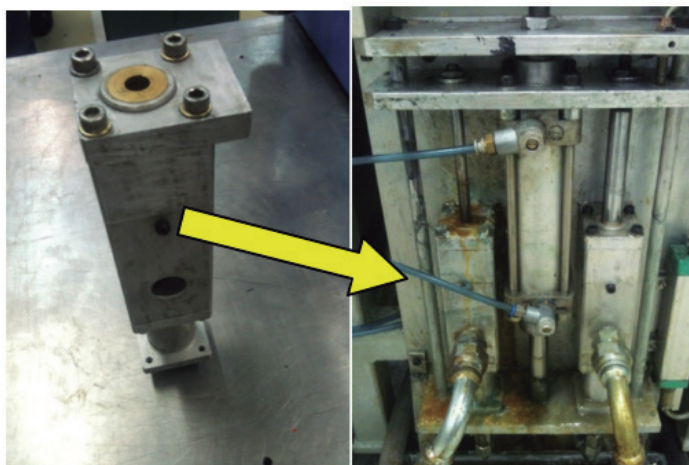


Figura 9. Conjunto reserva e conjunto obstruído

Outra alternativa possível para eliminar a causa raiz é a alteração do projeto do dosador de resina, o que envolveria um alto investimento. A vantagem desse novo sistema é que pela sua forma construtiva e condicionantes operacionais, não mais ocorreria o entupimento do sistema. Todavia, em função do alto custo do investimento, esta alteração não se justificaria. Quando há a necessidade da realização da manutenção corretiva não existe gasto em materiais para serem trocados, apenas mão de obra associada.

Para solucionar as falhas de origem eletrônica (sensoreamento), foram modificados os tipos de sensores utilizados (passaram a ser indutivos para detecção do nível de resina), assim como a instalação de um sistema de aquecimento na tubulação de resina. Com a resina aquecida da temperatura ambiente para 40°C, a viscosidade da mesma reduz drasticamente, amenizando dessa forma os problemas de entupimento na tubulação.

Técnicas de manutenção como a TPM (Total Productive Maintenance) poderiam ser utilizadas, focadas na manutenção autônoma do equipamento com envolvimento direto dos mecânicos operadores da máquina atuando no sistema para mantê-lo sempre nas condições iniciais de produção, evitando que chegue-se na condição extrema de obstrução e mau funcionamento do dosador.

Em relação falha na esteira de alimentação, na figura 10 está apresentado o ajuste dos dados coletados ao papel de probabilidade de Weibull, e na figura 11 o comportamento da taxa de falhas relacionados com a esteira de alimentação de matéria-prima.

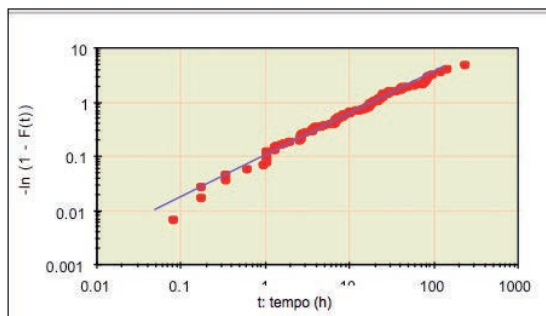


Figura 10. Gráfico de probabilidade normal ajustado por Weibull para a falha na esteira

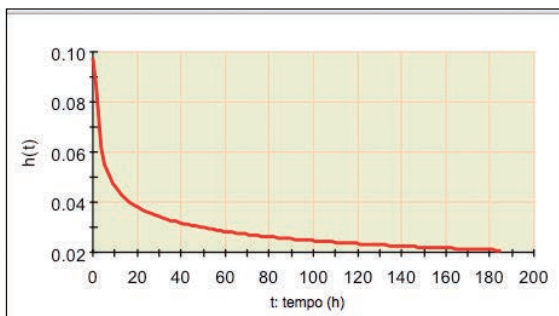


Figura 11. Taxa de falhas em função do tempo

Através do valor obtido para o parâmetro de forma ($\gamma = 0,74$) e também através do comportamento da taxa de falhas mostrado na figura 12, pode-se inferir que este modo de falha está associado à mortalidade infantil de acordo com a curva da banheira. A máquina é um projeto novo e foi colocada em operação há pouco mais de um ano, onde alguns problemas encontrados estão associados a deficiências do projeto inicial.

