

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 756

**PREVISIBILIDADE DE FALHAS EM  
CAPACITORES DO BARRAMENTO C.C.  
DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

**Fernando Cláudio de Oliveira**

DATA DA DEFESA: 21/09/2012

**Universidade Federal de Minas Gerais**

**Escola de Engenharia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**PREVISIBILIDADE DE FALHAS EM CAPACITORES DO  
BARRAMENTO C.C. DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**

Fernando Cláudio de Oliveira

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Porfírio Cabaleiro Cortizo

Belo Horizonte - MG

Setembro de 2012

**"Previsibilidade de Falhas em Capacitores do Barramento C.c.  
de Inversores de Frequência"**

**Fernando Cláudio de Oliveira**

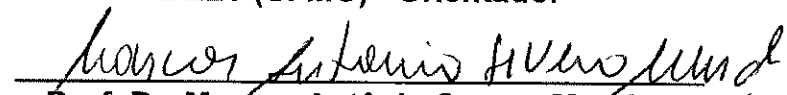
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 21 de setembro de 2012.

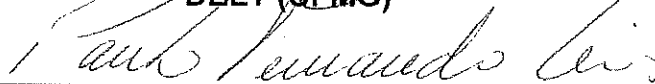
Por:



**Prof. Dr. Porfirio Cabaleiro Cortizo  
DELT (UFMG) - Orientador**



**Prof. Dr. Marcos Antônio Severo Mendes  
DELT (UFMG)**



**Prof. Dr. Paulo Fernando Seixas  
DELT (UFMG)**

## **Agradecimentos**

Registro especiais agradecimentos:

Ao Professor e orientador Porfírio Cabaleiro Cortizo, que com paciência e dedicação ajudou a encontrar os caminhos para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Marcos A. Severo, que em diversos momentos demonstrou apoio e incentivo para o desenvolvimento do tema aqui apresentado.

Ao Colega de Trabalho Rodrigo Márcio que se disponibilizou e ajudou a viabilizar os experimentos nos painéis elétricos de sua responsabilidade dentro da Aperam América do Sul (ex. Acesita).

Ao Professor e também colega de trabalho Márcio Pretti, um grande incentivador para a conclusão deste trabalho e um grande mestre que há 20 anos me ensinou os primeiros passos na área da eletrônica.

À Aperam América do Sul (ex. Acesita), que patrocinou, seja através de licenças no trabalho ou outros recursos, toda uma caminhada até que eu pudesse chegar à conclusão deste mestrado. Neste contexto, em especial ao colega e gestor Paulo Novaes.

Aos meus familiares, em especial à D. Taninha, minha mãe, que com fé e confiança acreditou nesta realização.

## **Resumo**

Este trabalho apresenta inicialmente as considerações sobre a aplicação dos capacitores eletrolíticos na indústria, especificamente nos barramentos c.c. de inversores de frequência e a importância em identificar, de forma antecipada, falhas relacionadas à sua deterioração por fim de vida útil.

Posteriormente são apresentados alguns conceitos de manutenção e todo o processo de construção de um capacitor eletrolítico de alumínio, abordando suas principais características, aplicações e seus modos de falha. Alguns estudos já realizados visando esta previsão de vida útil são também analisados de forma a criar os conceitos que servirão de base para a proposta de previsibilidade de falhas nestes componentes.

Após algumas simulações e experimentos é então proposto um processo de aplicação de testes de campo em inversores de frequência, que permite um acompanhamento preditivo, avaliando a evolução da vida útil de capacitores eletrolíticos de alumínio do barramento de corrente contínua.

## **Abstract**

Initially, this work presents considerations about application of electrolytic capacitors in the industry, especially in the inverters D.C. bus, and how important is to identify in advance failures related to deterioration and wearout of these devices.

After that, it is presented some maintenance's concepts and the whole process of building an aluminum electrolytic capacitor, discussing its main features, applications and their failure modes. Some previous studies regards predicting lifetime are also analyzed in order to create the theory that form the basis for the proposed failure's prediction in these components.

Finally, after some simulations and experiments, is then proposed a procedure to apply on frequency inverters, which will enable predictive maintenance based on evolution of lifetime of aluminum electrolytic capacitors.

CAPÍTULO 1 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA .....	7
Objetivo .....	8
CAPÍTULO 2 – MANUTENÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NA ÁREA INDUSTRIAL .....	9
2.1 Revisão dos conceitos sobre manutenção na área industrial .....	9
2.2 O Capacitor eletrolítico .....	12
2.3 Processo construtivo do Capacitor Eletrolítico .....	13
2.3.1 Decapagem .....	14
2.3.2 Formação .....	14
2.3.3 Corte .....	15
2.3.4 Bobinamento.....	15
2.3.5 Impregnação .....	16
2.4 Guia de Aplicação .....	17
2.4.1 Absorção dielétrica .....	17
2.4.2 Isolamento e aterramento.....	18
2.4.3 Pressão externa .....	18
2.4.4 Vibrações mecânicas .....	18
2.4.5 Válvula de alívio de pressão.....	19
2.4.6 Contato com eletrólito .....	20
2.4.7 Carga-descarga .....	20
2.4.8 Polaridade – Inversão de tensão .....	20
2.4.9 Inflamabilidade.....	21
2.5 Parâmetros do Capacitor e circuito equivalente .....	21
2.5.1 Capacitância.....	21
2.5.2 Resistência de perda dielétrica (DCR) .....	22
2.5.3 Fator de dissipação (DF).....	23
2.5.4 Indutância série equivalente (ESL).....	23
2.5.5 Resistência Série Equivalente (ESR).....	24
2.5.6 Faixa de Temperatura de operação.....	26
2.5.7 Faixa de Temperatura de armazenamento .....	26
2.5.8 Tensão c.c. Nominal .....	26
2.5.9 Sobretensão nominal.....	27
2.5.10 Transiente de sobretensão.....	27
2.5.11 Corrente de “Ripple” .....	27
2.6 Configuração de banco de Capacitores .....	29
2.6.1 Conexão de capacitores em paralelo .....	29
2.6.2 Conexão de capacitores em série.....	29
2.6.3 Conexão de capacitores série-paralelo .....	30
2.6.4 Conexão de capacitores paralelo-série .....	30

