v7.n11.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

OBSOLESCÊNCIA PROGRAMADA: UMA ANÁLISE TÉCNICA DO SUBDIMENSIONAMENTO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

PLANNED OBSOLESCENCE: A TECHNICAL ANALYSIS OF THE UNDERSIZING OF ELECTRONIC COMPONENTS

OBSOLESCENCIA PROGRAMADA: UN ANÁLISIS TÉCNICO DEL SUBDIMENSIONAMIENTO DE COMPONENTES ELECTRÓNICOS

João Pedro Marucci Pagliuso[1], Augusto Perez de Andrade[2]

e7119464

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i11.9464

PUBLICADO: 11/2026

RESUMO

A crescente vulnerabilidade dos equipamentos eletrônicos modernos torna necessária a avaliação técnica de suas falhas estruturais. Este trabalho teve como objetivo investigar o impacto das práticas de projeto e da seleção de componentes utilizadas no estágio de entrada de fontes de alimentação sobre a longevidade operacional e a ocorrência da obsolescência precoce. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica exploratória e descritiva, com a utilização de manuais técnicos de fabricantes e estudos de confiabilidade. Os resultados mostraram que a escolha de componentes com margens exíguas de tolerância acarreta a redução matemática da vida útil dos aparelhos. Na análise de proteção transiente, verificou-se que o uso de varistores com capacidade de absorção de energia reduzida acelera a degradação cumulativa e a falha prematura do circuito. Em relação à regulação de tensão, a aplicação da Lei de Arrhenius aos capacitores eletrolíticos indicou o impacto severo do estresse térmico. A alocação física dessas peças próxima a fontes dissipadoras de calor reduz a durabilidade estimada para cerca de mil horas de operação sob estresse térmico elevado, patamar que compromete a confiabilidade do sistema após curtos períodos de uso. Conclui-se que a falha prematura de eletrodomésticos está diretamente associada a restrições de projeto e à adoção de componentes com margens operacionais estreitas, condição técnica que reduz a longevidade dos aparelhos, favorece a obsolescência acelerada e agrava a geração de lixo eletrônico.

PALAVRAS-CHAVE: Capacitores. Engenharia. Lixo eletrônico. Obsolescência programada. Subdimensionamento. Varistores.

ABSTRACT

The growing vulnerability of modern electronic equipment makes the technical evaluation of their structural failures necessary. This work aimed to investigate the impact of design practices and component selection used in the input stage of power supplies on operational longevity and the occurrence of early obsolescence. The research was developed through an exploratory and descriptive bibliographic review, using technical manufacturer manuals and reliability studies. The results showed that the choice of components with narrow tolerance margins entails the mathematical reduction of the devices' lifespan. In the transient protection analysis, it was verified that the use of varistors with reduced energy absorption capacity accelerates cumulative degradation and premature circuit failure.

[1] Universidade de Araraquara (UNIARA). Graduando em Engenharia de Computação pela Universidade de Araraquara (UNIARA) e Estagiário de C*ustomer Care* na Ladder-Intereng, com atuação em automação industrial e solução de problemas.

[2] Universidade de Araraquara (UNIARA). Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (USP), graduado em Engenharia Mecatrônica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e docente do curso de Engenharia de Computação da UNIARA, com atuação em eletrônica e instrumentação voltada a bioengenharia ocular.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Regarding voltage regulation, the application of the Arrhenius Law to electrolytic capacitors indicated the severe impact of thermal stress. The physical allocation of these parts near heat-dissipating sources drops the estimated durability to around one thousand hours of operation under high thermal stress, a threshold that compromises system reliability after short periods of use. It is concluded that the premature breakdown of home appliances is directly associated with design constraints and the adoption of components with narrow operating margins, a technical condition that reduces device longevity, favors accelerated obsolescence, and aggravates the generation of electronic waste.

KEYWORDS: *Capacitors. Electronic waste. Engineering. Planned obsolescence. Undersizing. Varistors.*

RESUMEN
La creciente vulnerabilidad de los equipos electrónicos modernos hace necesaria la evaluación técnica de sus fallas estructurales. Este trabajo tuvo como objetivo investigar el impacto de las prácticas de diseño y la selección de componentes utilizadas en la etapa de entrada de las fuentes de alimentación sobre la longevidad operativa y la aparición de la obsolescencia prematura. La investigación se desarrolló a través de una revisión bibliográfica exploratoria y descriptiva, con la utilización de manuales técnicos de fabricantes y estudios de confiabilidad. Los resultados mostraron que la elección de componentes con márgenes exiguos de tolerancia conlleva la reducción matemática de la vida útil de los aparatos. En el análisis de protección transitoria, se verificó que el uso de varistores con capacidad de absorción de energía reducida acelera la degradación acumulativa y la falla prematura del circuito. En relación con la regulación de tensión, la aplicación de la Ley de Arrhenius a los condensadores electrolíticos indicó el impacto severo del estrés térmico. La ubicación física de estas piezas cerca de fuentes disipadoras de calor reduce la durabilidad estimada a cerca de mil horas de operación bajo alto estrés térmico, nivel que compromete la confiabilidad del sistema tras cortos períodos de uso. Se concluye que la falla prematura de los electrodomésticos está directamente asociada con restricciones de diseño y la adopción de componentes con márgenes operativos estrechos, condición técnica que reduce la longevidad de los aparatos, favorece la obsolescencia acelerada y agrava la generación de residuos electrónicos.

PALABRAS CLAVE: *Capacitores. Ingeniería. Obsolescencia programada. Residuos electrónicos. Subdimensionamiento. Varistores.*

INTRODUÇÃO

Os aparelhos denominados eletrodomésticos atuais possuem precursores mecânicos que surgiram no contexto da Revolução Industrial com o intuito de automatizar e facilitar tarefas diárias (ABRAMOVITZ *et al*., 2006 *apud* LOUIS, 2020). Contudo, ao longo do século XX, a forma como esses bens eram produzidos e comercializados sofreu uma drástica transformação. O modelo produtivo inicial, que visava a durabilidade extrema, cedeu espaço a estratégias comerciais focadas na rotatividade do consumo.

