

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ALAN PERSICO ALVES

**PROJETO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Porto Alegre

2019

ALAN PERSICO ALVES

**PROJETO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica na Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2019

ALAN PERSICO ALVES

**PROJETO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA
APLICAÇÕES INDUSTRIAIS**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Aprovado em: ___ / ___ / _____

BANCA EXAMINADORA:

prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – UFRGS _____

prof. Ms. Igor Passa Wiltuschnig– UFRGS _____

Eng. André Paulo Simovic – UFRGS _____

PORTO ALEGRE

2019

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e familiares, cujo apoio foi essencial durante toda a minha vida, proporcionando suporte para a concretização desta tão importante conquista.

Aos meus amigos, colegas e namorada Mariana que me apoiaram nos momentos mais difíceis dessa jornada.

À empresa Tdk Eletronics do Brasil LTDA, pela disponibilidade de materiais e equipamentos para a realização dos estudos deste trabalho, junto a todo conhecimento adquirido.

Ao Engenheiro Rafael Preisig, por basicamente ter me dado todos os ensinamentos do material apresentado nesse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, não somente pelo acompanhamento e aconselhamento ao longo do trabalho, mas por todo o suporte dado durante todos esses longos anos de graduação.

RESUMO

Este projeto de diplomação tem por objetivo apresentar todos os passos inerentes ao projeto de capacitores eletrolíticos de alumínio utilizados em aplicações industriais. Será discutida a base teórica do funcionamento de um capacitor eletrolítico junto a uma descrição do processo de fabricação desse tipo de capacitor. Adicionalmente, serão mostradas as características e comportamento de suas principais matérias primas na construção desse tipo de componente. Serão apresentados também o modelo térmico do capacitor e como é calculada sua estimativa de vida. Finalmente, serão apresentados os principais requisitos necessários para que se possa desenvolver um capacitor eletrolítico de alumínio junto a uma análise de suas principais características elétricas para determinar a melhor escolha para uma determinada aplicação.

Palavras-chaves: **armazenamento de energia, dispositivos passivos, eletrolítico, folhas de alumínio, Screw Terminal, Snap In, Solder Pin**

ABSTRACT

This work aims to demonstrate all the inherent steps for designing aluminum electrolytic capacitors used in industrial applications. The theoretical basis of how an electrolytic capacitor works will be discussed, together with the description of the manufacturing process for this type of capacitor. In addition, will be shown the characteristics and behavior of its main raw materials in the construction of this type of component. The thermal capacitor model and how its life estimate will be calculated will also be presented. Finally, will be presented the most important requirements for development of an aluminum electrolytic capacitor and electrical characteristics that must be considered to determine the best option for a specific application.

Palavras-chaves: *Aluminum Foils, Electrolytic, Energy Storage, Passive Devices, Screw Terminal, Snap In, Solder Pin.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Exemplos de tipos de capacitores industriais e suas principais aplicações.....	12
Figura 2: Construção básica de um capacitor	13
Figura 3: Construção básica de uma bobina de um capacitor eletrolítico de alumínio.....	15
Figura 4: Característica tensão vs corrente de um capacitor eletrolítico de alumínio	16
Figura 5: Circuito equivalente capacitor eletrolítico alumínio.....	17
Figura 6: Princípios de construção de capacitor eletrolítico de alumínio para aplicações industriais.....	18
Figura 7: Gráfico Dependência da temperatura na capacitância série.....	21
Figura 8: Gráfico Capacitância C x Frequência f	22
Figura 9: Gráfico Fator de dissipação em capacitor de baixa tensão	23
Figura 10: Gráfico Fator de dissipação em capacitor de alta tensão	24
Figura 11: Gráfico Fator de dissipação em capacitor especial de baixa tensão	24
Figura 12: Gráfico Impedância x frequência e temperatura (tensão baixa)	26
Figura 13: Gráfico Impedância x frequência e temperatura (tensão alta)	26
Figura 14: Corrente de fuga vs. tempo quando é aplicada uma tensão	28
Figura 15: Corrente de fuga x temperatura.....	28
Figura 16: Folha de ânodo para capacitores de alta tensão (ampliação 400x)	33
Figura 17: Folha de ânodo para capacitores de baixa tensão (ampliação 400x)	34
Figura 18: Representação esquemática do capacitor eletrolítico de alumínio em termos capacitivos.	38
Figura 19: Construção Papéis Eletrolíticos	42
Figura 20: Exemplos de papéis eletrolíticos em imagens tiradas em microscópio	42
Figura 21: Cuba eletrolítica – deslocamento de cargas elétricas sob ação de campo elétrico .	43
Figura 22: Processo de fabricação de capacitores eletrolíticos de alumínio	46
Figura 23: Etapa de impregnação a vácuo.....	49
Figura 24: Esquema de reoxidação em capacitores eletrolíticos de alumínio	51
Figura 25: Parâmetros térmicos do capacitor	54
Figura 26: Circuito para o modelo térmico considerado para o capacitor.....	55
Figura 27: <i>Useful life</i> : Dependendo da temperatura ambiente e condições de corrente de ripple.	58
Figura 28: Fator de frequência admissível para corrente de ondulação versus frequência	58
Figura 29: Características de frequência da resistência equivalente série.....	59

Figura 30: Impedância (Z) versus frequência (f).....	59
Figura 31: Contribuição dos materiais de bobina para formação do RSE analisados em baixa frequência	63
Figura 32: Contribuição dos materiais de bobina para formação do RSE analisados em alta frequência	64
Figura 33: Influência da temperatura no RSE em altas e baixas frequências.....	65
Figura 34: Simulação RSE vs. Frequência	66
Figura 35: Influência da quantidade de abas no RSE	66
Figura 36: RSE vs. Temperatura em diferentes frequências	67
Figura 37: Bobina com cátodo saliente	68
Figura 38: Influência do cátodo saliente na Rth	68
Figura 39: Medição de temperatura da caneca e do núcleo do capacitor	69
Figura 40: Perda de capacitância	70
Figura 41: Aumento de RSE.....	70
Figura 42: Simulação aumento de RSE durante a vida	71
Figura 43: Corrente de fuga após 48 horas de operação.....	71
Figura 44; Estimativa de vida em relação a tensão de operação	72
Figura 45: Ganho de Vida ao utilizar tensão menor que a nominal	72
Figura 46: Esquemático principais mecanismos de envelhecimento do capacitor.....	73

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
2 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO	13
3 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES DE CAPACITORES ELETROLITICOS DE ALUMÍNIO.....	19
3.1 CLASSE DE USO GERAL E CLASSE DE CAPACITORES LONGA VIDA	
19	
3.2 NORMAS APLICÁVEIS	19
3.3 DEFINIÇÕES DOS PRINCIPAIS PARAMETROS E SUAS VARIAÇÕES.	20
4 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS MATÉRIAS PRIMAS.....	30
4.1. ÓXIDO DE ALUMÍNIO	30
4.2 FOLHA DE ÂNODO.....	32
4.2.1 CARACTERISITICAS FOLHA ÂNODO	34
4.2.2 IMPUREZAS FOLHA DE ÂNODO.....	36
4.3 FOLHA DE CÁTODO	37
4.3.1 EFEITO CAPACITIVO.....	38
4.3.2 ESTABILIDADE	39
4.3.3 TIPOS DE CÁTODO	39
4.4 PAPEL ELETROLÍTICO	40
4.4.1 TIPOS DE PAPEIS ELETROLÍTICOS	41
4.5 ELETRÓLITO DE IMPREGNAÇÃO	43
4.5.1 CARACTERÍSTICAS E INFLUÊNCIA DO ELETRÓLITO DE IMPREGNAÇÃO	44
5. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS ...	46
5.1 BOBINAGEM	47
5.2 IMPREGNAÇÃO	48
5.3 REOXIDAÇÃO.....	50
6 PROJETO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO.....	53
6.1 MODELO TÉRMICO CAPACITOR ELETROLÍTICO DE ALUMÍNIO ...	53
6.2 CALCULO DE ESTIMATIVA DE VIDA	55
6.3 REQUISITOS PARA PROJETER CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO	60
6.3.1 PROJETO DE SÉRIES / FAMÍLIAS DE CAPACITORES	60

6.3.2 PROJETO DE CAPACITOR ELETROLÍTICO DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA.....	61
7 CONCLUSÃO.....	74
REFERÊNCIAS.....	75

1 Introdução

O conhecimento do comportamento de um componente durante sua vida, bem como o conhecimento do comportamento de seus parâmetros elétricos e mecânicos junto com o conhecimento dos princípios das principais matérias primas utilizadas são essenciais ao projetar um componente para uma aplicação específica.

Ao tratar-se de capacitores eletrolíticos de alumínio, sabe-se de forma geral o seu princípio de funcionamento. Princípio esse que é aplicado para todo tipo de capacitor; no entanto, o seu real funcionamento é desconhecido pela maioria dos projetistas. Dependendo da complexidade de um sistema, projeta-se desde bancos de capacitores complexos até simples associações série paralelo. Ao projetar essa parte do sistema, as principais características sabidas e/ou requeridas são geralmente capacitância, tensão e temperatura de operação dos capacitores. De modo geral, com essas informações consegue-se, junto as especificações de componentes no mercado, escolher capacitores que cumpram a necessidade de projeto. No entanto, esse componente pode estar superestimado, acarretando custos adicionais ao projeto como um todo, pois em linhas gerais quanto mais robusto um capacitor, maior será o seu custo. Ou seja, em diversas vezes equipamentos utilizam componentes em que “sobram especificação” para a aplicação desejada.

Diversas aplicações industriais, para não dizer a totalidade, utilizam-se de capacitores eletrolíticos de alumínio em suas estruturas. Como exemplos de utilização de capacitores eletrolíticos de alumínio em aplicações industriais estão entre os principais os No-Breaks, Drives, Fontes chaveadas, geradores de energia eólica, inversores solares, entre outros. Saber como se comporta o capacitor eletrolítico de alumínio, seu princípio de funcionamento, suas características elétricas e mecânicas junto as suas variações (frequência, temperatura, etc) e ainda somando as condições de aplicação em que o mesmo é submetido, pode-se projetar um capacitor para a aplicação específica em que o componente projetado cumpra os requisitos do sistema e que ao mesmo tempo possua um melhor custo benefício para esta aplicação.

Em aplicações industriais os tipos de capacitores eletrolíticos normalmente utilizados são capacitores de maiores dimensões, pois estas aplicações requerem grandes valores de capacitância e a elevadas potências nas aplicações. Os principais tipos de capacitores eletrolíticos de alumínio utilizados em aplicações industriais são:

- ***Srew Terminal***: Como o próprio nome diz, são capacitores que possuem parafusos para contactar o terminal do capacitor a um barramento.

- **Snap In:** São capacitores menores em relação aos Screw Terminals, que possuem terminal para encaixar em placas de circuito impresso.

- **4- Pin / Solder Pin:** São capacitores muito semelhantes aos Snap Ins, mas com dimensionais maiores e diferentes tipos de terminais. No entanto, ainda sim, são menores que os Screw Terminals.

Figura 1: Exemplos de tipos de capacitores industriais e suas principais aplicações



Fonte: O autor

Com base nessas informações, este trabalho tem por objetivo, apresentar como são projetados os capacitores eletrolíticos de alumínio para aplicações industriais. Esse trabalho mostrará quais as influências e como operam as principais matérias primas do capacitor, bem como apresentará as principais etapas de processo de fabricação do mesmo. Da mesma forma relacionará as matérias primas com os parâmetros elétricos do capacitor, assim como irá apresentar o comportamento dos mesmos em diferentes tipos de situações: como variação de temperatura, frequência, corrente de *ripple*, etc. Analisará o comportamento térmico do capacitor, bem como sua influência o cálculo de vida útil desse capacitor atuando em uma determinada aplicação. Por fim apresentará quais são as informações necessárias para que se possa projetar um capacitor eletrolítico de alumínio para operar em uma determinada aplicação industrial.

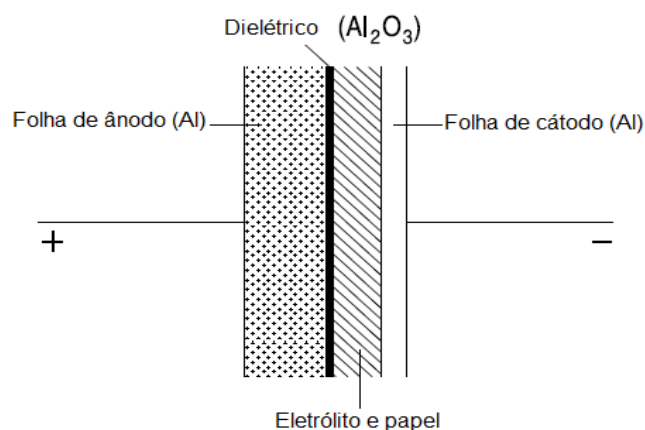
2 CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

Os capacitores eletrolíticos de alumínio são dispositivos passivos de armazenamento de energia, tendo como seus princípios de operação processos eletroquímicos. Por esta razão, os mesmos, assumem uma posição especial entre os vários tipos de capacitores.

A principal vantagem dos capacitores eletrolíticos de alumínio ocorre pela sua alta eficiência volumétrica (capacitância por unidade de volume) viabilizando até mesmo capacitores com capacitância nominal de 1 Farad. Outra vantagem dos capacitores eletrolíticos de alumínio está em suportar uma considerável corrente de *ripple* junto a uma alta confiabilidade e uma ótima relação custo/benefício.

Um capacitor eletrolítico de alumínio é construído por duas camadas de materiais eletricamente condutores que são separadas por uma camada dielétrica. Um eletrodo (o ânodo – com polaridade positiva) é formado por uma folha de alumínio com uma superfície ampliada por processos de cauterização. A camada de óxido de alumínio é formada sobre esta folha e usada como dielétrico. Contrastando com outros capacitores, o contra eletrodo (o cátodo – com polaridade negativa) dos capacitores eletrolíticos de alumínio é um líquido condutivo, chamado de eletrólito operacional. Uma segunda folha de alumínio, a chamada folha de cátodo serve como uma grande área de contato para a passagem de corrente para o eletrólito operacional. A figura 1 mostra como é a construção básica de um capacitor.

Figura 2: Construção básica de um capacitor



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

A capacitância é dada pela Equação (1).

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

Onde:

C - Capacitância [F];

ε_0 – Permissividade absoluta [$\frac{F}{m}$];

ε_r – Permissividade relativa [9,5 para Al_2O_3];

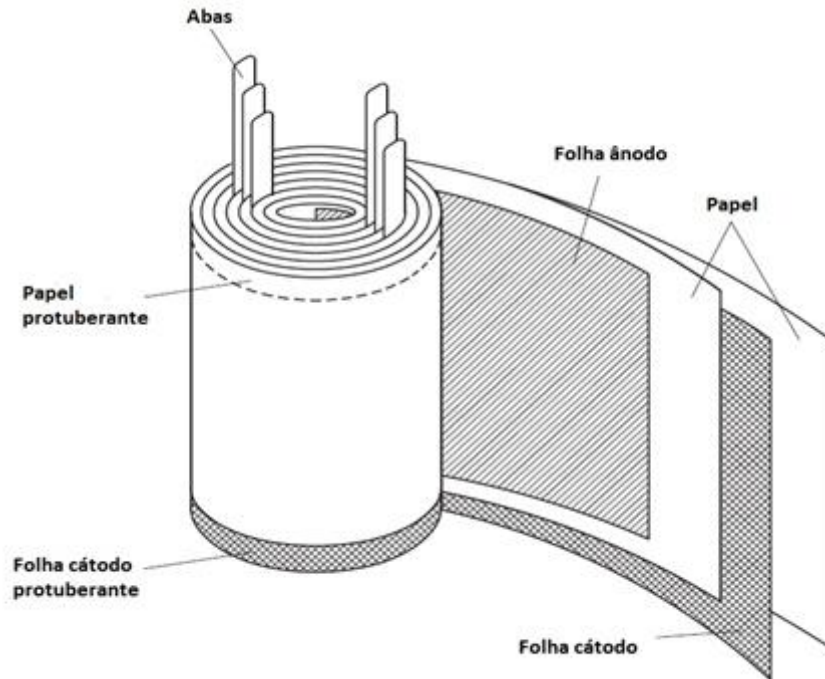
A – Área da superfície do eletrodo do capacitor [m^2];

d – Espaçamento entre eletrodos [m];

Uma vez que os capacitores eletrolíticos têm um líquido como cátodo, eles também são chamados de “molhados” ou capacitores “não-sólidos”. O líquido tem a vantagem de preencher os pequenos poços de cauterização, portanto, se encaixa otimamente na estrutura do ânodo.

As duas folhas de alumínio de alta pureza são separadas por separadores de papel. O papel serve para várias finalidades, serve como um recipiente para o eletrólito - o eletrólito é armazenado nos poros do papel absorvente - e também como um separador para evitar curtos-circuitos elétrico.

Figura 3: Construção básica de uma bobina de um capacitor eletrolítico de alumínio.

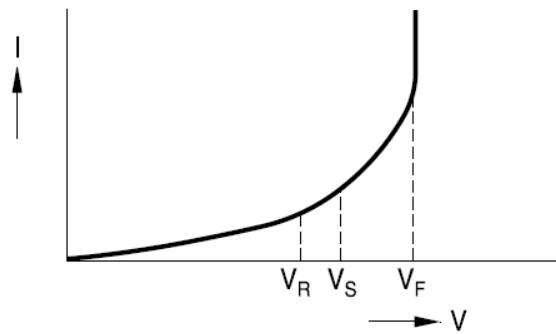


Fonte: (EPCOS AG 2017, 2017)

Um capacitor eletrolítico de alumínio construído da maneira descrita acima só funcionará corretamente se o polo positivo for conectado à folha de alumínio formada com óxido de alumínio (Al_2O_3) (ânodo), e o polo negativo à folha de cátodo. Caso aplicado uma polaridade inversa, haveria uma corrente contrária a habitual, o que resultaria na formação de uma camada dielétrica na folha de cátodo ao invés da reformulação do óxido de alumínio já presente na folha de anodo. Neste caso, ocorrerá forte geração de calor interno e emissão de gases podem ocorrer, degradando os materiais da bobina e destruindo o capacitor. Em segundo lugar, a capacitância do cátodo irá diminuir progressivamente à medida que a espessura da camada de óxido aumenta, e que está ligada em série com a capacitância do ânodo, desta forma a capacitância equivalente do capacitor.

A camada dielétrica de um capacitor eletrolítico de alumínio é criada por oxidação anódica (formação), que cria uma camada de óxido de alumínio sobre a folha. A espessura da camada aumenta em relação à tensão de formação a uma taxa de $1,2 \text{ nm/V}$. Mesmo para capacitores de elevada tensão, camadas com espessuras de menos de 1 mm são obtidas, permitido assim pequenos espaçamentos entre eletrodos. Essa é uma razão pela alta eficiência volumétrica obtida.

Figura 4: Característica tensão vs corrente de um capacitor eletrolítico de alumínio



Fonte: (EPCOS AG 2017, 2017)

Onde:

V_R – Tensão nominal de referência;

V_S – Sobretensão;

V_F – Tensão de formação;

I – Corrente;

Quando a tensão de formação V_F é excedida, o processo de formação começa gerar uma grande quantidade de gás e calor. O mesmo efeito, ainda que em menor escala, pode ser observado desde o joelho da curva. A fim de alcançar um elevado grau de segurança de operação para o capacitor, a tensão nominal V_R é definida como sendo a parte quase linear da curva. Como o capacitor é submetido à sobretensão V_S por curtos períodos de tempo, esta faixa encontra-se entre a tensão nominal e a tensão de formação. A diferença entre a tensão de formação e a tensão de funcionamento é chamada de sobre-anodização, tendo um substancial efeito na confiabilidade de operação do capacitor. Uma alta sobre-anodização oferece a possibilidade de construção de tipos especiais de capacitores com alta confiabilidade, denominados de longa-vida.

