

PROPOSTA DE MELHORIA DE UM MÉTODO DE ESTIMAÇÃO DA TAXA DE FALHAS EM INTERCONEXÕES DE SEGUNDO NÍVEL DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Alirio Cavalcanti de Brito

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

alirio@dss.inpe.br

Marcelo Lopes de Oliveira e Souza

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

marcelo@dem.inpe.br

RESUMO

Este artigo apresenta um método de estimação de taxa de falha de interconexão de segundo nível em componentes eletrônicos desenvolvido para ambientes operacionais de telecomunicação. Este artigo, também, propõe uma modificação no referido método de estimação de taxa de falha de interconexão de segundo nível para componentes eletrônicos operando em ambientes operacionais espaciais. No referido método, os resultados de teste de estresse acelerado das interconexões dos componentes são empregados como ponto de partida para as estimativas das taxas de falha. A análise de confiabilidade pode ser baseada em resultados de testes empíricos ou em modelamento. Os resultados de testes empíricos são preferidos para a análise com múltiplos parâmetros, pois, estes são difíceis de serem modelados. Também é mostrado que o empacotamento, as dimensões físicas dos componentes e o substrato onde os componentes são montados têm grande efeito na confiabilidade da interconexão. Esses estudos poderão ser empregados como ponto de partida para desenvolver método de qualificação de montagem superficial de componentes com terminais e sem terminais em sistemas eletrônicos espaciais.

PALAVRAS-CHAVE: junta de solda, taxa de falha, confiabilidade, interconexões

1 Introdução

Este artigo apresenta um método para se estimar a ocorrência de falha de interconexões de segundo nível em componentes eletrônicos desenvolvido por SARKKA (2008) para ambientes de telecomunicação e propõe melhoria e adaptação do método para componentes eletrônicos operando em ambientes espaciais. A proposta visa a melhorar as estimativas obtidas reproduzindo os testes acelerados realizados para o ambiente operacional de telecomunicações e também realizando testes acelerados adaptados para o ambiente espacial em órbitas LEO (Low Earth Orbit) e GEO (Geostationary Earth Orbit).

Entende-se por interconexão de segundo nível a conexão entre os terminais de um componente com o substrato onde ele é montado ou soldado. Neste método os resultados de testes de tensão acelerados são empregados como ponto de partida para estimativas de taxa de falha de interconexões de componentes eletrônicos.

Este artigo é baseado no trabalho de SARKKA (2008) onde ele propõe que a estimativa das falhas de interconexão numa dada condição de tensão seja realizada através de dados de ciclagem térmica obtidos de fabricantes de componentes ou através de dados de laboratórios

de teste, empregando um método de avaliação baseado na classe de empacotamento e de interconexão.

Todos os dados tratados neste artigo dizem respeito ao ambiente operacional de equipamentos eletrônicos de telecomunicações. Pretende-se aproveitar este trabalho e desenvolver a partir dele, método de qualificação de componentes eletro-eletrônicos com e sem terminais em tecnologia de montagem em superfície aplicados em ambientes operacionais espaciais.

2 Considerações de falha em juntas de solda em componentes eletrônicos

A falha da junta de solda é um resultado da fadiga da solda causada pela flutuação ou variação térmica constante. Geralmente é o resultado da incompatibilidade termo-mecânica do sistema de interconexão que induz tensões (estresses) as juntas de solda durante as flutuações térmicas. A tensão inicia a fratura da junta que propaga até a total ruptura e falha da interconexão. As ocorrências das falhas ou a taxa de falha ou de risco aumenta com o tempo. A taxa de falha segue a distribuição de Weibull de 2 parâmetros que é usado neste artigo para descrever o comportamento das falhas de interconexão no decorrer do tempo. Neste artigo a taxa de falha de interconexão com o tempo é denominada de iFIT (interconnection failures in time).

A taxa de falha constante é normalmente esperada ou obtida das falhas intrínsecas de componentes através da MIL-HDBK-217 que é baseada no modelo de distribuição exponencial. A taxa de falha $h(t)$ da distribuição exponencial é escrita da seguinte forma pela Eq. (1):

$$h(t) = \lambda, \quad (1)$$

onde λ é o número de falhas em 10^9 horas (FITs). A taxa de falha da distribuição exponencial apresenta um mesmo nível de falhas dentro de um intervalo de tempo para toda a vida do produto ou componente. Esta distribuição fornece estimativa de longo prazo bastante precisa, mas não é capaz de representar as mudanças na taxa de falha durante o tempo de operação do produto. A Fig. 1 mostra a taxa de falha constante da distribuição exponencial ($\lambda=100$) e a distribuição Weibull de 2 parâmetros (vida característica $\eta=10$ anos e parâmetro de forma $\beta=4$). Os resultados mostram que a taxa de falha da distribuição Weibull excede a taxa de risco da distribuição exponencial após 7,2 anos.

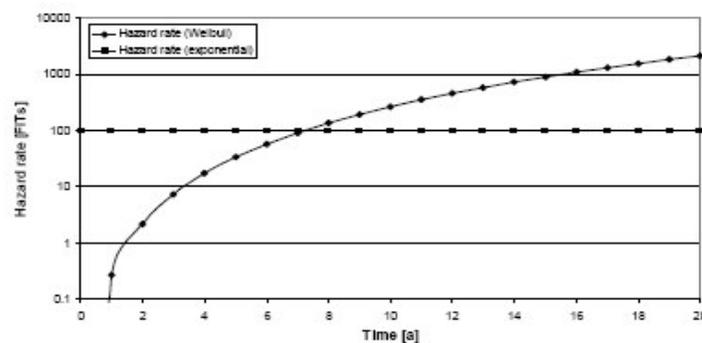


Figura 1- Taxas de falha das distribuições exponencial e Weibull, com $\lambda=100$, $\eta=10$ e $\beta=4$. Fonte: SARKKA (2008)

A função distribuição cumulativa de probabilidade (fdcp) da distribuição exponencial é descrita pela Eq. (2):

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

onde t é o tempo de operação e $F(t)$ é a função de distribuição cumulativa de probabilidade de falha.