Historicamente, a lógica econômica de limitar a vida útil dos produtos consolidou-se em episódios notórios, como as práticas do Cartel Phoebus na década de 1920 (SLADE, 2006). Mesmo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

após a dissolução desse acordo, a prática perpetuou-se e adaptou-se continuamente às novas tecnologias (LOUIS, 2020). Com a transição dos sistemas puramente elétricos para a eletrônica moderna, os fatores que limitam a longevidade dos aparelhos tornaram-se mais complexos.

A vulnerabilidade técnica dos equipamentos modernos reside, primordialmente, na interface com a rede elétrica. Componentes responsáveis pela proteção contra surtos, filtragem de ruídos e retificação, tais como Varistores de Óxido Metálico (MOVs), Indutores, Capacitores de Segurança (Classes X e Y) e Capacitores Eletrolíticos, podem apresentar desgaste acelerado quando especificados com margens de tolerância estreitas frente às variações reais da rede.

Embora o dimensionamento em limites nominais estreitos atenda aos requisitos básicos de homologação em normas de compatibilidade eletromagnética e segurança, essa condição técnica mostra-se muitas vezes insuficiente para assegurar a longevidade operacional sob estresse contínuo.

Um exemplo claro dessa condição ocorre com os varistores, quando selecionados com baixa capacidade de absorção de energia em Joules. Embora atuem no grampeamento de picos, esses componentes sofrem degradação cumulativa a cada atuação. O subdimensionamento acelera o desgaste da barreira de potencial. Isso provoca o aumento da corrente de fuga e a eventual falha térmica, o que deixa o circuito desprotegido (ZANETTA *et al.*, 2012).

Após essa proteção primária, o estágio responsável por bloquear os ruídos elétricos da rede, conhecido como filtro de Interferência Eletromagnética (EMI), apresenta fragilidades similares. Os capacitores de segurança, juntamente com os indutores de modo comum, são essenciais para evitar que ruídos da rede afetem o equipamento e vice-versa.

Contudo, a utilização de componentes com dielétricos menos robustos ou fios subdimensionados nos indutores resulta em superaquecimento e perda de capacitância. Já os capacitores eletrolíticos, cruciais para a estabilização da tensão contínua (CC), têm sua vida útil regida pela Lei de Arrhenius. Quando esses capacitores são instalados próximos a fontes de calor e submetidos ao limite de sua tensão nominal em placas compactas, seu eletrólito evapora prematuramente. Esse processo eleva a Resistência Série Equivalente (ESR, do inglês *Equivalent Series Resistance*) e causa a inoperância do dispositivo (ELNA, 2020).

Portanto, a falha prematura relaciona-se diretamente com o equilíbrio entre redução de custos, compactação física e margens de dimensionamento no projeto eletrônico. A presença de limitações técnicas nos estágios de proteção, filtragem e regulação permite o funcionamento regular do equipamento no curto prazo, mas favorece a ocorrência de falhas precoces ao longo do tempo devido ao estresse elétrico e térmico acumulado. Isso conduz ao problema central desta investigação: de que forma o subdimensionamento de componentes no projeto eletrônico compromete a vida útil e contribui para a obsolescência precoce dos aparelhos?

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A justificativa para esta investigação fundamenta-se na relevância socioambiental e científica do tema. Socialmente, o estudo alerta o consumidor sobre os prejuízos financeiros do ciclo de recompra frequente e lança luz sobre o impacto ambiental massivo gerado pelo descarte acelerado de equipamentos, conhecido como lixo eletrônico. Cientificamente, a pesquisa preenche uma lacuna ao retirar o debate da obsolescência do campo puramente econômico ou sociológico e inseri-lo na análise técnica da engenharia de *hardware*.

Diante desse cenário, o objetivo geral deste trabalho é investigar o impacto das práticas de projeto e da seleção de componentes utilizadas no estágio de entrada de fontes de alimentação sobre a confiabilidade e a obsolescência dos equipamentos. Os objetivos específicos são: contextualizar historicamente a transição da engenharia focada em durabilidade para a restrição do ciclo de vida; identificar as vulnerabilidades do circuito eletrônico frente aos distúrbios de qualidade de energia da rede elétrica; e analisar tecnicamente o subdimensionamento elétrico e térmico dos componentes de proteção, filtragem e regulação.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. A transição histórica do modelo de durabilidade à obsolescência

No contexto da Revolução Industrial e da mecanização do trabalho doméstico, surgiram os primeiros dispositivos voltados à automação de tarefas cotidianas, como ferros de passar a carvão e máquinas de lavar mecânicas (ABRAMOVITZ *et al.*, 2006 *apud* LOUIS, 2020). Contudo, o marco definitivo para a estruturação do mercado de consumo moderno foi o automóvel Ford Model T. Fabricado pela Ford Motor Company entre 1908 e 1927, este veículo inaugurou o Fordismo, sistema caracterizado pela padronização e produção em larga escala (ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA, [s.d.]). A filosofia de Henry Ford pautava-se, inicialmente, na entrega de bens duráveis e acessíveis, concebidos para ter uma longa vida útil.

Entretanto, a dinâmica industrial sofreu uma transformação. Em contrapartida ao modelo anterior, surgiu o Sloanismo, estratégia idealizada por Alfred P. Sloan Jr. na General Motors (GM) a partir de 1923.

A proposta consistia em incentivar a troca anual de veículos não por falha mecânica, mas pelo desejo de atualização estética, com o uso de novas cores e acessórios para gerar uma desvalorização psicológica dos modelos anteriores (LOUIS, 2020; SLADE, 2006). Enquanto a indústria automobilística apostava na persuasão estética, outros setores buscavam métodos técnicos para controlar o ciclo de vida dos produtos por meio da engenharia de materiais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Segundo Slade (2006), o Cartel Phoebus, denominação informal da *Convention for the Development and Progress of the International Incandescent Electric Lamp Industry*, foi oficializado em 23 de dezembro de 1924, em Genebra, na Suíça. O grupo reuniu as principais fabricantes de lâmpadas do mundo, como Philips, Osram e General Electric, com o propósito de padronizar e reduzir a vida útil de seus produtos. Antes do acordo, as lâmpadas eram capazes de operar por até 2.500 horas; com a nova resolução, a durabilidade foi limitada a um teto de 1.000 horas.