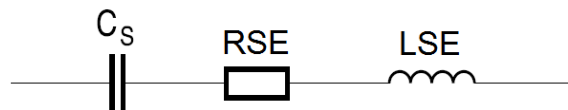
Um capacitor eletrolítico com design básico descrito acima é, portanto, adequado somente para operação CC. A tensão CC também pode ser uma tensão ripple, ou seja, uma tensão CC com uma tensão alternada sobreposta; o polo positivo deve ser conectado ao ânodo. Capacitores com esta configuração são versões com polos positivo e negativo (CC) que podem ser usados na maioria das aplicações.

Capacitores eletrolíticos de alumínio são capacitores polares, no entanto, são consideradas admissíveis tensões reversas de até 1,5V por curtos períodos de tempo já que a

formação de uma camada de óxido prejudicial no cátodo somente inicia em tensões dessa magnitude. (Isto por que a folha de cátodo é coberta por uma camada de ar-óxido que corresponde a uma camada dielétrica anodizada com uma tensão de ruptura de aproximadamente 1,5 V).

O circuito equivalente de um capacitor eletrolítico de alumínio é mostrado na figura 3, onde C_s corresponde a capacitância série equivalente, que é o parâmetro mais significativo para o componente e que está relacionado com a grandeza capacitância elétrica, em função de sua área, distância entre materiais condutores e constante dielétrica equivalente entre os materiais. Como o capacitor eletrolítico de alumínio é enrolado em forma de bobina, este enrolamento de metais aparece representado como uma indutância série equivalente, ou LSE. As imperfeições do contato entre terminais e folhas de alumínio, condutividade do eletrólito impregnado no papel e a espessura do óxido de alumínio, aparecem representadas como a RSE, ou, resistência série equivalente.

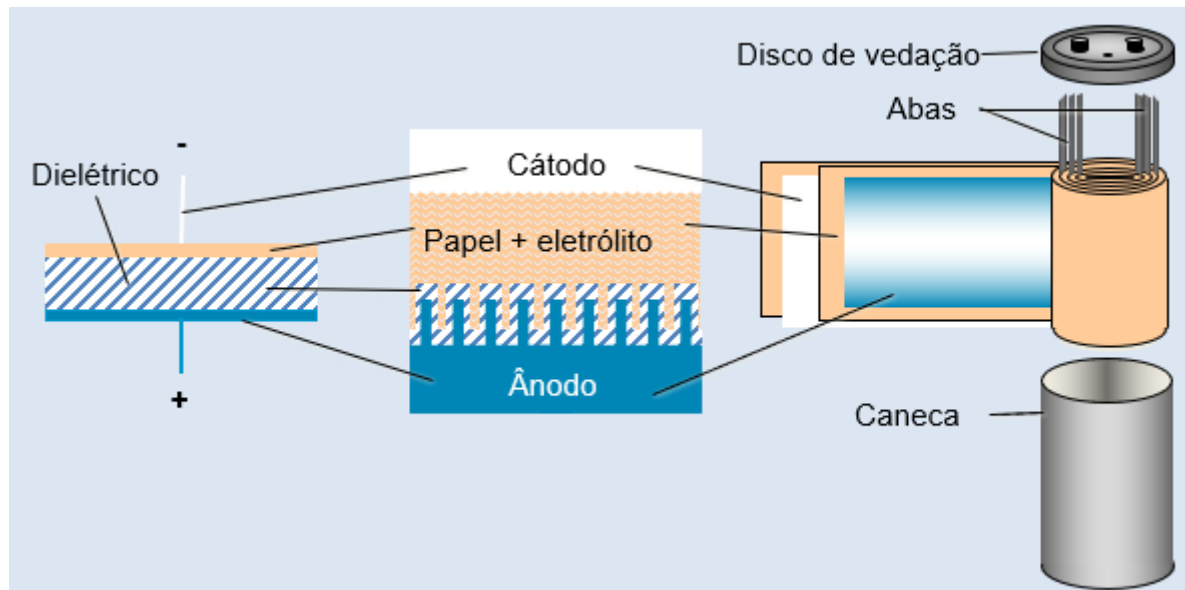
Figura 5: Circuito equivalente capacitor eletrolítico alumínio.



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Tendo em vista as principais matérias primas que estão relacionadas a bobina do capacitor, tem-se que dar atenção também a parte mecânica do capacitor eletrolítico de alumínio. A bobina composta por ânodo, cátodo, papel eletrolítico, eletrólito e abas (também chamadas de “tabs”) são soldadas nos terminais de um disco e colocadas em uma caneca de alumínio. Após isso, é feito um friso na caneca próximo ao disco para fixar a bobina dentro da mesma e reborderar a superfície da caneca no disco para fazer a vedação do capacitor.

Figura 6: Princípios de construção de capacitor eletrolítico de alumínio para aplicações industriais.



Fonte: O autor

3 NORMAS E ESPECIFICAÇÕES DE CAPACITORES ELETROLITICOS DE ALUMÍNIO.

Como para qualquer equipamento elétrico eletrônico, existem normas que fabricantes necessitam seguir para a produção dos mesmos.

3.1 CLASSE DE USO GERAL E CLASSE DE CAPACITORES LONGA VIDA

Capacitores eletrolíticos de alumínio são geralmente divididos em duas categorias básicas de confiabilidade: capacitores para aplicações de alta confiabilidade e capacitores para aplicações de uso geral. Esta diferenciação também foi adotada nas normas IEC relevantes.

Em publicações IEC, capacitores eletrolíticos de alumínio para aplicações de alta confiabilidade são identificados como capacitores da “Classe Longa-Vida. A abreviação LL (Long-Life) é estampada nos capacitores. Geralmente, os materiais utilizados para capacitores eletrolíticos de alumínio devem satisfazer rigorosos requisitos de pureza, Classe de uso geral e classe de capacitores longa-vida, e os materiais utilizados para a produção de capacitores da classe LL devem ser especialmente selecionados. O esforço necessário a nível de design para tais capacitores envolve os problemas de tamanho e de custo.

Capacitores eletrolíticos de alumínio para aplicações gerais são chamados de “Classe de Uso Geral” (GP) em publicações IEC.

3.2 NORMAS APLICÁVEIS

A norma internacional para capacitores eletrolíticos de alumínio é a IEC 60384-4.

A especificação mencionada acima é complementada por um conjunto de especificações de detalhes que se aplicam aos tipos de designs específicos/especiais (por exemplo, capacitores eletrolíticos com terminais axiais). Frequentemente estas especificações de detalhes contém melhores avaliações elétricas e mecânicas do que a especificação acima citada. São formas de contemplar também designs fora de padrão, ditos como especiais. As especificações de detalhe também incluem dimensões máximas permitidas em relação à capacitância e tensão nominal.

As seguintes normas são aplicáveis a capacitores eletrolíticos de alumínio com eletrólito não-sólido:

IEC 60384-1: Capacitores fixos para uso em equipamentos eletrônicos.

IEC 60384-4: Capacitores eletrolíticos de alumínio com eletrólito sólido e não-sólido.

IEC 60384-4-1: Capacitores eletrolíticos de alumínio com eletrólito não-sólidos

3.3 DEFINIÇÕES DOS PRINCIPAIS PARAMETROS E SUAS VARIAÇÕES

Tensão nominal (VR): A tensão nominal VR é o valor de tensão direta para o qual o capacitor foi projetado e que é indicada no mesmo. Para capacitores eletrolíticos de alumínio, tensões nominais ≤ 100 V são usualmente consideradas como "baixa tensão" e tensões nominais > 100 V como "alta tensão".

Tensão de operação (Vop): Os capacitores podem ser operados continuamente, à tensão nominal plena (incluindo tensão CA sobreposta - positiva) dentro de toda faixa de temperaturas de funcionamento. A faixa de tensão aceitável para operação contínua situa-se entre a tensão nominal e 0 V. Por curtos períodos de tempo, os capacitores também são capazes de suportar tensões de até 1,5 V.

Sobretensão (Vs): A sobretensão é a tensão máxima que pode ser aplicada ao condensador para curtos períodos de tempo, ou seja, até 5 vezes durante 1 minuto por hora. A IEC60384-4 especifica as tensões de surto da seguinte forma:

Para $VR \leq 315V$: $V_s = 1,15 VR$

Para $VR > 315V$: $V_s = 1,10 VR$

Tensão CA sobreposta, tensão ripple: Uma tensão alternada sobreposta, ou tensão ripple, pode ser aplicada a capacitores eletrolíticos de alumínio, desde que:

- A soma da tensão contínua e da tensão alternada sobreposta não exceda a tensão nominal;
- A corrente ripple nominal não seja excedida e que não ocorra nenhuma inversão de polaridade.

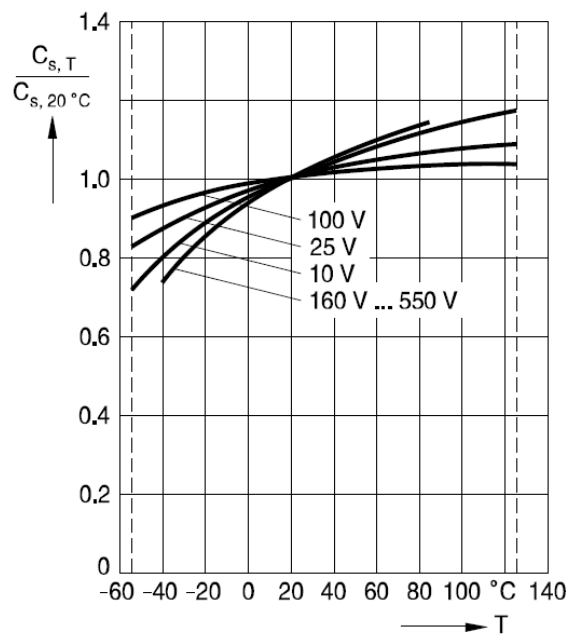
Tensão reversa: Capacitores eletrolíticos de alumínio são capacitores polares. Sempre que necessário, tensões de polaridade oposta devem ser evitadas pela ligação de um diodo. A tensão de estado condutivo do diodo de aproximadamente 0,8 V é admissível. Tensões reversas $\leq 1,5$ V são suportáveis por uma duração de menos de 1 segundo, mas não em operação contínua ou repetitiva.

Capacitância nominal (Rated Capacitance - CR): A capacitância nominal é o valor de capacitância para qual o capacitor foi projetado e o que é indicada nele. CR é determinada através de métodos de medição específicos descritos nas normas específicas (IEC 60384-1 e IEC 60384-4).

Tolerância de capacitância: A tolerância de capacitância é o intervalo dentro do qual a capacitância real pode desviar-se da capacitância nominal especificada. Estas tolerâncias de capacitância devem ser indicadas nos componentes em si.

Dependência da Temperatura: A capacitância de um capacitor eletrolítico não é uma quantidade constante que mantém seu valor em todas as condições de funcionamento. A temperatura tem um efeito considerável sobre a capacitância. Com a diminuição da temperatura, a viscosidade do eletrólito aumenta o que reduz sua condutividade. O comportamento típico resultante é mostrado na figura 7, com referência a 100Hz e 20°C que são as condições normalmente de especificações.

Figura 7: Gráfico Dependência da temperatura na capacitância série



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

A forma mais plana mostrada na Figura 7 é obtida através de eletrólitos especiais, que garantem que os capacitores podem ser operados a temperaturas muito abaixo de zero.

Dependência da Frequência: A capacitância depende não somente da temperatura, mas também da frequência de medição. A Gráfico 3 mostra o comportamento característico. Valores típicos de capacitância efetiva podem ser derivados a partir da curva de impedância, enquanto a impedância ainda estiver na faixa onde o comportamento capacitivo é dominante. A Equação 2 relaciona a dependência da capacitância com a frequência.

$$C = \frac{1}{2\pi fZ} \quad (2)$$

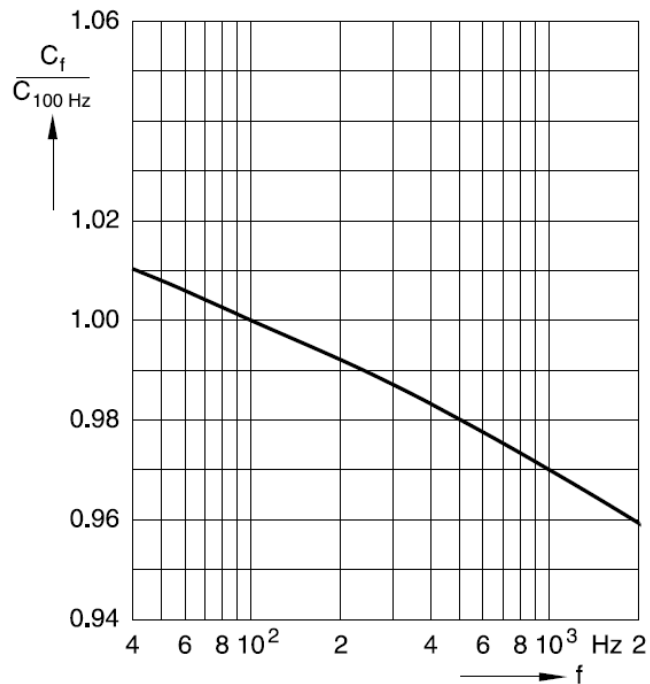
Onde:

C - Capacitância [F]

f - Frequência [Hz]

Z - Impedância [Ω]

Figura 8: Gráfico Capacitância C x Frequência f



Fonte: [3] EPCOS AG (2017)

Fator de dissipação ($\tan \delta$): O fator de dissipação $\tan \delta$ é a razão da resistência equivalente série pela componente de reatância capacitiva no circuito equivalente série, ou a razão da potência efetiva (potência dissipada) pela potência reativa para tensões sinusoidais.

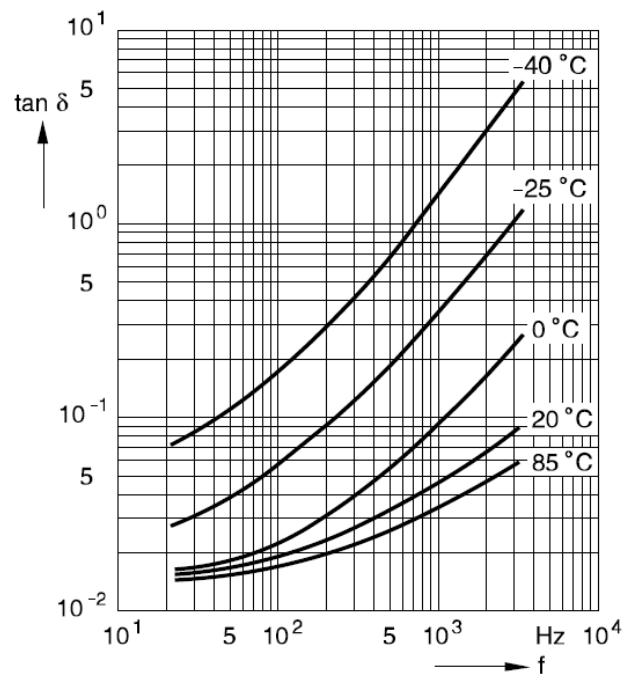
Na Tabela 1 são mostrados valores máximos para $\tan \delta$, especificados pela IEC 60384-4, aplicados a capacitores com valor máximo de carga de $100000 \mu C$. Proporcionalmente valores maiores de fator de dissipação são possíveis para capacitores com maior carga máxima.

Tabela 1 – Valores máximos para $\tan \delta$

Tensão nominal	$4V < V_R \leq 10V$	$10V < V_R \leq 25V$	$25V < V_R \leq 63V$	$63V < V_R$
Valor máximo para o fator de dissipação a 100 Hz (IEC 60384-4)	0,5	0,35	0,25	0,20

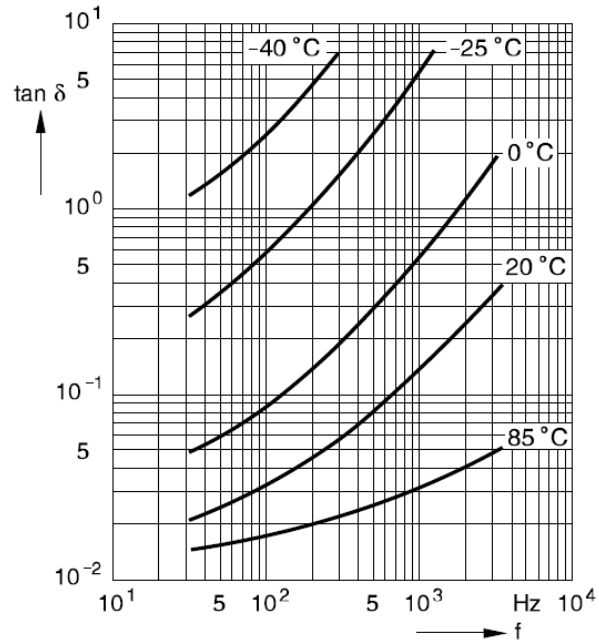
Dependência da Frequência e Temperatura: O fator de dissipação, como a capacitância, varia com a frequência e temperatura. As figuras 9,10 e 11 mostram alguns exemplos comuns de comportamento do fator de dissipação de capacitores utilizados em baixas e altas tensões.

Figura 9: Gráfico Fator de dissipação em capacitor de baixa tensão



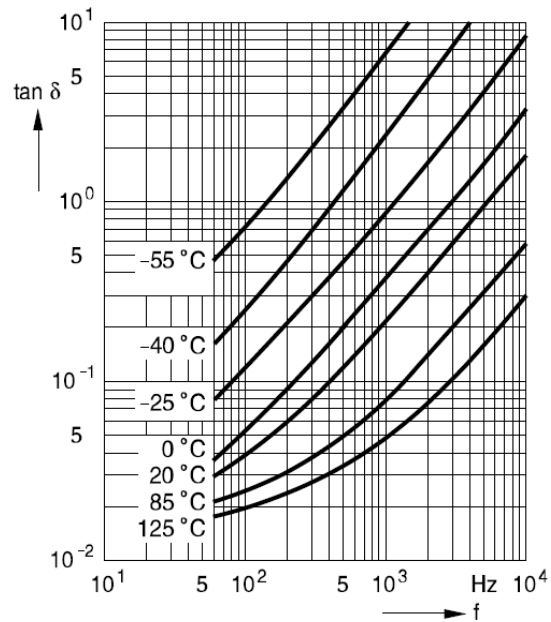
Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Figura 10: Gráfico Fator de dissipação em capacitor de alta tensão



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Figura 11: Gráfico Fator de dissipação em capacitor especial de baixa tensão



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Resistência série equivalente (ESR): A resistência série equivalente é a componente resistivo do circuito série equivalente. O valor da ESR depende da frequência e da temperatura e está relacionado com o fator de dissipação pela equação 3:

$$\mathbf{ESR} = \frac{\mathbf{\tan \delta}}{\omega \cdot C_s} \quad (3)$$

ESR Resistência série equivalente

tan δ Fator de dissipação

C_s Capacitância série

Os limites de tolerância da capacitância nominal devem ser levados em conta no cálculo deste valor.

Impedância (Z): A impedância de um capacitor eletrolítico resulta primariamente do circuito série formado pelos componentes série equivalentes individuais conforme circuito equivalente da figura 3.