Um exemplo de falhas cumulativas ou função distribuição cumulativa (fdc) das distribuições exponenciais e de Weibull de 2 parâmetros é apresentado na Fig. 2. Os resultados mostram que a distribuição exponencial fornece maiores falhas cumulativas durante 2,1 anos e após este tempo a distribuição Weibull fornece valores maiores. Enquanto a distribuição de Weibull tende a refletir mais precisamente a distribuição de falha real de campo, a distribuição exponencial fornece valores muito otimistas após 2,1 anos. A título de comparação, as falhas cumulativas de 99,9% são alcançadas após 16 anos pela distribuição de Weibull e após 770 anos pela distribuição exponencial.

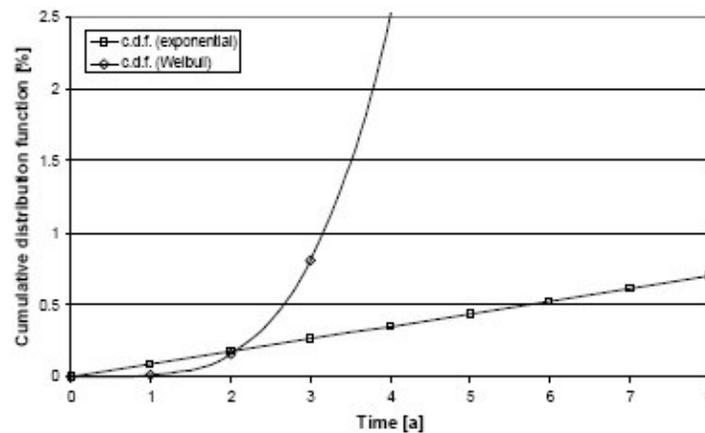


Figura 2- Taxas cumulativas pelas distribuições exponencial e de Weibull com $\beta=4$ e $\lambda=100$.

Fonte: SARKKA (2008)

A Fig. 3 mostra duas curvas diferentes da distribuição Weibull com a mesma vida característica η e para 2 diferentes parâmetros de forma, β . O parâmetro de forma β descreve o quanto que as falhas estão espalhadas dentro da distribuição. Um parâmetro de forma β menor significa um espalhamento maior para as ocorrências de falha significando que há um grande desvio dentro da população sob investigação. Idealmente, produtos ou sistemas similares falhariam no mesmo instante de tempo, resultando num valor infinito para o parâmetro de forma. Então, o parâmetro de forma de Weibull pode ser interpretado como um fator da qualidade do material ou da reprodutibilidade do processo. De acordo com LALL et al. (2004), a previsão de falha depende fortemente do parâmetro de forma da distribuição de Weibull.

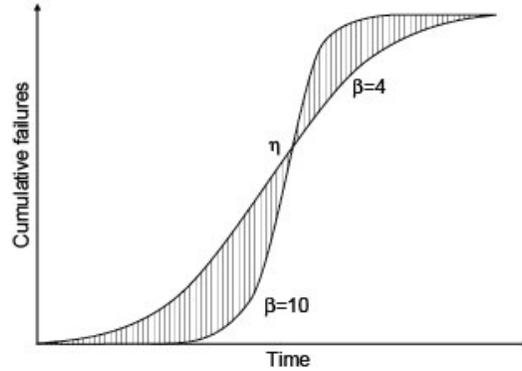


Figura 3- Falhas cumulativas como uma função do tempo pela distribuição de Weibull de 2 parâmetros. Fonte: SARKKA (2008)

O projeto no nível de placa e o ambiente operacional do produto estabelecem o nível de tensão produzido no sistema de junta de solda formado pelo componente, junta de solda, a PWB (Printed Wiring Board) e o ambiente de operação. Todos os fatores de qualidade mencionados anteriormente têm um efeito sobre a expectativa do tempo de vida da junta de solda. Além disso, o tipo de “empacotamento” do componente e as características do teste de tensão acelerado determinam a taxa de falha básica do sistema de interconexão nas condições operacionais. A figura iFIT descreve a taxa de falha específica do empacotamento do componente das juntas de solda nas condições dadas de tensão. A figura iFIT de interconexão $h_{SJ}(t)$ pode ser escrita da seguinte forma pela Eq. (3):

$$iFIT(t) = h_{SJ}(t) = h_{SJB}(t) \pi_D \pi_E \quad (3)$$

onde $h_{SJB}(t)$, π_D e π_E são respectivamente a taxa básica de falha da junta de solda de um componente particular, o fator de tensão devido ao projeto do produto e o fator de tensão devido ao ambiente. Isto mostra que o iFIT não é constante durante o tempo de vida.