Essa medida garantiu a rotatividade de vendas necessária para a manutenção dos lucros. Para assegurar o cumprimento das metas, foi instituído um sistema de multas para as empresas cujos produtos excedessem essa duração. Isso levou os engenheiros da época a estudarem formas de alterar os filamentos e limitar a vida útil da lâmpada. Esse episódio consolidou o primeiro esforço global documentado de obsolescência técnica planejada na história industrial.

1.2. A formalização teórica pós-crise e a engenharia do consumo

Apesar do sucesso comercial da GM e das articulações do Cartel Phoebus, a durabilidade técnica ainda predominava na maioria dos setores, o que culminou em uma saturação de mercado. A Crise de 1929, impulsionada pela superprodução, revelou-se uma consequência direta do modelo fordista clássico.

Para reverter a estagnação evidenciada pela crise, teóricos do mercado propuseram uma nova abordagem que transcendia a produção tradicional: a *Consumer Engineering* (Engenharia do Consumo). Esse conceito, formalizado pelo publicitário Earnest Elmo Calkins em 1932, defendia que a demanda não deveria ser apenas espontânea, mas estimulada continuamente (EWEN, 1976).

Ainda em 1932, no auge da Depressão, o corretor imobiliário nova-iorquino Bernard London (1932) publicou o ensaio intitulado *Ending the Depression Through Planned Obsolescence*. Em sua análise, o autor argumentou que o hábito tradicional de utilizar um produto até seu esgotamento físico tornava-se incompatível com o fluxo econômico moderno. O objetivo proposto era instituir um mecanismo de descarte e recompra para garantir demanda constante às fábricas e a manutenção do pleno emprego.

A análise contemporânea de Serge Latouche (2009) aprofunda essa discussão ao identificar a obsolescência programada não como um evento isolado, mas como uma das três âncoras fundamentais da Sociedade de Crescimento. Para o autor, o sistema econômico atual depende de um mecanismo circular de criação de demandas sustentado por três pilares

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

interconectados: a publicidade, responsável por gerar o desejo de consumo; o crédito, que viabiliza a aquisição imediata sem a necessidade de poupança prévia; e a obsolescência acelerada, que assegura a renovação constante das vendas por meio da redução da durabilidade.

1.3. A tipologia de Packard e a ascensão da "caixa-preta" eletrônica

Na década de 1960, o jornalista Vance Packard desempenhou um papel fundamental ao sistematizar essas práticas. Em seu *best-seller* de 1960, *The Waste Makers*, o autor analisou as estratégias voltadas ao consumo e categorizou a obsolescência em três tipologias distintas: a de função (quando uma inovação torna o produto antigo obsoleto); a de desejabilidade (ou psicológica, baseada na moda e no *status*); e a de qualidade (PACKARD, 1960). Ao definir a Obsolescência de Qualidade, o autor descreveu como o projeto técnico passou a influenciar diretamente a expectativa de vida útil de eletrodomésticos e veículos.

Com o avanço tecnológico na segunda metade do século XX, essa dinâmica migrou dos sistemas mecânicos para os eletrônicos. A ascensão da microeletrônica resultou em circuitos integrados complexos e inacessíveis ao usuário comum. Conforme aponta Tim Cooper (2010), a miniaturização dos componentes e a alta densidade dos *designs* eletrônicos dificultaram o reparo e reduziram a vida útil média dos aparelhos.

Nesse novo cenário, o desgaste físico visível, como a ferrugem ou a quebra de uma engrenagem, cedeu lugar a falhas microscópicas, o que transformou os equipamentos em verdadeiras caixas-pretas. Diferentemente da mecânica clássica, em que o defeito costumava ser visual e compreensível, a eletrônica moderna exige conhecimento especializado e instrumentação específica para o diagnóstico.

Além disso, a confiabilidade dos componentes internos depende diretamente das condições do seu ambiente operacional: em fontes de alimentação e placas eletrônicas de eletrodomésticos, o principal fator de desgaste é o estresse elétrico e térmico gerado na interface do aparelho com a rede elétrica.

2. METODOLOGIA

2.1. Estrutura metodológica e levantamento técnico

A pesquisa desenvolvida neste trabalho possui natureza exploratória e descritiva, direcionada à análise do dimensionamento de componentes no estágio de entrada de fontes chaveadas. O estudo busca reunir e interpretar manuais de fabricantes e resultados disponíveis

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

na literatura sobre a confiabilidade de *hardware* e a obsolescência precoce. A análise utiliza abordagens qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa atua na interpretação histórica e teórica do consumo cíclico e das restrições de projeto.

Em contrapartida, a abordagem quantitativa aplica-se na organização e na comparação de especificações técnicas, como capacidade de absorção de energia, vida útil projetada e limites térmicos operacionais. Para o desenvolvimento da pesquisa, realizou-se uma revisão bibliográfica comparativa e estruturada, baseada na consulta de artigos científicos, normas técnicas e folhas de dados (*datasheets*) de fabricantes do setor de semicondutores.

2.2. Indicadores técnicos e modelos matemáticos

A análise técnica considerou, primordialmente, os componentes responsáveis pela proteção transiente, pela filtragem de interferência eletromagnética e pela regulação de corrente contínua. Foram selecionados manuais e estudos teóricos com parâmetros quantitativos relacionados a esses três estágios do circuito. Avaliaram-se indicadores críticos como a tensão de grampeamento e a dissipação em Joules para varistores, a perda estrutural de capacitância para capacitores de segurança e o Efeito Joule em indutores de modo comum.

Paralelamente à análise desses componentes, aplicaram-se formulações matemáticas consolidadas na engenharia de confiabilidade para estimar a redução da vida útil. Utilizou-se a Lei de Arrhenius (Regra dos 10 Graus) para modelar a degradação térmica e o aumento da ESR em capacitores eletrolíticos. O uso dessas equações permite avaliar mecanismos de desgaste interno que comprometem a longevidade do *hardware* ao longo de sua operação.

2.3. Sistematização técnica e limitações do estudo

Após a seleção da literatura e dos manuais, os dados obtidos foram organizados para facilitar a identificação das vulnerabilidades específicas em cada componente analisado. Em seguida à análise individual dos mecanismos de falha elétrica e térmica, realizou-se uma síntese conjunta com o objetivo de compreender como o estresse acumulado nesses dispositivos compromete a durabilidade do eletrodoméstico após períodos moderados de uso.