2.6.5 Conexão não-polarizada .....	31
2.7 Estratégias de refrigeração.....	32
2.8 Prazo de validade.....	32
2.9 Considerações de aplicação .....	33
2.9.1 Soldagem .....	33
2.9.2 Montagem.....	33
2.10 Descarte de capacitores eletrolíticos.....	34
2.11 Modos de falha .....	35
2.11.1 Falha na válvula de pressão (Excesso na geração de gás).....	35
2.11.2 Falha causando abertura do capacitor.....	36
2.11.3 Curto Circuito .....	37
2.11.4 Falha por degradação.....	37
2.11.5 Falhas nos periféricos do capacitor .....	37
CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DE TRABALHOS ANTERIORES .....	39
3.1 Diagnóstico através da medição do valor da capacitância .....	39
3.2 Diagnóstico usando a ESR – Deterioração e perda de eletrólito.....	45
3.3 Diagnóstico de capacitores usando ESR - assinatura de tensão e corrente .....	50
CAPITULO 4 – EXPERIMENTOS DE CAMPO - ANÁLISE DOS CAPACITORES DE UM INVERSOR ABB .....	55
4.1 Medição da capacitância C .....	56
4.1.1 Experimento da medição da capacitância.....	59
4.2 Medição da ESR .....	62
4.2.1 Simulação do inversor no PSIM.....	62
4.2.2 Experimento de campo .....	64
4.2.2.1 ESR estimada na faixa de frequência chaveamento .....	67
4.2.2.2 ESR estimada na faixa de frequência do retificador de entrada .....	76
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE CONTINUIDADE.....	78
5.1 Relevância do tema.....	78
5.2 Resultados práticos e próximos passos.....	78
5.3 Recomendações e trabalhos futuros .....	79
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
APÊNDICE A: DIAGRAMA DE BLOCOS E ESPECIFICAÇÕES DO DRIVE ACV 700..	83
APÊNDICE B: ESPECIFICAÇÕES DOS CAPACITORES ABB .....	84
APENDICE C: ESPECIFICAÇÕES DOS CAPACITORES EPCOS .....	85
APENDICE D: DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO NO PSIM .....	86

## **CAPÍTULO 1 – IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA**

Os capacitores eletrolíticos de alumínio são largamente empregados como reservatórios de energia em fontes de alimentação, graças à sua grande capacidade de armazenamento de energia em um volume reduzido.

A grande relação energia/volume de um capacitor eletrolítico é possível devido à grande superfície plana das folhas de alumínio (expandida pelo processo de corrosão eletroquímica) e de sua camada dielétrica muito fina.

Estes capacitores são tradicionalmente utilizados para a filtragem, temporização e acoplamento, além de outras aplicações que requerem um baixo custo e grande relação energia/volume. Infelizmente, a vida útil destes componentes é muito reduzida quando submetidos a temperaturas de trabalho elevadas sendo, portanto um dos grandes motivos de defeito em equipamentos eletrônicos [1].

A aplicação de inversores de frequência na indústria tem aumentado consideravelmente nos últimos anos. Os capacitores eletrolíticos de potência estão presentes nestes inversores e têm basicamente a função de garantir uma tensão contínua ao estágio de saída, com o mínimo possível de ondulação. A detecção precoce de falhas nestes capacitores permite a execução de manutenção preventiva, possibilitando assim o desligamento controlado do processo e a redução dos custos de manutenção pela redução das intervenções emergenciais.

As falhas comuns nos capacitores eletrolíticos incluem principalmente falhas catastróficas por desvio ou defeito de fabricação, no início de sua operação e falhas por desgaste relacionadas ao fim de vida útil. Muitos dos trabalhos existentes na literatura foram testados e aplicados com fins acadêmicos. No capítulo 4 é apresentada uma forma de diagnóstico que viabiliza a aplicação industrial para a manutenção preditiva nos capacitores em questão.

## **Objetivo**

O objetivo deste trabalho é identificar um método para diagnosticar de maneira preditiva as falhas nos capacitores eletrolíticos do barramento c.c. de um inversor de frequência. Mais especificamente, este trabalho é aplicado em inversores de frequência de fabricação da empresa ABB, instalados na Usina Siderúrgica *Aperam South America*, localizada em Timóteo-MG, os quais acionam diversos motores de corrente alternada numa linha de recozimento e decapagem de Aço Inoxidável. Os inversores em questão operam conectados a um barramento geral de onde obtém tensão contínua, não possuindo retificador interno.