De acordo com SARKKA (2008) o tipo de método independente do tempo tem sido usado com taxa de falha básica constante pelo Reliability Information Analysis Center (RIAC). Na prática as tensões experimentadas pelos produtos ou componentes são baseadas, por exemplo, no comportamento histórico termo-mecânico da junta de solda, nos ciclos de potência, no gerenciamento térmico do produto, incluindo as atividades solar e ambiental que afetam o produto ou o componente. Um exemplo dos iFITs estimados pelo método do RIAC é apresentado na Tabela 1. A taxa de falha λ é calculada pela seguinte Eq. (4):

$$\lambda = \lambda_{SJB} \pi_{SJDIT} = \lambda_{SJB} \left(\frac{\Delta T}{44} \right)^{2.26} \quad (4)$$

onde λ_{SJB} , π_{SJDIT} e ΔT são respectivamente a taxa de falha básica da junta de solda, o multiplicador da taxa de falha e a faixa de temperatura da junta de solda durante um ciclo. O ambiente é baseado na referência dado pelo HDPU (1999) citado por SARKKA (2008). Segundo SARKKA (2008) o método do RIAC não leva em consideração a quantidade de ciclos diários para as juntas de solda que realmente afeta a taxa de falha das juntas de solda.

Tabela 1- Taxa de falha de junta de solda pelo Método RIAC (2006).

(As classes de ambiente são pela HDPUG (1999) e os valores de FIT da soldagem manual são fornecidos pela norma MIL-HDBK-217F (1991))

Componente	Taxa básica de falha (/10 ⁹)	Classe ambiental	Multiplicador de Taxa de falha $\pi_{SJD T}$	Taxa de Falha, FIT (/10 ⁹)
Capacitor cerâmico	0,00095	Equip. em operação; $\Delta T=45^{\circ}C$	1,0521	1,0
Capacitor cerâmico	0,00095	Equipamento portátil; $\Delta T=30^{\circ}C$	0,4208	0,4
CI plástico	0,00485	Equipamento em operação; $\Delta T=45^{\circ}C$	1,0521	5,1
CI plástico	0,00485	Equipamento portátil; $\Delta T=30^{\circ}C$	0,4208	2,0
Soldagem manual	0,0026	1,0 a 7,0	1,0 a 20 (Fator de Qualidade)	2,6 a 36,4

Fontes: RIAC (2006); HDPUG (2006) e MIL-HDBK-271F (1991) citados por SARKKA (2008).

Como pode ser visto na Tabela 1, todos os circuitos integrados (CIs) plásticos têm a mesma taxa de falha básica, independente dos resultados dos testes de confiabilidade no nível de placa ou de qualquer outra propriedade. O iFIT igual a 2 para CIs plásticos estimaria uma falha em juntas de solda para 5×10^8 de dispositivos-hora, que na prática pode não ser verdade para todos os diferentes tipos de CIs plásticos. A taxa de falha da soldagem manual segundo MIL-HDBK-217F pode variar entre 2,6 a 36,4 FITs dependendo dos fatores de qualidade e ambientais.

Como mencionado anteriormente, as falhas dos componentes são estimadas somente pelas previsões do MTBF. É necessário e importante considerar também as taxas de falha das interconexões de segundo nível. As falhas de interconexões são previstas nas previsões do MTBF usando as taxas de falha constantes que geralmente estão muito abaixo das taxas de falha usada para os próprios componentes eletrônicos não levando em conta a dependência com o tempo das taxas de falha das interconexões.

SARKKA (2008) propõe um método de estimativa de taxa de falha que leva em consideração a dependência da taxa de falha com o tempo. Após obter os resultados dos testes acelerados, o fator de aceleração é estimado entre as condições de tensões de teste e do produto real. Uma estimativa precisa envolve dividir o fator de aceleração real em sub-partes. A fim de utilizar prontamente os valores calculados para o fator de aceleração real, pontos de referência padrão são estabelecidos para o dispositivo sob teste de tensão acelerado, para as propriedades da PWB e para os níveis de tensão gerados pelo projeto térmico do produto e suas condições operacionais ambientais. As condições TC-3 de teste de tensão de referência foram escolhidas de acordo com a norma IPC-9701A que especifica um ciclo térmico de $-40^{\circ}C$ a $+125^{\circ}C$ com 60 minutos de tempo de ciclo para amostra de empacotamento de componentes soldados em PWB com espessura de 2,35 mm. O projeto referência utiliza as mesmas propriedades da PWB antes mencionado, com $5^{\circ}C$ de variação térmica uma vez por hora. A condição

ambiental de referência foi escolhida para ser empregado num equipamento de telecomunicação de acordo com HDPUG (1999) citado por SARKKA (2008).

3 Taxa de falha básica das juntas de solda

Segundo SARKKA (2008) a taxa de falha básica das juntas de solda representa uma taxa de falha de interconexão do componente no ambiente de tensão de referência padrão. Pode ser baseado em dados empíricos ou pode ser modelado. Os dados de teste empírico são preferidos porque eles fornecem um ponto de partida mais sólido para a análise. A desvantagem com a avaliação baseada puramente em modelos é a grande quantidade de parâmetros que não pode ser considerada, pois são difíceis de serem modelados. Nos testes empíricos esses parâmetros já estão incorporados no espécime de teste e ao mesmo tempo incorporados nos resultados dos testes. Esses parâmetros incluem os efeitos do acabamento superficial da PWB, efeitos dos parâmetros de processo e do projeto dimensional da ilha ou “pad” de solda. A taxa de falha básica também fornece uma medida de referência para estimação da taxa de falha de tecnologias de empacotamento similares.

Na análise, os empacotamentos dos componentes são classificados numa quantidade finita de classes de empacotamentos. Essas classes são tratadas em blocos, tendo somente as medidas do tipo do empacotamento e os resultados de teste de tensão normalizados. Este último representa a quantidade de ciclos térmicos nas condições de teste padrão. Quando essas figuras são conhecidas, a análise utiliza multiplicadores calculados para cada elemento básico de interconexão para se estimar o desempenho no campo, baseado na análise de diferença de tensão. O resultado da análise pode ser usado na estimativa da confiabilidade do produto. Aqui a taxa de falha básica das juntas de solda de um dado componente é função do tipo do empacotamento do componente, das propriedades da PWB, da especificação do teste e da vida característica no teste.