O presente trabalho foi desenvolvido predominantemente a partir de dados secundários obtidos na literatura técnica e científica e em documentos institucionais, sem a realização de medições experimentais, testes destrutivos em bancada ou simulações termográficas próprias.

Dessa forma, os resultados e as discussões estão condicionados às especificações nominais disponibilizadas pelos estudos selecionados e aos modelos matemáticos estabelecidos pelos fabricantes das peças.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. A vulnerabilidade da rede CA e a transição de topologias

A infraestrutura de distribuição elétrica global baseia-se predominantemente em Corrente Alternada (CA). A escolha histórica por esse sistema, consolidada no final do século XIX, deve-se à eficiência na transmissão de energia a longas distâncias, o que permite a fácil elevação e o rebaixamento de tensão por meio de transformadores (MAMEDE FILHO, 2017). No entanto, para os equipamentos eletrônicos sensíveis, a rede elétrica representa um ambiente operacional hostil e ruidoso.

Idealmente, a tensão fornecida pelas concessionárias deveria ser uma onda senoidal pura, com frequência e amplitude constantes (60 Hz e 127 V/220 V no Brasil). Contudo, a realidade da rede elétrica é permeada pelo que se denomina "sujeira da rede" ou distúrbios elétricos. Esses distúrbios incluem variações de tensão, distorção harmônica e, principalmente, Ruído Eletromagnético e Interferência de Radiofrequência (RFI).

Esses ruídos são gerados tanto por fatores externos, como descargas atmosféricas e manobras na rede de distribuição, quanto internos, causados pelo acionamento de motores, reatores e outras fontes chaveadas conectadas à mesma rede. Nesse cenário, a tomada não entrega apenas energia limpa, mas um espectro de frequências indesejadas e transientes de alta tensão que agridem os componentes internos dos aparelhos.

Portanto, o estágio de entrada de qualquer equipamento eletrônico moderno não serve apenas para retificar a corrente (transformar CA em CC), mas atua como uma barreira de defesa. Sua função primordial é filtrar esses ruídos para que não afetem o funcionamento lógico do aparelho e, simultaneamente, proteger o circuito contra surtos destrutivos.

É justamente nessa interface que a redução nas margens de dimensionamento compromete a confiabilidade do sistema, uma vez que a fragilidade nos componentes responsáveis por essa blindagem acelera o desgaste do equipamento.

Para compreender a vulnerabilidade dos equipamentos atuais, é necessário analisar a evolução da topologia de alimentação. Até o final do século XX, a maioria dos eletrodomésticos utilizava Fontes Lineares. Nesse arranjo, a primeira barreira entre a rede elétrica e o circuito era um grande transformador *step down* (abaixador) com núcleo de ferro. Além de reduzir a tensão, esse transformador atuava, fisicamente, como um filtro indutivo gigante. Devido à sua alta indutância, ele oferecia uma elevada impedância a frequências altas. Essa característica bloqueava naturalmente transientes rápidos e ruídos da rede antes que pudessem atingir os componentes eletrônicos sensíveis (PRESSMAN *et al*., 2009).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Entretanto, a busca por redução de custos e de peso, aliada à necessidade de maior eficiência energética, levou à substituição massiva dessa tecnologia pelas Fontes Chaveadas (SMPS, do inglês *Switching Mode Power Supplies*). Diferentemente do modelo anterior, as SMPS retificam a tensão da rede diretamente na entrada, sem o isolamento prévio de um transformador de baixa frequência. Isso significa que os componentes do estágio primário (diodos, capacitores e transistores de chaveamento) são expostos diretamente à tensão de pico da rede (que pode chegar a 311 V em redes de 220 V) e a todas as anomalias provenientes dela.

Essa transição arquitetônica removeu a "blindagem física" robusta que o transformador oferecia. Para compensar essa exposição direta, tornou-se obrigatória a inclusão de um estágio de filtragem e proteção composto por componentes discretos. Ao substituir um bloco de ferro por pequenos elementos eletrônicos de proteção e filtragem, a durabilidade da fonte passou a depender estritamente da tolerância dessas peças. Se esses componentes de defesa forem especificados com margens exíguas para atender a restrições de espaço e custo, a proteção atual falha muito antes do que o antigo transformador falharia.

3.2. A engenharia de falha no estágio de entrada

3.2.1. A degradação dos varistores na proteção transiente

O primeiro componente ativo de defesa no estágio de entrada de uma fonte chaveada é o varistor de óxido metálico. Sua função primária é o grampeamento de tensão. Em condições normais de operação, o varistor apresenta alta impedância (próxima ao infinito) e comporta-se como um circuito aberto. Contudo, ao detectar um surto de tensão que ultrapasse seu limiar nominal ($Tensão\ de\ Varistor\ -\ Vn$), sua resistência cai abruptamente para valores próximos de zero em nanossegundos. Isso desvia a corrente excessiva para o terra ou neutro e protege os componentes a jusante.

Fisicamente, o MOV é composto por grãos de óxido de zinco (ZnO) sinterizados com outros óxidos metálicos, como bismuto e cobalto. Essa estrutura cria uma matriz policristalina na qual cada fronteira de grão atua como uma microjunção P-N (semicondutora). Essa junção forma o que se conhece como "Barreiras de Schottky". É a soma desses milhões de microbarreiras que define a tensão de operação do componente.

3.2.2. O mecanismo de degradação cumulativa

A vulnerabilidade que compromete a longevidade do circuito reside na natureza não regenerativa do varistor. Ao contrário do que o senso comum sugere, o MOV não se desgasta apenas com eventos catastróficos. Conforme detalhado por Brown (2004) em seu artigo

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

intitulado *Metal Oxide Varistor Degradation*, publicado pela *International Association of Electrical Inspectors* (IAEI), a degradação do varistor é um processo cumulativo e irreversível.

Surtos de pequena magnitude, frequentes na rede elétrica devido ao chaveamento de cargas indutivas, como motores de elevadores ou compressores de ar-condicionado, agridem as fronteiras de grão do ZnO. Cada pequeno surto absorvido causa um dano microscópico na camada de dissipação e cria caminhos condutivos permanentes através das barreiras de Schottky.