## **Organização do texto**

Este trabalho é dividido em cinco capítulos, onde no primeiro capítulo são apresentados os fatores motivadores da pesquisa e seu objetivo. O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica focada nos conceitos de manutenção e nos fundamentos técnicos dos capacitores eletrolíticos. O capítulo 3 apresenta as considerações acerca de pesquisas anteriores relacionadas ao assunto e na sequência o capítulo 4 mostra os resultados dos experimentos realizados na indústria. Finalmente o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho.

## CAPÍTULO 2 – MANUTENÇÃO DE CONVERSORES DE FREQUÊNCIA NA ÁREA INDUSTRIAL

Apresenta-se a seguir uma breve descrição dos tipos de manutenção realizados na área industrial de modo a facilitar o entendimento do objetivo deste trabalho. Também são apresentados detalhes construtivos de um capacitor eletrolítico e os seus modos de falha.

### 2.1 Revisão dos conceitos sobre manutenção na área industrial

Os tipos de manutenção na área industrial podem ser classificados em: [2]

- a) **Manutenção Corretiva** - é a atuação para correção da falha ou desempenho menor que o esperado, de um dispositivo ou equipamento.

A Manutenção Corretiva pode ser dividida em duas classes:

- **Manutenção Corretiva Não Planejada** – correção da falha de maneira aleatória, ou seja, é a correção da falha ou do desempenho menor que o esperado após a ocorrência do fato. Este tipo de manutenção implica em altos custos, pois causa perdas de produção e a extensão dos danos aos equipamentos é maior. Quando só existe a manutenção corretiva, é o equipamento que comanda a manutenção.
- **Manutenção Corretiva Planejada** – é a correção que se faz em função de um acompanhamento preditivo, detectivo, ou até pela decisão gerencial de se operar até a falha. Esse tipo de manutenção é PLANEJADA. Tudo que é planejado é sempre mais barato, mais seguro e mais rápido

Em algumas indústrias esses dois tipos de manutenção corretiva são conhecidos como Manutenção Corretiva Previsível e Manutenção Corretiva Não Previsível.

- b) **Manutenção preventiva** - é a atuação realizada para reduzir ou evitar falhas ou queda no desempenho, obedecendo a um planejamento baseado em intervalos definidos de tempo de operação de um dispositivo ou equipamento.

Um dos segredos de uma boa manutenção preventiva está na determinação dos intervalos de tempo. Como, na dúvida, as equipes de manutenção tendem a ser mais conservadoras e os intervalos normalmente são menores que o necessário o que implica em paradas e troca de peças desnecessárias.

A manutenção preventiva tem grande aplicação em instalações ou equipamentos cuja falha pode provocar catástrofes ou riscos ao meio ambiente; sistemas complexos e/ou de operação contínua.

Como a Manutenção Preventiva está baseada em intervalos de tempo, é conhecida como “TIME BASED MAINTENANCE – TBM” ou Manutenção Baseada no Tempo.

- c) **Manutenção preditiva** - é um conjunto de atividades de acompanhamento das variáveis ou parâmetros que indicam o desempenho dos equipamentos, de modo sistemático, visando definir a necessidade ou não de intervenção.

Quando a intervenção, fruto do acompanhamento preditivo, é realizada estamos fazendo uma MANUTENÇÃO CORRETIVA PLANEJADA.

**Preditiva**  **Corretiva planejada**

Esse tipo de manutenção é conhecido com “CONDITION BASED MAINTENANCE – CBM” ou Manutenção Baseada na Condição.

Permite que os equipamentos operem por mais tempo e a intervenção ocorra com base em dados e não em suposições.

Algumas empresas adotam uma classificação onde a Preventiva engloba a Manutenção Baseada no Tempo e a Manutenção Baseada na Condição, isto é a Preditiva seria um ramo da Preventiva. Optou-se por mantê-la separada tendo em vista as características diferentes das duas

- d) **Manutenção Detectiva** - é a atuação efetuada em sistemas de proteção ou comando buscando detectar falhas ocultas ou não perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção.

Um exemplo clássico é quando o circuito que comanda a partida de um gerador de energia em um hospital entra em falha, durante a falta de energia da companhia de distribuição.

À medida que aumenta a utilização de instrumentação de comando, controle e automação nas indústrias, maior a necessidade da manutenção detectiva para garantir a confiabilidade dos sistemas e da planta.

Esse tipo de manutenção é novo e por isso mesmo muito pouco mencionado no Brasil.

**Detectiva**            **Corretiva planejada**

- e) **Engenharia de manutenção** - é o conjunto de atividades que permite que a confiabilidade seja aumentada e a disponibilidade garantida. É deixar de ficar consertando e convivendo com problemas crônicos. A Engenharia de manutenção visa a melhoria de padrões e sistemáticas, desenvolvimento de técnicas de manutenção realimentando o projetista e interferindo tecnicamente nas compras.

Normalmente quem está apagando fogo, vivendo de manutenção corretiva não planejada, não terá tempo para fazer Engenharia de Manutenção. Mas possivelmente terá tempo para continuar apagando fogo e convivendo com péssimos resultados. É necessário mudar, incorporar a manutenção preventiva, a manutenção preditiva e fazer engenharia de manutenção.

As tendências atuais, analisadas nas empresas que são referência, indicam a adoção cada vez maior de técnicas preditivas e a prática da engenharia de manutenção. A tabela 1 abaixo demonstra o porquê, relacionando os tipos de manutenção e seus custos.