4 Classes de empacotamento em termos de confiabilidade de interconexão

Durante as flutuações de temperatura, a placa de circuito impresso e o componente expandem e contraem em diferentes taxas causando uma diferença global no material. Surgem tensões locais entre o material da solda, o substrato e a placa. Essa diferença de expansão e contração induz uma tensão ao componente, na placa e nas suas interconexões durante os gradientes térmicos. Na medida em que o nível de tensão aumenta gradualmente, o material da solda é geralmente o primeiro a se deformar plasticamente. Com as cargas de choque, o substrato do componente ou a placa podem ser os primeiros a se romper. Quando as juntas de solda se deformam durante as flutuações térmicas, as propriedades mecânicas da solda se degradam gradualmente, resultando definitivamente na falha da junção de solda.

Como os fatores mencionados anteriormente são as razões das falhas das juntas de solda, a única diferença entre os tipos de empacotamentos dos componentes é a dimensão geométrica. Seguindo esta hipótese, SARKKA (2008) estabeleceu três tipos diferentes de componentes como principais classes de empacotamento sob o ponto de vista crítico com relação a confiabilidade de interconexão. As classes são as seguintes:

1. Componentes Leadless:
 - a. Componentes sem terminais (leadless) com substrato de material plástico com interconexões encasteladas e na versão de interconexões na parte de baixo do corpo do componente;

- b. Componentes sem terminais (leadless) com substrato de material cerâmico com interconexões encasteladas;
2. BGA (Ball Pin Grid) em plástico com substrato BT e cerâmico ambas em multicamadas e com bolas de solda
 3. Componentes com encapsulamento plástico com terminais com interconexões encasteladas, por ex: Thin Small Outline Package (TSOP)

5 Efeito da placa de circuito impresso de teste

A placa de circuito impresso é um dos elementos chave no sistema de interconexão. As propriedades do seu material têm grandes efeitos nas taxas de falha das juntas de solda. Segundo SYED (2003) citado por SARKKA (2008) reduzindo a espessura da placa de circuito impresso de 1,6 mm para 0,8 mm a vida característica nos testes acelerados de tensão aumenta em 47%. Essa grande diferença pode ser observada modificando somente um parâmetro da placa de circuito impresso. Portanto, as propriedades das placas de circuito impresso tanto a de teste quanto a do produto final devem ser muito bem conhecidas e levadas em consideração.

SARKKA (2008) empregou como referência uma placa de teste com espessura de 2,35 mm e um CET de 18 ppm/°C submetendo-a a 1000 ciclos térmicos. Por conseguinte e como exemplo, 1400 ciclos térmicos numa placa de 1,6 mm com CET de 16 ppm/°C corresponde ao mesmo nível de tensão que na PWB de referência. A Figura 4 mostra uma representação gráfica da quantidade de ciclos térmicos correspondentes a 1000 ciclos térmicos no teste de referência.

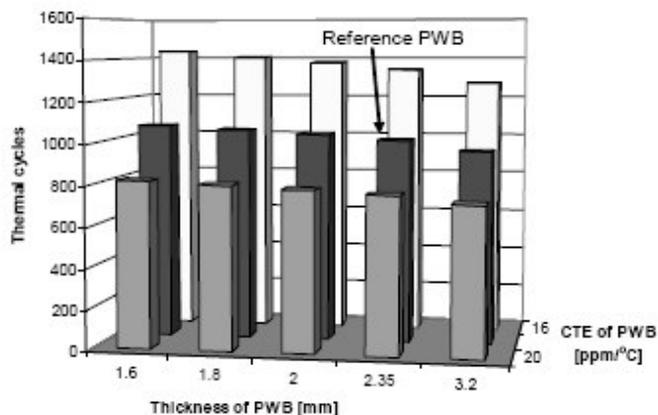


Figura 4- Representação gráfica da quantidade de ciclos térmicos correspondentes a 1000 ciclos térmicos no teste de referência. Fonte: SARKKA (2008)

6 Valores de taxa de falha básica de interconexões de componentes

A taxa de falha de interconexão $h(t)$ é uma expressão da quantidade de falha da junta de solda $F(t)$ dentro de uma população durante um intervalo de tempo. A taxa de falha pode ser calculada usando as equações da distribuição de Weibull de 2 parâmetros. Os valores dos parâmetros de forma de Weibull de 2 e 4 foram usados para componentes “leaded” e “leadless”, respectivamente. Conforme SARKKA (2008) os tipos de componentes escolhidos

foram o BGA, com substrato plástico com terminação na parte de baixo do componente, o cerâmico “leadless”, o BGA cerâmico e o terminal em cobre TSOP (Thin Small Outline Package) devido as suas diferentes características de sistema de interconexão. Os parâmetros dos componentes foram escolhidos para corresponder às vidas características de Weibull de 400, 500, 700, 1000, 2000 e 5000 ciclos térmicos de -40°C a 125°C com 1 hora de duração do ciclo para se ajustarem à lei de crescimento potencial. De acordo com SARKKA et al. (2003), CLECH (2004) e SYED (2004) esses valores são normalmente usados com a tecnologia atual de componente.

As falhas de interconexão dos componentes no tempo (iFIT) nas condições de campo de equipamento de telecomunicações são mostradas na Tabela 2. O η_0 significa a vida característica de um componente particular nas condições de teste padrão. Os resultados de teste de outros dispositivos de teste devem ser convertidos para corresponder ao teste padrão, a menos que as figuras da Tabela 2 não se apliquem. A norma IPC 9701A (2006) recomenda usar 1000 ciclos como limite de qualificação para a faixa de teste de -40°C a +125°C. Os componentes para atender este critério teriam taxas de falha de 1,5 a 41 FITs após 1 ano de serviço, dependendo da classe de empacotamento do componente.

