



## Estudo de degradação de capacitores eletrolíticos sob estresse térmico

### Degradation study of electrolytic capacitors under thermal stress

Natanael Costa Matias<sup>1</sup>, Alessandro Goedel<sup>2</sup>, Marcelo Favoretto Castoldi<sup>3</sup>

#### RESUMO

O monitoramento de sistemas que utilizam conversores estáticos tornou-se essencial para assegurar confiabilidade e segurança à aplicação. Dentre os componentes com maior índice de falha estão os capacitores eletrolíticos, devido ao seu principal mecanismo de degradação que se dá através da evaporação do eletrólito. O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo matemático que descreva a variação da resistência série equivalente do capacitor eletrolítico em função do tempo. O processo de degradação utilizado foi por meio de estresse térmico. Ainda, foi utilizado o método de mínimos quadrados para obtenção dos parâmetros de ajuste para um modelo matemático presente na literatura e para um segundo modelo, sendo este uma modificação do primeiro. Os resultados mostram que o modelo ajustado possui melhor adaptação aos dados, permitindo a implementação de uma estratégia de monitoramento e estimativa de vida útil para capacitores eletrolíticos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem do capacitor eletrolítico; estresse térmico; método de mínimos quadrados.

#### ABSTRACT

The monitoring of systems employing static converters has become essential to ensure reliability and safety in the application. Among the components with the highest failure rate are electrolytic capacitors due to their primary degradation mechanism, which occurs through the evaporation of the electrolyte. The objective of this study is to present a mathematical model that describes the variation of the equivalent series resistance of the electrolytic capacitor over time. The degradation process used involved thermal stress. Additionally, the least squares method was employed to obtain adjustment parameters for a mathematical model found in the literature and for a second model, which is a modification of the first one. The results demonstrate that the adjusted model better fits the data, enabling the implementation of a monitoring strategy and an estimation of the service life for electrolytic capacitors.

**KEYWORDS:** Electrolytic capacitors modeling; thermal stress; least square method.

#### INTRODUÇÃO

Com a crescente demanda por dispositivos mais eficientes e confiáveis, os conversores eletrônicos de potência adquiriram grande importância em aplicações tecnológicas, como sistemas de energia renováveis, veículos elétricos, aviãoica, dentre outros, por atenderem às exigências energéticas necessárias a estes sistemas (KULKARNI, 2013). Devido à sua capacidade de conversão e controle de elevadas taxas de fluxo de potência elétrica, estes conversores tornaram-se partes

<sup>1</sup> Bolsista do(a) Fundação Araucária. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: lobato@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <https://lattes.cnpq.br/6246231211818685>.

<sup>2</sup> Docente no Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedel@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1920650157123774>.

<sup>3</sup> Docente no Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6178029384175205>.



críticas em sistemas como os mencionados anteriormente, fazendo com que seu monitoramento seja essencial para assegurar durabilidade, confiabilidade e segurança à aplicação (SUNDARARAJAN et al., 2020).

Em eletrônica de potência, os componentes eletrônicos que apresentam as mais elevadas taxas de falhas são as chaves de potência, geralmente MOSFET's e IGBT's, capacitores eletrolíticos, circuitos integrados para modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), e opto-acopladores (GOODMAN et al., 2005). Por conta do baixo índice de confiabilidade e elevada importância para o correto funcionamento da topologia, os capacitores eletrolíticos configuram um elemento essencial para monitoramento e estimativa de vida útil, pois são os componentes mais vulneráveis à degradação e com maior índice de falhas (KULKARNI, 2013; ELIAS, 2018).

Os tipos de falhas em capacitores eletrolíticos podem ser categorizados em dois tipos, i) falhas catastróficas, nas quais o capacitor perde completamente sua funcionalidade por meio de um curto-circuito em seus terminais ou por um circuito aberto nos mesmos, provocado por um elevado nível de estresse térmico, elétrico ou mecânico (SUNDARARAJAN et al., 2020); ii) e falhas por desgaste, que configura o principal responsável por mau funcionamento nos dispositivos, e sua principal consequência é, de forma gradual, provocar alterações em dois importantes parâmetros elétricos do capacitor, a capacitância e a resistência série equivalente (*Equivalent Series Resistance - ESR*)(GUPTA et al., 2018). Deste modo, o monitoramento deste componente é de grande relevância no que concerne a manutenção preventiva, e a redução dos riscos de parada repentina de ativos críticos da indústria (ELIAS, 2018).

