

O envelhecimento de capacitores em circuitos eletrônicos

Capacitor ageing in electronic devices

Richard Brandão Nogueira Vital¹; Tatiane Melo Vital²

Resumo

A determinação do momento no qual um componente eletrônico para de operar conforme requisitos previamente estabelecidos é uma tarefa que deve ser levada em consideração desde o início da concepção de um sistema. Entretanto, com o emprego de diferentes tecnologias que podem funcionar sob diversas condições ambientais, a escolha dos componentes durante a fase de projeto torna-se cada vez mais complexa. Neste trabalho são analisados os efeitos que o envelhecimento de capacitores pode provocar na operação de alguns circuitos eletrônicos. Para isso, são analisados conceitos de confiabilidade, processos e mecanismos de degradação. Adicionalmente, são apresentados alguns modelos matemáticos que podem auxiliar em atividades de manutenção e substituição de componentes em processo de degradação. A abordagem apresentada faz uma comparação nos efeitos produzidos por componentes íntegros frente ao comportamento provocado por componentes em processo de envelhecimento.

Palavras-chave: Capacitores. Componentes Eletrônicos. Confiabilidade. Envelhecimento.

Abstract

The moment when an electronic component doesn't work like requirements, previously established is a task that need to be considered since began of a system design. However, the use of different technologies, operating under several environmental conditions, makes a component choice a complex step in system design. This paper analyzes the effects that ageing phenomenon of capacitors may introduce in electronic devices operation. For this reason, reliability concepts, processes and mechanism of degradation are presented. Additionally, some mathematical models are presented to assist maintenance activities or component replacement. The presented approach compares the operability of intact and aged components.

Keywords: Capacitor. Electronic component. Reliability. Ageing.

¹ Graduado e Mestre em Engenharia Elétrica, Instituto Nacional de Telecomunicações; richardvital@gmail.com

² Graduada e Mestre em Engenharia Elétrica, Instituto Nacional de Telecomunicações; tati.mv7@gmail.com

Introdução

A busca por melhores práticas na fabricação e utilização de sistemas eletrônicos tem promovido uma procura incessante por componentes com maior confiabilidade e menor custo (LING; LE; LEW, 2001), (LEAHY; OSTER, 2012). Esses aspectos, muita vezes são conflitantes, uma vez que quanto mais confiável é um componente maior será seu custo. Enquanto empresas de áreas com maior poder econômico como Aeroespacial, Nuclear, Médica, Petroquímica e Energia Elétrica buscam produtos com baixo índice de falhas, outros mercados como o de bens de consumo empregam componentes com menor custo para aumentar a competitividade. Dependendo do grau de segurança exigido por uma determinada atividade econômica, o processo de qualificação de componentes pode-se tornar complexo e exigir a aplicação de muitos recursos. Entretanto, diferentes condições operacionais e ambientais podem levar a um aumento na taxa de falhas do componente durante o período inicialmente qualificado pelo fabricante.

Neste cenário, torna-se de extrema importância a análise periódica do comportamento dos circuitos eletrônicos, de forma a identificar mecanismos que possam reduzir sua confiabilidade. Essa análise pode definir processos de manutenção preventiva ou até mesmo a substituição de itens quando tal necessidade for identificada.

Esse trabalho demonstra aspectos relacionados ao envelhecimento de alguns tipos de capacitores e seus efeitos em circuitos comuns como fontes de alimentação, osciladores e filtros.

Para atingir o objetivo apresentado o trabalho foi dividido em seis seções. A segunda seção apresenta noções sobre confiabilidade e taxa de falhas em componentes eletrônicos. Na terceira seção, são apresentadas características e um modelo equivalente simplificado para estudo do comportamento dos capacitores. Na quarta seção, são apresentadas condições que podem contribuir para o envelhecimento de alguns tipos de

capacitores e, ainda, alguns modelos que descrevem a variação da capacitância em função do tempo. Já na quinta seção, são analisados os efeitos que o envelhecimento de capacitores pode provocar em alguns tipos de circuitos eletrônicos, como filtros e fontes de alimentação. Por fim, na sexta seção, são apresentadas as principais conclusões obtidas durante o desenvolvimento da pesquisa apresentada.