Tabela 2- Resultados de testes de ciclagem térmica nas condições de campo de equipamento de telecomunicação ($\Delta T=45^\circ\text{C}$, média de 40°C) em 1, 3, 7 e 10 anos de 4 tipos de componentes.

(O η_0 é a vida característica (63,2%) nas condições de teste de referência e $\eta_{0,f}$ é a expectativa de vida (63,2%) nas condições no campo de equipamento de telecomunicação.)

Tipo de componente	η_0 [ciclo]	$\eta_{0,f}$ [a]	Taxa de Falha (iFIT) [1/10 ⁹]			
			1º ano	3º ano	7º ano	10º ano
BGA	400	4,6	1100	2,9E+04	3,4E+05	1,1E+06
	500	5,6	480	1,3E+04	1,6E+05	4,8E+05
	700	7,5	150	4000	5,1E+04	1,5E+05
	1000	10	40	1100	1,4E+04	4,0E+04
	2000	19	3,4	91	1200	3400
	5000	44	0,12	3,4	43	130
sem terminal em cerâmica	400	5,8	400	1,1E+04	1,4E+05	4,0E+05
	500	7,1	180	4800	6,3E+04	1,8E+05
	700	9,6	53	1400	1,8E+04	5,3E+04
	1000	13	15	399	5100	1,5E+04
	2000	25	1,0	32	410	1200
	5000	56	0,05	1,0	16	47
Terminação no fundo com substrato plástico	400	4,5	1100	2,9E+04	3,7E+05	1,1E+06
	500	5,5	490	1,3E+04	1,7E+05	4,9E+05
	700	7,4	150	4000	5,1E+04	1,5E+05
	1000	10	41	1100	1,4E+04	4,1E+04
	2000	19	3,4	92	1200	3400
	5000	43	0,13	3,5	44	130
BGA cerâmico	400	5,8	400	1,1E+04	1,4E+05	4,0E+05
	500	7,1	180	4800	6,1E+04	1,8E+05
	700	9,6	53	1400	1,8E+04	5,3E+04
	1000	13	15	400	5100	1,5E+04
	2000	25	1,2	33	420	1200
	5000	56	0,05	1,2	16	45
com terminal em cobre	400	170	7,8	23	55	78
	500	210	5,2	16	37	52
	700	280	2,8	8,5	20	29
	1000	390	1,5	4,5	11	15
	2000	730	0,43	1,3	3,0	4,3
	5000	1700	0,08	0,25	0,57	0,82

Fonte: SARKKA (2008)

Como mostrado na Tabela 2 as taxas de falha dos empacotamentos com terminais de cobre estão abaixo de 100 mesmo após 10 anos de operação onde outros tipos de empacotamento de componentes têm relativamente maiores taxas de falha. Isto significa que as interconexões dos empacotamentos com terminais não são motivos de preocupação do ponto de vista da confiabilidade da junta de solda.

A taxa de falha descreve a ocorrência de falha num dado intervalo de tempo, mas ela, no entanto, não inclui a perspectiva da quantidade de falhas totais. A Tabela 3 a seguir apresenta as falhas cumulativas dos mesmos tipos de empacotamento mostrados na Tabela 2 na classe de equipamento de telecomunicações operando no campo. Observa-se pela Tabela 3 que as falhas cumulativas variam entre 0,0007% até 59% durante os 10 anos de serviço dependendo do tipo de empacotamento, limitando-se aos mesmos 1000 ciclos conforme a IPC 9701A (2006). Desse modo, mesmo atendendo a quantidade requerida de ciclos térmicos não há garantia de uma operação livre de falha nas condições de campo, razão pelas quais ferramentas e métodos sofisticados são necessários para o gerenciamento da junta de solda.

Tabela 3- Falhas cumulativas dos tipos de empacotamento de componente por resultados de ciclagem térmica nas condições no campo de equipamento de telecomunicação ($\Delta T=45^{\circ}C$, média $40^{\circ}C$) após 1, 3, 7 e 10 anos de serviço. Fonte: Sarkka (2008)

Tipo de componente	η_0 [ciclo]	$\eta_{0,f}$ [a]	Falhas cumulativas de componente devido à falha de interconexão			
			1º ano	3º ano	7º ano	10º ano
BGA	400	4,6	0,23	17	100	100
	500	5,6	0,10	8,1	92	100
	700	7,5	0,03	2,6	54	96
	1000	10	0,01	0,70	19	58
	2000	19	7,4E-04	0,05	1,8	7,1
	5000	44	2,7E-05	2,2E-03	0,07	0,27
sem terminal em cerâmica	400	5,8	0,09	6,9	88	100
	500	7,1	0,04	3,2	62	98
	700	9,6	0,01	0,93	24	69
	1000	13	3,2E-03	0,26	76	28
	2000	25	2,6E-04	0,02	0,62	2,6
	5000	56	1,0E-05	8,3E-04	0,02	0,10
Terminação no fundo com substrato plástico	400	4,5	0,23	17	100	100
	500	5,5	0,11	8,4	93	100
	700	7,4	0,03	2,6	54	96
	1000	10	0,01	0,72	19	59
	2000	19	7,4E-04	0,06	1,8	7,2
	5000	43	2,8E-05	2,3E-03	0,07	0,28
BGA cerâmico	400	5,8	0,09	0,8	88	100
	500	7,1	0,04	3,1	61	98
	700	9,6	0,01	0,94	24	69
	1000	13	3,2E-03	0,26	76	28
	2000	25	2,7E-04	0,02	0,64	2,6
	5000	56	1,0E-05	8,1E-04	0,02	0,10
com terminal em cobre	400	170	3,4E-05	3,1E-04	1,7E-03	3,4E-03
	500	210	2,3E-05	2,1E-04	1,1E-03	2,3E-03
	700	280	1,2E-05	1,1E-04	6,1E-04	1,2E-03
	1000	390	6,6E-06	5,9E-05	3,2E-04	6,6E-04
	2000	730	1,9E-06	1,7E-05	9,3E-05	1,9E-04
	5000	1700	3,6E-07	3,2E-06	1,8E-05	3,6E-05

(O η_0 é a vida característica (63,2%) nas condições de teste de referência e o $\eta_{o,f}$ a expectativa de vida nas condições de campo de equipamento de telecomunicação.)