Individualmente existem as componentes:

Reatância capacitiva $\frac{1}{\omega C_s}$ da capacitância C_s ;

Perdas dielétricas e resistência ôhmica do eletrólito e dos terminais (ESR);

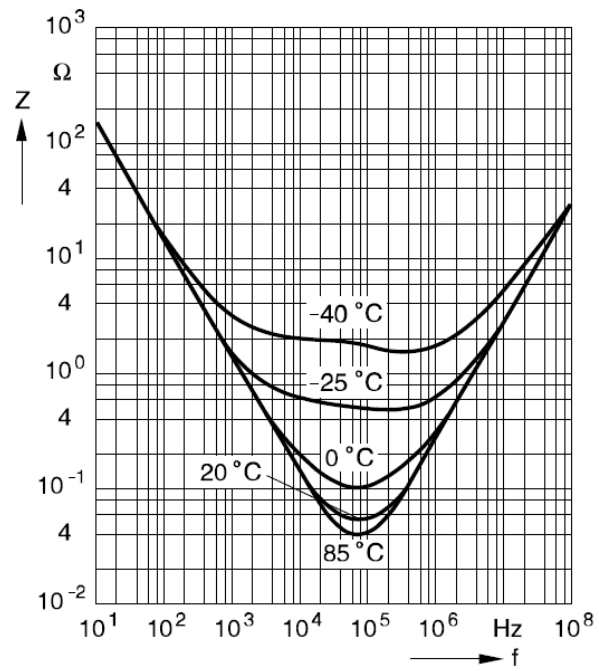
Reatância indutiva ωESR da bobina do capacitor e terminais;

A reatância indutiva ωESR depende somente da frequência, enquanto $\frac{1}{\omega C_s}$ e ESR dependem da frequência e da temperatura.

As características dos componentes resistivos e reativos, individualmente, determinam a impedância total do capacitor.

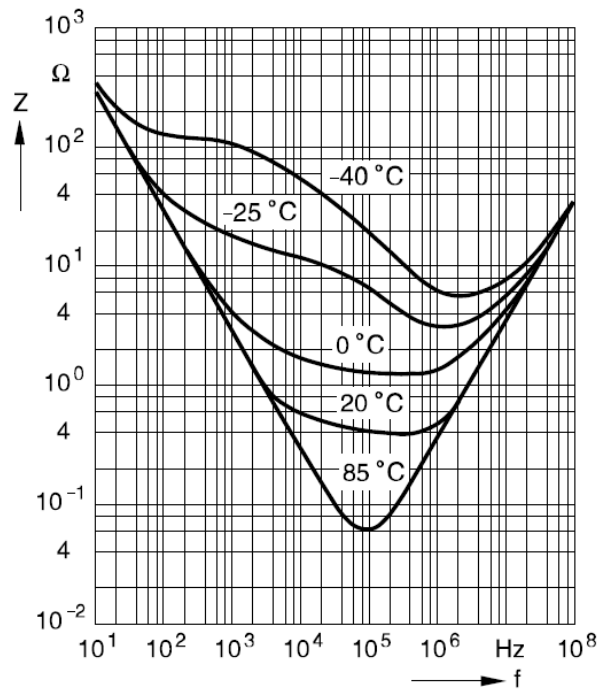
As figuras 12 e 13 mostram a característica típica de frequência e temperatura de capacitores eletrolíticos de alumínio.

Figura 12: Gráfico Impedância x frequência e temperatura (tensão baixa)



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Figura 13: Gráfico Impedância x frequência e temperatura (tensão alta)



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

A partir das figuras 12 e 13, algumas observações podem ser feitas:

A reatância capacitiva predomina em baixas frequências

Com a frequência crescente, a reatância capacitiva ($X_C = 1/\omega C_S$) decresce até atingir a ordem de magnitude da resistência do eletrólito.

Para frequências ainda mais altas e sem mudança de temperatura (visto na curva 20 °C), a resistência do eletrólito predomina.

Quando a frequência de ressonância do capacitor é atingida, as reatâncias indutivas e capacitivas se cancelam.

Abaixo dessa frequência a resistência indutiva da bobina e seus terminais ($X_L = \omega L$) se torna mais efetiva e predomina no aumento da impedância.

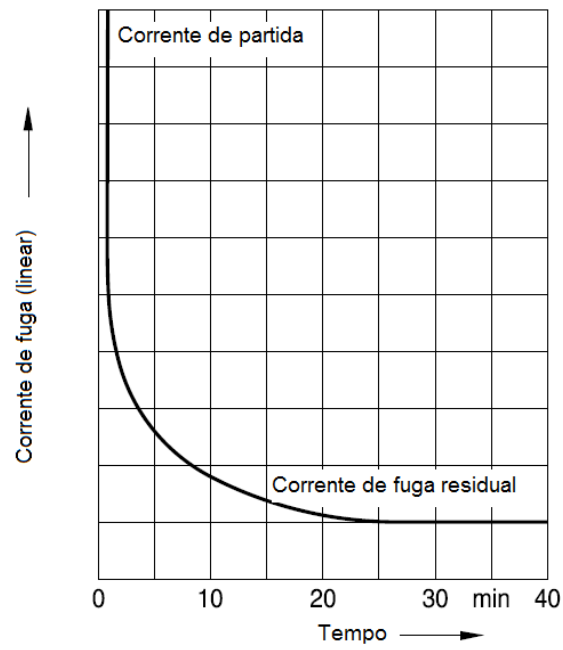
A resistência do eletrólito aumenta fortemente com a diminuição da temperatura, pois com o aumento da temperatura há a diminuição da viscosidade do eletrólito e conseqüentemente uma melhor impregnação e condutividade do eletrólito. As figuras 12 e 13 mostram que este efeito já aparece em baixas frequências para baixas temperaturas.

Corrente de fuga (I_{leak}): Devido às propriedades especiais da camada de óxido de alumínio utilizado como dielétrico, uma pequena corrente continuará a fluir mesmo depois de uma tensão CC ter sido aplicada por longos períodos. Essa corrente é chamada de corrente de fuga. O valor da corrente de fuga depende do design do capacitor e também é função do tempo, da tensão aplicada e da temperatura interna do capacitor. O valor nível inicial da corrente de fuga também é afetado pela história do capacitor tal como suas condições de estocagem e duração. Uma baixa corrente de fuga é uma indicação de que o dielétrico é bem elaborado. Ou seja, o óxido de alumínio presente na folha de ânodo é um óxido estável.

Dependência do Tempo e Temperatura: Como mostrado na Figura 14, uma grande corrente de fuga flui no primeiro minuto após ser aplicada a tensão no capacitor, principalmente após um prolongado armazenamento sem tensão aplicada. No decorrer da operação contínua, a corrente de fuga vai diminuindo até chegar a um valor quase constante.

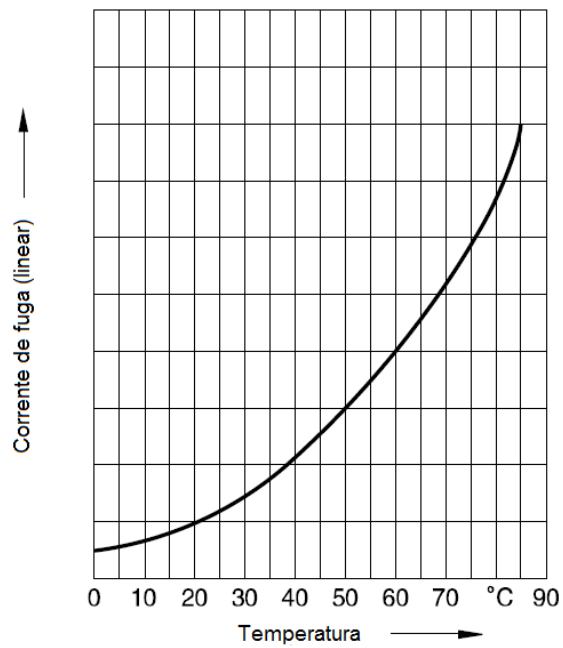
A dependência da temperatura da corrente de fuga é mostrada na Figura 15, sendo mostrado um capacitor de categoria 85 °C como exemplo.

Figura 14: Corrente de fuga vs. tempo quando é aplicada uma tensão



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Figura 15: Corrente de fuga x temperatura



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Corrente de ondulação (Corrente de Ripple): O termo corrente de ondulação é usado para o valor eficaz da corrente alternada que flui através do dispositivo como resultado de qualquer pulsação ou ondulação de tensão. O valor máximo de ondulação permissível depende da temperatura ambiente, da área da superfície do capacitor (ou seja, da área de dissipação de calor), do fator de dissipação $\tan \delta$ (ou ESR) e da frequência CA.

Como o estresse térmico tem um efeito decisivo na expectativa de vida do capacitor, a dissipação de calor gerada pela corrente de ondulação é um fator importante que afeta a vida útil do capacitor. Existem diagramas específicos que relacionam a vida útil do capacitor com a temperatura ambiente.

Essas considerações térmicas implicam que em certas circunstâncias, pode ser necessário selecionar um capacitor com maior tensão ou capacitância nominal do que seria requerido para a respectiva aplicação.

Dependência da Frequência: O fator de dissipação, que é relacionado com a resistência série equivalente, varia com a frequência da tensão aplicada. Como resultado, a corrente de ondulação é também uma função da frequência. Em catálogos, geralmente, a corrente de ondulação é referenciada para frequências de 100 ou 120 Hz, ou em alguns casos para frequências de 10 ou 20 kHz.

Dependência da Temperatura: Os catálogos especificam uma corrente máxima de ondulação permissível para a categoria superior de temperatura para cada capacitor. Para a maioria dos tipos com categoria de temperatura acima de 85 °C, a corrente de ondulação de 85 °C também é incluída para servir de comparação. Os catálogos de cada capacitor também incluem um diagrama que mostra os valores limite para operação contínua e outro para temperatura ambiente e corrente de ondulação. Os diagramas também permitem estimar a expectativa de vida com as condições de operação dadas.

4 DESCRIÇÃO DAS PRINCIPAIS MATÉRIAS PRIMAS

Para a realização do projeto de capacitores eletrolíticos de alumínio é essencial saber as principais características das suas principais matérias primas. Sabendo como elas se comportam, elétrica e mecanicamente.

4.1. ÓXIDO DE ALUMÍNIO

O alumínio é o metal mais abundante da crosta terrestre. Seu principal minério é a bauxita ($\text{Al}(\text{OH})_3$). A obtenção e a purificação deste metal a partir da bauxita baseia-se no processo eletroquímico com alta demanda de energia elétrica.

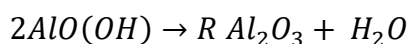
A classificação do alumínio na tabela de eletronegatividade, caracteriza-o como um metal muito reativo, inclusive mais que o ferro. Contudo, o mesmo apresenta características semelhantes às de um metal relativamente nobre. Este fato se deve fundamentalmente as propriedades físico-químicas do óxido de alumínio que reveste a sua superfície.

Face a sua reatividade, o alumínio se oxida instantaneamente ao simples contato com o oxigênio do ar, porém devido as suas características, esta película impede a oxidação sucessiva do alumínio, isto é, atuando como uma camada protetora da metal base. A espessura dessa película é extremamente fina e depende das condições de umidade e temperatura.

Na prática, nem sempre o óxido natural é suficiente para atribuir ao alumínio as características necessárias à sua utilização. Os processos mais conhecidos para a obtenção do óxido de alumínio são os seguintes:

Recozimento: consiste no aquecimento do alumínio a temperatura de 450°C a 550°C em atmosfera contendo oxigênio. Nesse processo, há um efeito colateral que é a formação de óxidos cristalinos de Alumínio o que reduz sensivelmente a dureza da folha. Com isso, este processo também é conhecido por aumentar a ductibilidade do alumínio. A oxidação por esse processo é quantitativamente muito limitada.

Cocção: Consiste na imersão do alumínio em água fervente. Este processo provoca a reação da água com o alumínio gerando $\text{AlO}(\text{OH})$ hidratado (boemita). A grande vantagem deste processo é o menor consumo de energia elétrica quando posteriormente se submete o alumínio a oxidação eletroquímica a fim de obter uma camada mais espessa de óxido. Neste caso ocorre a desidratação/cristalização conforme a reação:



Eletroquímico: Consiste na oxidação do alumínio com a aplicação de corrente contínua numa cuba eletrolítica onde o alumínio exerce a função de anodo. O processo

comercialmente mais conhecido é a anodização ou preoxidação. Seus objetivos são basicamente os seguintes:

Revestir a superfície do alumínio com uma camada mais espessa de óxido a fim de atribuir maior resistência a agentes químicos.

Obter efeitos estéticos através do uso de eletrólitos de classe II (ex. solução aquosa de ácido sulfúrico ou oxálico) que além de oxidar também cauteriza o alumínio. Este fato confere o aspecto fosco a superfície do alumínio. Nesse banho também podem ser adicionados corantes cujos pigmentos penetram nos poros da cauterização. A sua normalmente é feita com posterior cocção do alumínio.

Formar camadas de óxidos de alumínio com propriedades dielétricas para utilização nos capacitores eletrolíticos.

A Influência do óxido de alumínio na capacitância é descrita por:

A grande vantagem dos capacitores eletrolíticos de alumínio é a relação capacitância versus tensão por unidade de volume, que se reflete na redução dimensional e no custo do componente.

A relação entre capacitância e as características do óxido de alumínio é dada pela equação:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e} \quad (3)$$

Onde:

C: Capacitância;

ϵ_0 : Constante dielétrica absoluta;

ϵ_r : Constante dielétrica relativa do óxido;

S: Superfície efetiva do ânodo;

e: Espessura da camada de óxido;

A elevada capacitância volumétrica específica do capacitor é atribuída aos seguintes fatores:

Espessura da película de oxido extremamente fina devido a sua alta rigidez dielétrica. Conforme expressão 3 acima, a capacitância é inversamente proporcional a espessura do óxido de alumínio.

Constante dielétrica relativa do óxido acima para fins de comparativos com filmes plásticos utilizados em capacitores eletrostáticos apresentam $\epsilon_r = 2,2 \dots 3,2$

Outro fator que contribui para a elevada capacitância específica da folha de anodo é o processo de cauterização que permite obter uma superfície efetiva (capacitiva) superior a 100 vezes em relação a folha lisa. Isso é possível graças a reduzida espessura do óxido. Este fato possibilita o revestimento de poros e túneis existentes na superfície de folhas cauterizadas.

Normalmente o óxido de alumínio é conhecido como material eletricamente isolante, contudo na realidade ele apresenta características de um semiconductor no processo eletroquímico:

Como condutor: Quando a folha revestida com a camada de óxido é conectada ao terminal negativo da fonte. Nesse caso, para neutralização do cátion ocorre somente a circulação de elétrons através do óxido sem praticamente encontrar resistência a sua passagem. Esse fato explica a característica de curto circuito apresentado pelo capacitor eletrólito unipolar quando é ligado invertido.

Quando a tensão aplicada cria um campo elétrico suficientemente intenso para provocar o deslocamento do oxigênio através da camada de óxido, gerando nova partícula de Al_2O_3 . Este fenômeno é observado quando se aplica uma sobre tensão no capacitor que se reflete na elevação de corrente através do mesmo.

Como isolante: Quando o campo elétrico gerado pela aplicação de tensão não é suficiente para provocar a migração do oxigênio através do óxido, isto é, a camada de óxido comporta-se como barreira para a passagem de corrente elétrica. É nessa condição que o óxido desempenha a função de dielétrico no capacitor eletrolítico de alumínio.

Considerações Gerais:

- A oxidação pelo processo eletroquímico é regida quantitativamente pela lei de Faraday e qualitativamente é em função das condições do processo, tais como; tipo de eletrólito, temperatura, densidade de corrente, etc.

- O processo industrial de oxidação de folhas de ânodo é realizado em equipamento denominado Banho de Preoxidação, em que a folha virgem de alumínio passa por banhos eletrolíticos para a formação da camada de óxido em sua superfície.

4.2 FOLHA DE ÂNODO

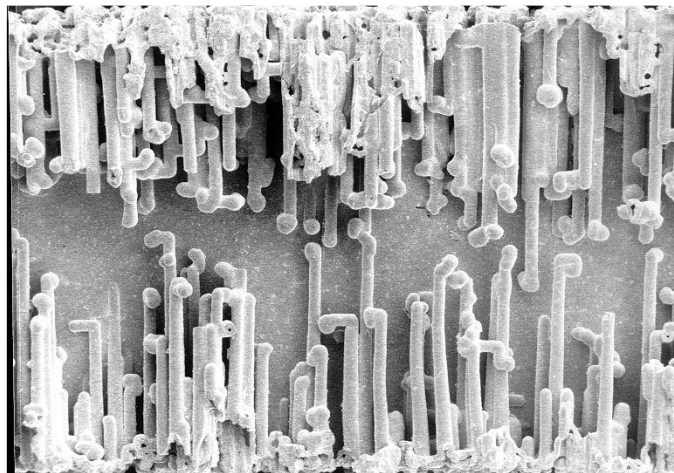
A folha de ânodo é o material mais importante utilizado na fabricação de capacitores eletrolíticos de alumínio. Ela é uma folha de alumínio que passa por dois processos de extrema importância e que geram suas principais características. Os processos em questão são:

Processo de Cauterização: o processo de cauterização é o processo no qual a folha de alumínio que inicialmente tem a sua superfície “lisa” sofre um tratamento eletroquímico criando “túneis microscópicos” em sua superfície. A criação desses túneis aumenta sua superfície de contato em torno de 200 vezes. A vantagem desse processo é que quanto maior o nível de cauterização da folha de alumínio maior será sua potencialidade capacitiva. O mesmo é visto na equação 1 em que a capacitância é diretamente proporcional a área.

Processo de Formação: O processo de formação é o processo em que a folha cauterizada é submetida a um tratamento eletroquímico para gerar uma camada de óxido de alumínio que funciona como dielétrico do capacitor e também define a tensão em que esse anodo poderá ser submetido. Essa tensão tem o nome de tensão de formação do ânodo.

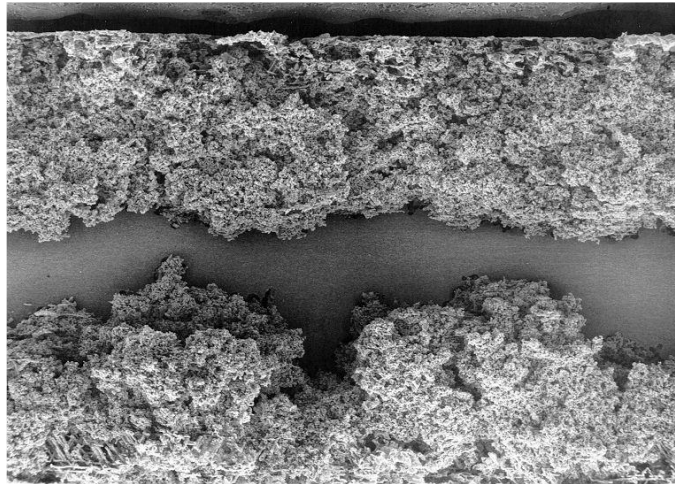
Quanto maior a tensão aplicada na folha de anodo maior será a camada de óxido criada na superfície/tuneis da folha de alumínio. Conseqüentemente quanto maior a espessura da camada de óxido formado menor será a área disponível e com isso, menor será a capacidade de capacitância desse anodo. Ou seja, via de regra, em ânodos com as mesmas características e processos de cauterização e formação, os que tiverem maior tensão de formação, terão menor capacitância.