Esse fenômeno gera o chamado "aumento da corrente de fuga" (*leakage current drift*). Inicialmente, um varistor novo pode ter uma fuga de apenas alguns microamperes (μA). Com o tempo e o estresse repetitivo, essa corrente aumenta. Como o componente está permanentemente conectado à tensão da rede, o aumento da corrente de fuga gera calor ($P = V \times I$), o que degrada ainda mais o material e cria um ciclo vicioso conhecido como Embalo Térmico (*Thermal Runaway*), que culmina na queima do componente ou na abertura do fusível.

3.2.3. A matemática da falha por subdimensionamento de energia

A vulnerabilidade na proteção primária manifesta-se na seleção da Capacidade de Absorção de Energia (Wtm) do varistor, medida em Joules (J). A energia que um varistor pode dissipar sem falhar é diretamente proporcional ao seu volume físico (diâmetro do disco e espessura). A equação fundamental que define a energia absorvida durante um transiente é dada por:

$$E = \int_0^t v\,(t) \cdot i(t)dt \approx V_c \cdot I_p \cdot \tau \cdot K$$

Onde:

- E é a energia em Joules.
- V_C é a Tensão de Grampeamento.
- I_P é a Corrente de Pico do surto.
- τ é a duração do pulso.
- K é uma constante relacionada à forma da onda (geralmente $K \approx 1{,}4$ para ondas padrão 8/20 μs).

Fabricantes fornecem curvas de vida útil que relacionam a quantidade de surtos que o componente suporta antes de falhar. Um varistor padrão de 14 mm (ex.: 14D241K) pode

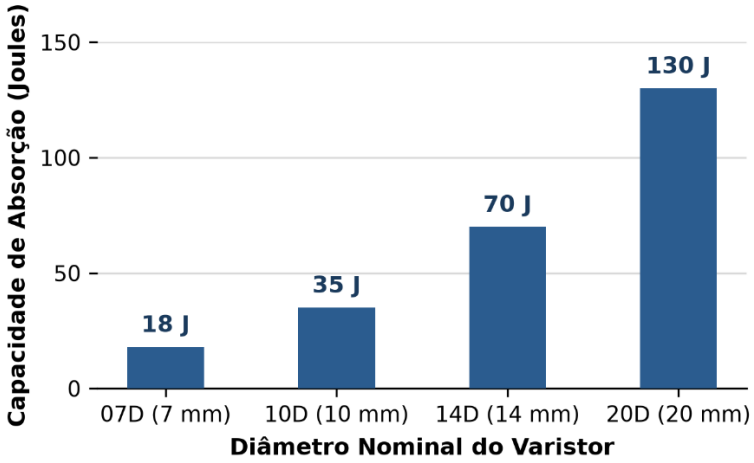
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

suportar, por exemplo, 1 surto de 4.500 A, ou 100 surtos de 500 A, ou 1.000.000 de surtos de 10 A.

A vulnerabilidade por subdimensionamento ocorre ao utilizar um varistor de diâmetro reduzido (ex.: 7 mm ou 07D) em uma aplicação sujeita a distúrbios frequentes que exigiriam um modelo de 14 mm ou 20 mm.

Conforme ilustrado na Figura 1, ao comparar componentes de uma mesma classe de tensão nominal (275 VCA / série 431K, sob pulso de 8/20 µs), um varistor de 7 mm possui uma capacidade máxima de absorção de Joules drasticamente menor.

Figura 1. Relação entre o diâmetro físico do varistor e sua capacidade máxima de absorção de energia transiente (referência nominal de 275 VCA / código 431K, onda de 8/20 µs)



Fonte: Elaborado pelos autores com base nas especificações técnicas nominais de fabricantes para as séries 07D, 10D, 14D e 20D.

Ao considerar uma rede elétrica com distúrbios frequentes que entrega 5 pequenos surtos de baixa intensidade (0,5 J) por dia, um varistor de 14 mm (capacidade ≈ 70 J) levaria anos para atingir seu ponto de degradação crítica, pois opera na zona segura da curva de *derating*. Um varistor de 7 mm (capacidade ≈ 18 J), submetido aos mesmos surtos, terá suas fronteiras de grão saturadas rapidamente. Segundo Brown (2004), quando a tensão de varistor (Vn) varia mais de ±10% em relação ao original devido ao estresse, o componente é considerado tecnicamente falho.

A utilização do componente de 7 mm restringe matematicamente a tolerância do circuito a surtos repetitivos, fazendo com que o dispositivo atinja o seu limite de degradação após um

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

número previsível de ciclos de operação. Dessa forma, o esgotamento precoce da proteção primária reduz significativamente a expectativa de vida útil do equipamento.

3.2.4. O subdimensionamento em capacitores de segurança e indutores na filtragem EMI

Após o estágio inicial de grampeamento de tensão realizado pelo varistor, a energia da rede elétrica passa pelo filtro EMI/RFI. Este circuito possui uma função bidirecional. Ele deve impedir que os ruídos de alta frequência gerados pelo chaveamento da própria fonte poluam a rede elétrica e, simultaneamente, bloquear os ruídos da rede antes que alcancem a ponte retificadora.

Para cumprir as normas globais e locais de compatibilidade eletromagnética (como as diretrizes da CISPR e da ANATEL no Brasil), a arquitetura da fonte requer a inclusão deste filtro. Ele é tipicamente composto por Capacitores da Classe X, Capacitores da Classe Y e Indutores de Modo Comum.

A limitação da vida útil neste estágio não decorre da ausência dos componentes, mas sim da aplicação de peças sujeitas a desgaste contínuo e silencioso, ou dimensionadas para operar próximo ao limite de suas especificações elétricas e térmicas (MANIKTALA, 2012).

3.2.5. Topologia e função dos capacitores de segurança

Os capacitores utilizados no filtro de entrada não são componentes comuns. Eles são classificados como "Capacitores de Segurança" (regidos pela norma internacional IEC 60384-14) porque estão conectados diretamente à linha de alta tensão CA, na qual uma falha estrutural poderia resultar em incêndio ou choque elétrico ao usuário.