7 Fatores de conversão das condições de operação

Como já mencionado, as tensões induzidas às juntas de solda são geradas por mudanças de temperatura e por tensões mecânicas. Há muitas fontes de variação de temperatura de um produto eletrônico, por exemplo, equipamentos eletrônicos de telecomunicação instalados em ambientes externos podem experimentar variações de temperatura devido ao ambiente (por exemplo, ciclo de temperatura diário), devido à operação do sistema (por exemplo, ciclo de potência) e devido ao sistema de gerenciamento térmico do produto. Todas essas fontes de variação têm níveis de comportamento cíclico e aleatório.

Em vez de usar modelos reais e ao mesmo tempo complexos, níveis equalizados de tensões são usados para descrever as tensões cumulativas induzidas na junta de solda durante os ciclos. A faixa de temperatura equalizada deve ser a mais representativa possível da flutuação real de temperatura. Essas tensões padronizadas por classes de produto podem ser encontradas em várias referências, como por exemplo, HDPUG (High Density Packaging User Group) (1999), MIL-HDBK-271F (1991) citadas por SARKKA (2008) e IPC 9701A (2006).

Como exemplo a vida característica para um componente BGA (Ball Grid Array) em diferentes aplicações foi calculada com o objetivo de se obter os fatores de aceleração entre as diferentes classes operacionais ou ambientais. A Tabela 4 apresenta fatores de aceleração (A.F.) entre equipamento de telecomunicação padrão e outras classes ambientais. Um fator de aceleração (A.F.) elevado significa maior expectativa de tempo de vida. A comparação entre as classes de ambiente operacional é apresentada na Tabela 5. Como pode ser observado, há uma alta aceleração relativa entre equipamento de telecomunicação fixo (no campo) e o portátil.

Tabela 4- Vidas características estimadas η de componente BGA em diferentes condições de operação.

(A.F. representa o fator de aceleração entre diferentes condições de operação.)

Classe de uso padrão	ΔT (°C) (1)	η [a]	Fator de Aceleração (A.F.)
Máquina Servidora em ambiente interno controlado (2)	25	25,1	2,35
	30	19,5	1,82
Equipamento de telecomunicação em situação de pior caso (3)	35	15,6	1,46
	40	12,8	1,2
Equipamento de telecomunicação nas condições de campo (2)	45	10,7	1,0
	50	9,1	0,85
	55	7,9	0,74
	60	6,9	0,64
	65	6,0	0,56
Tráfego/ocioso	70	5,4	0,5

(1)- temperatura média de 45°C e 1 ciclo por dia.

(2)- Fonte HDPUG (1999) citado por SARKKA (2008)

(3)- Fonte IPC-9701 (2006) citado por SARKKA (2008)

Tabela 5- Fator de aceleração (A.F.) entre as tensões geradas em diferentes condições de campo.

Classe de ambiente do dispositivo	Flutuação ΔT	Ciclos por dia	A.F. (t)
Computador de mesa	35°C	2	0,56
Equipamento portátil	30°C	24	0,23
Equipamento em campo	45°C	1	1,00

Fonte: HDPUG (1999) citado por SARKKA (2008)

Os resultados mostram que as condições de tensão dos componentes nos locais de operação têm um efeito marcante sobre a taxa de falha das interconexões dos componentes. Também, as condições operacionais variam de produto para produto de modo que as estimativas de nível geral não são precisas para uma população inteira. Embora, quando as condições de pior caso são conhecidas, as primeiras falhas podem ser preditas com muita precisão. Esta informação é de grande valia durante a fase de manutenção do produto, onde as primeiras falhas podem ser consideradas como o ponto inicial para as suas demais falhas.

8 Fatores de conversão de projeto do produto

As tensões que os componentes experimentam são diferentes quando montados na placa do produto final (real) e na PWB de teste. As tensões induzidas nas juntas de solda de um componente nos testes de tensão acelerados são devidos às características de ciclagem térmica e às propriedades da PWB. Na placa do produto final, as tensões induzidas nas juntas de solda são devidas às características térmicas do produto e as propriedades do material do componente, das juntas de solda e da PWB. De modo que, as diferenças das tensões experimentadas pelas juntas de solda no teste de tensão acelerado e no produto final são baseadas nas diferenças das propriedades mencionadas anteriormente.

As características térmicas são baseadas nas flutuações térmicas diárias e nas flutuações devidas a geração de potência do produto. A flutuação térmica diária é uma parte das tensões ambientais discutida anteriormente. A parte mais importante da flutuação térmica experimentada pelo produto é baseada no gerenciamento térmico dos componentes. Se o calor gerado no componente é efetivamente dissipado, a frequência da flutuação térmica e a sua amplitude são minimizadas. De outro modo, se o projeto térmico for desprezado, os componentes irão experimentar várias flutuações de alta temperatura durante sua operação ao longo de sua vida.