A principal forma de desgaste que os capacitores eletrolíticos sofrem se dá pela evaporação do eletrólito, acarretando na diminuição da capacitância e aumento na *ESR*, caracterizando estes parâmetros como bons candidatos ao monitoramento do estado atual e estimativa de tempo de vida para estes capacitores (GASPERI, 1996). Diversos modelos matemáticos, tanto físicos como orientado por dados, são apresentados na literatura para descrever e analisar o comportamento de mudança nas características elétricas dos capacitores sob diferentes métodos de envelhecimento acelerado (GUPTA et al., 2018).

Neste trabalho um conjunto de seis capacitores foram submetidos a envelhecimento por meio de estresse térmico e por ciclos de carga/descarga, enquanto os valores de capacitância e *ESR* foram medidos em intervalos regulares. Foi utilizado o método de mínimos quadrados para calcular os parâmetros do modelo linear inverso para o valor de *ESR*, e de um modelo modificado para cálculo da mesma grandeza, onde observou-se que o segundo modelo apresentou melhor ajuste aos dados obtidos durante o processo de degradação.

## MODELO DE DEGRADAÇÃO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS

Ao considerar o capacitor eletrolítico submetido a uma temperatura ambiente elevada e constante ou a repetidos ciclos de carga/descarga, que causam elevação na temperatura em seu núcleo, um aumento na taxa de evaporação do eletrólito ocorre, provocando diminuição da capacitância e aumento da *ESR* (KULKARNI, 2013). Os dados referentes a estes efeitos foram utilizados em um modelo empírico baseado na lei de Arrhenius onde se considera o efeito da temperatura (GASPERI,



1996). Este modelo é conhecido como linear inverso e é expresso na Equação (1).

$$\frac{1}{ESR(t)} = \frac{1}{ESR_0} \left[ 1 - k \cdot t \cdot e^{\left( -\frac{4700}{T + 273} \right)} \right] \quad (1)$$

em que  $ESR(t)$  é o valor de ESR no tempo  $t$ ,  $ESR_0$  é o valor de ESR inicial,  $T$  é a temperatura de operação,  $k$  é um fator constante que depende da forma e da construção do capacitor.

Por se tratar essencialmente de uma função linear, o modelo dado pela Equação (1) pode ter o parâmetro  $k$  obtido pelo método de mínimos quadrados para se obter o melhor ajuste do modelo aos dados (LAHYANI et al., 1998).

## MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS

Quando um gráfico de dispersão entre duas variáveis apresenta um comportamento que se assemelha a uma certa função conhecida (linear, exponencial, etc), assume-se que este conjunto de dados pode ser representado pela linha de regressão expressa por tal função, que resume a relação entre as duas variáveis (MOORE; MCCABE; CRAIG, 1996). Ao se determinar a função de ajuste, são calculados valores de parâmetros que são responsáveis por minimizar o erro entre os dados reais e os valores obtidos pelo modelo.

Para o caso da Equação (1), tem-se uma função linear do tipo dado na Equação (2), em que é necessário calcular os parâmetros de ajuste  $a$  e  $b$  de acordo com as equações em 3.

$$y = ax + b \quad (2)$$

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}; \quad b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n x_i \right)^2}, \quad (3)$$

onde  $x_i$  e  $y_i$  são os valores correspondentes do conjunto de dados, e  $n$  é número de amostras.

Comparando o modelo na Equação (1) com a Equação (2), têm-se que:

$$y = \frac{1}{ESR(t)} \quad (4)$$

$$x = t \quad (5)$$

$$a = -\frac{k e^{\left( -\frac{4700}{T + 273} \right)}}{ESR_0} \quad (6)$$

$$b = \frac{1}{ESR_0} \quad (7)$$

em que o parâmetro  $k$  pode ser determinado pela Equação (6). O valor de  $b$ , como definido na Equação (7), produz um ajuste não otimizado, onde propõe-se o calculo desse valor através da



equação dada em (3), e o modelo de degradação do capacitor passa a ser representado pela Equação (8).

$$\frac{1}{ESR(t)} = b - \frac{k \cdot t \cdot e^{\left(-\frac{4700}{T+273}\right)}}{ESR_0} \quad (8)$$

Um importante fator para se determinar o quão eficiente foi o ajuste do modelo aos dados é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que assume valores entre 0 e 1 (quanto mais próximo de 1, melhor foi o ajuste) e pode ser calculado por meio da Equação (9), onde  $\hat{y}$  é o valor calculado de  $y$  e  $\bar{y}$  é o valor médio.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (9)$$

