

Previsão da vida útil de medidores eletrônicos de energia (*smart metering*) por análise estatística de resultados de ensaios acelerados

Celso Pinto Saraiva¹, Rafael de Biasi Ribeiro¹, Bruno Agra Kleinau², Marcílio André Félix Feitosa³, Vicente Olímpio Pavan¹

¹ Fundação CPqD, ² Celpe, ³ Universidade de Pernambuco

E-mail: celso@cpqd.com.br, bkleinau@celpe.com.br

Resumo: A previsão da vida útil de um dispositivo não é uma atividade trivial e pode ser estimada por diversas formas, seja a partir de parâmetros de vida de seus componentes, durante a fase de desenvolvimento deste dispositivo, seja pela análise de dados de desempenho quando em operação (análise de garantia) ou seja pelas modernas técnicas de ensaios acelerados de vida. Além de descrever sumariamente os modelos matemáticos empregados na abordagem, apresenta os resultados já obtidos na estimativa da vida útil de alguns medidores instalados na Companhia Energética de Pernambuco (CELPE), sem referenciar marcas ou modelos.

Palavras-chave: Confiabilidade de Medidores Eletrônicos de Energia; Ensaios Acelerados de Vida; Prognóstico de Vida Útil.

Abstract: The life prediction of a device is not a trivial activity and may be estimated in several ways, either from life parameters of its components during the development phase of this device, by performing data analysis when it's in operation (guaranteed analysis) or by modern techniques of accelerated life testing. This paper briefly describes the mathematical models used in the approach, it presents the results obtained on the estimated useful lives of some meters installed in the Energy Company of Pernambuco (CELPE) without reference brands or models.

Keywords: Reliability of Electronic Energy Meters; Accelerated life testing; Prognostic of Life.

1. INTRODUÇÃO

Os medidores de energia representam para as distribuidoras de energia elétrica, o caixa da empresa. Com o advento das redes elétricas inteligentes, ou *smart grids*, o medidor de energia passou a ter a necessidade de adotar a tecnologia eletrônica. Foram agregadas várias novas funcionalidades que a antiga tecnologia eletromecânica não possibilitaria por suas limitações. Este trabalho tem por finalidade

definir condições e propor procedimentos para a realização de ensaios de confiabilidade e Estresse-Vida em amostras de medidores eletrônicos de energia para inferir sobre a respectiva vida útil, a partir dos dados de desempenho. Esses procedimentos deverão ser capazes de identificar, com elevado nível de segurança, se os medidores de energia eletrônicos de fato durarão 13 anos, conforme atual prazo regulatório de amortização desse tipo de equipamento para as empresas distribuidoras de

energia elétrica.

Este trabalho é decorrente de resultados preliminares do Projeto de P&D da ANEEL “Estudos preditivos de vida útil de medidores eletrônicos de energia elétrica por inferência estatística de parâmetros de desempenho em ensaios de vida acelerados”, em desenvolvimento na CELPE e no CPqD.

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO – ANÁLISE DE FALHAS

O tratamento matemático dos dados de histórico de falhas depende da origem das falhas, se oriundas de desgaste pelo uso rotineiro ou decorrente de ensaios acelerados.

No primeiro caso, a análise de falhas pode ser adequadamente tratada pelos modelos matemáticos apresentados a seguir:

Exponencial:

$$f(t) = \gamma e^{-\gamma t} \quad (1)$$

Weibull

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2)$$

Onde β é o parâmetro de forma e η é o parâmetro de escala.

Lognormal

$$f(t) = \frac{1}{t\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3)$$

Onde t é o tempo até a falha, μ a média dos logaritmos naturais dos tempos até as falhas e σ é o desvio padrão dos logaritmos naturais dos tempos até as falhas.

3. MODELOS PARA ENSAIOS ACELERADOS

São utilizados para relacionar os dados de falhas em condições aceleradas com as condições normais de stress. Eles podem ser baseados em

modelos físicos ou paramétricos. O importante pressuposto decorrente, quando se utiliza qualquer um destes modelos, é que os componentes que operam sob condições normais experimentam o mesmo mecanismo de falha como aqueles que ocorrem nas condições de estresse acelerado. Supõe-se que a transformação de escala de tempo ou fator de aceleração (AF) é constante e, portanto, implica em aceleração linear.

3.1 MODELO DE ARRHENIUS

A temperatura é comumente empregada como um stress ambiental para testes de dispositivos eletrônicos. Isso geralmente é modelado usando a velocidade da reação Arrhenius, cuja equação é dada por:

$$r = A e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (4)$$

onde

r é a velocidade de reação;

A é uma constante não térmica desconhecida;

E_a é a energia de ativação (eV);

k é a constante de Boltzman ($8,617385 \times 10^{-5}$ eV / K);

T é a temperatura absoluta (Kelvin).

Supõe-se que a vida L de um dispositivo é inversamente proporcional à taxa de reação e, portanto, (4) pode ser escrita como:

$$L = \frac{1}{r} = \frac{A e^{\frac{E_a}{kT}}}{r} \quad (5)$$

A relação entre a vida à temperatura normal de funcionamento L_0 e àquela L_s , produzida pelo nível de estresse elevado, pode ser reescrita como:

$$L_0 = L_s e^{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right)} \quad (6)$$

Utilizando a Equação (6), o tempo de vida em condições normais de operação L_0 pode ser prevista, a partir dos resultados de seu tempo de

vida L_S obtido por ensaios acelerados de temperatura.