Basicamente são dois tipos de falhas associadas ao conjunto de alimentação de canecas: a primeira é uma falha sistêmica das canecas trancarem na esteira, por posicionamento incorreto do alimentador de canecas ou por regulagem incorreta durante o setup. Este tipo de falha contribuiu para um elevado número de falhas, visto que ocorre seguidas vezes durante a produção; porém o reparo é rápido, sendo necessário apenas a correção da posição da caneca na mesa de alimentação. A segunda falha é associada às falhas no motor do alimentador de canecas por mau funcionamento e também falhas associadas ao elevador de canecas do alimentador. Essas falhas quando ocorrem requerem um tempo maior de reparo, porém são causas especiais com incidência mais baixa.

Para redução da taxa de falhas deste modo foram propostas três ações:

- Troca do conceito do alimentador de canecas. Eliminar o elevador e substituir por alimentador tipo panela vibratória e alimentação horizontal. Com isso eliminam-se as paradas por canecas trancadas no elevador. Esta ação foi implantada e está em processo de aprovação. Porém, através da realização de testes piloto não ocorreram mais falhas devido a canecas trancadas, pois foi modificado o conceito do alimentador.
- Modificação do sistema de transporte e separação de canecas na entrada da máquina. A modificação visa um ajuste mais fácil e preciso quando ocorre uma troca de diâmetros de canecas. O sistema apresenta muitas paradas devido à imprecisão do mesmo.
- Reprojeto da entrada de canecas na mesa da máquina. O reprojeto contempla a inclusão de uma mesa com indexadora, o que garante maior precisão na posição de parada da mesa a cada ciclo da máquina. O conceito atual causa uma incidência alta de falhas devido à imprecisão de parada do conjunto. Esta ação também foi realizada e a nova mesa indexadora foi colocada em operação. No período logo após instalação observou-se uma queda de eficiência, que é esperada durante o start up de novos projetos, porém obteve-se o ajuste e posicionamento ideal o qual resultou em um aumento de eficiência do equipamento.

Com a realização das ações acima mencionadas obteve-se um ganho médio em torno de 5% na eficiência global do equipamento, onde é possível perceber um crescimento com tendência positiva na eficiência do equipamento mês a mês. Também reduziu-se o tempo de setup devido ao sistema novo ser de mais fácil ajuste.

Nas figuras 12 e 13 estão apresentados o ajuste do papel de probabilidade de Weibull e a

taxa de falhas para a falha na descarga das peças, respectivamente.

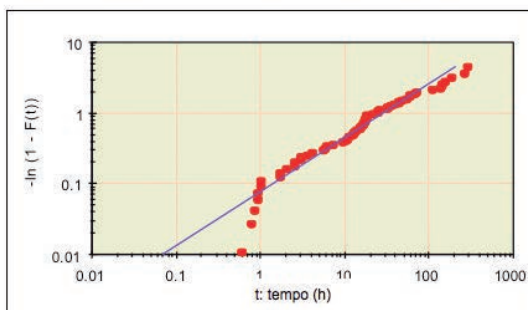


Figura 12. Gráfico de probabilidade normal por Weibull para a falha na descarga de peças

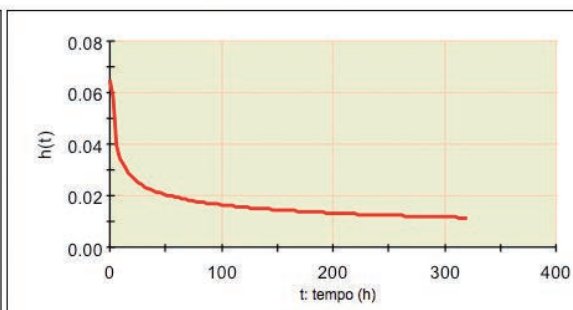


Figura 13. Taxa de falhas ao longo do tempo

Este modo de falha tem uma característica semelhante com o modo de falha anterior, onde percebe-se um tempo médio entre falhas relativamente baixo (36 horas) e com parâmetro de forma $\gamma < 1$, cujas falhas caracterizam-se por encontrarem-se na fase de mortalidade infantil da curva da banheira.