Tabela 1 – Custo dos tipos de manutenção - Fonte - NMW Chicago 1998

<b>Tipo de Manutenção</b>	<b>Custo US\$/HP/ano</b>
<b>Corretiva não planejada</b>	<b>17 a 18</b>
<b>Preventiva</b>	<b>11 a 13</b>
<b>Preditiva/Corretiva Planejada</b>	<b>7 a 9</b>
* HP ( <i>horse power</i> ) é a potência instalada	

Tendo então como referência os conceitos de manutenção industrial acima citados, pode-se perceber que as ações preditivas e a Engenharia de Manutenção devem ser cada vez mais o foco das equipes de manutenção, buscando sempre a redução dos custos através da previsibilidade das falhas e conseqüentemente do aumento da confiabilidade. O objetivo deste trabalho está alinhado com estes conceitos.

## **2.2 O Capacitor eletrolítico**

O capacitor eletrolítico de alumínio é um componente passivo que se manteve estável face aos avanços da tecnologia. São utilizados em diversas aplicações, pois podem atingir alta capacitância específica (grandes valores de capacitância em volume reduzido) mantendo uma boa relação custo-benefício. Este tipo de capacitor tem sido tradicionalmente utilizado para a filtragem, temporização, acoplamento, e outras aplicações. Para entender como isso acontece, é importante analisar algumas das propriedades básicas de capacitores [1].

Basicamente todo capacitor é constituído por duas placas paralelas, os eletrodos, com um dielétrico entre eles. A principal diferença entre o capacitor eletrolítico de alumínio e os demais tipos de capacitores reside no fato de que um dos eletrodos, o catodo, é constituído de um fluído condutor, o eletrólito, e não de uma placa metálica. O outro eletrodo, o anodo, é constituído de uma folha de alumínio em cuja superfície é formada, por processo eletrolítico, uma fina camada de óxido de alumínio que serve como dielétrico.

O valor da capacitância é diretamente proporcional à superfície dos eletrodos e inversamente proporcional à espessura do dielétrico. Nos capacitores eletrolíticos, a espessura do dielétrico é aquela da camada de óxido formada sobre a placa de anodo. A camada de óxido de alumínio é formada por oxidação anódica. A espessura desta camada é praticamente proporcional a tensão de formação aplicada. A tensão de formação da camada de óxido é muito superior a da tensão nominal ou tensão de pico do capacitor.

Outra característica é o aumento da superfície dos eletrodos resultante da cauterização eletroquímica ou decaagem que torna a folha de alumínio rugosa. Como o catodo do capacitor eletrolítico é constituído por um eletrólito, este preenche idealmente as reentrâncias da folha de anodo. Durante a oxidação da folha cauterizada, os finos poros são em parte

fechados e tanto mais o serão quanto mais alta for a tensão de oxidação empregada. A constante dielétrica <sup>1</sup>do óxido de alumínio é cerca de 10, valor considerado muito elevado. O óxido de alumínio apresenta como vantagens o fato de poder ser obtido em filmes de espessura muito pequena e a propriedade de suportar tensões muito elevadas. [3]

Uma ilustração típica de um capacitor eletrolítico de alumínio está representada na figura 2.1.

O método de bobinagem é o mais empregado na fabricação dos capacitores eletrolíticos de alumínio. A bobina contém, além da folha de anodo, uma segunda folha de alumínio que tem, no mínimo, a mesma dimensão da folha de anodo. A diferença está em que essa segunda folha, conhecida por folha de catodo, não é oxidada e serve apenas como grande área fornecedora de corrente para o eletrólito. Ambas as folhas são separadas uma da outra por algumas camadas de papel que exerce diversas funções: serve como armazenador de eletrólito (armazenado nos poros do papel absorvente) e como separador para evitar curtos.

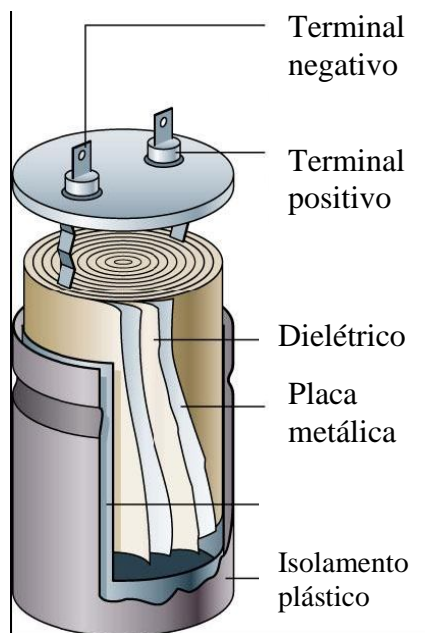


Figure 2.1- Corte na seção de um capacitor eletrolítico. (Fonte: Precision Graphics)

### 2.3 Processo construtivo do Capacitor Eletrolítico

---

<sup>1</sup> Constante dielétrica - Matematicamente,  $\epsilon = Q/Q_0$ , ou seja, é a razão entre a carga  $Q$ , obtida com uma determinada tensão no capacitor que contém um dado dielétrico e a carga  $Q_0$ , que é a carga que existiria se os eletrodos estivessem separados pelo vácuo.