Figura 16: Folha de ânodo para capacitores de alta tensão (ampliação 400x)



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

Figura 17: Folha de ânodo para capacitores de baixa tensão (ampliação 400x)



Fonte (EPCOS AG 2017, 2017)

4.2.1 CARACTERÍSTICAS FOLHA ÂNODO

Além de exercer a função do terminal positivo do capacitor e possuir o revestimento do óxido de alumínio que funciona como dielétrico do capacitor a folha de alumínio possui também outras características relevantes além da tensão de formação e capacitância. Essas características são:

Pureza: A folha de alumínio utilizada como ânodo na estrutura de um capacitor eletrolítico de alumínio deve possuir uma alta pureza. Pureza que gira em torno de 99,98 a 99,99 % de alumínio. Níveis de pureza inferiores a estes somente são permitidos em capacitores em que a exigência em níveis de corrente de fuga não é severa. O nível de pureza de alumínio não representa garantia de bom desempenho, no entanto é essencial e deve-se observar os tipos de impurezas contidas na folha de alumínio.

Espessura: Normalmente a espessura de folhas de anodo está situada entre 70 a 100 μm . Porquanto folhas com espessura inferior a 70 μm admitem baixo grau de cauterização, isto é, menos túneis formados, resultando uma menor área de contato para a formação do óxido resultando num baixo incremento de capacitância resultante. Por outro lado, folhas com espessuras superiores a 100 μm , permitem uma maior capacidade de cauterização gerando maiores túneis na superfície do ânodo e conseqüentemente maior incremento de capacitância. Ter maior espessura pode gerar efeitos colaterais como dificuldades no contato (solda das lides/guias na folha), menor resistência ao dobramento, problema de remoção de contaminantes gerados na cauterização, elevado fator de perdas. Hoje em dia, tem-se alta tecnologia para

cauterização e formação de folhas de anodo. Tem-se, em anodos de alta tensão de formação, a necessidade de possuir maior cauterização por causa da baixa capacitância gerada; no entanto, hoje tem-se anodos com alto ganho capacitivo em espessuras em torno de 125 μm .

- Características elétricas

O desempenho do capacitor eletrolítico de alumínio depende fundamentalmente do anodo, isto é, da folha de alumínio e da camada de óxido que a reveste. Os principais parâmetros elétricos influenciados pela folha de anodo são:

- Capacitância: Este parâmetro é em função do grau de rugosidade/cauterização da folha (dimensão / densidade de poros) e da espessura da camada de óxido de alumínio

- Corrente de fuga: Esta característica é influenciada principalmente pelas impurezas contidas na folha de alumínio, pela quantidade de óxido obtido o processo de formação e nível de contaminação no processo fabril.

- Fator de perdas: Esta característica depende basicamente do grau de rugosidade da folha (profundidade dos poros)

Características mecânicas

Além das características elétricas deve-se considerar as características mecânicas da folha de anodo, pois a mesma, deve ser suficientemente robusta para suportar os processos em que é submetida na fabricação do capacitor

Os limites de cada parâmetro abaixo citados dependem fundamentalmente da largura da folha de anodo, dos equipamentos utilizados no corte, preparação e bobinagem

As principais características mecânicas do anodo são:

Resistência ao dobramento: Esta característica é avaliada pelo número de flexões que a folha suporta sem se quebrar. Ela é muito importante para verificar a qualidade da contactação do furo do rebite (lugar onde se é soldado a aba, que é o material que faz o contato da folha de anodo e catodo com os terminais do capacitor). Outro aspecto dessa característica é verificar a compatibilidade da folha com o diâmetro do mandril da máquina usado na bobinagem, visto que nas voltas iniciais da bobinagem a folha é submetida a flexão com menor raio de curvatura.

A resistência ao dobramento depende basicamente dos seguintes fatores:

- Grau de cauterização;
- Espessura;
- Raio de curvatura;
- Tração da bobinagem;

- Espessura da camada de óxido.

Resistência à tração: Esta característica indica a tração máxima que a folha de ânodo pode ser submetida durante a bobinagem. A mesma depende principalmente dos seguintes fatores:

- Largura da folha;
- Grau de cauterização;
- Espessura da folha.

Resistência a ruptura dinâmica: Essa característica avalia a energia necessária para romper uma folha de anodo. Na prática ele permite verificar se a energia transmitida pela folha é compatível com a energia necessária para movimentar os roletes e o rolo de ânodo nas máquinas de bobinagem.

Os fatores que influenciam na ruptura dinâmica são:

- Largura da folha;
- Espessura da folha ;
- Grau de cauterização.

4.2.2 IMPUREZAS FOLHA DE ÂNODO

O alumínio e o tântalo são poucos dos metais industrialmente viáveis para que tem a propriedade de formar óxidos “isolantes”, isto é, com características dielétricas para a fabricação de capacitores eletrolíticos.

Os óxidos da maioria dos metais como ferro, cobre, manganês, etc. apesar de possuir maior resistividade do que sua respectivo metal base, ainda são considerados bons condutores elétricos. Alguns materiais possuem maiores influências na folha de ânodo, os principais são citados abaixo:

Influência do ferro: A presença de impurezas metálicas na folha de anodo, na qual é formada a camada dielétrica, afeta negativamente o desempenho funcional do capacitor sob o aspecto elétrico.

A presença de ferro com teores acima de 100 PPM (0,01%) provocam danos catastróficos no componente devido ao aparecimento de corrosão na folha de anodo. Atribui-se este fenômeno ao fato de o ferro não ser assimilado pelo alumínio, o que provoca sua segregação.

A corrosão consiste na destruição progressiva e irreversível do alumínio e seu óxido provocada pela alta densidade de corrente elétrica e conseqüentemente elevação da temperatura nos pontos onde se localizam as impurezas.

Teores de ferro em torno de 50 PPM são suficientes para elevar a corrente de fuga do capacitor próximo ao seu limite estabelecidos em normas internacionais. Isto se deve a dificuldade de se obter folha de alumínio totalmente isentas de outras impurezas.

Influência do Cobre: Outra impureza que merece destaque é o cobre, cuja influência sobre corrente de fuga somente ocorre com teores maiores que 100 PPM. Contudo, a presença de cobre contribui significativamente na capacitância específica da folha cauterizada.

Influência do silício: Quanto ao silício, constatou-se que sua presença praticamente não influencia as características elétricas do capacitor. Sabe-se, contudo, que a sua presença dificulta a recristalização e aumenta a rigidez da folha de alumínio.

As impurezas da folha de alumínio não são provenientes apenas do processo de purificação e laminação do alumínio. Porquanto, processos posteriores a que são submetidas as folhas de alumínio, como cauterização, preoxidação, corte e etc. também podem contaminar a folha de anodo prejudicando o desempenho do componente.

A corrente de fuga do capacitor eletrolítico de alumínio é influenciada somente pelas impurezas localizadas na superfície do anodo e não pelas localizadas no núcleo da folha.

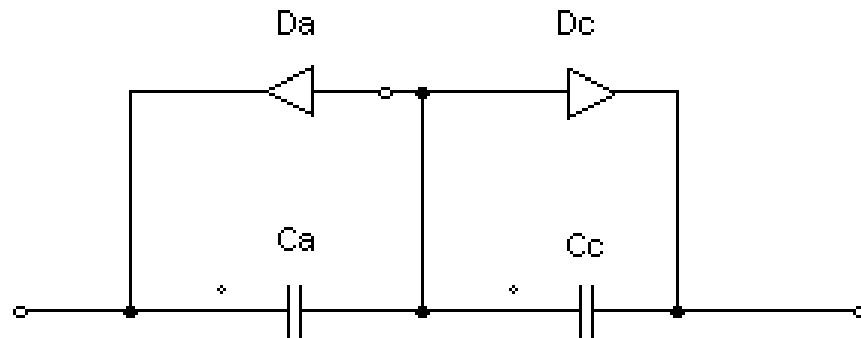
As partículas de ferro situadas na superfície da folha normalmente constituem pontos preferenciais de corrosão no processo de cauterização. Formação de cloreto de ferro que se dissolve no eletrólito de cauterização reduz sensivelmente o teor desta impureza na sua superfície.

Outro metal que contribui significativamente para o incremento da resistência mecânica e da capacitância da folha cauterizada é o manganês. Para folha de catodo, inclusive este elemento não é considerado impureza, mas sim parte integrante da liga.

4.3 FOLHA DE CÁTODO

A principal função da folha de cátodo no capacitor eletrolítico de alumínio é interligar eletricamente o terminal negativo ao eletrólito. Contudo, devido ao óxido natural que a reveste, a folha de cátodo apresenta características de um capacitor no instante em que ocorre a inversão no sentido da corrente elétrica.

Figura 18: Representação esquemática do capacitor eletrolítico de alumínio em termos capacitivos.



Fonte: O autor

Em que:

Da: Diodo ânodo;

Dc: Diodo cátodo;

Ca: Capacitância ânodo;

Cc: Capacitância cátodo.

4.3.1 EFEITO CAPACITIVO

Durante o seu funcionamento o capacitor eletrolítico de alumínio encontra-se submetido a oscilação de tensão e conseqüentemente sujeito a inversão da corrente. Nesse caso, as características são semelhantes a dois capacitores em série onde a capacitância equivalente é influenciada pela capacitância do cátodo segundo a seguinte equação:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_c}$$

Onde:

Ce: Capacitância equivalente

Como normalmente cátodos não possuem formação (somente cauterizada) em sua superfície da folha de alumínio ou então possuem uma baixa formação (em torno de 3 a 5 volts), ou seja, não possuem uma grande camada de óxido de alumínio em sua superfície em relação a folha de ânodo; logo, a capacitância da folha de cátodo é muito maior que a capacitância da folha de ânodo. Conforme a equação acima, a maximização da capacitância equivalente se obtém quando temos a capacitância do cátodo muito maior que a do ânodo. Em outras palavras,

quanto maior a capacitância do cátodo em relação ao ânodo a capacitância equivalente ficará mais próxima da capacitância do ânodo.

Este fator leva as fabricantes de capacitores eletrolíticos de alumínio a usarem folhas de cátodo cauterizadas de alta capacitância. O objetivo, é reduzir o consumo dos materiais que constituem a bobina e, conseqüentemente, o custo do componente. Esta técnica é principalmente utilizada em capacitores de baixa tensão onde a capacitância da folha de ânodo apresenta valores mais elevados.

4.3.2 ESTABILIDADE

O revestimento de cátodo apenas com óxido natural normalmente não oferece proteção contra a hidratação do Alumínio uma vez que a presença do grupo hidroxila no eletrólito é inevitável. Nesse caso, ocorre também a redução da capacitância, sobre pressão interna, elevação da resistência série, etc.

Com o objetivo de evitar a hidroxidação submete-se a folha de catodo ao processo de estabilização que mantém inalteradas suas características mesmo por longo período de armazenamento.

4.3.3 TIPOS DE CÁTODO

Via de regra os cátodos são classificados pela espessura nominal já que sua capacitância e resistência mecânica estão intimamente relacionadas com esta característica. As espessuras usuais são: 20; 30; 40; 50 μm .

Com o desenvolvimento da tecnologia, há outras características a se considerar na utilização de catodos em capacitores eletrolíticos de alumínio como a pureza da folha de alumínio utilizada e também a uma possível pequena formação de óxido em sua superfície.

Na utilização de cátodos são observados os seguintes aspectos para o projeto de um capacitor eletrolítico de alumínio:

Pureza da folha de alumínio: Normalmente é possível utilizar, para certas aplicações, catodos que utilizam folhas de alumínio com uma pureza inferior a 99,99%. Há fabricantes que comercializam catodos com 98% de pureza, no entanto, quanto mais pura a composição da folha melhor é o desempenho final do capacitor eletrolítico de alumínio.

Espessura: ao projetar um capacitor eletrolítico de alumínio, a espessura dos materiais é essencial para verificar se a bobina final gerada irá caber dentro da caneca para a montagem do capacitor.

Formação: hoje no mercado há cátodos com pequenas formações de óxidos, em torno de 3 Volts. Utilizar cátodos com formação gera um ganho na vida final do capacitor eletrolítico de alumínio, visto que o mesmo gera mesmo gás e conseqüentemente menor consumo de eletrólito. No entanto, cátodos formados por apresentar uma leve camada de óxido possuem menor capacitância efetiva. Cátodos com formação normalmente são utilizados em capacitores de alta tensão onde as folhas de anodo possuem alta tensão de formação e conseqüentemente baixas capacitâncias.

4.4 PAPEL ELETROLÍTICO

O papel eletrolítico é em capacitores eletrolíticos de alumínio a matéria prima responsável por separar e por fazer a isolação entre a folha de ânodo e a folha de cátodo além de ser responsável por armazenar uma quantidade de eletrólito que será consumido durante a vida do capacitor para fazer a reforma do oxido presenta na folha de alumínio.

O papel eletrolítico tem duas funções básicas na bobina de um capacitor eletrolítico de alumínio: separar as folhas de anodo e catodo para que não ocorre curto circuito e absorver e reter eletrólito.

Como “separador” o papel eletrólito tem como função principal não permitir o contato físico entre as folhas de anodo e catodo, protegendo, então, a bobina de sofrer um curto circuito em seu interior. Para esta função é indispensável que o papel eletrolítico possua uma espessura considerável para evitar curtos circuitos provocados por rebarbas ou limalhas, ambas causadas pelos processos de corte, rebtagem e solda da folha de alumínio.

Em via de regra, a espessura do papel eletrolítico é diretamente proporcional a tensão nominal do capacitor, contudo o uso de papeis mais espessos podem causar feitos indesejáveis como o aumento do RSE, aumento do fator de perdas (TGD) e aumento do dimensional da bobina.

Cada tipo de papel possui uma densidade de fibras necessárias para evitar a perfuração por rebarbas ou limalhas. Nesse caso, também é aconselhado o uso de papeis com alta densidade de fibra; no entanto, essa alta densidade pode acarretar a elevação do fator de perdas e da resistência série do capacitor. Esse aumento dos fatores citados é explicado pela diminuição da quantidade de eletrólito absorvido pelo papel. Como se tem uma alta densidade de fibras, há menos espaço para a penetração de eletrólito no papel, acarretando uma menor condutividade na bobina e uma maior resistência série.

Um fator que cabe analisar também na utilização dos papéis eletrolíticos é a uniformidade da textura em toda sua superfície, isto é, sem falhas ou furos que permitam o contato entre as folhas de alumínio.

Como “retentor” de eletrólito é fundamental que o papel apresente a propriedade de absorver uma grande quantidade de eletrólito, essa propriedade chamamos de fator de absorção. O fator de absorção é a relação do número de gramas de eletrólito cada grama de papel absorve. Quanto maior esse fator, maior será a capacidade de absorver eletrólito desse papel. Para atender essa exigência, recomenda-se o uso de papéis eletrolíticos mais espessos, de alta porosidade. A combinação dessas características acarreta a grandes espaços entre fibras gerando espaços para o eletrólito de impregnação ficar armazenado, gerando então um alto fator de absorção.

4.4.1 TIPOS DE PAPEIS ELETROLÍTICOS

Os papéis eletrolíticos possuem algumas tecnologias em sua formação. Essa tecnologia está ligada aos tipos de fibras que compõe a formação desse papel. Atualmente as fibras mais utilizadas e com mais alta tecnologia são as fibras denominadas: manila hemp, esparto pulp, hemp pulp, cotton linter, kraft, special celulose.

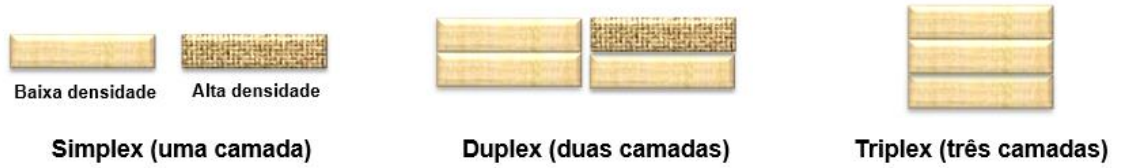
Dentre os tipos de fibras, tem-se também a classificação de dos papéis quanto ao número de camadas dessas fibras em sua construção. Os mesmos podem ser classificados como: simplex, duplex e triplex.

Os papéis classificados como simplex possuem uma camada de fibras, sendo a mesma de alta ou baixa densidade de fibras. Dentre os papéis são os considerados mais simples.

Os papéis classificados como duplex, possuem duas camadas de fibras e normalmente possuem, ou duas camadas de baixa densidade, ou uma de baixa e outra de alta densidade de fibras em sua composição.

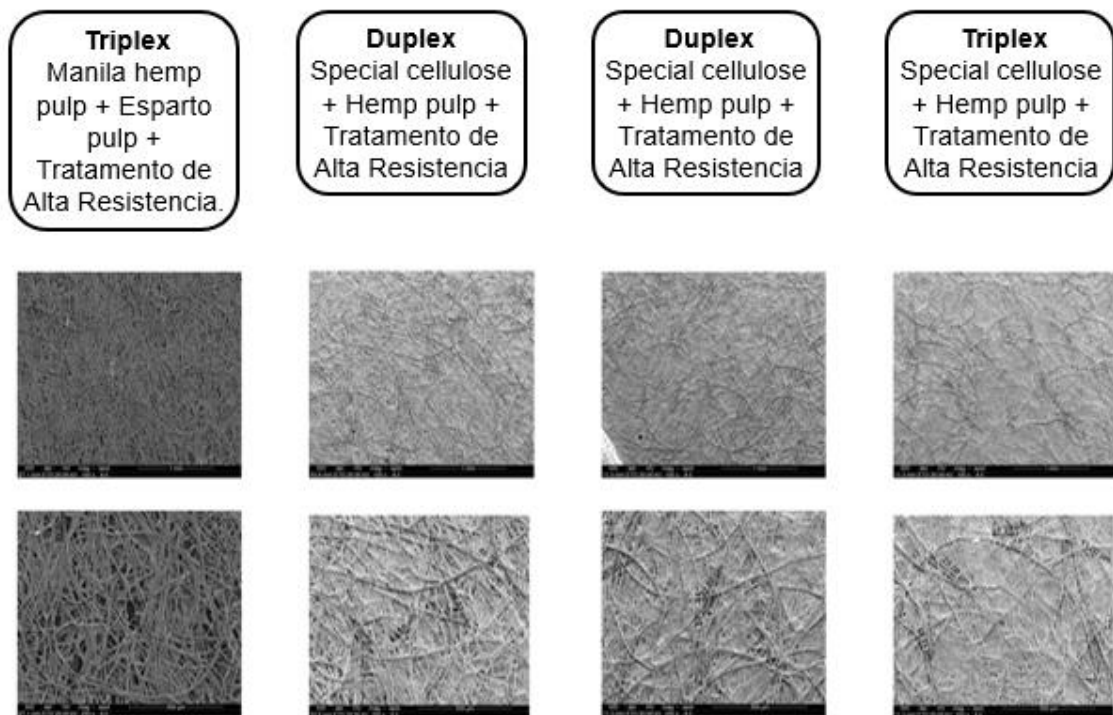
Os papéis classificados como triplex, possuem três camadas de fibras e normalmente essas três camadas são camadas com fibras de baixa densidade.