Confiabilidade

A ocorrência de falhas operacionais em sistemas eletrônicos pode gerar perdas que muitas vezes não são aceitáveis, dependendo da complexidade da atividade que os mesmos estão inseridos. Neste contexto, a Engenharia de Confiabilidade busca fornecer às atividades humanas sistemas eletrônicos que atendam as funções especificadas em um determinado projeto, durante um período de operação pré-definido (BONETTI, 2009). Porém, a confiabilidade de um sistema eletrônico também se relaciona com as condições ambientais onde o mesmo opera.

Muitos componentes eletrônicos costumam ter suas características de falhas comparadas a chamada “Curva da Banheira” (WANG; MA; BLAABJERG, 2012), (MAKDESSI; SARI; VENET, 2013). Neste modelo podem-se observar três fases distintas (VEIGA, 2010).

A primeira fase é a de “Falhas precoces” ou “Mortalidade Infantil” que pode estar relacionada a falhas nos processos de fabricação, projeto ou instalação. As falhas podem ser reduzidas nesse período inicial com a implementação de controle efetivo na qualidade dos produtos.

A segunda fase é a de “Falhas Casuais” ou “Vida Útil”, onde um componente apresenta taxa de falhas constantes. Nesta fase, as falhas apresentam comportamento aleatório, o que dificulta prever o instante de falha. Entretanto, neste período o projetista pode estimar alternativas para a ocorrência de determinadas falhas.

A terceira fase é a de “Desgaste” ou “Envelhecimento”, na qual um componente perde de forma crescente a capacidade de executar suas funções. Um modelo muito utilizado para se caracterizar a taxa de falhas $h(t)$ de um sistema é a distribuição de Weibull que consiste de três variáveis, como mostrado na Equação (1) (PERISSE; VENET; ROJAT, 2004), (BONETTI, 2009).

, para $t > 0$

$$h(t) = \frac{\beta \times t^{(\beta-1)}}{\eta^\beta} \quad (1)$$

Onde β é o parâmetro de forma da distribuição, η é o parâmetro de escala e t é o tempo de vida do componente.

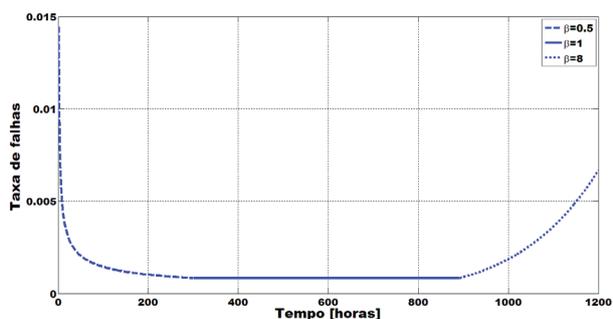
A Figura 1 ilustra uma curva hipotética seguindo o modelo da banheira para um valor de η igual a 1200 e diferentes valores de β de pendendo da fase em qual o componente se encontrar. A Tabela 1 mostra o relacionamento entre a fase de vida de um componente eletrônico e o valor de β .

Tabela 1 - Valores de β para diferentes fases de vida do componente modelado na Figura 1

Fase	Valor de β
Mortalidade Infantil	0,5
Vida útil	1
Envelhecimento	8

Fonte: os próprios autores

Figura 1 - Taxa de falhas seguindo o modelo da “Curva da banheira”



Fonte: os próprios autores

A função de confiabilidade $R(t)$ é definida como a probabilidade de operação sem falha dentro de um determinado intervalo t e relaciona-se com a função de distribuição de falhas cumulativa $F(t)$, como mostrado na Equação (2) (HARTZELL; SILVA; SHEA, 2010).

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

Capacitores

Os capacitores são componentes destinados ao armazenamento de cargas elétricas, cuja propriedade física capacitância está diretamente relacionada às propriedades dos eletrodos e meio dielétrico (KEMET, 2013). Dessa forma, a capacitância é diretamente proporcional à carga armazenada Q e inversamente proporcional à diferença de potencial elétrico entre os eletrodos ΔV , como mostrado na Equação (3).

$$C = \frac{Q}{\Delta V} \quad (3)$$

Para executar diferentes tipos de função como acoplamento, filtragem e armazenamento de energia, o mercado de componentes eletrônicos fornece diferentes modelos de capacitores construídos a partir da modificação de características físicas dos eletrodos e do meio dielétrico.