### 2.3.1 Decapagem

As placas ou eletrodos são feitos de uma fina folha de alumínio de alta pureza (0,05 a 0,1mm de espessura). Para obter o máximo de capacitância para uma determinada área de superfície de eletrodo, um processo eletroquímico chamado de decapagem é utilizado para dissolver alguns dos materiais da superfície e aumentar a superfície da folha, sob a forma de uma densa rede de microscópicos canais. O processo consiste na decapagem contínua, submetendo a folha de alumínio a uma solução de cloreto e aplicando uma corrente elétrica entre a solução e a folha de alumínio. Esta corrente elétrica pode ser alternada (c.a.), contínua (c.c.) ou uma corrente com componentes alternada e contínua. O aumento da área superficial é referido como o ganho da folha, e pode ser de até 100 vezes quando se deseja fabricar capacitores de baixa tensão, e de 20 a 25 vezes para aplicações de alta tensão [1].

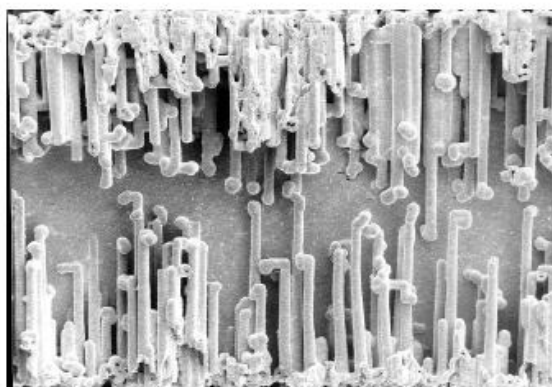


Figura 2.2 a) - Folha de anodo para capacitores de alta tensão (zoom 400x) [1]

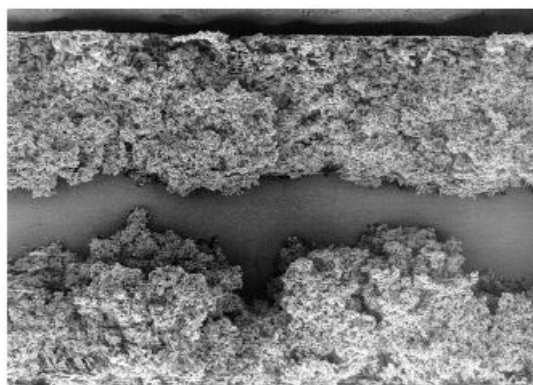


Figura 2.2 b) - Folha de anodo para capacitores de baixa tensão (zoom 400x) [1]

### 2.3.2 Formação

O dielétrico do capacitor eletrolítico de alumínio é composto por uma camada fina de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), que é formado na superfície da folha de alumínio durante um processo chamado de "formação". Este processo de formação do dielétrico óxido sobre a folha de alumínio (eletrodo), exige uma contínua aplicação de tensão c.c na base de 140% à 200% da tensão nominal do capacitor a ser fabricado. A espessura do dielétrico deste filme de óxido de alumínio é de aproximadamente  $15\text{Å}/\text{V}$  (Angstrom/Volt) [1]. A resistência de isolamento é de aproximadamente  $10^7$  V/cm. Uma vez que a capacitância é inversamente proporcional à espessura do dielétrico e a espessura do dielétrico é proporcional à tensão de formação, a relação entre capacitância e tensão de formação é dada por

$$C \times V = \text{constante} \quad (2.1)$$

$C$  = capacitância, e  $V$  = tensão de formação

Isto é verdade para capacitores cujas folhas de alumínio possuem estrutura dielétrica relativamente mais espessa. No entanto, para estruturas dielétricas extremamente finas, a transformação de alumínio em óxido de alumínio sofre um efeito significativo relacionado ao nivelamento da estrutura corroída, resultando em uma relação não-linear.

### **2.3.3 Corte**

A película formada é então cortada em diversas larguras, dependendo do tamanho específico do capacitor.

### **2.3.4 Bobinamento**

Cada capacitor contém duas películas, a positiva é chamada de anodo e a película negativa é chamada de catodo. As folhas de anodo e o catodo são enroladas em uma forma cilíndrica junto com um separador de papel, chamado de "separador". O papel separador impede que as folhas do anodo e do catodo entrem em contato umas com as outras, provocando um curto circuito. Como parte de um processo altamente automatizado de bobinamento, terminais de alumínio são soldados ao anodo e ao catodo. Esta montagem completa da película formada e atacada, papel separador e terminais é chamado de "elemento" capacitivo, como mostrado nas figuras 2.1, 2.3 e 2.4.