Figura 19: Construção Papéis Eletrolíticos



Fonte: O autor

Figura 20: Exemplos de papéis eletrolíticos em imagens tiradas em microscópio



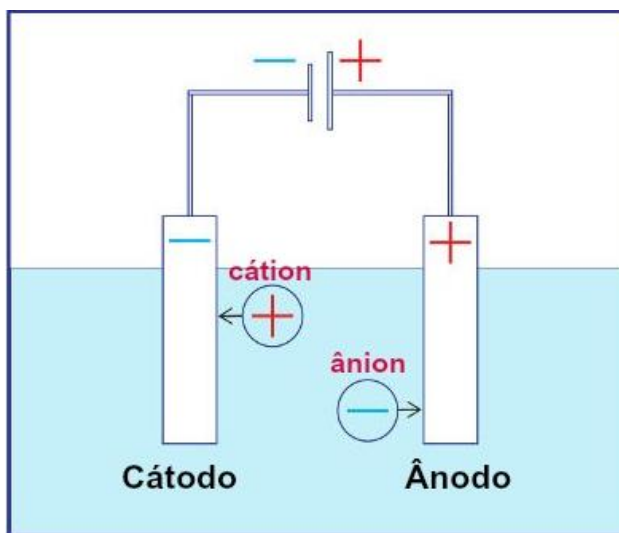
Fonte: O autor

Além de sua composição e construção, há algumas características muito importantes necessárias observar na escolha de papéis eletrolíticos como espessura, máxima tensão elétrica suporta (*breakdown voltage*) e capacidade de absorção que está diretamente ligada a densidade de fibras e a porosidade do papel.

4.5 ELETRÓLITO DE IMPREGNAÇÃO

Eletrólito é todo meio que conduz eletricidade através de deslocamento iônico. Exemplo característico é uma solução na qual ocorre deslocamento de cargas elétricas (ânions e cátions) sob ação de campo elétrico.

Figura 21: Cuba eletrolítica – deslocamento de cargas elétricas sob ação de campo elétrico



Fonte: Brasil escola

Eletrólito de impregnação é um líquido que no capacitor eletrolítico exerce a função de armadura negativa, isto é, o eletrólito é o verdadeiro cátodo do capacitor.

Para fabricantes de capacitores, o eletrólito constitui uma das matérias primas mais importantes utilizada na sua produção, já que suas características influenciam diretamente na performance e no regime operacional do capacitor. Este fato leva os fabricantes de capacitores a utilizarem dezenas de tipos de eletrólitos conforme as exigências e condições de trabalho de cada componente.

O eletrólito é também conhecido como “elixir da vida” do capacitor eletrolítico de alumínio. Como ele é responsável pela reconstrução do óxido de alumínio, o capacitor “vive” enquanto ainda houver eletrólito no interior da bobina. Ao final do eletrólito a bobina fica “seca”, o óxido de alumínio começa a se degradar e o capacitor perde suas características finalizando seu tempo de funcionamento.

Os produtos químicos utilizados na produção de eletrólitos podem ser subdivididos em três famílias denominadas: Solvente, soluto e aditivo.

Solvente: Líquido orgânico ou inorgânico de alta resistividade que desempenha a função de meio para deslocamento de cargas elétricas.

Soluto: Ácidos, bases ou sais que se dissociam no solvente e cujo ânions tem a propriedade de oxidar o alumínio quando o campo elétrico aplicado supera a tensão de ruptura da camada de óxido.

Aditivo: Produto químico que participa do eletrólito em pequena quantidade, mas que contribui significativamente na sua performance. Absorção de gases para gerar uma menor pressão dentro da bobina, inibidor de corrosão para não prejudicar soldas e estabilizador da camada de óxido de alumínio são algumas das principais funções dos aditivos.

4.5.1 CARACTERÍSTICAS E INFLUÊNCIA DO ELETRÓLITO DE IMPREGNAÇÃO

O eletrólito é considerado o segredo de muitos fabricantes de capacitores eletrolíticos de alumínio, pois ele é a matéria prima que está ligada diretamente em todos os parâmetros elétricos e no desempenho do capacitor. Para a escolha do eletrólito a ser utilizado em um item leva-se em consideração algumas características muito importantes que estão diretamente relacionadas com alguns parâmetros do capacitor. As principais características do eletrólito de impregnação são:

- **Condutividade:** a condutividade é uma característica muito importante a se considerar na utilização de um eletrólito. Ela está diretamente relacionada a resistência série resultante do capacitor. Em linhas gerais quanto maior a condutividade do eletrólito, menor será a resistência série do capacitor ao se comparar um mesmo design de bobina com um eletrólito de maior condutividade, ou seja, ao utilizar uma bobina com mesmos materiais (ânodo, cátodo, papel) terá uma resistência série resultante menor a que utilizar um eletrólito de maior condutividade. Esse fato se dá por que tendo maior condutividade, tem-se maior facilidade nos transportes de cargas dentro da bobina, facilitando o fluxo da corrente e conseqüentemente diminuindo a resistência/dificuldade do transporte de cargas.

- **Tensão de Chispamento:** a tensão de chispamento é outra característica necessária ser observada ao utilizar um eletrólito. Essa tensão é a tensão em que o eletrólito começa a chispar. O mesmo é submetido a uma certa temperatura e mede-se a tensão em que o mesmo começa a produzir faíscas. Ao produzir essas faíscas o eletrólito começa a perder suas propriedades e características, ou seja, ao especificar um eletrólito o capacitor normalmente

deve operar a uma tensão menor que a tensão de chispamento do eletrólito. Além de o eletrólito perder suas propriedades, o mesmo pode causar estouros dentro da bobina do capacitor.

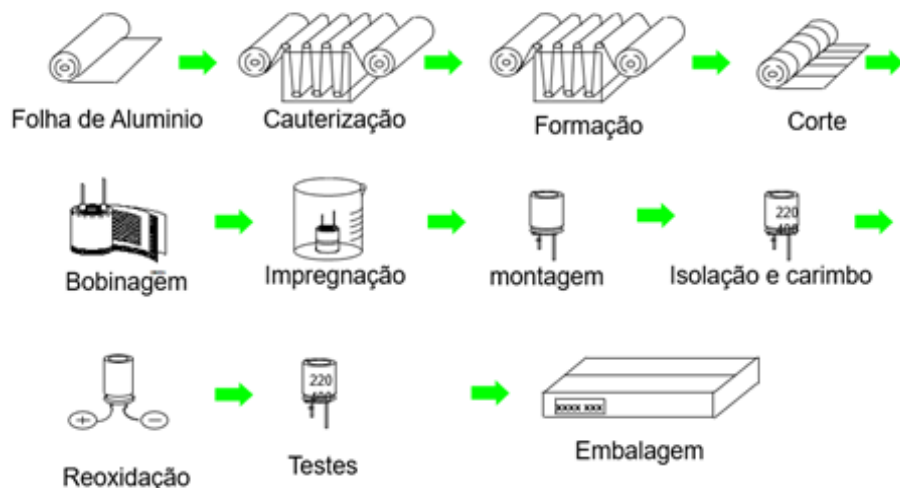
- **Tensão de operação:** Essa característica é uma definição de em qual faixa de tensão o eletrólito pode operar dentro de um capacitor eletrolítico de alumínio.

- **Temperatura de operação:** como a tensão de operação, essa característica mostra a faixa de temperatura em que o eletrólito pode operar dentro de um capacitor.

5. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS

O capacitor eletrolítico, passa por algumas etapas de produção e tem alguns processos que merecem algum destaque e atenção na hora de projetar um capacitor eletrolítico de alumínio. Primeiramente, observa-se o processo de preparação das folhas de alumínio. Como citadas anteriormente as folhas de ânodo e cátodo passam por um processo de preparação antes de serem cortadas e bobinadas junto com o papel eletrolítico. Após escolhidos os materiais a serem utilizados e cortados os mesmos é feita a bobina na etapa de bobinagem. Após ser bobinada a bobina passa pelo processo de impregnação, que é onde o eletrólito entra em contato com as folhas de alumínio e fica armazenado no papel eletrolítico. Feita a impregnação, a bobina passa pelo processo de montagem. Esse processo consiste na inserção da bobina na caneca e é nele também que ocorre a vedação do capacitor. Feita a montagem o capacitor passa pelo processo de isolamento e carimbo antes de ser levado a etapa de reoxidação. Nessa etapa os capacitores são submetidos a uma certa tensão e temperatura para reformar os óxidos das folhas de alumínio que foram perdidos no corte da folha. Após reoxidados as peças são testadas e embaladas para ser entregues.

Figura 22: Processo de fabricação de capacitores eletrolíticos de alumínio



Fonte: O autor

Há processos que merecem melhor atenção e serão apresentados de forma mais completa.

5.1 BOBINAGEM

A bobinagem caracteriza-se pelo enrolamento das folhas de alumínio e papel com o objetivo de maximizar a capacidade volumétrica e o uso racional de ambas as faces capacitivas das folhas de alumínio.

Alguns procedimentos recomendados a fim de reduzir os efeitos indesejáveis que podem afetar o desempenho dos capacitores devem ser analisados na etapa de bobinagem do capacitor. São eles:

Tração dos materiais: O tracionamento das folhas deve propiciar a obtenção de uma bobina compacta, sendo o seu limite a tração de ruptura dos materiais nas respectivas larguras utilizadas. Uma bobinam “frouxa” pode acarretar consequências indesejáveis no funcionamento do capacitor. A elevação da resistência série e do fator de perdas são os principais efeitos colaterais. Os mesmos podem ser gerados devido a distância entre a camada de óxido e a folha de catodo, o desaparelhamento das folhas e o aumento do diâmetro interno da bobina.

Desemparelhamento: O alinhamento das folhas de alumínio e do papel constitui um dos parâmetros mais críticos do processo, uma vez que o desaparelhamento normalmente reflete na performance do capacitor. O aumento do comprimento da bobina, redução de capacitância, aumento de resistência série, aumento do fator de perdas e curto circuito entre ânodo e caneca (a caneca é parte negativa do capacitor) são os principais prejuízos causado por uma bobina com matérias desparelhados.

Cobertura do ânodo: Tanto no início como no fim da bobinagem é fundamental que toda a extensão da folha de ânodo seja envolvida pela folha de cátodo, ou seja, mesmo com a folha de papel separando a folha de ânodo e cátodo, a folha de catodo deve cobrir a folha de ânodo por toda sua extensão na bobina. A não observância desse requisito podem gerar aumento de resistência série e aumento do fator de perdas do capacitor.

Solda das lides(abas) na folha de alumínio: Tanto na folha de ânodo quanto na folha de catodo há a solda de lides para a contactação da folha com o terminal do capacitor. Em alguns casos os próprios lides já são os terminais de capacitores. A má solda das abas na folha de anodo pode gerar alta corrente de fuga no capacitor e causar possíveis estouros internos na bobina.

Fechamento da bobina: Normalmente o fechamento das bobinas é feito com o uso de fita adesiva. Dependendo da altura da bonina utiliza-se mais de uma fita para seu fechamento.

O mal fechamento da bobina pode acarretar o desalinhamento e descompactação de todos os materiais da bobina acarretando até mesmo curto circuitos.

5.2 IMPREGNAÇÃO

O processo de impregnação tem por objetivo revestir o óxido de alumínio com uma película de eletrólito que exercerá a função de eletrodo negativo, isto é, a do verdadeiro cátodo no capacitor eletrolítico de alumínio.

Os meios utilizados para umectação da bobina são fundamentais em fenômenos físico-químicos denominados capilaridade e dinâmica dos fluidos. Ambos vinculados as características do papel, eletrólito e as condições de impregnação.

Os principais fatores que influenciam no processo de impregnação são:

Largura do papel: A largura do papel que define o comprimento da bobina, exerce significativa influência no processo de impregnação, uma vez que a penetração do eletrólito ocorre pelas testeiras da bobina. Sob este aspecto, as bobinas confeccionadas com papel estreito, dependendo da sua porosidade e da fluidez do eletrólito, podem ser impregnados apenas pelo efeito da capilaridade

Secagem da bobina: Este procedimento consiste em submeter as bobinas ao aquecimento a fim de retirar a umidade do papel e aumentar o seu poder de absorção. A secagem da bobina é normalmente recomendada para capacitores de tensão alta, cujo eletrólito limita o teor de água na sua composição.

Temperatura: A temperatura é fundamental para a impregnação pois tem como principal objetivo o aquecimento do eletrólito de impregnação, pois o mesmo diminuía a viscosidade do eletrólito para uma melhor absorção da bobina. O aquecimento, embora dispensável para alguns tipos de eletrólitos, é fundamental principalmente em eletrólitos com alta viscosidade e quando utilizado em conjunto com papeis de baixa porosidade. Esse fato ocorre normalmente em capacitores de alta tensão, em que papeis são pouco porosos e com uma alta densidade de fibras, necessitando assim do aquecimento do eletrólito para melhor absorção da bobina.

Vácuo: A aplicação do vácuo no processo de impregnação tem por objetivo reduzir a pressão e retirar a umidade do interior da bobina. Esse procedimento é indicado para impregnação de bobinas de dimensões maiores, isto é, para quais os efeitos da capilaridade não são suficientes para obter uma umectação satisfatória. A vantagem desde processo é

posteriormente utilizar o diferencial de pressão para provocar infiltração do eletrólito no interior da bobina.

Tempo de impregnação: Corresponde ao tempo em que a bobina permanece em contato ou imersa no eletrólito. Este tempo depende diretamente das características do eletrólito, do tipo de papel e das condições de processo, contudo é fundamental que após o tempo previsto, a bobina esteja completa e uniformemente umedecida com o eletrólito.

Processos de impregnação:

Os processos mais utilizados atualmente para impregnação de bobinas são:

Impregnação por “dipping”: Consiste em molhar o fundo da bobina no eletrólito. Neste caso, a impregnação ocorre exclusivamente por efeito da capilaridade. A utilização desse processo implica as seguintes condições:

- Eletrólito com baixa viscosidade e baixa tensão superficial
- Papeis com largura estreita e alta porosidade

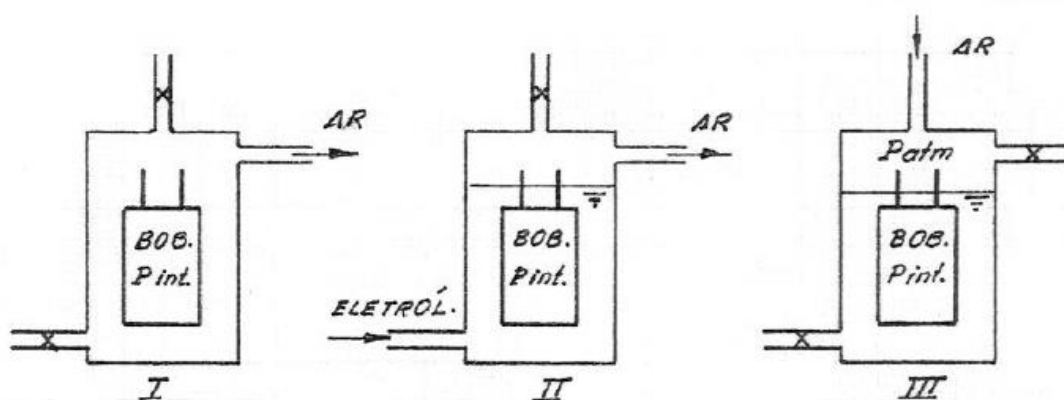
A grande vantagem deste processo é o reduzido tempo de impregnação o que viabiliza a sua implantação na própria linha de produção.

Impregnação a vácuo: O processo de impregnação a vácuo é um processo muito mais robusto do que a impregnação por “dipping”. A mesma pode ser realizada com ou sem aquecimento e é feita com a utilização de caldeiras. A utilização desse processo é recomendada para:

- Eletrólito e alta viscosidade e alta tensão superficial
- Papeis com grande largura e baixa porosidade.

As etapas do processo de impregnação a vácuo podem ser divididas em três etapas conforme figura abaixo:

Figura 23: Etapa de impregnação a vácuo



Etapa I: Aplicação do vácuo: retirada do ar com redução da pressão no interior da bobina.

Etapa II: Injeção do eletrólito: Nesta etapa inicia a impregnação por capilaridade.

Etapa III: Aplicação da pressão atmosférica: Com a abertura da caldeira o diferencial de pressão entre a pressão atmosférica com a pressão do interior da bobina provoca a infiltração do eletrólito no interior da mesma.

Qualquer que seja o eletrólito, papel e o processo utilizado na impregnação das bobinas, estas deverão ser hermeticamente encapsuladas o mais rápido possível. Os principais efeitos indesejáveis provocados pela prolongada exposição da bobina impregnada ao ar ambiente são:

Higroscopia: Praticamente todos os eletrólitos atualmente utilizados são higroscópicos. A absorção da umidade do ar pelo eletrólito normalmente implica na elevação da corrente de fuga do capacitor, podendo inclusive provocar a corrosão das abas devido ao chispamento.

Ressecamento: A presença de produtos químicos mais voláteis contidos principalmente nos eletrólitos de baixa tensão pode alterar sua condutividade quando expostos por longo tempo ao ambiente. Este fato em via de regra reflete na elevação do fator de perdas.

Contaminação: A deposição de impurezas sobre as bobinas expostas ao ambiente é um fator que também pode contribuir para a elevação de corrente de fuga, da mesma forma que as impurezas presente no anodo.

5.3 REOXIDAÇÃO

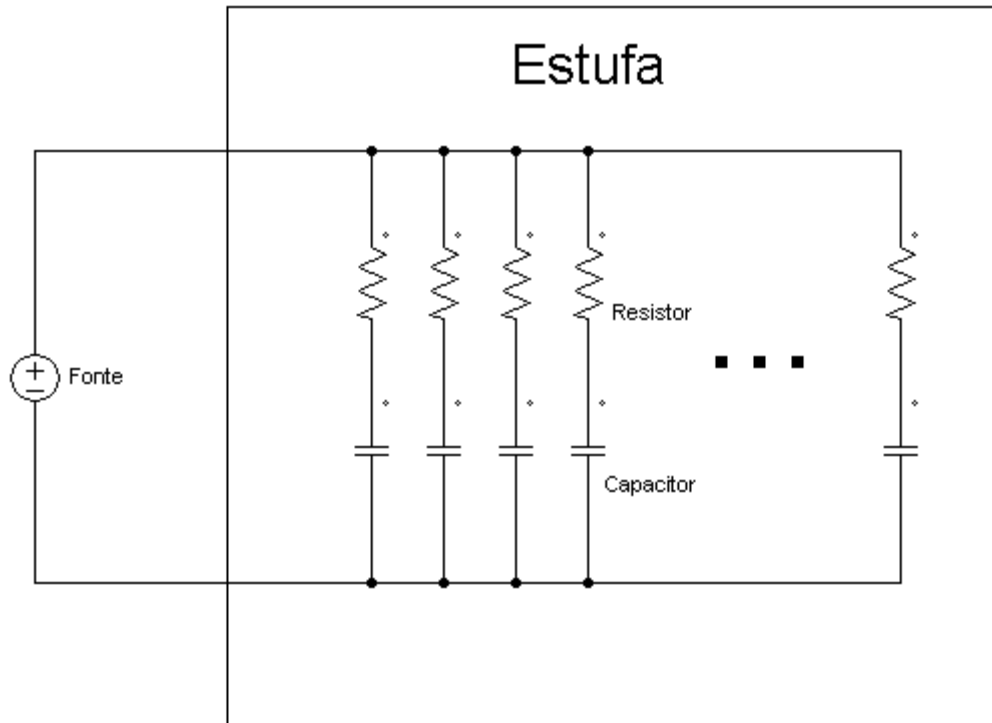
Ao processar o anodo para a fabricação de capacitores de alumínio tem-se alguns danos gerados na folha de anodo e nos lides. Ao cortar a folha de anodo são geradas bordas sem a camada de oxido na folha de alumínio. Já no lide há algum prejuízo causado ao oxido na parte de solda e/ou rebtagem do mesmo. Com isso, é necessário recompor essa camada de oxido danificada durante o processo fabril e eventualmente complementar o processo de preoxidação da folha de alumínio.