A capacitância de um capacitor plano está relacionada a área dos eletrodos A , distância entre eletrodos d e a constante dielétrica do material existente entre os eletrodos ϵ , seguindo a Equação (4) (ASHEN, 1987), (KEMET, 2013).

$$C = \frac{\epsilon \times A}{d} \quad (4)$$

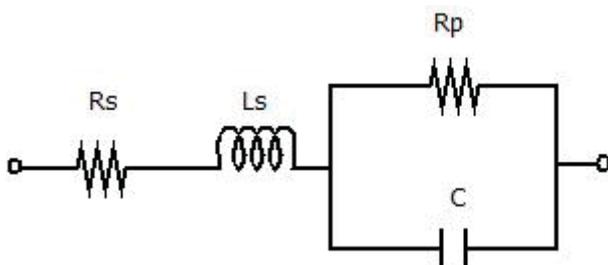
Para os capacitores cilíndricos, a capacitância está relacionada ao comprimento dos eletrodos cilíndricos L , a constante dielétrica do material existente entre os eletrodos ϵ e as distâncias entre os eletrodos externos e internos em função do centro do cilindro (parâmetros b e a) (ASHEN, 1987). A

Equação (5) mostra o relacionamento das grandezas citadas.

$$C = \frac{2\pi \times \varepsilon \times L}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (5)$$

Os diversos tipos de capacitores existentes no mercado (cerâmicos, eletrolíticos de alumínio, de Tântalo ou Poliéster), geralmente são modelados pela combinação de componentes resistivas, capacitivas e indutivas. Um modelo simplificado para os capacitores é mostrado na Figura 2 (IMAM, 2007), (KEMET, 2013), (WYNNE, 2002). Neste modelo, a resistência equivalente em série, R_s , é decorrente do processo de fabricação do capacitor e das propriedades físicas do eletrólito. Essa resistência está relacionada à fuga de corrente que ocorre nos eletrodos dos capacitores e pode variar de acordo com as condições na qual o componente opera (CELAYA et al., 2011), (PETERCHEV; SANDERS, 2004). Já a resistência equivalente em paralelo, R_p , está relacionada à capacidade de isolamento do dielétrico utilizado no componente. A capacitância C relaciona-se à capacidade de armazenamento de energia do componente, sendo proporcional à área do dielétrico e inversamente proporcional à sua espessura (KEMET, 2013). A indutância equivalente em série, L_s , é consequência do processo de construção do componente e é proporcional à distância dos eletrodos em relação à base do componente (ARCHAMBEAULT, 2009).

Figura 2 - Circuito equivalente simplificado de um capacitor



Fonte: os próprios autores

Envelhecimento de capacitores

O envelhecimento pode ser caracterizado como uma alteração gradual das características operacionais de um componente eletrônico. Geralmente, espera-se que esse comportamento seja mais freqüente após o tempo de vida útil ou período qualificado informado pelo fabricante. Entretanto, alguns fatores podem acelerar o processo de envelhecimento até mesmo dentro do período qualificado. Existem dois tipos de processo que podem acelerar o envelhecimento de componentes eletrônicos: fatores externos e internos (IAEA, 2004), (ERTL et al., 2006). Dentre os processos externos destacam-se: temperatura ambiente; umidade local; fontes geradoras de radiações ionizantes (alfa, beta, gama e Raios-X) e não-ionizantes (Radiofrequência, Ultra-vermelha); condição química atmosférica (presença de gases e partículas sólidas em suspensão). Já os fatores internos que podem acelerar o envelhecimento são: aquecimento decorrente de cargas elétricas ou mecânicas; estresse mecânico; oscilações de energia; vibrações.

O envelhecimento dos capacitores costuma gerar três tipos de fenômenos (CELAYA et al., 2011), (IMAM, 2007): evaporação do eletrólito, corrente de fuga e aumento da pressão interna.

Com exceção das aplicações nucleares, onde a radiação pode ser o agente que pode provocar o envelhecimento precoce dos capacitores, nos outros setores econômicos, o fator que tem maior influência é a temperatura de operação (KURZWEIL; FRENZEL, GALLAY, 2005), (LEITE et al., 2007), (KREZANIK et al., 2009), (CELAYA et al., 2011), (WANG; MA; BLAABJERG, 2012).

Os estudos sobre envelhecimento de um capacitor demonstram que o volume do dielétrico é reduzido a cada intervalo de observação. Essa redução provoca um aumento da Resistência Equivalente em Série e decréscimo no valor da capacitância (LEITE et al., 2007), (CELAYA et al., 2011), (ALAM et al., 2011).

Diversos estudos têm demonstrado que o envelhecimento de capacitores está relacionado com

a família que o mesmo pertence como será discutido a seguir. Atualmente, não existe um modelo único que possa representar todos os tipos de capacitor e, ainda, alguns não foram investigados devido à relação entre impacto das falhas e custo de pesquisa.