O modo de falha na descarga de peças basicamente está associado a três causas principais que são: falha na retirada do capacitor da mesa, colocação do capacitor em posição incorreta no palete e queda do capacitor durante a transferência da máquina para o palete. Este último possui uma taxa elevada porém um tempo de reparo baixo sendo necessário apenas o reposicionamento da peça no palete ou descarte da peça caso não seja possível reaproveitá-la. A tendência da queda da taxa de falhas com o tempo é condizente com o comportamento da falha, pois imediatamente após algum setup de máquina, esta falha ocorre seguidas vezes. Com a intervenção e realização de ajustes mecânicos no decorrer da produção, consegue-se chegar a uma operação mais estável ao longo do tempo.

Como esta falha está associada basicamente a regulagens e ajustes de posicionamento mecânico recomenda-se manter a intervenção corretiva, pois não chega a acontecer a quebra do equipamento (apenas o reposicionamento da peça) para depois reinicializar a máquina. Para eliminação da falha recomenda-se o reprojeto do sistema de saída de peças e uma garra nova, mais robusta, que não apresente variabilidades na posição de retirada do capacitor da máquina. Com a adoção de tais providências, a peça chegará no palete sempre na mesma posição a cada ciclo.

Nesse caso, a variação da posição do capacitor na saída de peças também está associada ao desgaste prematuro dos mecanismos e folgas existentes entre os conjuntos. Para este modo de falha também aplicam-se as técnicas de TPM com implantação do conceito de manutenção autônoma, ou seja, a falha poderia ser evitada pela intervenção antecipada do mecânico operador da máquina, efetuando uma limpeza, lubrificação e reaperto de todo conjunto, prevenindo assim a falha. Também com uma inspeção mecânica diária evita-se a falha e mantém-se o conjunto com uma repetibilidade maior.

A falha da solda estanho foi aquela que apresentou a maior incidência entre todos os problemas encontrados na máquina em análise. Nas figuras 14 e 15 estão apresentados o papel de probabilidade e a taxa de falhas, respectivamente.

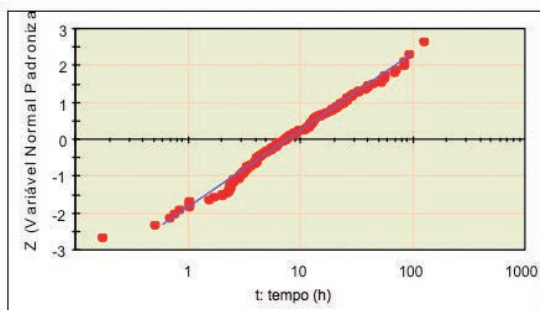


Figura 14. Gráfico de probabilidade normal ajustado pela Lognormal para falha na solda estanho

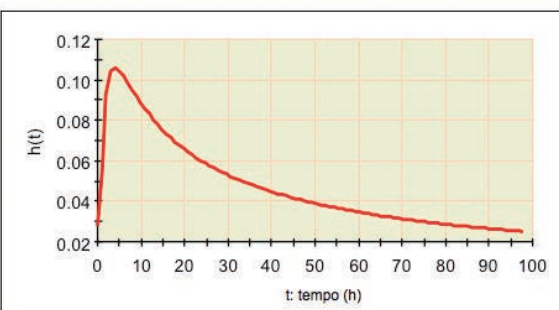


Figura 15. Taxa de falhas em função do tempo

Tal modo de falha obteve um melhor ajuste com o modelo Lognormal, pois foi a única hipótese não rejeitada nos testes de aderência. Os parâmetros encontrados foram $\mu = 2,03$ e o $\sigma = 1,10$. Este modelo é comumente utilizado na modelagem de tempo até reparo em unidades reparáveis para componentes sujeitos ao desgaste, o que se aplica ao modo de falha em questão, apesar do gráfico da taxa de falhas possuir uma característica de mortalidade infantil. Isto se dá pelo fato de que a máquina realiza uma operação de solda a cada ciclo, que é de 4 segundos, o que gera em média 4 a 5 mil operações por turno. Com isso, pode-se considerar que as falhas são relacionadas com a etapa de desgaste, o que está coerente com a realidade, pois a falha basicamente é a ruptura ou perfuração da ponteira de solda devido ao excesso repetitivo de operações. Esta perfuração está associada não só com o tempo de máquina em funcionamento, mas também com a quantidade de peças soldadas, temperatura do ferro de solda, pré-aquecimento da superfície e condição da superfície de solda. De acordo com Kubouchi *et al.* (2012), as falhas dessa natureza são responsáveis por uma quantidade significativas de problemas em capacitores eletrolíticos em alumínio.