Esse processo de recompor a camada de óxido chama-se de reoxidação e tem por objetivo formar/regenerar a camada de óxido de alumínio na superfície do ânodo e respectivo lide faixa para conseqüentemente redução da corrente de fuga e estabilização dos demais parâmetros elétricos do capacitor eletrolítico.

A reoxidarão em capacitores eletrolíticos de alumínio ocorre normalmente ligando uma fonte de tensão contínua aos capacitores em paralelo entre si, onde esses capacitores ficam

submetidos a uma certa temperatura dentro de uma estufa. O esquema abaixo ilustra uma reoxidação de capacitores eletrolíticos de alumínio:

Figura 24: Esquema de reoxidação em capacitores eletrolíticos de alumínio



Fonte: O autor

O uso de resistor série visa tão somente limitar a corrente através do componente em caso de eventual falha no processo/material utilizado. Recomenda-se uso de resistor para reoxidação de capacitores de tensão alta ($>100\text{V}$) e também elevado produto capacitância x tensão, porquanto a ocorrência de curto circuitos nesses tipos de capacitores pode danificar a fonte de alimentação e provocar a explosão deste componente, afetando as demais peças, inclusive ao próprio equipamento de reoxidação.

O processo de reoxidação sem resistor série é normalmente utilizado para capacitores de tensão baixa ($<100\text{V}$) e cujo produto capacitância vs. tensão é relativamente baixo, já que nesses casos a potência da fonte é suficiente para provocar a ruptura do componente que eventualmente entra em curto sem acarretar danos significativos.

Os capacitores são todos colocados em paralelo, junto a uma fonte de tensão. Os capacitores são colocados também dentro de uma estufa para sofrerem também a influência de uma temperatura normalmente 85 graus Celsius. A temperatura tem grande influência na reoxidação dos capacitores pois gera uma melhor umectação das folhas de alumínio e papeis,

melhor difusão dos gases gerados durante o processo e menor corrente de fuga na máxima temperatura de sua categoria.

Normalmente a reoxidação de capacitores são feitas através de “receitas de reoxidação”. Essas receitas se dão como etapas de reoxidação em que são estipuladas uma tensão e uma temperatura durante um certo tempo para cada etapa de reoxidação.

6 PROJETO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

Para projetar séries e designs específicos de capacitores eletrolíticos de alumínio, precisa-se, além de ter conhecimento sobre seu funcionamento, seu processo de fabricação e as características de suas matérias primas precisa-se ter conhecimento pleno da aplicação em que o mesmo será submetido. Há diversos casos em que analisando o Data Sheet de um componente consegue-se avaliar se o mesmo irá satisfazer a aplicação em questão. No entanto, na maioria dos casos o projetista utiliza sempre um alto fator de segurança, utilizando capacitores com especificações acima das necessárias. Em outros muitos casos em que o sistema não é muito complexo, os projetistas avaliam somente a capacitância e a tensão que o capacitor/banco de capacitor deverá ter em sua aplicação, deixando outras análises importantes de fora da avaliação do mesmo.

Para otimizar o projeto / *design* de um capacitor eletrolítico de alumínio, precisa-se entender primeiramente o seu comportamento térmico e como estimar a sua vida na aplicação. Deve-se recordar que estamos tratando de um componente passivo em que vai se degradando ao longo de sua vida.

6.1 MODELO TÉRMICO CAPACITOR ELETROLÍTICO DE ALUMÍNIO

Para analisar o comportamento térmico do capacitor, pode-se fazer uma analogia entre circuito térmico e elétrico. Quando um capacitor está polarizado e faz a função de filtro de ondulação, as oscilações de tensão geram uma corrente de ondulação, chamada também de corrente de Ripple. Esta corrente de ondulação produz aquecimento no capacitor. A potência dissipada pelo capacitor em função da corrente de ondulação aplicada pode ser calculada a partir da Equação (1).

$$P = I_{RMS}^2 RSE \quad (4)$$

Onde,

P : Potência, em Watt [W];

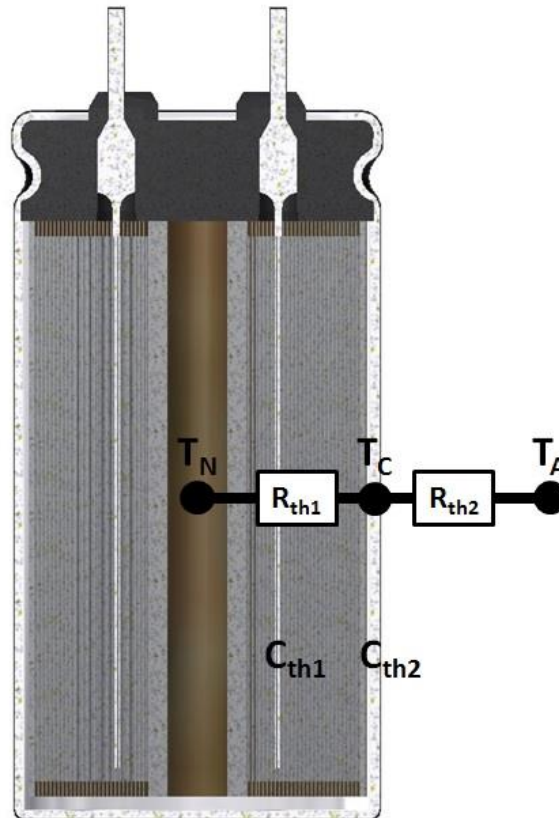
I_{RMS} : Corrente eficaz ou RMS (do inglês, *Root Mean Square*), em Ampere [A];

RSE : Resistência Série Equivalente, em ohm [Ω].

O calor gerado em função da corrente de ondulação na bobina do capacitor é transferido para todo o interior e também para a caneca externa. Desta maneira, existe uma transferência

de calor entre o interior do capacitor e a caneca e entre a caneca e o ambiente. Dependendo se existe ou não contato entre a bobina interna do capacitor e a caneca, a transferência de calor acontecerá de maneiras diferentes, assim como as temperaturas entre núcleo e caneca terão comportamentos diferentes.

Figura 25: Parâmetros térmicos do capacitor



Fonte: Girard, Alessandro: COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS

T_N – Temperatura Núcleo [°C];

T_C – Temperatura Caneca [°C];

T_A – Temperatura Ambiente [°C];

R_{th1} – Resistência Térmica Núcleo-Caneca [°C/W];

R_{th2} – Resistência Térmica Caneca-Ambiente [°C/W];

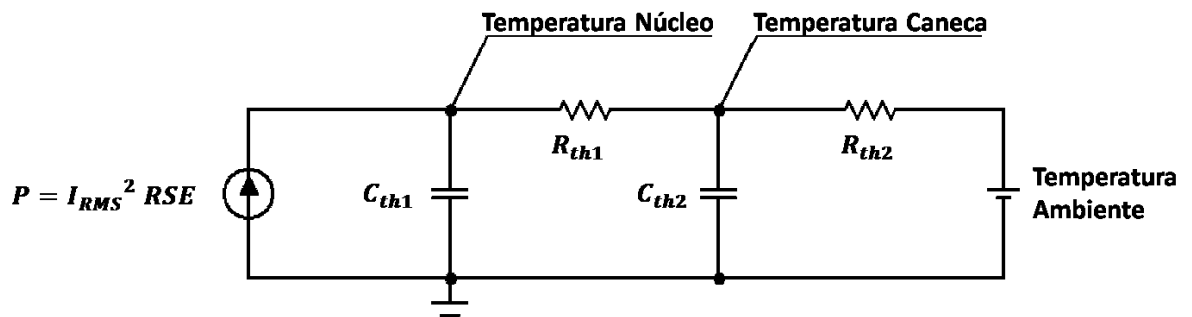
C_{th1} – Capacitância Térmica Núcleo [J/°C];

C_{th2} – Capacitância Térmica Caneca [J/°C].

A Figura 26 abaixo, mostra como pode ser considerado o circuito elétrico análogo ao modelo térmico para a simulação das temperaturas de núcleo e caneca quando aplicada uma condição de corrente de ondulação, que pode ser constante ou ter um perfil de valores e intervalos de aplicação. Podem se feitas as seguintes analogias:

- A dificuldade de condução de calor de um ponto a outro pode ser interpretado como uma resistência térmica, analogamente a resistência elétrica;
- As diferenças de temperatura corresponderiam às diferenças de tensão elétrica, em que o fluxo de calor corresponderia ao fluxo de corrente elétrica.
- O armazenamento de calor na massa de alumínio do núcleo e da caneca pode ser interpretado como uma Capacitância Térmica, em analogia a Capacitância Elétrica, em que o armazenamento de calor corresponderia ao armazenamento de cargas elétricas.

Figura 26: Circuito para o modelo térmico considerado para o capacitor



Fonte: Girard, Alessandro: COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS

No circuito da Figura 26, R_{th1} e R_{th2} são as resistências térmicas e C_{th1} e C_{th2} são as capacitâncias térmicas. Uma fonte fixa de valor constante representa a temperatura ambiente do circuito simulado e a fonte de corrente tem seu valor dado em potência [W].

6.2 CALCULO DE ESTIMATIVA DE VIDA

Tendo conhecimento sobre a modelagem térmica do capacitor, pode-se analisar e estimar a vida desse capacitor na aplicação. A perda do capacitor está diretamente ligada a potência dissipada pelo mesmo e que está diretamente ligada a resistência série desse capacitor e a corrente de ripple que passa pelo mesmo, conforme descrito acima na equação 4.

Outro fator que diretamente influencia a vida do capacitor eletrolítico é a temperatura do núcleo da bobina do capacitor, que pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$T_N = P * R_{th} + T_A \quad (5)$$

Onde:

$$R_{th} = R_{th1} + R_{th2} \quad (6)$$

Juntando as equações 5 e 6, tem-se:

$$T_N = (I_{rms}^2 * RSE) * R_{th} + T_A \quad (7)$$

O cálculo da expectativa de vida para capacitores eletrolíticos é baseado na Equação de Arrhenius e tem como base a temperatura e os fatores aceleradores. É esperado um fator de aceleração próximo a 10 para a grande maioria dos capacitores eletrolíticos, ou seja, a cada 10° C de elevação ou redução de temperatura a expectativa de vida dobra ou se reduz à metade.

$$L = L_0 * 2^{\frac{\Delta T}{10}}$$

$$\Delta T = T_{Máx} - T_N$$

Onde:

L : Estimativa de vida nas condições de operação [h];

L_0 : Expectativa de vida nominal do capacitor [h];

$T_{Máx}$: Temperatura máxima suportada pela série. Normalmente consegue-se verificar essa temperatura nas curvas de “Useful Life” presente nos Data Sheets.

Em relação a corrente de ondulação permitida, a mesma depende da frequência aplicada. Geralmente dois valores são dados - um para baixa frequência (100 ou 120 Hz) e um para alta frequência (100 kHz). Às vezes a corrente de ondulação permitida comparada à frequência é dada apenas por um fator. Por exemplo, a corrente de ondulação permitida de 100 Hz pode ser 0,5 vezes a ondulação permitida de 100 kHz. Esse fator é dado na especificação do capacitor.

Todos os fabricantes de capacitores eletrolíticos, para facilitar o trabalho, realizam os ensaios de expectativa de vida na condição de tensão máxima. Quando a condição de operação não é tensão máxima o capacitor vai ganhar em expectativa de vida. Cada fabricante tem o seu critério próprio para avaliar qual seria o ganho na condição de tensão mais baixa. O ganho vem do fato de o capacitor, ao operar em tensão mais baixa, terá menor corrente de fuga e conseqüente menor consumo de eletrólito junto a uma menor degradação do óxido de alumínio.

Resultando, numa maior expectativa de vida. Usam como parâmetro de avaliação o fator de tensão que é definido pela relação entre a tensão de formação da folha de ânodo e a tensão nominal do capacitor.

Muitos fabricantes não tem um fator de cálculo específico para avaliar o ganho de expectativa de vida em função da tensão. Usam o mesmo fator de tensão para determinada série. Ao querer otimizar a vida desse capacitor faz a alteração no fator de tensão desse componente. Ou então, estima-se qual seria sua nova expectativa de vida para aquele design.

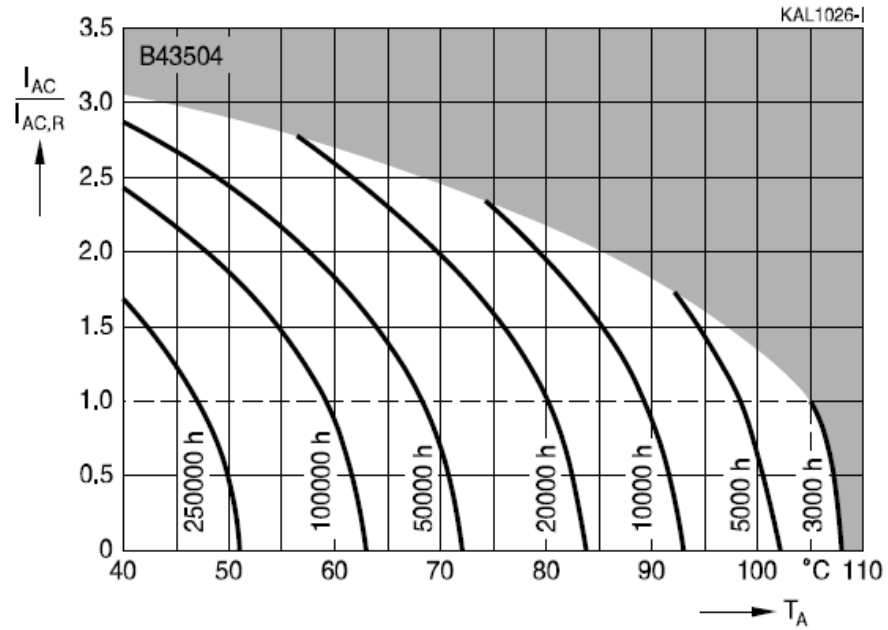
Assim para um capacitor com especificação de 105°C; 5000 horas utiliza-se, por exemplo, um fator de tensão de 1,45 enquanto para um capacitor de mesmo design com 8000 horas um fator de tensão de 1,7.

Para o caso de uma aplicação hipotética com tensão máxima de 190V o regime de trabalho para um capacitor de 250V; 105° C. Tem-se uma tensão de formação na folha de anodo de 425V e, portanto, um fator de tensão na aplicação de 2,23. Que seria bem superior aos 1,7 definidos na série e, portanto, suportaria valores de vida bem superiores a 8000 horas.

Normalmente, os fabricantes também especificam o valor da expectativa de vida do capacitor será obtido utilizando-se as curvas de “Useful life” da série apresentadas no data sheet empregando-se o fator de ripple calculado e a temperatura ambiente do local a onde o capacitor está operando.

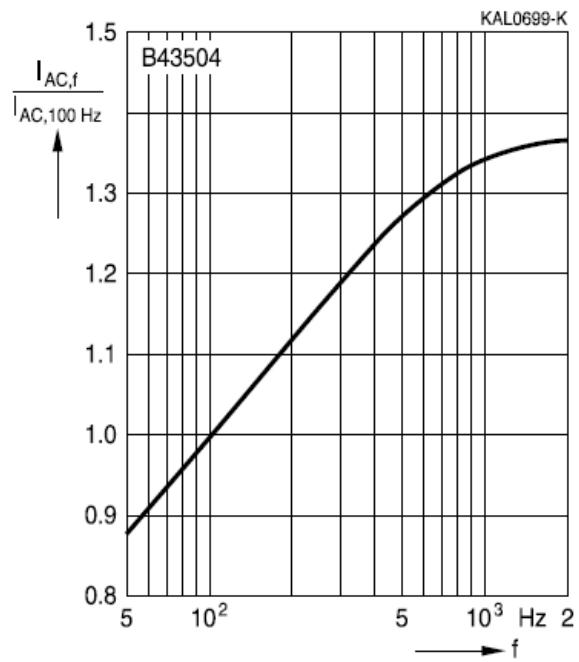
Abaixo, exemplos de curvas presentes em Data Sheets para que se possa estimar a vida de um capacitor pertencente aquela série.

Figura 27: *Useful life*: Dependendo da temperatura ambiente e condições de corrente de ripple.



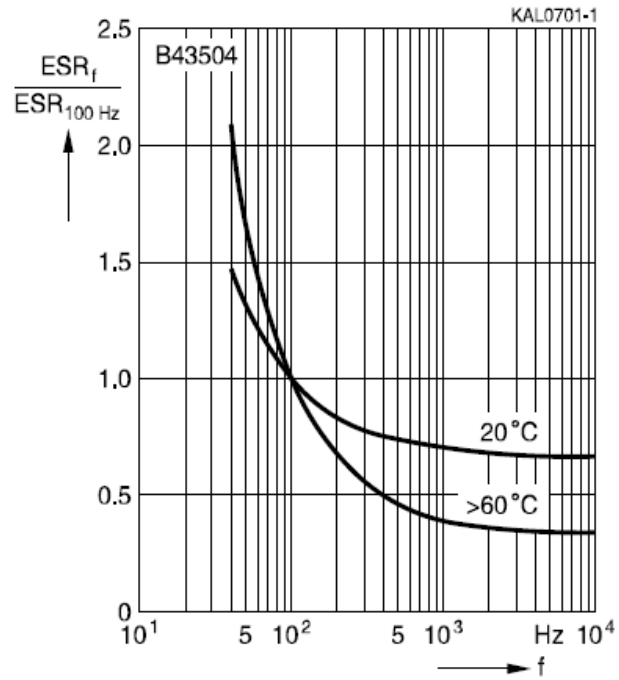
Fonte (EPCOS AG 2009, 2009)

Figura 28: Fator de frequência admissível para corrente de ondulação versus frequência



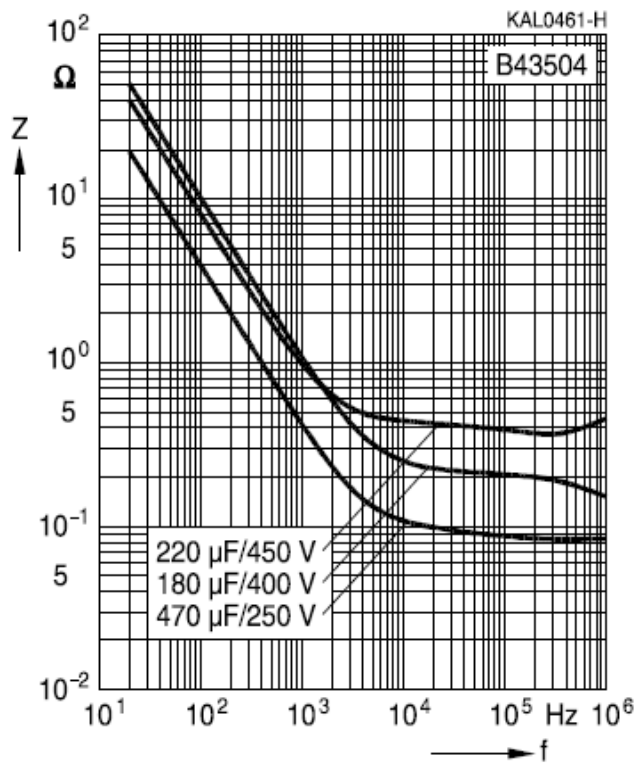
Fonte (EPCOS AG 2009, 2009)

Figura 29: Características de frequência da resistência equivalente série.



Fonte (EPCOS AG 2009, 2009)

Figura 30: Impedância (Z) versus frequência (f)



Fonte (EPCOS AG 2009, 2009)

Tanto o método de cálculo de vida a partir das equações acima citadas quanto o método de aproximações a partir das curvas, são bem eficazes e já trazem grandes ganhos no que se diz respeito a otimização na utilização de capacitores eletrolíticos.