Os Capacitores da Classe X são conectados em paralelo com a rede elétrica (entre Fase e Neutro) e têm a função de filtrar ruídos de Modo Diferencial. Por atuarem diretamente entre os condutores vivos, o seu dimensionamento normativo visa prevenir o risco de incêndio. Embora a sua construção em filme metalizado priorize a perda gradual de capacitância (tendência a circuito aberto), caso ocorra uma falha catastrófica em curto-circuito sob sobretensões severas, o encapsulamento é projetado para suportar o estresse térmico sem propagar chamas até a interrupção do circuito pelo fusível de entrada.

Já os Capacitores da Classe Y são conectados entre a linha (Fase/Neutro) e o chassi do aparelho (Terra) para filtrar ruídos de Modo Comum. Por estarem ligados ao gabinete acessível ao usuário, sua falha nunca pode resultar em curto-circuito, sob pena de energizar a carcaça e causar choque elétrico. Por esse motivo, os componentes da Classe Y possuem isolamento

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

dielétrico reforçado e capacitância reduzida, de modo que sua eventual falha ocorra de maneira segura em circuito aberto.

A degradação que afeta os capacitores da Classe X (geralmente construídos com filme de polipropileno metalizado) está diretamente associada a uma propriedade física conhecida como Autorregeneração (*Self-Healing*). Conforme descrito em notas de aplicação técnica da Vishay Intertechnology (2018), quando um pequeno surto de tensão da rede perfura o dielétrico plástico do capacitor, ocorre um microarco elétrico. O calor desse arco vaporiza instantaneamente a finíssima camada metálica ao redor do furo, o que isola o defeito e permite que o capacitor continue em operação sem entrar em curto.

Contudo, esse processo cobra um preço físico. Cada evento de autorregeneração consome uma fração da área metálica das placas do capacitor. A seleção de um capacitor Classe X de menor porte ou com uma classe de tensão inferior (por exemplo, um modelo X2 de menor margem em vez de um X1, ou um filme metalizado com espessura reduzida) faz com que os transientes cotidianos da rede provoquem milhares de microeventos de *self-healing*. Ao longo do tempo, o componente perde parte significativa de sua capacitância original (frequentemente cai de 0,47 µF para menos de 0,1 µF). Sem capacitância suficiente, o filtro EMI perde eficácia, permitindo que os picos de tensão e os ruídos de alta frequência passem diretamente para a ponte retificadora e para os circuitos lógicos, o que acelera a falha de componentes mais complexos.

3.2.6. Capacitores X2 e o efeito de autorregeneração

Nos capacitores da subclasse X2, amplamente aplicados diretamente na tensão da rede (até 250 VCA ou 275 VCA), o processo de autorregeneração descrito anteriormente impacta diretamente a geometria ativa do componente. Embora atue como um mecanismo de proteção eficiente contra curtos-circuitos, esse fenômeno acarreta uma degradação estrutural cumulativa. A capacitância (C) de um capacitor de placas paralelas é fundamentada na física clássica (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), dada pela equação:

$$C = \frac{\varepsilon \cdot A}{d}$$

Onde ε é a permissividade do dielétrico, A é a área das placas e d é a distância entre elas. A cada evento de *self-healing* causado pelas instabilidades diárias da rede elétrica, uma fração da área metalizada (A) é vaporizada. Consequentemente, a capacitância total cai de forma irreversível e progressiva ao longo dos meses de operação (VISHAY INTERTECHNOLOGY, 2018).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Essa redução gradual de capacitância torna-se ainda mais crítica em eletrodomésticos de baixo custo que utilizam fontes sem transformador, conhecidas como fontes capacitivas. Nessas topologias, a reatância capacitiva (X_c) do próprio capacitor X2 é utilizada em série para rebaixar a tensão da rede e limitar a corrente de alimentação do circuito (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), conforme a relação:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}$$

Se o capacitor X2 perde 50% de sua capacitância original devido ao acúmulo de surtos, a sua reatância (X_c) dobra. Com isso, a corrente fornecida à placa de controle cai drasticamente e o eletrodoméstico deixa de ligar. Dessa forma, o equipamento completo torna-se inoperante em decorrência do desgaste progressivo de um único componente submetido continuamente às variações da rede elétrica (MANIKTALA, 2012).

3.2.7. Indutores e o estresse térmico nos enrolamentos

Em conjunto com os capacitores, os Indutores de Modo Comum formam o filtro passa-baixa da entrada. Eles são construídos por meio do enrolamento de fios de cobre esmaltado sobre um núcleo toroidal de ferrite. A vulnerabilidade associada ao subdimensionamento nestes componentes reside na especificação da espessura do condutor utilizado. Quando se selecionam fios com área de seção transversal reduzida para atender a restrições de espaço e projeto, eleva-se a resistência elétrica em corrente contínua (R_{DC}) do enrolamento. A passagem da corrente gera aquecimento parasita por meio do Efeito Joule (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013), definido por:

$$P = I^2 \cdot R_{DC}$$

Esse aquecimento constante degrada o verniz isolante do fio ao longo do tempo, o que pode gerar curto-circuito entre as espiras e anular a indutância (L). Além disso, conforme aponta McLyman (2011), o calor excessivo transmitido ao núcleo de ferrite aproxima o material de sua Temperatura de Curie, ponto no qual ele perde suas propriedades magnéticas e satura. Com o filtro EMI inoperante, os ruídos de alta frequência e o estresse elétrico passam a atingir o componente mais sensível da fonte: o capacitor eletrolítico.

3.2.8. Os capacitores eletrolíticos e a degradação térmica

Após a retificação e a filtragem inicial, a tensão necessita ser estabilizada para alimentar os circuitos lógicos integrados em CC. Essa função de "reservatório" de energia e suavização de tensão é desempenhada pelo capacitor eletrolítico de alumínio. Diferentemente dos capacitores

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

da subclasse X2, o capacitor eletrolítico é um dispositivo eletroquímico, composto por folhas de alumínio imersas em um eletrólito líquido condutivo (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2013). Essa característica construtiva o torna, invariavelmente, o componente com a menor expectativa de vida útil em qualquer circuito eletrônico (MANIKTALA, 2012).