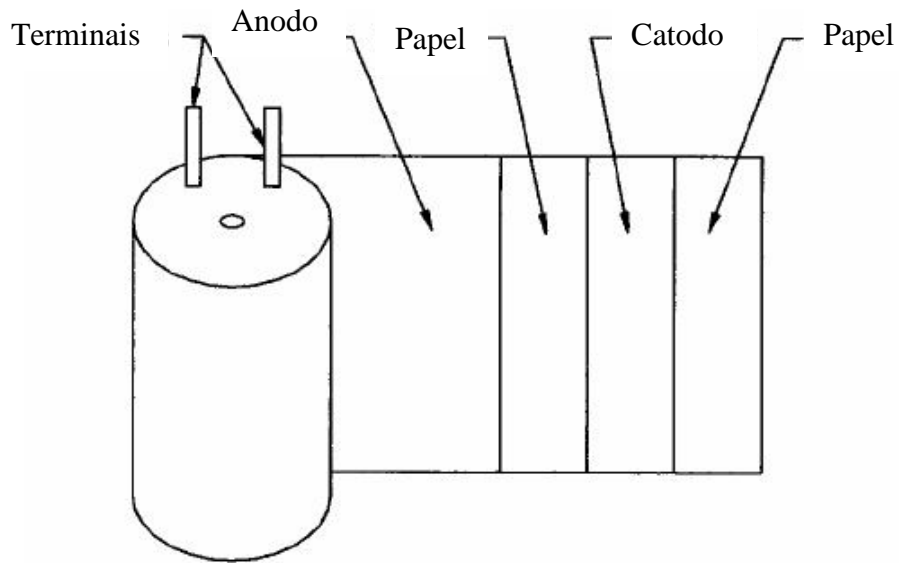


Figure 2.3 - Bobinamento dos elementos do capacitor.

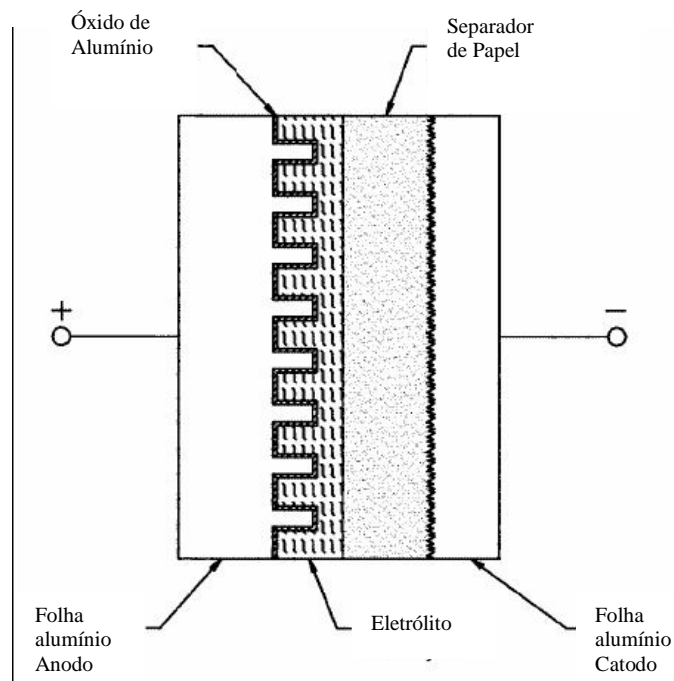


Figura 2.4 - Corte da seção transversal de uma bobina capacitiva.

### 2.3.5 Impregnação

O eletrólito é agora adicionado à montagem por um processo chamado de "impregnação". O método de impregnação requer que o elemento seja imerso no eletrólito. Para que ocorra uma boa absorção, dependendo do tipo do eletrólito, a câmara de aplicação trabalha em vácuo ou

pressão, podendo também prover ou não um aquecimento ao conjunto elemento/eletrólito como forma de compensar as variações de densidade do eletrólito. O eletrólito contém um solvente como o etilenoglicol e um soluto, como o borato de amônia. Caso o filme dielétrico seja danificado, a presença do eletrólito permitirá que o capacitor se cure, formando mais óxido. Ao se selecionar diferentes eletrólitos, características do capacitor tais como limite de temperatura de funcionamento, resposta em frequência, tempo de vida em operação ou armazenamento podem ser melhoradas [1].

### **2.3.6 Selagem e envelhecimento**

O elemento impregnado é na sequência inserido em um encapsulamento de alumínio. O material de selagem pode ser de borracha, borracha fenólica, moldados de resina fenólica, ou sulfeto de polifenileno (PPC). O último processo é o "envelhecimento", durante o qual uma tensão superior à tensão nominal do capacitor é aplicada a temperaturas elevadas. A finalidade é a reforma (ou reparação) do óxido de qualquer filme que possa ter sido danificado durante o corte, enrolamento e processos de montagem [1].

## **2.4 Guia de Aplicação**

### **2.4.1 Absorção dielétrica**

Absorção dielétrica pode ser caracterizada como o re-aparecimento de uma tensão entre os terminais do capacitor, após os mesmos terem sido curto-circuitados por um breve período e em seguida reabertos. Esta característica é importante, por exemplo, nos circuitos temporizadores RC, circuitos de chaveamento de semicondutores de potência e defasamento de fases de rede elétrica, onde esta tensão residual indesejada pode afetar o funcionamento dos circuitos citados. Para capacitores eletrolíticos de alumínio a absorção dielétrica permitirá recuperação de até 10% da tensão de carga entre 100s e 1000s a 25°C e é mais acentuada em altas temperaturas. A máxima absorção dielétrica pode ser obtida pelo carregamento dos capacitores durante 1 hora à tensão nominal e descarga através de um curto-circuito por 1 minuto. Posteriormente medições ao longo do tempo podem ser feitas usando pontas de medição de alta impedância [1].

Um retorno de tensões na ordem de 40 a 50V em capacitores eletrolíticos de alumínio, são possíveis. Tensões internas são causadas pelo processo químico no qual surge uma pequena tensão através dos terminais, devido à carga de polarização da camada dielétrica, mesmo na ausência de qualquer tensão externa aplicada. Embora tais tensões não sejam um risco de segurança, elas podem certamente assustar o usuário se os terminais forem curto-circuitados por uma ferramenta durante a instalação. Fitas Condutoras são utilizadas para evitar este problema.