Atualmente há fabricantes que já possuem simuladores em seus sites, contemplando basicamente todos os fatores que interferem na vida do capacitor, no qual basta colocar as variáveis de aplicação e o simulador, a partir do capacitor escolhido, retorna a expectativa de vida do mesmo para aquela aplicação. No entanto, os mesmos não explicam como são gerados esses valores e como é feita a modelagem de seus cálculos.

6.3 REQUISITOS PARA PROJETAR CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO

Ao falar de projetos de criação de capacitores eletrolíticos de alumínio há duas frentes de desenvolvimento: Criação de séries / famílias de capacitores e criação de um design específico em que temos um melhor custo benefício em relação ao desempenho do capacitor na aplicação. Em ambas as situações os capacitores devem ser testados para qualificar o design projetado.

6.3.1 PROJETO DE SÉRIES / FAMÍLIAS DE CAPACITORES

Dos requisitos que dizem respeito para criação de séries de capacitores há diversas frentes em os fabricantes normalmente aderem. Em catálogos dos fabricantes, as séries são divididas por temperatura nominal e quantidade de vida. Se tratando de capacitores industriais, as séries são normalmente especificadas em 85°C ou 105°C. Há também outras duas características que são fortemente consideradas ao projetar uma série de capacitores eletrolíticos de alumínio: a capacidade de corrente de ripple suportada e miniaturização da série, ou seja, colocar a maior capacitância possível num determinado tamanho de capacitor.

Normalmente ao dar foco em uma das três principais características, automaticamente o engenheiro de produto já sabe em quais matérias primas e características elétricas e/ou mecânicas deverá atuar com maior atenção. Pode-se citar três diferentes situações de desenvolvimento de séries:

- Série 85°C ou 105°C: A temperatura nominal da série está diretamente ligada ao fator de tensão utilizado na série e também nas características de operação do eletrólito.

- Foco em miniaturização: Quando o projeto de uma série de capacitores está ligado a miniaturização, tem-se o ânodo como foco principal. Aqui, como a ideia é colocar a maior

capacitância possível numa determinada dimensão, são utilizados anodos com altos ganhos capacitivos.

- Foco em corrente de Ripple – Caso mais complexo em relação aos anteriores. Quando a ideia é projetar uma série com maior capacidade de corrente de ripple, o engenheiro de produto deve focar na diminuição da resistência série equivalente gerada pela combinação dos materiais da bobina e também na diminuição da resistência térmica (R_{th}) do capacitor. Junto a isso, elevados fatores de tensão dão maior capacidade de suportar maiores correntes de ripple em um design.

6.3.2 PROJETO DE CAPACITOR ELETROLÍTICO DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÃO ESPECÍFICA.

Para projetar um capacitor eletrolítico de alumínio para uma aplicação especial, é necessário conhecer as condições de operação que o capacitor será submetido. Dentro as principais características necessárias para a criação de um design especial estão:

- **Tipo de capacitor:** Escolha entre tipos de capacitores compatíveis com o design do sistema.

- **Tamanho disponível para o capacitor / banco de capacitores:** O engenheiro de desenvolvimento de produto necessita saber o espaço disponível para saber em que dimensões poderá projetar o capacitor.

- **Tensão de operação:** tensão de regime permanente em que o capacitor ou banco de capacitores será submetido.

- **Temperatura:** Máxima temperatura em que o capacitor ficará submetido

- **Capacitância:** Capacitância do capacitor ou banco de capacitores. Atentar para a capacitância em que o capacitor terá no final de sua vida.

- **Corrente de ripple:** Corrente de ripple com sua respectiva frequência de operação que passa pelo capacitor ou banco de capacitores.

- **Resistência equivalente série, Impedância:** Caso haja a necessidade de compatibilização de impedância no sistema, o engenheiro de produto necessita saber quais valores máximos poderá atingir. Atentar para a variação que esses parâmetros possam ter no final da vida do capacitor.

Em casos em que o engenheiro de produto precisa criar um capacitor para alguma aplicação específica, normalmente o mesmo escolhe um design de uma série próximo a

aplicação e se adapta o design escolhido de catálogo e que já aprovado. Em outras palavras ele avalia os requisitos da aplicação e faz as alterações necessárias no design conforme a aplicação para ter um melhor custo benefício para a aplicação em questão.

Como visto a temperatura é o parâmetro que mais influência na vida e performance do capacitor que durante sua vida sofre perda de capacitância gerada pela degradação do óxido de alumínio e aumento da resistência equivalente série do capacitor gerado principalmente pela degradação do eletrólito. Com isso, saber a resistência série do capacitor na sua temperatura de aplicação é de extrema importância. Toda a perda, manifestada através de calor, ocorre a partir da resistência série do capacitor. Com a resistência série e o R_{th} do design projetado, que é diretamente ligado ao dimensional do capacitor, consegue-se estimar, junto a corrente de ripple aplicada, a temperatura do núcleo da bobina que junto da temperatura ambiente da aplicação nos dá a possibilidade de estimar a vida do capacitor e se o capacitor em questão suprirá as necessidades da aplicação.

Normalmente são duas atividades de mudanças feitas para que o capacitor supra as necessidades de uma aplicação específica. O aumento da capacidade de corrente de ripple e o aumento de vida útil do capacitor. Quando há a necessidade de somente aumentar a capacidade de corrente de ripple do capacitor trabalha-se, então em alguma forma de diminuir a resistência série do capacitor em questão, pois com conforme a equação 4, diminuindo a resistência série do capacitor ganha-se a possibilidade de aumentar a corrente de ripple suportada pelo mesmo para chegar na mesma perda estimada. Isso se dá fazendo modificações nas matérias primas da bobina, como por exemplo utilizando papéis de menor RSE, eletrólito com maior condutividade, maior número de pares de abas. O valor da resistência série está diretamente ligada a temperatura e frequência da aplicação.

A análise a ser feita pelo engenheiro de desenvolvimento de produto está na modelo base que determina as características elétricas do produto e em qual proporção cada matéria prima está relacionada. Os principais componentes que determinam a característica elétrica de um design são:

- Alumínio (ânodo, cátodo, abas, solda): Alta condutividade. Aqui a resistência série está diretamente ligado a frequência de operação, em que quanto maior a frequência maior será a influência da quantidade de alumínio no valor da resistência série.

- Dielétrico (óxido de alumínio): Muito baixa condutividade, está ligado as perdas dielétricas.

- Combinação papel + eletrólito: Média condutividade. Sua resistência série equivalente está diretamente ligada ao inverso da condutividade do eletrólito em questão.

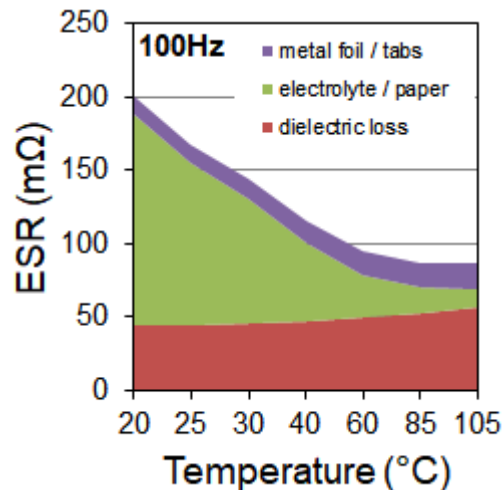
Tem-se então que a resistência série equivalente é dada pela soma da resistência serie desses três fatores em relação a temperatura e frequência de operação.

$$RSE(total) = RSE(aluminio) + RSE(dielétrico) + RSE(papel + eletrólito)$$

$$RSE(total) = função(temperatura, frequência)$$

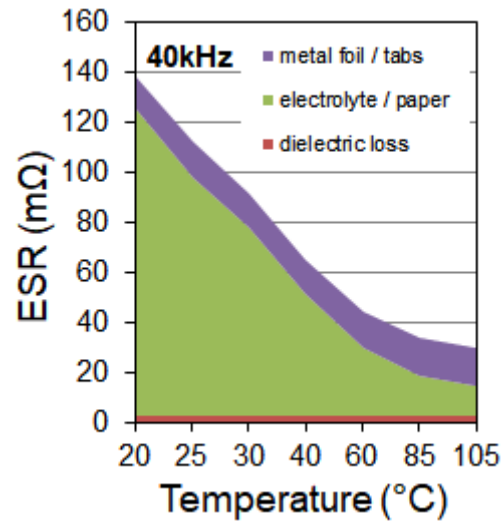
Abaixo está mostrado um gráfico uma análise da influência de cada material feita em baixa e alta frequência e também ao longo do aumento de temperatura de um desenvolvimento especial feito pelo fabricante Tdk Eletronics. Por motivos de sigilo, não são apresentadas as especificações de projeto.

Figura 31: Contribuição dos materiais de bobina para formação do RSE analisados em baixa frequência



Fonte: Tdk Eletronics

Figura 32: Contribuição dos materiais de bobina para formação do RSE analisados em alta frequência

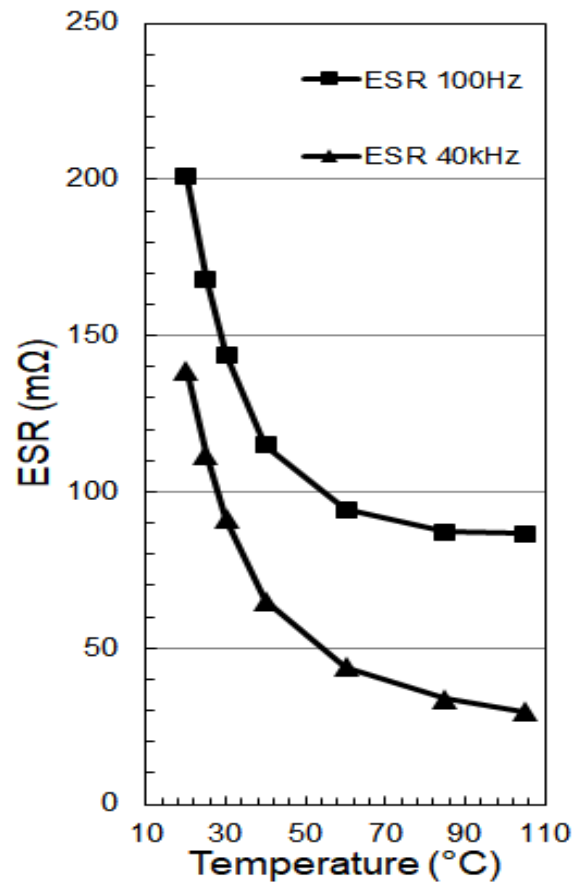


Fonte: Tdk Eletronics

Nessas análises percebe-se que em baixas frequências e baixas temperaturas tem-se como materiais dominantes na formação do RSE o sistema papel + eletrólito e a camada de óxido (dielétrico). Já em altas frequências e altas temperaturas a camada de óxido tem maior dominância.

Para altas frequências e altas temperaturas tem-se como dominante o sistema papel + eletrólito e os materiais metálicos(alumínio) como dominantes. Já para altas frequências e baixas temperaturas o fator dominante é o sistema papel + eletrólito.

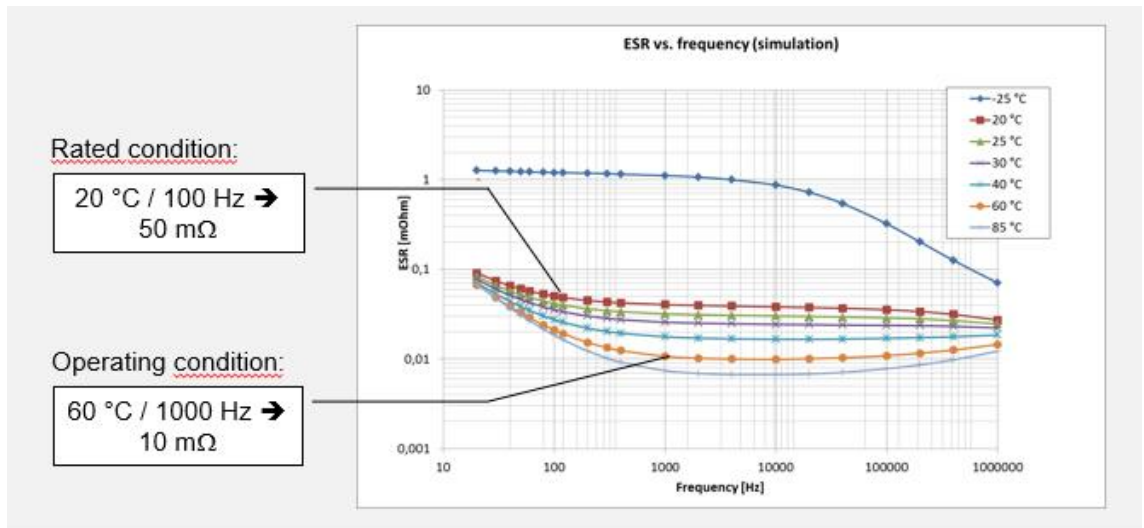
Figura 33: Influência da temperatura no RSE em altas e baixas frequências



Fonte: Tdk Eletronics

Nesse gráfico percebemos que independentemente do valor da frequência de aplicação a RSE do capacitor diminui conforme o aumento de temperatura. Esse fator é muito importante pois as perdas do capacitor, conforme já mencionado anteriormente estão ligadas diretamente a esse valor. Abaixo pode-se ver um exemplo da diferença do valor do RSE de especificação em relação ao RSE na condição de operação:

Figura 34: Simulação RSE vs. Frequência

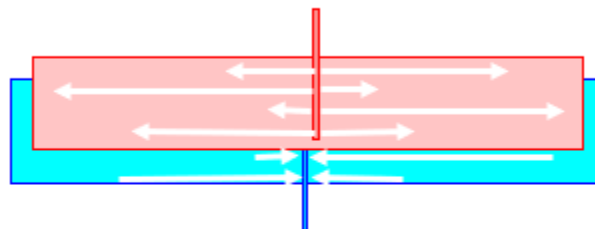


Fonte: Tdk Eletronics

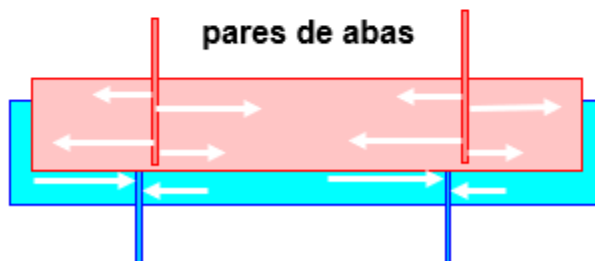
Outro fator que pode ser analisado para a redução e/ou avaliação do RSE é a quantidade de pares de abas presentes na bobina. Quanto maior os números de pares de abas menores será a distância percorrida pela corrente dentro da bobina e portanto, diminuindo a dificuldade de transporte da mesma. Logo, há a diminuição do RSE conforma se aumenta o número de pares de abas na bobina do capacitor. As imagens abaixo ilustram essa característica:

Figura 35: Influencia da quantidade de abas no RSE

rota de corrente longa com guia de contato único :



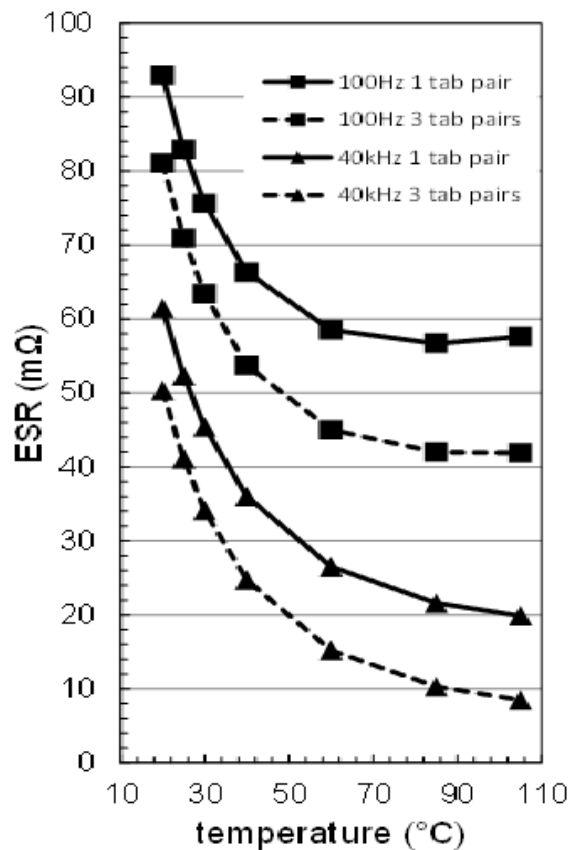
Rota de corrente curta com maior numero de pares de abas



Fonte: Tdk Eletronics

Percebe-se que quanto maior os números de abas menor será a RSE do capacitor. Nota-se também que o maior número de abas influencia significativamente para designs utilizados em altas frequências conforme gráfico abaixo:

Figura 36: RSE vs. Temperatura em diferentes frequências



Fonte: Tdk Eletronic

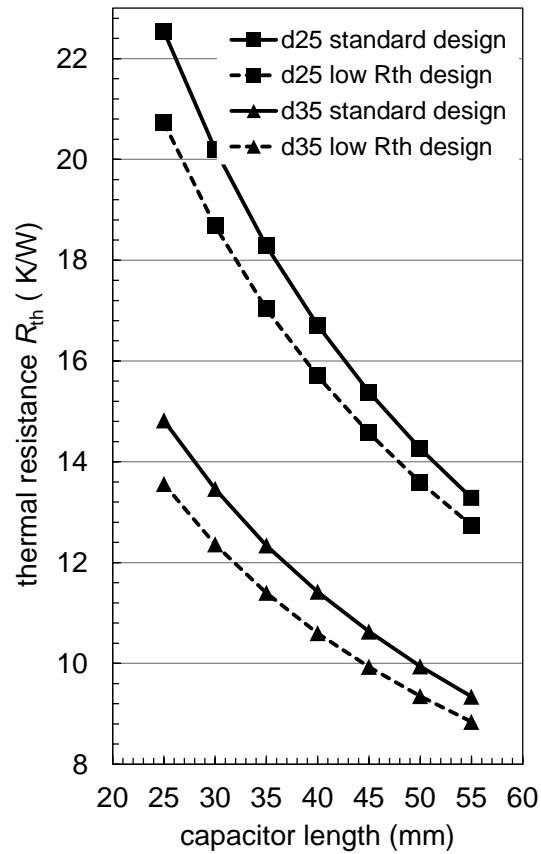
Pode-se também para ter um ganho em corrente de ripple, tentar diminuir a resistência térmica (R_{th}) do capacitor. Para isso, é necessário melhorar a dissipação térmica do capacitor. Uma técnica muito comum utilizada em capacitores do tipo industrial a o chamado catodo saliente. Deixa-se o catodo saliente a bobina e ao ser inserida a bobina dentro da caneca o mesmo fica em contato com a caneca de alumínio, que acaba funcionando como um dissipador. Cátodo, eletrólito e caneca formam o lado negativo do capacitor, sendo assim possível esse design sem ocorrência de curto circuito na bobina, a menos que haja problemas de construção da mesma.

Figura 37: Bobina com cátodo saliente



Fonte: O autor

Figura 38: Influência do cátodo saliente na R_{th}



Fonte: Tdk eletronicas

Com isso, saber a temperatura da caneca e do núcleo dos capacitores é essencial para a estimativa de vida do capacitor. Para analisar essas temperaturas, coloca-se termopares no núcleo da bobina e na caneca do capacitor e se coloca o mesmo a operar em suas condições específicas fazendo então a análise dos parâmetros elétricos do capacitor. Esses parâmetros elétricos, todos tem sua parcela de influência na temperatura e devem ser analisados em diversas situações para avaliar o seu comportamento. Abaixo a figura 39 mostra como são medidas as temperaturas da caneca e do núcleo do capacitor em um capacitor do tipo radial. O mesmo processo é feito nos capacitores industriais citados nesse material.