O mecanismo de falha do capacitor eletrolítico está estritamente ligado à evaporação de seu eletrólito. Quando submetido a altas temperaturas, o líquido interno vaporiza e escapa lentamente pelo selo de borracha inferior. À medida que o eletrólito seca, a ESR do componente aumenta drasticamente. Como os capacitores em fontes chaveadas são submetidos a altas correntes de ondulação (*ripple*), o aumento da ESR gera um autoaquecimento interno pelo Efeito Joule ($P = I^2 \cdot \text{ESR}$). Isso cria um ciclo de Embalo Térmico que culmina no estufamento ou vazamento do componente (PRESSMAN *et al.*, 2009).

A previsibilidade matemática desse desgaste faz com que o componente seja um fator determinante para o tempo de vida útil da fonte. A degradação térmica do eletrólito obedece fielmente à Lei de Arrhenius, um princípio da físico-química que correlaciona a velocidade de uma reação com a temperatura. Na engenharia de confiabilidade de capacitores, essa lei é simplificada pela "Regra dos 10 Graus". Conforme documentado em notas técnicas de fabricantes (ELNA, 2020), a vida útil estimada de um capacitor eletrolítico cai pela metade a cada aumento de 10 °C em sua temperatura operacional, conforme ilustrado na Figura 2, o que pode ser modelado pela seguinte equação:

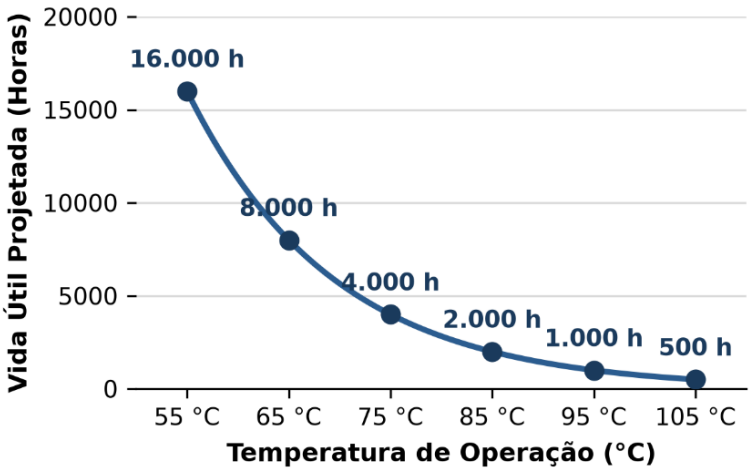
$$L_X = L_0 \cdot 2^{\frac{T_0 - T_X}{10}}$$

Onde:

- L_X é a vida útil projetada sob a temperatura real de operação.
- L_0 é a vida útil base garantida pelo fabricante.
- T_0 é a temperatura máxima nominal do componente.
- T_X é a temperatura ambiente real ao redor do capacitor.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 2. Curva de degradação térmica e redução da vida útil projetada (L_X) para um capacitor eletrolítico comercial ($L_0 = 2.000$ h a $T_0 = 85$ °C)



Fonte: Elaborado pelos autores com base na formulação da Lei de Arrhenius (ELNA, 2020).

Por meio dessa relação matemática, o impacto do dimensionamento térmico torna-se evidente e mensurável. Na prática de projeto de bens de consumo, a redução acentuada da longevidade decorre frequentemente da combinação de dois fatores técnicos. O primeiro é a seleção de capacitores comerciais de entrada com vida útil nominal (L_0) reduzida, como 2.000 horas a 85 °C, em vez de séries de longa duração especificadas para 5.000 ou 10.000 horas a 105 °C. O segundo fator relaciona-se ao arranjo físico (*layout*) de placas altamente compactadas, nas quais os capacitores eletrolíticos acabam posicionados a poucos milímetros de dissipadores de calor de transistores de chaveamento ou diodos retificadores, que operam em temperaturas elevadas.

Com base na equação apresentada e nos dados da Figura 2, se um capacitor especificado para 2.000 horas a 85 °C for submetido a uma temperatura ambiente interna de 95 °C gerada por um dissipador adjacente, sua vida útil projetada (L_X) cai para 1.000 horas de operação contínua. Sob a ótica da confiabilidade de *hardware*, essa condição térmica restringe severamente a durabilidade do componente, levando ao esgotamento precoce do eletrólito e comprometendo o funcionamento da fonte após um período reduzido de operação.

3.3. Análise conjunta dos resultados

A análise integrada demonstra que os fenômenos de degradação elétrica e térmica no estágio de entrada ocorrem de maneira interdependente ao longo da operação do equipamento.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No estágio de proteção transiente, os dados indicam que o emprego de varistores com menor volume físico e capacidade reduzida em Joules resulta na saturação progressiva do óxido de zinco sob distúrbios repetitivos. De forma complementar, nos estágios de filtragem e regulação, as condições térmicas de operação exercem influência direta sobre a estabilidade das propriedades físicas dos indutores e capacitores.

A correlação entre esses fatores indica que a longevidade operacional dos circuitos eletrônicos está diretamente condicionada às margens de tolerância adotadas no projeto da placa. Restrições dimensionais e de custo, tais como a utilização de condutores de seção reduzida e a proximidade física entre capacitores e elementos dissipadores de calor, alteram significativamente o comportamento do *hardware* ao longo do tempo.

Dessa forma, as especificações nominais de tensão e vida útil de cada componente, quando analisadas isoladamente em condições ideais de bancada, não refletem integralmente a durabilidade do sistema completo em regime real de trabalho.

Sob a perspectiva da engenharia de confiabilidade, a modelagem pela Lei de Arrhenius e as curvas de *derating* dos manuais técnicos evidenciam a sensibilidade dos componentes passivos à temperatura. A interação entre a absorção de energia transiente, o aquecimento por Efeito Joule e a dissipação térmica estabelece um encadeamento físico entre os diferentes estágios analisados. Nesse contexto, as instabilidades cotidianas da rede elétrica somam-se às condições térmicas impostas pela compactação do *layout*, acelerando o desgaste natural dos materiais.