Após análise dos fatores mencionados acima, juntamente com o sistema de coleta de dados onde o registro do problema é feito de forma manual e existe uma tolerância de tempo no lançamento, pode-se explicar a diferença obtida entre o tempo médio entre falhas encontrado em torno de 14 horas sendo que na realidade em média troca-se uma ponteira a cada turno de produção (8 horas). A manutenção preventiva não se aplica a esta falha pois o tempo de reparo é o mesmo que a corretiva e também como tempo de reparo é curto e para um total aproveitamento da ponteira de solda, recomenda-se manter a manutenção corretiva associada à inspeção constante da ponteira para não prejudicar a qualidade do produto. A troca da ponteira deve ser feita momentos antes que fure, o que pode ser detectado através da inspeção visual da mesma, pois apresenta modificação de cor e deformação mecânica, com isso obtém-se o aproveitamento total da ponteira a qual possui um custo associado ao produto se trocada antes do final da sua vida útil.

DISCUSSÃO

Após análise dos modos de falha e execução das ações propostas, o equipamento apresentou uma evolução na eficiência global do equipamento, demonstrado através dos indicadores de disponibilidade, desempenho e qualidade. Pode-se perceber na figura 16 uma tendência positiva no indicador de desempenho devido à redução do número de falhas. Não foi apresentado o indicador de qualidade na figura 16, pois não o mesmo apresentou valores menores que 99%.

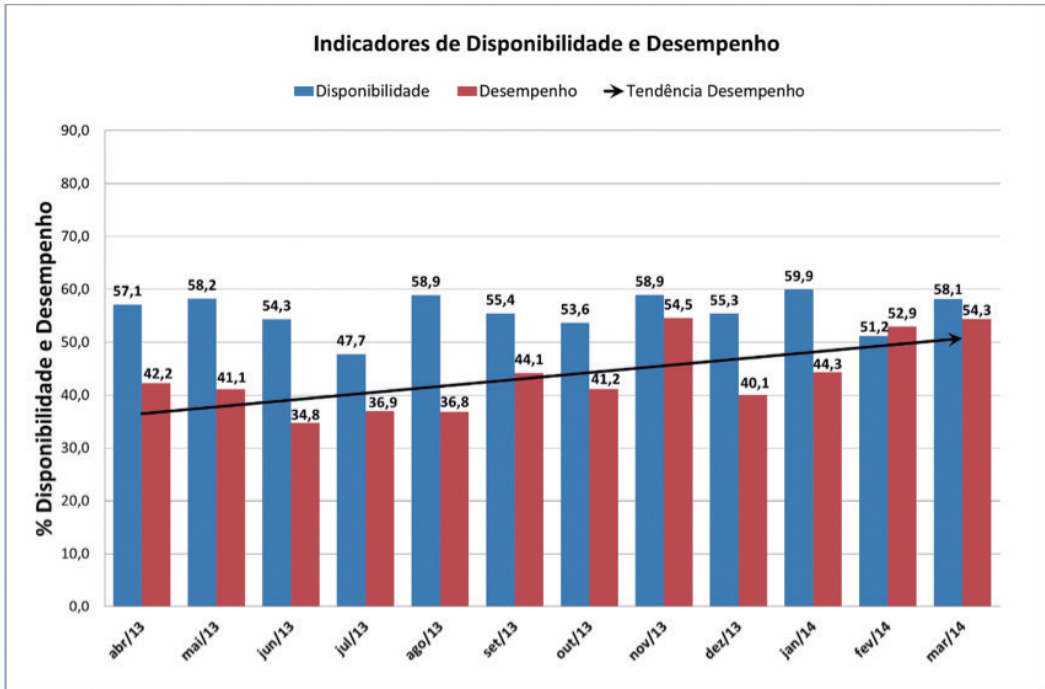


Figura 16. Evolução no indicador de desempenho

Com base nos dados apresentados referentes aos modos de falha analisados, realizou-se uma representação genérica do posicionamento dos mesmos na curva da banheira, conforme pode-se verificar na Figura 17, cujo procedimento de análise também foi adotado por outros autores (Wuttke e Sellitto, 2008).