Um modelo utilizado por diferentes fabricantes de capacitores cerâmicos é mostrado na Equação (6) (SYFER, 2011).

$$C = C_1 \left[1 - \frac{\log_{10} t}{100} \right] \quad (6)$$

Neste modelo, a capacitância C_t em um determinado momento t relaciona-se com um valor de capacitância inicial C_1 e uma constante de envelhecimento k .

Os capacitores eletrolíticos de alumínio são componentes susceptíveis à degradação por envelhecimento (WYNNE, 2002), (LEITE et al., 2007), (MAKDESSI; SARI; VENET, 2013). Os principais indícios de envelhecimento são o decréscimo da capacitância e acréscimo da resistência equivalente em série.

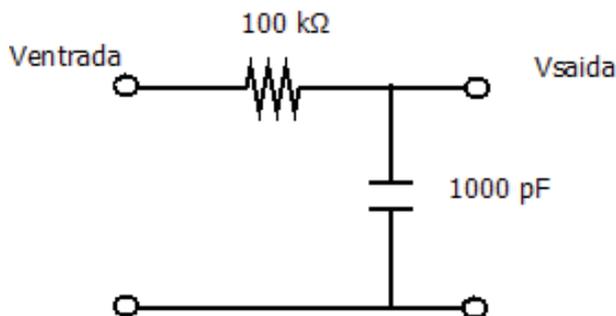
A Equação (7) mostra um modelo empírico que descreve a variação da capacitância $\Delta C(t)$ em função do tempo de operação (CELAYA et al., 2011). Esse modelo, obtido a partir de um algoritmo baseado no Filtro de Kalman, é formado pelo parâmetro de forma α e de escala β . O parâmetro α é a taxa de envelhecimento do capacitor eletrolítico e β está relacionado ao valor inicial da capacitância.

$$\Delta C(t) = e^{\alpha t} + \beta \quad (7)$$

Comportamento de circuitos em processo de envelhecimento

Uma aplicação comum dos capacitores cerâmicos é em circuitos que funcionam como filtro. Para avaliar o efeito do envelhecimento sobre essa família de capacitores, foi realizada uma simulação de um filtro passa baixas de primeira ordem como mostrado na Figura 3.

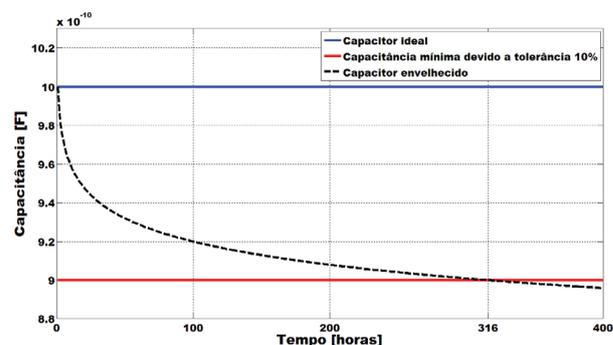
Figura 3 - Filtro passa baixas de primeira ordem



Fonte: os próprios autores

Dessa forma, foram geradas as curvas de magnitude de resposta em frequência para diferentes valores de capacitância (valor ideal ou nominal, limites inferiores e superiores em função da tolerância e capacitor cerâmico comercial após 5 anos de operação em processo de envelhecimento). Nesta simulação, o modelo de capacitor analisado é o VKO102KCQCD0KR (VISHAY, 2012). O capacitor cerâmico analisado possui dielétrico classificado como CLASSE 2, capacitância nominal é de 1000 pF, com tolerância de $\pm 10\%$, tensão de operação máxima de 300 V_{AC} e constante de envelhecimento de -4% por década. A variação temporal da capacitância durante o envelhecimento pode ser observado na Figura 4, mostrando que a capacitância do componente torna-se menor que o mínimo definido pelo valor de tolerância em aproximadamente 316 horas.

Figura 4 - Variação temporal da capacitância de um capacitor cerâmico em processo de envelhecimento



Fonte: os próprios autores

A fim de avaliar o efeito da variação da capacitância no comportamento do filtro passa baixas, foi calculado e analisado o valor da frequência crítica que corresponde ao ponto de -3dB da magnitude da resposta em frequência, como mostrado na Figura 5 (ALZUWAYED, 2014). A Equação (8) mostra que o cálculo aproximado da frequência crítica $f_{CRÍTICA}$ para o filtro passa baixas de primeira ordem mostrado na Figura 3 depende dos valores de resistência R e capacitância C .