## METODOLOGIA

Seis capacitores eletrolíticos de 470  $\mu$ F/400 V foram submetidos à estresse térmico em um forno elétrico a temperatura de 85 °C, sendo esta a temperatura nominal indicada pelo fabricante dos capacitores, operando como filtro na saída de um retificador de meia onda ligado a uma carga resistiva, provocando assim, um estresse pelo processo de carga/descarga do capacitor. Este procedimento foi realizado com o intuito de acelerar o processo de envelhecimento dos capacitores, em que a cada 15 dias um capacitor foi retirado do forno, totalizando 90 dias (2.160 horas) para o último capacitor (ELIAS, 2018). A combinação dos efeitos de temperatura ambiente elevada e ciclos de carga e descarga acentua o aumento da taxa de evaporação do eletrólito, o que acarreta numa diminuição da capacitância e aumento no valor da ESR, diminuindo a vida útil do dispositivo (KULKARNI, 2013).

Durante o período de confinamento no forno, os parâmetros de capacitância e ESR foram medidos por sensores de efeito Hall a cada 15 minutos e armazenados via firmware desenvolvido no software Matlab, onde as Equações em 10 e 11 foram implementadas.

$$P_{\max} = \frac{V^2}{4ESR} \quad (10)$$

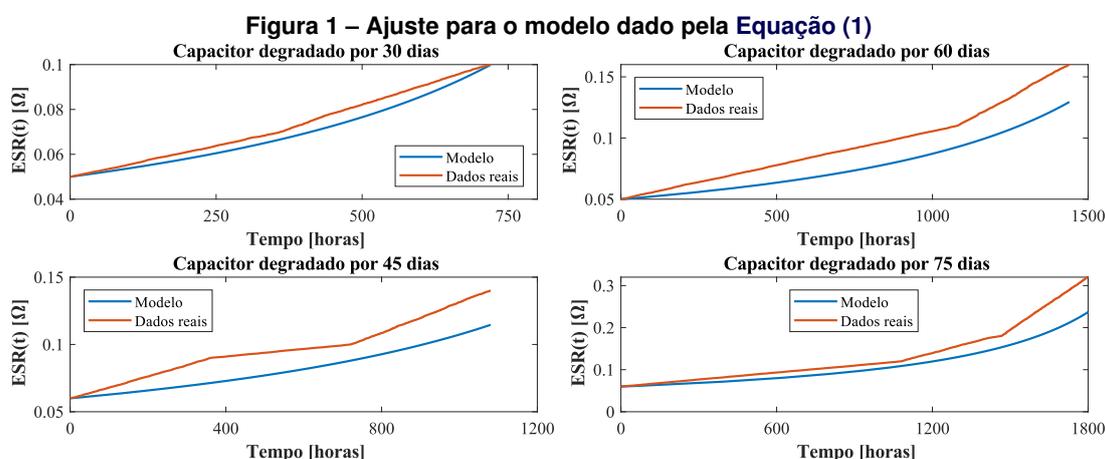
$$C = \frac{2P_{\text{in}}}{f_r(V_{\max}^2 - V_{\min}^2)}, \quad (11)$$

em que  $f_r$  é a frequência da rede,  $P_{\max}$  é a potência máxima do capacitor,  $P_{\text{in}}$  é a potência consumida pela carga,  $V$  é a tensão média sobre o capacitor, e  $V_{\max}$  e  $V_{\min}$  são os valores máximo e mínimo, respectivamente, referentes à ondulação de tensão sobre o capacitor. Estas equações são obtidas à partir da análise do circuito retificador de meia onda, utilizado neste procedimento. Ao término do processo de envelhecimento dos capacitores, os dados de ESR foram tratados pelo método de mínimos quadrados aplicado às Equações (1) e (8) implementado no software Matlab.