Sob a perspectiva do projeto mecânico há diferença no formato e no volume de solda entre a PWB de teste e a PWB real. O efeito dos diferentes projetos de ilhas de solda e do acabamento superficial da PWB deve ser caracterizado através de ensaio. A precisão das predições de falha de junta de solda melhora se a quantidade de parâmetros alternativos for minimizada. Ênfase adicional deve também ser colocada na qualidade das amostras de componentes. Embora, mesmo que os parâmetros medidos fossem idênticos, segundo SARKKA (2008) citando LALL et al. (2003) eles não reproduziriam a mesma resposta nos testes acelerados.

O efeito de uma ciclagem térmica de baixa amplitude deve também ser cuidadosamente considerado. Uma flutuação térmica de 5°C uma vez por hora acarreta 16 anos de vida característica para os componentes BGA conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6- Tempo característico de Weibull para falha (em anos) para juntas de solda versus diferentes faixas de temperatura ΔT e a quantidade de ciclos por dia (CPD).

ΔT (°C)	Vida característica (a)	Vida característica (a)	Vida característica (a)	Vida característica (a)
	12 CPD	24 CPD	48 CPD	96 CPD
5	22,7	<i>15,9</i>	11,4	8,4
10	14,3	9,9	7,0	5,1
15	9,0	6,1	4,3	3,1
20	6,1	4,1	2,8	2,0

Fonte: SARKKA (2008)

9 Validação do método

O método foi validado por SARKKA (2008) empregando quatro componentes diferentes. Os componentes foram os seguintes:

- BGA com empacotamento plástico de 1356 juntas de solda Sn37Pb63;
- BGA em cerâmica com 552 juntas de solda Sn90Pb10;
- MLF (Micro Lead Frame) com 48 pontos de solda e,
- CLLCC (Ceramic Lead-Less Chip Carrier) com 10 juntas de solda Sn37/Pb63.

O CET da placa de teste foi de 18 ppm/°C mas para o MLF 48 foi de 17 ppm/°C. O teste de tensão acelerado usado foi -40°C a 125°C (ciclagem térmica de 1 hora) exceto para o MLF 48, foi aplicada uma ciclagem térmica de 30 min variando de -55°C a 125°C. As condições de campo foram escolhidas de 50°C de ciclo térmico de uma vez por dia. Todos os componentes foram testados por SARKKA (2008), exceto o componente MLF que foi testado por SYED et al. (2003). Para a modelagem por elementos finitos (FEM) foi empregado o software da ANSYS.

Os resultados são apresentados na Tabela 7 com as informações necessárias. O resultado do ciclo térmico com o PBGA 1356 mostra muito boa correlação entre o método e o resultado do ciclo térmico real. Mas a correlação com as predições feitas com o FEM é baixa.

Tabela 7- Comparação da vida característica η de 4 componentes diferentes feitos com o método desenvolvido por SARKKA

(O $\eta_{\text{método}}$ significa vida característica predita com o modelo pelo método de Sarkka e $\eta_{\text{referência}}$ significa a vida característica nas referências (ciclagem térmica da predição FEM). TC (Thermal Cycling) significa quantidade de ciclos térmicos.)

Componentes	$\eta_{\text{método}}$	$\eta_{\text{referência}}$	Diferença [%]	Método em referência
PBGA 1356	706 TC	752 TC	+6,5	Ciclagem térmica em placa de teste
PBGA 1356	706 TC	1443	+104	Predição com FEM
PBGA 1356	11,5 a	18,5 a	+61	Predição com FEM
CBGA 552	573 TC	789 TC	+37	Ciclagem térmica em placa de teste
CBGA 552	573 TC	346 TC	-39	Predição com FEM
CBGA 552	4,0 a	4,6 a	+15	Predição com FEM
MLF48	5793 TC	5090 TC	-12	Ciclagem térmica (SYED et al, 2003)
CLLCC10	908 TC	735 TC	-24	Ciclagem térmica em placa de teste
CLLCC10	5a	9,5 a	+90	Predição com FEM

Fonte: SARKKA (2008)

A correlação para os componentes CBGA é razoável indo de -39% a +37%. A vida característica η estimada pelo método de SARKKA nas condições de campo é muito próxima da predição realizada através do FEM. Os componentes MLF 48 e os CLLCC10 têm respectivamente -12% e -24% de diferença na vida característica entre os resultados do método e da ciclagem térmica. Entretanto, a diferença para a predição pelo FEM é relativamente elevada.

10 Proposta de modificação do presente método

A preocupação com a confiabilidade das juntas de solda em montagens superficiais sempre esteve presente desde o início do seu emprego, devido principalmente a diferença que possa existir entre os coeficientes de expansão térmica (CET) dos substratos e dos materiais de empacotamento. Com o emprego de substratos orgânicos de baixo custo com relação aos de cerâmicos e outros substratos, principalmente os circuitos impressos de base de fibra de vidro-epoxi FR-4, a busca por métodos estimativos da confiabilidade de juntas de solda tem se intensificado. Esses esforços têm sido no sentido de desenvolver métodos de estimativa mais precisos e adaptados ao ambiente de interesse e que incorpore modelos de mecanismo de falha da junta de solda mais próximo possível do real.

As diferenças entre os valores de vidas características obtidas com o método de SARKKA e com teste de ciclagem térmica apresentadas na Tabela 2 são animadoras, mas insuficientes para a aplicação espacial. Mesmo sendo um dos menos hostis, enquanto em operação no espaço, o ambiente espacial exige menores taxas de falha pela razão da impossibilidade ou dificuldade de reparo dos seus sistemas.