Portanto, a perda prematura de desempenho nos equipamentos analisados não decorre necessariamente de defeitos de fabricação isolados, mas do efeito cumulativo das solicitações elétricas e térmicas sobre componentes que operam próximos aos seus limites nominais. A Tabela 1 apresenta uma síntese das relações identificadas entre os componentes analisados, seus respectivos mecanismos de degradação e as implicações técnicas no funcionamento do circuito.

Tabela 1. Síntese das vulnerabilidades no estágio de entrada de fontes chaveadas

Componente	Função no circuito	Mecanismo de degradação	Implicação técnica da falha
Varistor	Proteção transiente	Saturação das fronteiras de grão por surtos repetitivos	Alteração na tensão de grampeamento e aumento da corrente de fuga

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Capacitor Classe X (X2)	Filtragem de ruídos de Modo Diferencial	Vaporização gradual do filme metalizado (*self-healing*)	Redução progressiva da capacitância e elevação da reatância capacitiva
Capacitor Classe Y	Filtragem de ruídos de Modo Comum	Desgaste dielétrico dimensionado normativamente para falha segura em aberto	Redução da atenuação de ruídos de alta frequência sem risco de choque elétrico
Indutor	Filtragem de Modo Comum	Aquecimento por Efeito Joule em condutores de seção reduzida	Degradação térmica do esmalte isolante e redução da indutância
Capacitor Eletrolítico	Filtragem e regulação em CC	Evaporação gradual do eletrólito acentuada pelo calor adjacente	Elevação da ESR, aquecimento interno e perda de regulação de tensão

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos resultados e manuais técnicos analisados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa atendeu ao objetivo de demonstrar que a falha prematura de eletrodomésticos modernos não decorre apenas de eventos aleatórios isolados, mas relaciona-se diretamente com as margens de tolerância adotadas na engenharia de *hardware*. Verificou-se que as restrições térmicas e elétricas estabelecidas durante a seleção de componentes e a compactação das placas exercem influência determinante sobre a longevidade operacional dos equipamentos e contribuem para a aceleração do ciclo de substituição dos bens de consumo.

Por meio da análise técnica do estágio de entrada das fontes de alimentação, constatou-se que a adoção de componentes comerciais operando próximos aos seus limites nominais reduz significativamente a margem de segurança do circuito frente aos distúrbios cotidianos da rede elétrica.

A utilização de capacitores eletrolíticos com vida útil base de 2.000 horas alocados nas proximidades de fontes dissipadoras de calor, somada ao emprego de varistores de volume físico reduzido e condutores de menor seção transversal, pode restringir a durabilidade projetada do estágio de filtragem e regulação a patamares próximos de 1.000 horas sob estresse térmico elevado. Essa redução acentuada da vida útil compromete a confiabilidade do sistema após períodos moderados de uso.

Por fim, a sistematização apresentada neste estudo permite mapear os pontos críticos de desgaste em fontes chaveadas de uso doméstico. Os resultados compilados fornecem subsídios

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

técnicos para que engenheiros e profissionais da área orientem manutenções corretivas e preventivas com maior precisão, priorizando o redimensionamento de componentes submetidos a elevado estresse elétrico e térmico.

Adicionalmente, o referencial desenvolvido contribui para a fundamentação de análises de confiabilidade, auxilia projetistas no estabelecimento de margens de segurança mais robustas e fomenta práticas de *ecodesign* voltadas à extensão da vida útil dos aparelhos e à mitigação do descarte precoce de resíduos eletrônicos.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2013.

BROWN, Kenneth G. Metal Oxide Varistor Degradation. **IAEI Magazine**, Richardson, TX, mar. 2004. Disponível em: https://iaeimagazine.org/2004/march2004/metal-oxide-varistor-degradation/. Acesso em: 24 fev. 2026.

COOPER, Tim. The significance of product longevity. *In*: COOPER, Tim (Org.). **Longer Lasting Products**: Alternatives to the Throwaway Society. Farnham: Gower, 2010. Cap. 1, p. 3-36.

ELNA. **Reliability of Aluminum Electrolytic Capacitors**. [S.l.]: ELNA Co., Ltd., 2020. Nota Técnica. Disponível em: https://www.elna.co.jp/en/product/business_capacitor/. Acesso em: 9 dez. 2025.

ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA. **Model T**. Chicago: Encyclopædia Britannica, [s.d.]. Disponível em: https://www.britannica.com/technology/Model-T. Acesso em: 2 dez. 2025.

EWEN, Stuart. **Captains of Consciousness**: Advertising and the Social Roots of the Consumer Culture. New York: McGraw-Hill, 1976.

LATOUCHE, Serge. **Pequeno Tratado do Decrescimento Sereno**. São Paulo: Martins Fontes, 2009.

LONDON, Bernard. **Ending the depression through planned obsolescence**. New York: [s.n.], 1932. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/London_%281932%29_Ending_the_depression_through_planned_obsolescence.pdf. Acesso em: 26 jan. 2026.

LOUIS, Letícia Martins. **Os setores de eletrônicos e eletrodomésticos**: a estratégia da obsolescência programada. 2020. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020. Disponível em: https://repositorio.unicamp.br/Busca/Download?codigoArquivo=512239. Acesso em: 2 dez. 2025.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

MANIKTALA, Sanjaya. **Switching Power Supplies A-Z**. 2. ed. Burlington: Elsevier/Newnes, 2012.

MCLYMAN, William T. **Transformer and Inductor Design Handbook**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

PACKARD, Vance. **The Waste Makers**. New York: David McKay, 1960.

PRESSMAN, Abraham I.; BILLINGS, Keith; MOREY, Taylor. **Switching Power Supply Design**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2009.

SLADE, Giles. **Made to Break**: Technology and Obsolescence in America. Cambridge: Harvard University Press, 2006.

VISHAY INTERTECHNOLOGY. **AC Film Capacitors in Connection with the Mains**. Application Note. Document Number: 28153. Malvern, PA: Vishay Intertechnology, 2018. Disponível em: https://www.vishay.com/doc?28153. Acesso em: 16 out. 2026.

ZANETTA, D. P. B. *et al*. Ageing of metal oxide varistors due to surges. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON LIGHTNING PROTECTION (ICLP), 31., 2012, Vienna. **Proceedings...** Vienna: IEEE, 2012. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/6088462. Acesso em: 9 dez. 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.