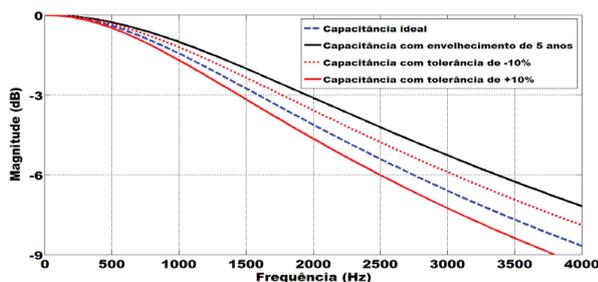
$$f_{CRÍTICA} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (8)$$

Ao se analisar os valores de capacitância e a frequência crítica para diferentes tempos de operação em relação ao valor nominal, verifica-se que a capacitância estimada supera a tolerância do componente e, interfere de forma considerável no desempenho do filtro.

Os dados mostrados na Figura 5 indicam que um capacitor cerâmico apresenta redução de capacitância durante o tempo de operação promovendo uma variação crescente na frequência crítica de um filtro passa baixas de primeira ordem.

Como o objetivo do trabalho é mostrar as variações no comportamento do circuito em função do envelhecimento do capacitor, foi analisada a magnitude da resposta em frequência e desprezada a variação devido à tolerância do resistor. A Figura 5 mostra a resposta do filtro para o valor nominal de 1000 pF, capacitâncias de 900 pF e 1100 pF que são os valores limites de acordo com a tolerância do capacitor e 814,13 pF que é a capacitância devido ao envelhecimento após 5 anos de operação utilizando o modelo da Equação (6).

Figura 5 - Magnitude da Resposta em frequência do filtro passa baixas de primeira ordem



Fonte: os próprios autores

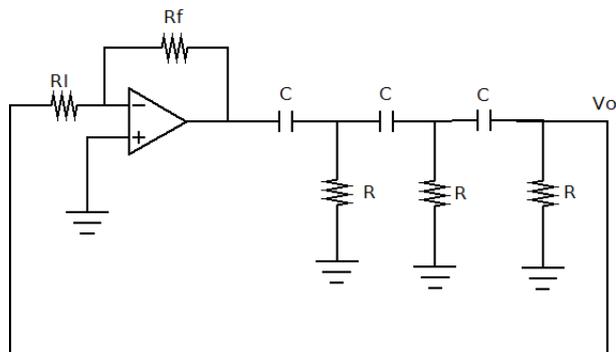
Outra família de circuitos eletrônicos que sofrem influência direta quanto à variação no valor de capacitância são os osciladores. Esses circuitos são muito utilizados em sistemas de comunicação que geram sinais de referência para a sincronização entre transmissores e receptores.

A fim de verificar o efeito do envelhecimento de um capacitor, analisou-se um circuito oscilador com Amplificador Operacional e blocos de realimentação resistiva e capacitiva, que gera um sinal senoidal cuja frequência de oscilação f_0 é dado pela Equação (9) (SALVADO; MARTINS, 2010).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}} \quad (9)$$

A Figura 6 mostra o circuito oscilador empregando o capacitor cujo modelo de envelhecimento é mostrado na Figura 4 e o resistor de 100 kΩ. A escolha de componentes com os mesmos valores de capacitância e resistência baseou-se na redução da complexidade dos cálculos e maior clareza na identificação do efeito relacionado ao envelhecimento. Neste sentido, o efeito considerado para os componentes foi o mesmo.

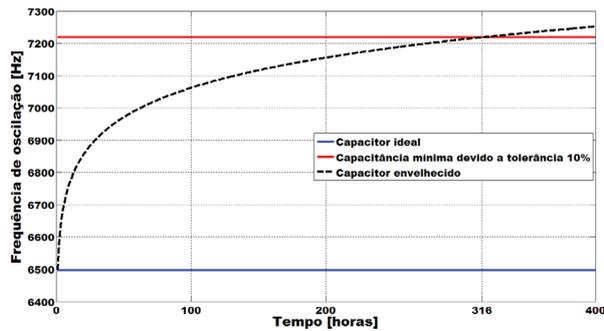
Figura 6 - Circuito Oscilador com Amplificador Operacional e blocos de realimentação resistiva e capacitiva



Fonte: os próprios autores

A Figura 7 apresenta uma comparação da frequência obtida em função de valores nominais de capacitância, tolerados e em processo de envelhecimento.