Por esses motivos é válido investigar mais as condições em que as falhas nas juntas de solda ocorrem no ambiente espacial, caracterizar melhor o perfil térmico das montagens eletrônicas e procurar um modelo que melhor expresse o comportamento de fadiga da junta de solda.

A predição da confiabilidade de uma junta de solda para uma determinada aplicação requer vários parâmetros: geometria da junta de solda, material, processos e condições operacionais. Quando alguns ou muitos desses parâmetros não estão disponíveis, de acordo com Perkins e

Sitaraman (2009), a prática comum é considerar parâmetros baseados na experiência passada ou usar parâmetros baseados em aplicações similares. Em geral, para se avaliar a confiabilidade das juntas de solda são requeridos os seguintes dados:

- Tipo de empacotamento do dispositivo eletrônico para a aplicação pretendida;
- Propriedades e equações constitutivas do modelo de fadiga dos materiais;
- Histórico de temperatura e passos do processo de fabricação dos empacotamentos;
- Perfil de carregamento das montagens do empacotamento eletrônico na placa de circuito impresso;
- Dados de “lay-out” dos empacotamentos vizinhos posicionados na placa;
- Perfil de carregamento proveniente de excursões térmicas, perfil de vibração, perfil de ciclagem de potência, etc.
- Métricas de confiabilidade requeridas incluindo o percentual de falha para a aplicação pretendida.

11 Conclusão

O presente artigo apresentou o método desenvolvido por Sarkka de estimativa de taxa de falha empregando dados de teste de vida acelerada. O método emprega uma abordagem específica do tipo de empacotamento do componente em vez de uma abordagem genérica convencional.

O objetivo do método é empregar multiplicadores a fim de estimar as taxas de falha das interconexões dos componentes em dadas condições operacionais. Isto é possível estimando as condições de tensão ou estresse no espécime de teste e no ambiente do produto real. O método emprega resultados de teste de confiabilidade de interconexão de segundo nível para estimativas de ocorrência de falha de um tipo de empacotamento específico. Além disso, os resultados podem ser usados para estimativas de confiabilidade de empacotamento de componente.

O método, também, possibilita a comparação de diversas tecnologias de empacotamento em termos de confiabilidade de interconexão no ambiente operacional do produto final. Uma vantagem comparada com a abordagem totalmente modelada (por exemplo, simulação por FEM) é a utilização dos dados de teste acelerado de tensão (estresse). Esta abordagem empírica inclui o efeito de parâmetros embutidos ou escondidos de difícil modelagem e que estão prontamente disponíveis ou incluídos nos dados de teste de tensão.

Foi mostrado que o tipo de empacotamento tem um efeito sobre a estimativa da taxa de falha das interconexões do componente. A mesma vida característica no teste fornece estimativas divergentes de ocorrência de falha. Também, devem ser considerados os efeitos da PWB de teste e as condições de tensão ou estresse para que a precisão das predições não seja prejudicada.

O mérito do método apresentado é permitir a escolha correta de um determinado componente numa dada condição de operação, evitando, assim o “over-design” ou o “over-specification”.

Foi proposto que o método desenvolvido por Sarkka seja empregado e adaptado às condições operacionais dos sistemas espaciais obtendo assim menores margens de diferença de estimativa de taxa de falha entre o seu método e o teste de ciclagem térmica.

Método semelhante deve ser desenvolvido para componentes eletrônicos com diversos tipos de empacotamento empregados em sistemas espaciais e em diversas condições operacionais espaciais.

REFERÊNCIAS

1. CLECH, J.P. **Lead-Free and Mixed assembly Solder Joint Reliability Trends**. Proc. IPC Printed Circuit EXPO, SEMMA Council APEX, Designers Summit: S28.3.1–14. 2004
Disponível em: < http://www.jpclench.com/Clech_APEX2004_Paper.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2009.
2. ASSOCIATION CONNECTING ELECTRONICS INDUSTRIES IPC-9701A. **Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments**. 2006. Standard by IPC, Bannockburn, IL.
3. LALL, P. et al. **Model for BGA and CSP Reliability in Automotive Underhood Applications**. Proc IEEE Electronic Components and Technology Conference: 189–196. 2003. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1216276&isnumber=27358>>. Acesso em: 20 jun. 2009.
4. LALL, P. et al. **Model for BGA and SCP Reliability in Automotive Underhood Applications**. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 27(3): 585–593. 2004. Disponível em: < <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01331556>>. Acesso em: 20 jun. 2009.
5. Department of Defense. **MIL-HDBK-217F: Reliability Prediction of Electronic Equipment**. Military Handbook. 1991. Washington DC, USA
6. SYED, A. KANG, W. **Board Level Assembly and Reliability Considerations for QFN Type Packages**. Proc. SMTA International. 2003. Disponível em:< http://www.solder.net/PDFs/QFN_Assembly_Reliability.pdf>. Acesso em: 03 mai 2009.
7. SYED, A. **Accumulated Creep Strain and Energy Density Based Thermal Fatigue Life Prediction Models for SnAgCu Solder Joints**. Proc. IEEE Electronic Components and Technology Conference: 737–746. 2004. Disponível em:<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1319419&isnumber=29234>>. Acesso em: 27 abr. 2009.
8. SÄRKKÄ, J. **A Novel Method For Hazard Rate Estimates of the Second Level Interconnections In Infrastructure Electronics**. 2008. Disponível em:< <http://herkules.oulu.fi/isbn9789514288197/isbn9789514288197.pdf>> . Acesso em: 30 abr. 2009.
9. PERKINS A. E.; SITARAMAN S. K. **Solder joint reliability prediction for multiple environments**. New York. Springer, 2009. 192 pags. ISBN 978-0-387-79393-1