3.2 MODELO DE EYRING

É semelhante ao modelo de Arrhenius, no entanto, também pode ser utilizado para modelar os dados de outras condições de stress único ou múltiplo tais como campo elétrico, tensão, umidade, dado por

$$L = \frac{1}{T} e^{\frac{\beta}{T} - \alpha} \quad (7)$$

onde:

α e β são constantes determinadas a partir de dados de ensaios;

L é a vida média;

T é a temperatura absoluta (Kelvin).

A forma geral do modelo Eyring é:

$$L_S = \left(\frac{\alpha}{T_S} \right) e^{\frac{E_a}{kT_S}} e^{S \left(\beta + \frac{\gamma}{T_S} \right)} \quad (8)$$

onde:

α , β e γ são constantes que precisam ser determinadas

E_a é a energia de ativação (eV);

k é a constante de Boltzman (8.617385×10^{-5} eV / K);

T é a temperatura absoluta (Kelvin);

S é o estresse físico aplicado.

3.3 MODELO COFFIN-MANSON

É usado para testar dispositivos eletrônicos quando o estresse é ciclo térmico. O mecanismo de falha é essencialmente o craqueamento ou ruptura térmica.

A equação do modelo é:

$$N = A f^{-a} \Delta T^{-b} G(T_{max}) \quad (9)$$

onde:

N é o número de ciclos até à falha;

8º Congresso Brasileiro de Metrologia, Bento Gonçalves/RS, 2015

f é a frequência da ciclagem;

T é o intervalo de temperatura durante um ciclo;

A é um coeficiente constante desconhecido;

a é o expoente da frequência de ciclagem, um valor típico é da ordem de $-1/3$;

b é o expoente da faixa de temperaturas, um valor típico é de cerca de 2;

$G(T_{max})$ corresponde a

$$e^{\frac{E_a}{kT_{max}}} \quad (10)$$

E_a é um termo de Arrhenius avaliado à temperatura máxima, T_{max} , alcançado em cada ciclo.

4. TRATAMENTO DOS DADOS

4.1 O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE VIDA

Foram utilizados os dados de 2 modelos de medidores que retornaram de campo com defeito, tratados estatisticamente de forma similar.

A função confiabilidade representa a probabilidade de o medidor funcionar até um determinado tempo e é a principal função para especificar a compra de materiais (possibilita determinar percentual de medidores em operação após o ciclo regulatório de 13 anos).

A vida média, apresentada na figura 1, representa a expectativa de vida dos medidores do modelo 1. Nesse caso, 8,6 anos, bem menor que os 13 anos regulatórios.



Figura 1 - Vida média do medidor modelo 1

A probabilidade condicionada representa a probabilidade de um equipamento durar um tempo $(t+T)$, dado que esse equipamento já opera a um tempo T . O software calculou a probabilidade de 13,93% do medidor modelo 1 chegar a 13 anos de vida.

O percentual de defeitos também é uma forma de avaliar se o lote de medidores atende aos requisitos de qualidade e poucas falhas ao final do ciclo de vida regulatório. O percentual de defeitos calculado para o medidor com 13 anos de uso foi de 87,87%.

4.2 O MODELO DE ESTRESSE-VIDA

Para avaliação do modelo de Estresse-Vida, foram utilizados os dados de um modelo de medidor eletrônico monofásico fabricado em 2012. Os ensaios foram realizados com uma amostra de 160 medidores.

A duração do ensaio totalizou 250 horas. A temperatura e umidade foram utilizadas como fatores de estresse. Para o cálculo do fator de aceleração global foram considerados os seguintes parâmetros:

- TU (Temperatura de Uso) = 30°C,
- TS (Temperatura de Estresse) = 85°C,
- URU (Umidade Relativa de Uso) = 65% e
- URS (Umidade Relativa de Estresse) = 75%.

As condições de estresse foram baseadas nos fatores de estresse da norma “ABNT NBR 16078:2012”. Essas condições foram suficientes para gerar as falhas necessárias durante o tempo de ensaio. As condições de uso foram definidas para uma situação de maior agressividade, onde a temperatura média seria de 30°C e a umidade relativa 65%.

Para E_a , a energia de ativação do modelo matemático, foi adotado o valor de referência de 0,9 eV que é usado para equipamentos

eletrônicos e também são sugeridas na norma ABNT NBR 16078:2012.

4.3 CONCLUSÕES

Com a função densidade de probabilidade nas condições de uso, foi possível calcular a vida média para um dos modelos de medidor usando o software Weibull++. Esse valor foi de 20,18 anos.

Também se calculou a probabilidade deste medidor durar 13 anos ou a confiabilidade em 13 anos e obteve-se um resultado de 77,27 %, que é abaixo de 85% que seria um valor aceitável.

Os ensaios para validação dos modelos, empregando múltiplos estressores em degraus, objetivo principal da pesquisa, encontram-se atualmente em andamento, mas resultados preliminares indicam que os testes de confiabilidade para determinar se a vida útil do medidor supera os treze anos regulamentares poderá ser efetuado e concluído em menos de 30 dias de ensaios acelerados, com aproximadamente 90% de confiança.

Agradecimentos

Agradecemos à Celpe, ao CPqD e à UPE pela parceria e pelo envolvimento de profissionais altamente qualificados. Também agradecemos à equipe de P&D da Celpe que apoiou a realização desse projeto de pesquisa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MIL – STD – 1692 A – Military Standard – Procedures for performing a failure mode, effects and criticality analysis, USA, 1980;
- IEEE 1413.1-2002 – IEEE Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413;
- ABNT NBR 16078:2012 - Equipamentos de medição de eletricidade - Confiabilidade - Vida acelerada por umidade e temperatura;