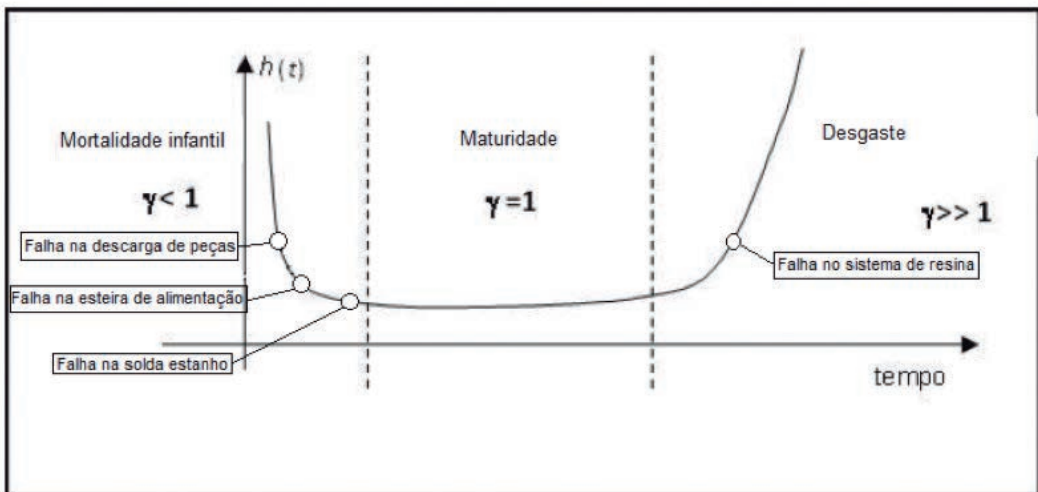


Figura 17. Posição dos modos de falha na curva da banheira

Pode-se afirmar, conforme mostrado na figura 17, que os principais modos de falha da máquina de montagem analisada estão agrupados basicamente na etapa de mortalidade infantil da curva da banheira. O modo de falha na solda estanho como foi explicado anteriormente

devido a particularidades do modo, assim como o modo falha no sistema de resina estão relacionados com a etapa de desgaste.

No caso específico da máquina apresentada, pode-se observar que como foi colocada em operação a curto prazo e o processo de produção é extremamente particular (montagem de capacitores), a maioria dos modos de falha possui característica de mortalidade infantil na curva da banheira com uma taxa de falhas que ao início da produção mostra-se alta reduzindo com o tempo com tendência de estabilização. Isto deve-se ao fato de que a máquina possui um número elevado de setups, exigindo um alto número de ajustes e regulagens de máquina ocasionando inúmeras falhas no início de produção, ao mesmo tempo que o mecânico vai sanando as mesmas até chegar a uma taxa mais constante.

A Tabela 3 mostra um resumo de toda análise onde pode-se verificar qual estratégia de manutenção foi considerada mais adequada conforme cada caso estudado.

Tabela 3. Estratégia de manutenção associada à causa raiz de cada modo de falha

Modo de falha	Causa raiz	Estratégia de manutenção
Falha no sistema de resina	Falha de Projeto	Reprojeto e Manutenção Autônoma.
Falha na esteira de alimentação	Falha de Projeto	Reprojeto e Manutenção Corretiva
Falha na descarga de peças	Falha de Projeto e Falta de Instrução Operacional	Manutenção Autônoma e Corretiva
Falha na solda estanho	Ponteira de solda furada	Manutenção Corretiva

Através da análise da Tabela 3 pode-se evidenciar que a máquina, por ser um projeto novo, apresenta falhas de projeto como causa raiz. Sellitto (2005) comenta que a estratégia da manutenção corretiva vem a ser a mais indicada quando o modo de falha encontra-se na etapa de mortalidade infantil da curva da banheira pois antecipa o fim desta fase, ao reforçar os itens que quebraram ou remover as causas das falhas de origem.

A existência dos modos de falha associados às falhas de projeto e montagem de capacitores (principalmente cerâmicos) já foi apresentada na literatura. Munikoti e Dhar (1988) citam que muitas vezes a falta de ensaios adequados realizados por parte dos fabricantes é uma das principais causas de falhas nesses componentes na fase inicial de uso.