#### **2.4.2 Isolamento e aterramento**

Com eletrólito não-sólido, a carcaça do capacitor eletrolítico é conectada ao terminal negativo através do eletrólito do capacitor. A resistência de isolamento resultante pode variar de poucos ohms a alguns milhares de ohms. Para capacitores de terminais axiais ou com encapsulamento planos, a carcaça também é conectada ao terminal negativo. Se objetos em contato com as carcaças tiverem que estar em um potencial diferente do terminal negativo, capacitores com mangas isolante são utilizados. A manga isolante pode suportar 3000Vcc ou 2500 Vca 60 Hz [1].

#### **2.4.3 Pressão externa**

Capacitores eletrolíticos de alumínio podem operar em altitudes de até 24 km e em baixas pressões como 3 kPa, e a máxima pressão do ar depende do tamanho e do estilo do capacitor. Exceder a máxima pressão pode danificar o capacitor por ruptura da carcaça, abrindo o orifício de alívio de pressão, ou causando um curto circuito [1].

#### **2.4.4 Vibrações mecânicas**

Capacitores eletrolíticos de alumínio geralmente podem suportar 10G de força de vibração. Para testar a resistência à vibração, um capacitor é acoplado a uma plataforma vibratória e submetido a um simples movimento harmônico com no máximo 0,06 polegadas de amplitude pico-a-pico e uma aceleração máxima de 10G ou 15G, conforme especificado. A frequência de vibração varia linearmente entre 10 e 55 Hz. Toda a gama de frequências é percorrida em 1 minuto. Salvo disposição em contrário, os capacitores serão vibrados durante uma hora e meia, devendo a direção do movimento ser paralela ao eixo do capacitor, em seguida o

capacitor é colocado na posição perpendicular ao eixo de vibração e a vibração continua por outra uma hora e meia. Durante a última meia hora do ensaio, a capacitor é ligado a um circuito de medição em ponte, e as observações são feitas em busca de qualquer dano mecânico, por um período de 3 minutos. Além disso, não deverá haver qualquer sinal de afrouxamento do elemento dentro do capacitor, quando o mesmo é agitado à mão após o teste. Não deverá haver qualquer indicação de contato intermitente, abertura ou curto durante os 3 minutos de observação [1].

#### **2.4.5 Válvula de alívio de pressão**

Durante o funcionamento de um capacitor eletrolítico de alumínio com eletrólito não-sólido, a pressão de gás normalmente aumenta. O gás é geralmente o hidrogênio e uma pressão excessiva é evitada por permeação do gás através do selo do capacitor. No entanto, em alguns casos como a aplicação de uma sobretensão, tensão reversa, tensão c.a. ou falha no capacitor, pode-se ter uma explosão do mesmo devido a uma pressão excessiva.

Para evitar o risco de explosão, capacitores eletrolíticos de alumínio são normalmente equipados com uma válvula de alívio de pressão que tem como função liberar a pressão do gás. Depois da ruptura, o capacitor tem uma vida limitada, porque ele perde eletrólito e resseca.

Cuidados devem ser tomados para evitar interferência na função da válvula de alívio como, por exemplo, elementos de montagem como grampos ou cola.

No caso de grandes capacitores onde os elementos do capacitor são suportados por envasamento de termoplásticos, os alívios não devem ser montados para baixo, já que devido a possíveis sobreaquecimentos, o termoplástico pode fluir em direção ao mesmo, vindo a bloqueá-lo.

Em casos raros, para capacitores montados sozinhos e mais freqüentemente para capacitores montados em bancos paralelos, um funcionamento pleno do alívio pode não ser atingido a tempo. Isso pode ser causado por sobrecarga extrema ou ignição de gás no interior do capacitor através de faíscas causadas por avaria.

As pessoas devem ser protegidas de possíveis rupturas de capacitores de alta energia, utilizando-se blindagem física adequada.

Exemplos de proteção adequada para os ensaios são 1/4 de polegada de espessura para aço ou meia polegada espessura para policarbonato. Outra proteção é criar câmaras com uma extremidade aberta para redirecionar a explosão, ao invés de contê-la.

#### **2.4.6 Contato com eletrólito**

O eletrólito de capacitores eletrolíticos não-sólidos é um líquido biodegradável baseado em um solvente estável com um elevado ponto de ebulição. O eletrólito inclui um sistema de base ácida e outros produtos químicos. O eletrólito é quimicamente neutro e não contém compostos de chumbo, ou compostos halogenados. Tem uma baixa toxicidade, mas o contato com a pele ou os olhos deve ser evitado, bem como a inalação prolongada. O contato com o eletrólito pode ser tratado pela lavagem da área exposta com água. Se o eletrólito atingir os olhos, deve-se lavar por 10 minutos com água corrente. A fumaça resultante da queima do eletrólito é irritante, mas não contém dioxinas ou substâncias tóxicas similares [1].

#### **2.4.7 Carga-descarga**

Frequentes carregamentos e descarregamento rápidos de capacitores eletrolíticos de alumínio que não foram concebidos para este serviço, podem danificar os mesmos por superaquecimento e sobre-pressão, ou podem avariá-los, abrindo-os ou colocando-os em curto-circuito [3].