Figura 7 - Evolução da frequência de oscilação em um Circuito Oscilador em função do envelhecimento dos capacitores



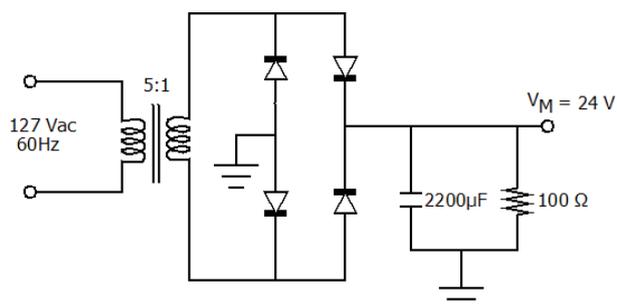
Fonte: os próprios autores

Os capacitores eletrolíticos geralmente são utilizados como filtro em fontes de alimentação (PYAKURYAL; MATIN, 2013). Tomando como exemplo o circuito da Figura 8, verifica-se que o parâmetro dependente da operação do capacitor eletrolítico é a tensão de ondulação $V_{ONDULAÇÃO}$ conforme mostrado na Equação (10) a seguir:

$$V_{ONDULAÇÃO} = \frac{V_M}{2fR_L C} \quad (10)$$

onde f é a frequência da rede de distribuição de energia elétrica, V_M é a tensão de saída presente no secundário do transformador subtraída das contribuições dos diodos em polarização direta, R_L é a carga alimentada pela fonte de alimentação e C é a capacitância do capacitor que trabalha como filtro.

Figura 8 - Circuito retificador em ponte com filtro capacitivo

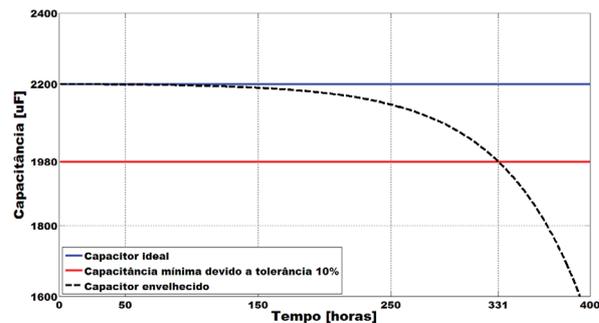


Fonte: os próprios autores

Para se quantificar e avaliar o efeito do envelhecimento de capacitores eletrolíticos de alumínio, foi utilizado o modelo de envelhecimento descrito pela Equação (7) com os valores dos parâmetros α e β de 0,0163 e -0,5653, respectivamente (CELAYA et al., 2011).

A Figura 9 compara os valores simulados para o circuito mostrado na Figura 8, empregando o modelo descrito na Equação (10) para um capacitor de 2200 μF com tolerância de $\pm 10\%$, considerando resistência de carga de 100 Ω e alimentados por uma rede 127 VAC / 60 Hz. Para tornar a simulação mais próxima do comportamento real de um circuito desse tipo, foi considerada uma queda de tensão em cada diodo com valor de 0,7 V.

Figura 9 - Variação temporal da capacitância no circuito retificador em ponte com filtro capacitivo



Os resultados obtidos demonstram que após um determinado período a capacitância do componente supera o valor da tolerância exigindo uma análise do impacto que a variação pode provocar no desempenho do circuito eletrônico. Na análise apresentada não foi descrita a influência da resistência equivalente em série, uma vez que o objetivo principal deste trabalho é analisar o efeito do envelhecimento apenas sobre o valor de capacitância.

Conclusões

A partir da variação dos valores de capacitância apresentados neste trabalho, verifica-se que o envelhecimento de diferentes tipos de capacitores

podem isoladamente influenciar no desempenho de alguns circuitos eletrônicos. A determinação do momento exato para substituição de um determinado capacitor é dependente de inúmeras variáveis (KULKARNI et al., 2013). Portanto, é necessário estabelecer um programa de monitoração periódica dos sistemas eletrônicos para se identificar mecanismos de envelhecimento de componentes dentro de um período previamente qualificado junto ao fabricante.