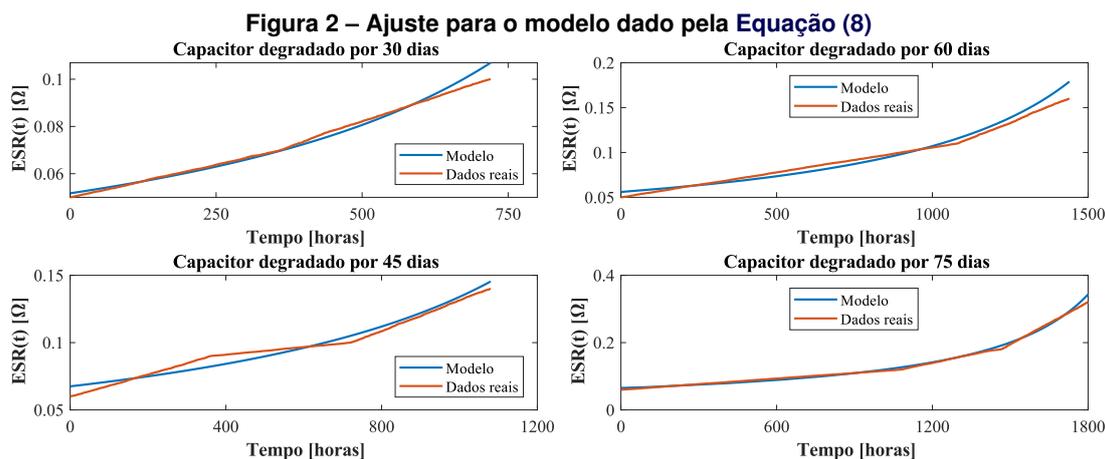


## RESULTADOS

Todos os cálculos foram implementados no software Matlab, onde os gráficos das Figuras 1 a 2 foram gerados, nos quais são apresentadas as curvas de mudança no valor de  $ESR$  para diferentes períodos de envelhecimento e a respectiva curva definida pelas funções de ajuste. Percebe-se, por meio da Figura 1, que o ajuste realizado por meio do modelo dado pela Equação (1) não fica em conformidade com os dados de degradação da  $ESR$  obtidos experimentalmente. Isso se dá devido ao fato de o parâmetro  $b$  ser definido empiricamente e não pela devida implementação do método de mínimos quadrados. Um ajuste mais preciso pode ser observado na Figura 2, onde os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), apresentados na Tabela 1, mostram a validade do ajuste feito pela Equação (8).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## CONCLUSÃO

Neste trabalho foi utilizado o método de mínimos quadrados para ajuste de parâmetros de um modelo matemático que descreve a variação da  $ESR$  em função do tempo em capacitores eletrolíticos sob estresse térmico, e foi proposta uma abordagem diferente visando melhorar o



ajuste do modelo aos dados. Os resultados apontam que o modelo modificado apresentou melhor coeficiente de determinação, sendo próximo de um para todos os casos, demonstrando que houve boa concordância entre o modelo e os dados experimentais, caracterizando o modelo como aplicável para uma estratégia de monitoramento de capacitores eletrolíticos capaz de determinar o estado atual e a vida útil remanescente do dispositivo.

Tabela 1 – Valores de  $R^2$  para os modelos adotados.

Tempo [horas (dias)]	$R^2$ : Modelo Eq. (1)	$R^2$ : Modelo Eq. (8)
360 (30)	0,94	0,99
720 (45)	0,37	0,96
1080 (60)	0,62	0,97
1440 (75)	0,78	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece à Fundação Araucária pela bolsa de iniciação científica, ao Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) UTFPR pelos recursos disponibilizados e aos colegas e orientadores pelo apoio.

## REFERÊNCIAS

- ELIAS, Igor da Silva. **ESTUDO DE FALHAS EM CAPACITORES DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Cornélio Procópio, 2018.
- GASPERI, Michael L. Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors. **IEEE**, 1996.
- GOODMAN, D.L. et al. Practical application of PHM/prognostics to COTS power converters. **2005 IEEE Aerospace Conference**, IEEE, p. 3573–3578, 2005.
- GUPTA, Anunay et al. A REVIEW OF DEGRADATION BEHAVIOR AND MODELING OF CAPACITORS. **International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems**, 2018.
- KULKARNI, Chetan S. **A physics-based degradation modeling framework for diagnostic and prognostic studies in electrolytic capacitors**. 2013. Tese (Doutorado) – Vanderbilt University.
- LAHYANI, Amine et al. Failure Prediction of Electrolytic Capacitors During Operation of a Switchmode Power Supply. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 13, n. 6, p. 1199–1207, 1998.
- MOORE, David S.; MCCABE, George P.; CRAIG, Bruce A. **Introduction to the Introduction to the Practice of Statistics**. 6. ed. New York: W. H. Freeman e Company, 1996.
- SUNDARARAJAN, Prasanth et al. Condition Monitoring of DC-Link Capacitors Using Goertzel Algorithm for Failure Precursor Parameter and Temperature Estimation. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS**, v. 35, n. 6, p. 6386–6396, 2020.