Figura 39: Medição de temperatura da caneca e do núcleo do capacitor



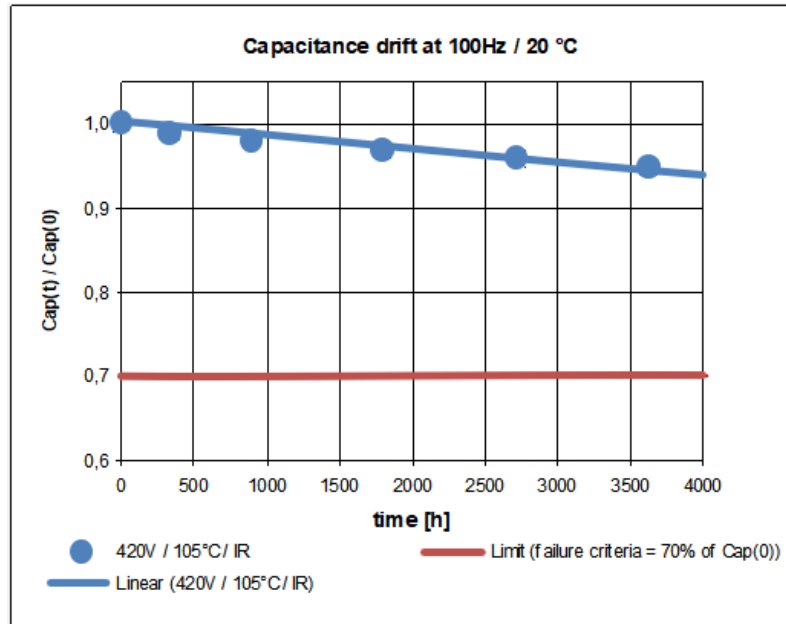
Fonte: Girard, Alessandro: COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS

Outra das principais mudanças feitas para aplicações especiais é no aumento/diminuição do fator de tensão do capacitor. Normalmente essa situação aparece quando há a necessidade em aumentar/diminuir a estimativa de vida do capacitor sendo que o mesmo já suporta a corrente de ripple da aplicação. Isso faz com que a corrente de fuga do capacitor seja menor e, então, a degradação do óxido de alumínio seja mais lenta, levando o capacitor a uma maior vida útil dentro dos padrões de especificação. No entanto, esse fator não é levado em consideração no cálculo de vida tradicional de capacitores eletrolíticos de alumínio. A avaliação deste fator é feita pelo fator de tensão da série de capacitor utilizada e fazendo ajustes no mesmo

dependendo da tensão de operação que será inserido o capacitor. Após essa análise inicial, são feitas amostras e nelas feitos testes de vida para comprovar a análise inicial feita.

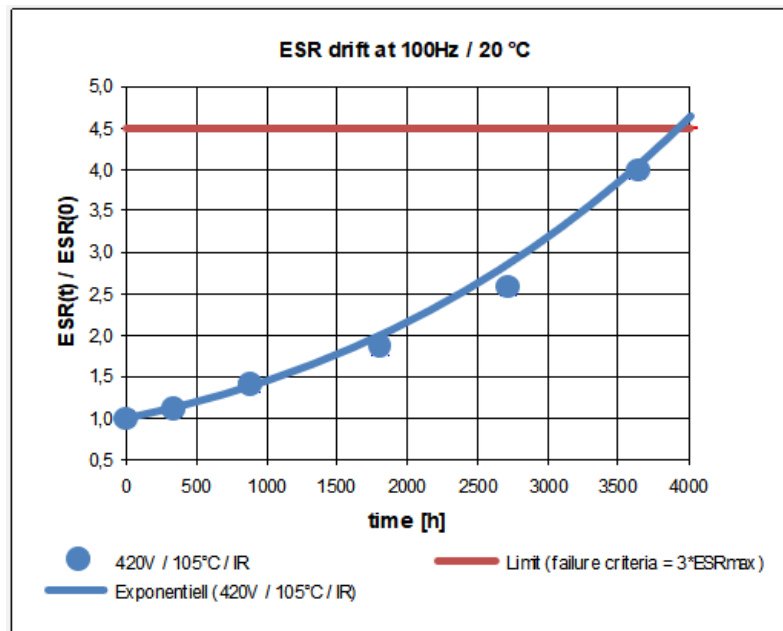
Abaixo, mostra-se os gráficos de uma análise feita para um capacitor de tensão nominal 450 volts com especificação de 105°C de temperatura e 4000 horas de vida. No entanto, o mesmo foi submetido a uma tensão de operação de 420 volts.

Figura 40: Perda de capacitância



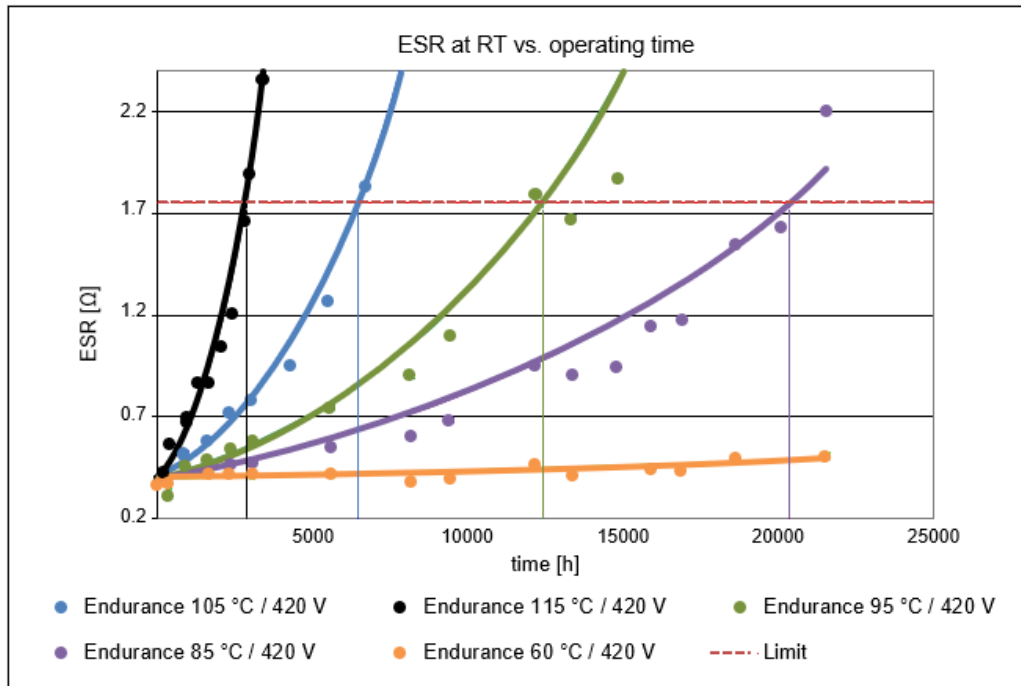
Fonte: Tdk electronics

Figura 41: Aumento de RSE



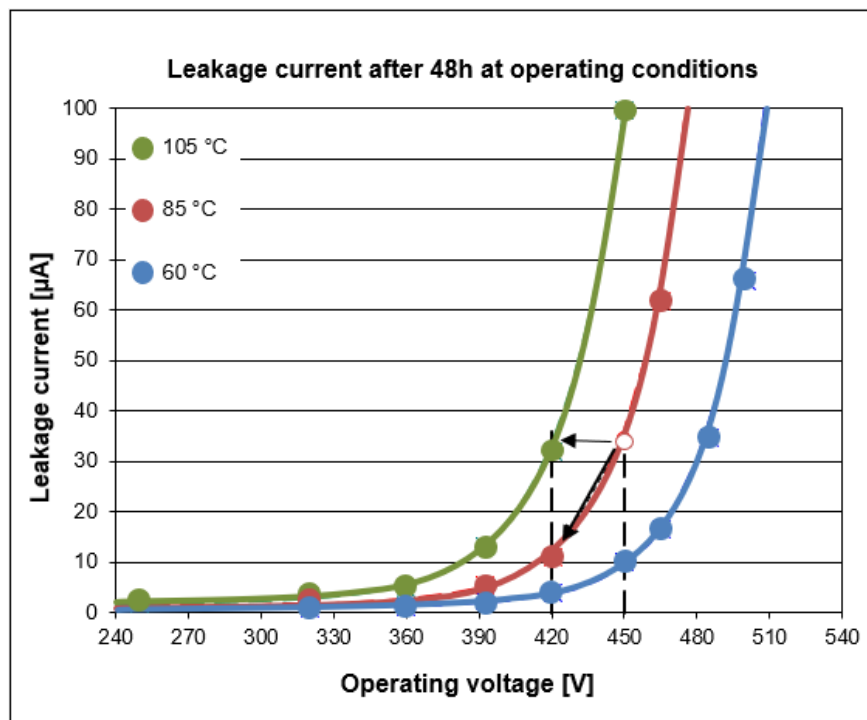
Fonte: Tdk electronics

Figura 42: Simulação aumento de RSE durante a vida



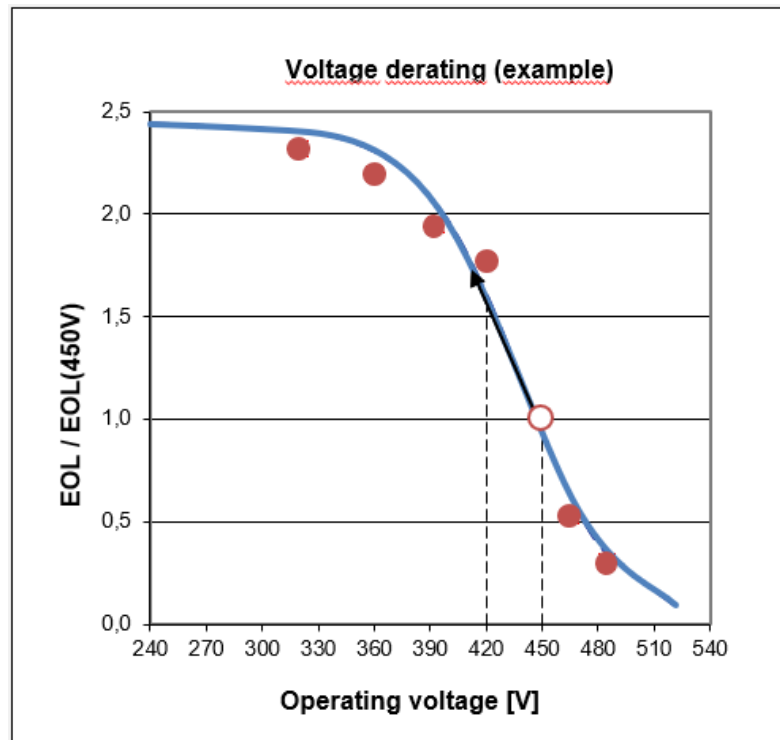
Fonte: Tdk electronics

Figura 43: Corrente de fuga após 48 horas de operação



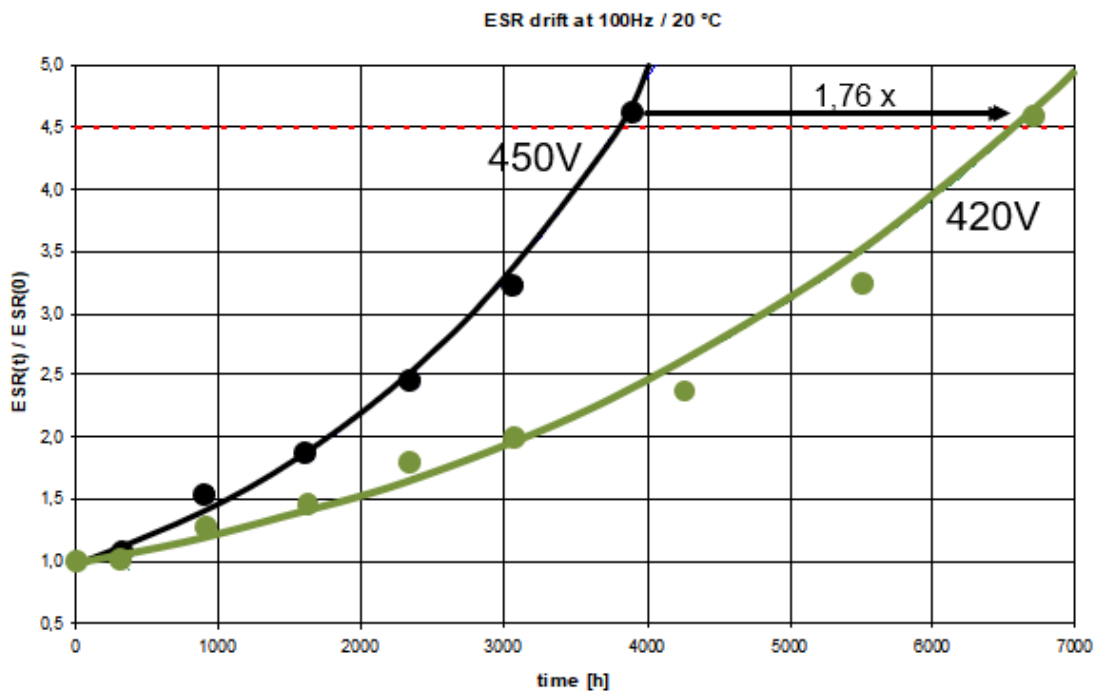
Fonte: Tdk electronics

Figura 44; Estimativa de vida em relação a tensão de operação



Fonte: Tdk electronics

Figura 45: Ganho de Vida ao utilizar tensão menor que a nominal



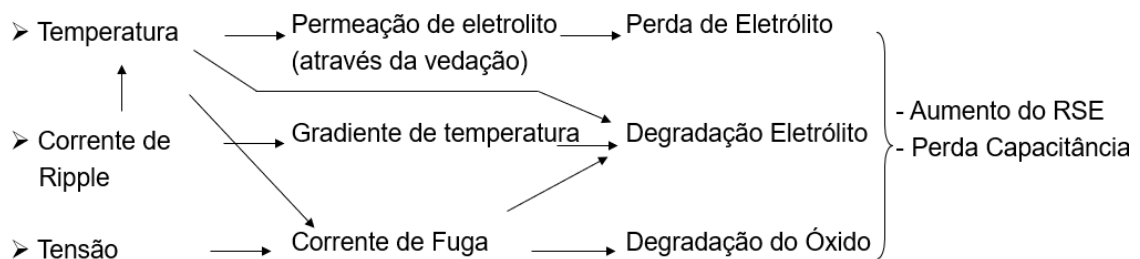
Fonte: Tdk electronics

A partir dos gráficos percebe-se que a tensão de operação também influi na vida do capacitor eletrolítico de alumínio. E uma análise previa desse fator deve ser levada em conta antes de projetar um design para uma aplicação especial.

O custo de um capacitor eletrolítico de alumínio do tipo industrial, tem na folha de ânodo sua maior influência. O mesmo chega a variar de 30% a 75% do custo do capacitor. Dependendo de seu tamanho e capacitância. Com isso, poder reduzir a tensão de formação do ânodo utilizado no design ajuda a reduzir consideravelmente o custo final do capacitor que em algumas aplicações chega a ser uns dos mais caros componentes do sistema.

Portanto, cabe ao engenheiro de desenvolvimento de produto analisar e avaliar as características da aplicação avaliar os mecanismos de envelhecimento do capacitor para que o mesmo possa suportar a aplicação em questão. O diagrama esquemático abaixo mostra quais são os fatores que mostram os principais mecanismos que geram o envelhecimento e/ou perda de vida do capacitor e onde o engenheiro de desenvolvimento de produto deve atuar para otimizar designs e também o custo benefício do capacitor.

Figura 46: Esquemático principais mecanismos de envelhecimento do capacitor



Fonte: O autor

7 CONCLUSÃO

Projetar sistemas não é um trabalho nada fácil. Chegar em componentes otimizados também não é uma tarefa muito fácil. A engenharia sempre nos traz novos desafios em busca de melhor performance sempre ligada a melhores custos.

Viu-se que o projeto de capacitores eletrolítico de alumínio está diretamente ligado em trabalhar as diferentes variações e melhorar a resistência série equivalente (RSE), pois a mesma está diretamente ligada as perdas no capacitor que são geradas através de calor. Essa resistência série é dada em função da temperatura e frequência da operação. Junto com a corrente de ripple que circula no capacitor sabe-se o quanto esquentará o núcleo da bobina e assim é possível estimar a vida do capacitor. Outro fator também muito ligado a vida do capacitor é o fator de tensão que mostra que utilizar o capacitor em tensões menores que sua tensão nominal pode gerar uma grande melhora na estimativa de vida desse capacitor, pois as perdas por degradação do óxido diminuem pôr o capacitor apresentar menor corrente de fuga.

A análise do projeto de capacitor eletrolítico de alumínio apresentada nesse trabalho mostra, quais são as características necessárias para que se possa projetar um design específico para uma aplicação específica. Para isso necessita-se entender como as matérias primas desses componentes se comportam e também saber quais as principais necessidades da aplicação, como:

- Tensão de operação;
- Corrente de ripple (espectro de frequência, característica da carga);
- Temperatura de operação;
- Critérios de final de vida para os capacitores do sistema;
- Dimensões, terminais do capacitor, tipo isolamento.

Com esses fatores pode-se então trabalhar em cima de designs existentes fazendo designs com melhor custo benefício para a aplicação. Designs feitos para operarem em nas condições ideais de operação e que tenham a quantidade de vida estipulada, com isso deixa-se de poder ter um “excesso de especificação” dos componentes e passa-se a ter um design com ótimo desempenho para a aplicação e com um custo benefício muito mais em conta.

REFERÊNCIAS

EPCOS AG 2017. **Aluminum Electrolytic Capacitors**, dez. 2017. Disponível em: <<http://en.tdk.eu/tdk-en/529362/products/product-catalog/aluminum-electrolytic-capacitors>>. Acesso em: 03 maio. 2018.

EPCOS AG 2009. **Aluminum Electrolytic Capacitors**, dez. 2017. Disponível em: <<http://en.tdk.eu/tdk-en/529362/products/product-catalog/aluminum-electrolytic-capacitors>>. Acesso em: 03 maio. 2018.

NICHICON CORPORATION. **General Description of Aluminum Electrolytic Capacitors** Disponível em<<http://www.nichicon.co.jp/english/products/pdf/aluminum.pdf>> Acesso em: 03 maio 2018>

Sam G. Parler, Jr **Selecting and Applying Aluminum Electrolytic Capacitors for Inverter Applications** Disponível em <<http://www.cde.com/resources/technical-papers/selectinvcap.pdf>> Acesso 15 maio 2018

Sam G. Parler, Jr **Deriving Life Multipliers for Electrolytic Capacitors** disponível em: < <http://www.cde.com/resources/technical-papers/multipliers.pdf>> Acesso 15 maio 2018

EVOX RIFA PASSIVE COMPONENTS, **Life-Limiting Factors in Electrolytic Capacitors (and how to improve them)** disponível em < http://www.efo-power.ru/pub/power/Capacitors/articles/kak_otsehit_srok_cond.pdf> acesso 15 maio 2018.

Girard, A. **COMPORTAMENTO TÉRMICO DE CAPACITORES ELETROLÍTICOS DE ALUMÍNIO PARA APLICAÇÕES AUTOMOTIVAS**