Em projeto de máquinas para processos específicos não é incomum falha de projeto devido à dificuldade de realizar testes preliminares e também a análise inicial durante a elaboração fica suscetível a falhas. A fim de minimizar esses problemas, Confer *et al.* (1991) recomendam o emprego de testes acelerados em componentes eletrônicos, a fim de diagnosticar a ocorrência de problemas. Segundo os autores, ensaios realizados em até 24 horas são capazes de verificar defeitos potenciais, além de monitorar as condições dos processos de fabricação.

CONCLUSÕES

Com as análises realizadas pode-se constatar que para cada modo de falha, conforme sua característica, existe um tipo de procedimento de manutenção que melhor se aplica e obtêm-se melhores resultados. Para o caso estudado verifica-se a necessidade de uma revisão do plano de manutenção e aplicação dos tipos de manutenções sugeridas no decorrer da análise voltada na confiabilidade do equipamento. Também para melhor refinamento e análise dos dados recomenda-se um sistema automatizado de registro de paradas do equipamento. De uma forma geral os objetivos do trabalho foram obtidos como foi demonstrado através do aumento de eficiência do equipamento e da definição da nova estratégia de manutenção para cada modo de falha.

Como já foi mencionado anteriormente o processo de montagem é extremamente específico para o caso, também deve ser levado em consideração o treinamento operacional e qualificação de mão de obra direta utilizada na máquina. Todas estas ações são completamente factíveis de implementação e execução dentro do cenário industrial analisado. Para trabalhos futuros recomenda-se explorar o tema de eficiência e produtividade do equipamento, relacionado com a análise de confiabilidade, pois a redução do número de falhas de um equipamento associado com aumento de confiabilidade é fundamental para obtenção de melhores resultados a nível fabril.

REFERÊNCIAS

- BIROLINI, A. Reliability Engineering - Theory and Practice. Springer, 1999. 253p.
- CONFER, R. *et al.* Use of highly accelerated life test (HALT) to determine reliability of multilayer ceramic capacitors. In: Electronic Components and Technology Conference, 1991. Proceedings., 41st. IEEE, 1991. p. 320-322.
- ELSAYED, E. A. Reliability engineering. Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.
- FOGLIATTO, F.S., and RIBEIRO, J. L. D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. 1. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. São Paulo: Atlas, 1991.
- HUANG, W., and ASKIN, R.G. Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation. Quality and Reliability Engineering International, 2003, vol. 19, no. 3, p. 241-254.
- JARDINE, A.K., and TSANG, A.H. Maintenance, replacement, and reliability: Theory and applications. CRC Press, 2013. 338p.
- KUBOUCHI, T., et al. Controlling technology of Sn whisker in welding of electronics lead. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 2012, vol. 55, no.2.p. 727-733.
- MOUBRAY, J. Reliability-centered maintenance. 2nd. New York: Industrial Press Inc., 2000. 440p.
- LEWIS, E.E. Introduction to Reliability Engineering. Illinois, Jon Wiley & Sons, Inc., 1995.
- LIU, D.D., and SAMPSOM, M.J. Reliability evaluation of base-metal-electrode multilayer ceramic capacitors for potential space applications. Em: *CARTS Proceeding*, 2011. p. 5-63.

MUNIKOTI, R.; and DHAR, P. Highly accelerated life testing (HALT) for multilayer ceramic capacitor qualification. *IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, 1988, vol. 11, no. 4, p. 342-345.

PROCONF98. Confiabilidade de componentes. Software. Copyright©, Maxxi Gestão Empresarial, Porto Alegre, 1998.

SELLITTO, M.A. Formulação estratégica da manutenção industrial com base na confiabilidade dos equipamentos. *Produção*, 2005, vol. 15, no. 1, p. 44-59.

WAEYENBERGH, G., and PINTELON, L. A framework for maintenance concept development. *International journal of production economics*, 2002, vol. 77, no. 3, p. 299-313.

WUTTKE, R.A., and SELLITTO, M.A. Cálculo da disponibilidade e da posição na curva da banheira de uma válvula de processo petroquímico. *Revista Produção Online*, 2008, Florianópolis, SC vol. VIII, no. IV.