Para ilustrar a aplicação desta monitoração, considerou-se uma fonte de alimentação que utilize o circuito mostrado na Figura 8. A fonte foi avaliada considerando a operação nas condições que definiram os valores dos parâmetros $\alpha = 0,0163$ e $\beta = -0,5653$ e, ainda, que a tensão de ondulação máxima permitida foi definida em função do valor mínimo da capacitância definida pela tolerância do componente. Pelo comportamento mostrado na Figura 9 é fácil concluir que o componente precisa ser substituído após aproximadamente 331 horas de operação nas condições apresentadas. Entretanto, essa conclusão de tempo aproximado só é possível a partir da aplicação de modelagem a partir de dados operacionais obtidos de forma experimental e periódica, para outras condições de operação um novo estudo deve ser realizado para se definir o tempo da substituição (WYNNE, 2002), (PARLER, 2004), (KURZWEIL; FRENZEL; GALLAY, 2005), (MAKDESSI; SARI; VENET, 2013). Existem diversas abordagens para modelagem do efeito de envelhecimento, entretanto, para se obter melhores conclusões, torna-se necessário estender o estudo para outros tipos de componentes que ainda não foram estudados devido a fatores econômicos (impacto de falhas, aplicação) e área de atuação (necessidade de componentes com determinado nível de confiabilidade).

Verifica-se, ainda, que os processos de monitoração devem ser definidos de acordo com a confiabilidade exigida, dentro de um custo considerado aceitável pelo projetista ou usuário do sistema eletrônico.

Dependendo das condições de operação, outros tipos de componentes eletrônicos também podem ter seu tempo de vida útil abreviado e, a combinação do envelhecimento de diversos componentes pode provocar efeitos indesejáveis. Dessa forma, torna-se necessário identificar quais componentes podem ter o processo de envelhecimento acelerado de acordo com as condições operacionais e ambientais na qual um dispositivo eletrônico está inserido. O objetivo principal dessa avaliação e identificação é melhorar as condições operacionais do sistema, quando possível, ou ainda, possibilitar o planejamento para substituir o item antes que uma falha indesejada possa ocorrer.

A pesquisa apresentada pode ser desenvolvida em outros temas, como:

- Avaliação dos efeitos do envelhecimento dos capacitores combinando modelos de capacitância e resistência equivalente em série;
- Análise da confiabilidade dos circuitos utilizando Redes Bayesianas e de Petri (KULKARNI et al., 2012), (LI; LIN, 2012), (ALZBUTAS; IESMANTAS, 2014);
- Combinação de efeitos de envelhecimento considerando outros componentes além dos capacitores, por exemplo, relés, indutores, circuitos integrados, diodos e cabos.

Referências

- ALAM, M. A.; AZARIAN, M. H., OSTERMAN, M.; PECHT, M. Prognostics of Failures in Embedded Planar Capacitors using Model-Based and Data-Driven Approaches. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 22, p. 1293-1304, 2011.
- ALZBUTAS, R.; IESMANTAS, T. Application of Bayesian Methods for Age-Dependent Reliability Analysis. *Quality Reliability Engineering*, v. 30 n.1 p.121-132, 2014.
- ALZUWAYED, A. M. K. A survey of active filters. *International Journal of Inventive Engineering and Sciences*, v. 2, n. 6, p. 9-13, 2014.

- ARCHAMBEAULT, B. Decoupling capacitor connection inductance. *IEEE EMCS Newsletter*, 2009
- ASHEN, R. A. Basic electrotechnology. *Technology & Engineering*, 1. ed., p.1-188, 1987.
- BONETTI, L. V. *Dados de garantia e análise qualitativa de especialistas como base para estudo de confiabilidade no setor de máquinas agrícolas*. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CELAYA, J. R.; KULKARNI, C.; BISWAS, G.; SAHA, S.; GOEBEL, K. A model-based prognostics methodology for electrolytic capacitors based on electrical overstress accelerated aging. *Annual Conference of Prognostics and Health Management Society*, 2011.
- ERTL, H.; EDELMOSER, K.; ZACH, F. C.; KOLAR, J. W. A Novel Method for On-Line Monitoring and Managing of Electrolytic Capacitors of DC Voltage Link PWM Converters. *International Conference on Power Conversion and Intelligent Motion*, 2006.
- HARTZELL, A. L.; SILVA, M. G.; SHEA, H. MEMS Reliability. *Springer*, v.36, p. 1-291, 2011.
- International Atomic Energy Agency. Management of life cycle and ageing at nuclear power plants: Improved I&C maintenance, 2004.
- IMAM, A. M. *Condition monitoring of electrolytic capacitors for power electronics applications*. 2007. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Georgia Institute of Technology.
- KEMET CORP. Introduction to Capacitor Technologies. Application Note, South Carolina, 2013.
- KREZANIK, P.; MARTIN, C.; VENET, P.; CLERC, G.; ROJAT, G.; ZITOUNI, Y. Constant power cycling for accelerated ageing of supercapacitors. In: European Conference on Power Electronics and Applications, 13th, Barcelona, Spain, p.1-10, 2009.
- KULKARNI, C. S.; CELAYA, J. R.; GOEBEL, K.; BISWAS, G. Bayesian Framework Approach for Prognostic Studies in Electrolytic Capacitor under Thermal Overstress Conditions. *Annual Conference of the Prognostics and Health Management*, 2012.
- KULKARNI, C. S.; BISWAS, G.; CELAYA, J. R.; GOEBEL, K. Physics Based Degradation Models for Electrolytic Capacitor Prognostics under Thermal Overstress Conditions. *International Journal of Prognostics and Health Management*, v. 4, p. 1-17, 2013.
- KURZWEIL, P.; FRENZEL, B.; GALLAY, R. Capacitance Characterization Methods and Ageing Behavior of Supercapacitors. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON DOUBLE LAYER CAPACITORS, 15th, Deerfield Beach, USA, p.1-14, 2005.
- LEAHY, K.; OSTER, G. The evolution of electronic systems technology and its impact on methods of innovation. *Global Business Review*, v. 5, p. 8-15, 2012.
- LEITE, A. V. T.; TEIXEIRA, H. J. A. ; CARDOSO, A. J. M.; ARAÚJO, R. M. E. A simple ESR identification methodology for Electrolytic capacitors condition monitoring. In: CONGRESS ON CONDITION MONITORING AND DIAGNOSTIC ENGINEERING MANAGEMENT, 20th, Faro, Portugal, p. 75-84, 2007.
- LI, Y; LIN, Y. A Multistate physics model of component degradation based on stochastic petri nets and simulation. *IEEE Transaction on Reliability*, v. 61, n. 4, p. 921-931, 2012.
- LING, S. X.; LE, B. Q.; LEW, A. L. Evaluating and implementing commercial processes for producing reliable, cost-effective miniaturized space electronics. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, v. 22, n. 2, p. 144-154, 2001.
- MAKDESSI, M.; SARI, A.; VENET, P. Health monitoring of DC link capacitors. *Chemical Engineering Transactions*, v. 33, p. 1105-1110, 2013.
- PARLER, S. G. Deriving Life Multipliers for Electrolytic Capacitors. *IEEE Power Electronics Society Newsletter*, v. 16, n. 1, p. 11-12, 2004.

PERISSE, F.; VENET, P. ROJAT, G. Reliability determination of aluminum electrolytic capacitors by the mean of various methods: application to the protection system of the LHC. *Microelectronics Reliability*, v. 44, p. 1757-1762, 2004.

PETERCHEV, A.; SANDERS, S. R. Design of Ceramic-Capacitor VRM's with Estimated Load Current Feedforward. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 35th, Aachen, Germany, p. 4325-4332, 2004.

PYAKURYAL, S.; MATIN, M. Filter Design for AC to DC Converter. *International Refereed Journal of Engineering and Science*, v. 2, n. 6, p. 42-49, 2013.

SALVADO, J.; MARTINS, G. Osciladores RC Sinusoidais com AmpOps: Simulação e Realização Prática em Laboratório. *IEEE – RITA – Revista Iberoamericana de Tecnologias de Aprendizagem*, v. 5, n.1, p. 1-12, 2010.

SYFER Capacitance Ageing of Ceramic Capacitors. Application Note, United Kingdom, 2011.

VEIGA, F. *Provimento de tolerância a faltas em Redes-em-Chip*. Universidade do Vale do Itajaí, 2010.

VISHAY Inc. *AC Line Rated Ceramic Disc Capacitors Class X1, 440 V_{AC} Class Y2, 300 V_{AC}*. Application Note, Philadelphia, USA, 2014.

WANG, H.; MA, K.; BLAABJERG, F. Design for Reliability of Power Electronic Systems. ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 38th, Montreal, Canada, 2012.

WYNNE, E. M. *Determination of the shelf life of aluminum electrolytic capacitors*. University of North Texas, 2002.

Recebido em 1 Julho, 2014 – Received on July 1, 2014
Aceito em 19 Agosto, 2015 – Accepted on August 19, 2015