#### **2.4.8 Polaridade – Inversão de tensão**

A polaridade de cada capacitor deve ser verificada, tanto na concepção quanto na montagem do circuito. Embora os capacitores possam suportar aplicação contínua de 1,5 V de tensão reversa, ultrapassar esse valor pode danificar o capacitor por superaquecimento, sobre-pressão ou ruptura do dielétrico. Isso também pode resultar em circuitos abertos ou curto-circuito [1].

## 2.4.9 Inflamabilidade

Capacitores eletrolíticos de Alumínio contêm materiais, que podem se inflamar e manter combustão quando em contato com chamas. Partes inflamáveis incluem peças plásticas, mangas de isolamento, papel e os eletrólitos. A maioria dos capacitores passam pelo teste da chama-piloto (requisitos de teste UL 94V-O), e não suportam combustão aos requisitos da categoria B ou C. Em casos raros, o capacitor pode auto-inflamar no caso de sobrecargas (elevada corrente de “ripple”) ou defeito interno. O Hidrogênio no capacitor também pode inflamar se a ignição ocorrer durante uma falha do capacitor [1].

## 2.5 Parâmetros do Capacitor e circuito equivalente

O circuito equivalente de um capacitor eletrolítico de alumínio está representado na figura 2.5. Devido à sua forma construtiva e projeto dos seus elementos físicos, um capacitor não possui somente capacitância, mas também um indutor e um resistor em série, além de um resistor em paralelo representando a corrente de fuga do capacitor [3].

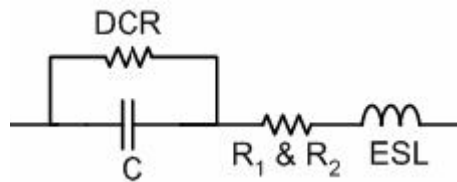


Figura 2.5 - Circuito equivalente do capacitor eletrolítico

### 2.5.1 Capacitância

A Capacitância de um capacitor eletrolítico de alumínio, assim como de outros tipos de capacitores, pode ser expressa por:

$$C = \frac{\mu_0 \mu_r A}{d} \quad (2.2)$$

Onde:

$\mu_0$  = Constante dielétrica no espaço livre ( $8.8542 \times 10^{-12}$  F/m)

$\mu_r$  = Constante dielétrica relativa do material

A = Área da superfície do dielétrico em  $m^2$

d = espessura do dielétrico em m

Uma elevada capacitância pode ser obtida quando:

- A constante dielétrica é alta
- A Área da superfície é elevada
- A espessura é fina

Em capacitores de alumínio, a constante dielétrica relativa é de cerca de 8 a 10, e a camada dielétrica de óxido de alumínio é fina (cerca de  $15\text{Å/V}$  (Angstrom/Volt)). No entanto, o aumento da superfície das placas dos capacitores devido a corrosão eletroquímica, permite um ganho, na ordem de 100 vezes para os capacitores de baixa tensão, e de 20 a 25 vezes para os capacitores de tensão mais elevada. Desta forma, um capacitor eletrolítico de alumínio pode fornecer uma grande capacitância específica, em comparação com outros tipos de capacitores

A tolerância permitida é definida como os valores mínimos e máximos (em percentagem) da capacidade em relação ao valor nominal,  $\Delta C/C$ . Tolerâncias típicas de capacitores são de  $\pm 10\%$ , e  $\pm 20\%$ , no entanto, a tolerância de capacitores com tensão nominal superior a 150V é inferior a estes valores. [3].

### **2.5.2 Resistência de perda dielétrica (DCR)**

O dielétrico de um capacitor tem uma resistência elevada, o que impede o fluxo de corrente contínua. No entanto defeitos em algumas áreas do dielétrico podem permitir a passagem de uma pequena quantidade de corrente, chamado corrente de fuga [1]. Esta fuga acontece devido às impurezas existentes nas placas e a não homogeneidade do dielétrico em torno destas impurezas.

A corrente de fuga é também determinada pelos seguintes fatores:

- Valor do capacitor
- Tensão aplicada “versus” tensão nominal
- Histórico anterior

A fuga de corrente é proporcional à capacitância e diminui à medida que a tensão aplicada é reduzida [3]. Se o capacitor foi exposto a temperaturas elevadas sem tensão aplicada por um

longo tempo, pode ocorrer a degradação do óxido dielétrico, o que irá resultar em uma maior corrente de fuga. Normalmente, este dano será reparado quando a tensão for novamente aplicada.

### **2.5.3 Fator de dissipação (DF)**

Em física, o fator de dissipação (DF) é uma medida da taxa de perda de potência de um modo de oscilação (mecânica, elétrica ou eletromecânica), num sistema dissipativo. É o inverso do fator de qualidade, que representa a qualidade de oscilação.

No caso de um capacitor, indica a relação entre a resistência série equivalente (*ESR*) e a reatância capacitiva  $DF = \frac{ESR}{X_c}$ , podendo também ser multiplicado por 100 para indicar

percentual. É um valor dependente da frequência e também é representado por  $\tan\delta$ .

### **2.5.4 Indutância série equivalente (ESL)**

A indutância de um capacitor é uma constante, e é devido principalmente às conexões internas das placas aos terminais do capacitor. A indutância varia entre 10 nH para pequenos capacitores radiais e 100 nH para grandes capacitores tipo caneca. Geralmente, a indutância não afeta a impedância global a menos que o capacitor opere em altas frequências, como mostrado na Figura 2.6, que traz o diagrama de Bode da impedância equivalente de um capacitor eletrolítico de 1 mF, 85 ° C, 100 volts .

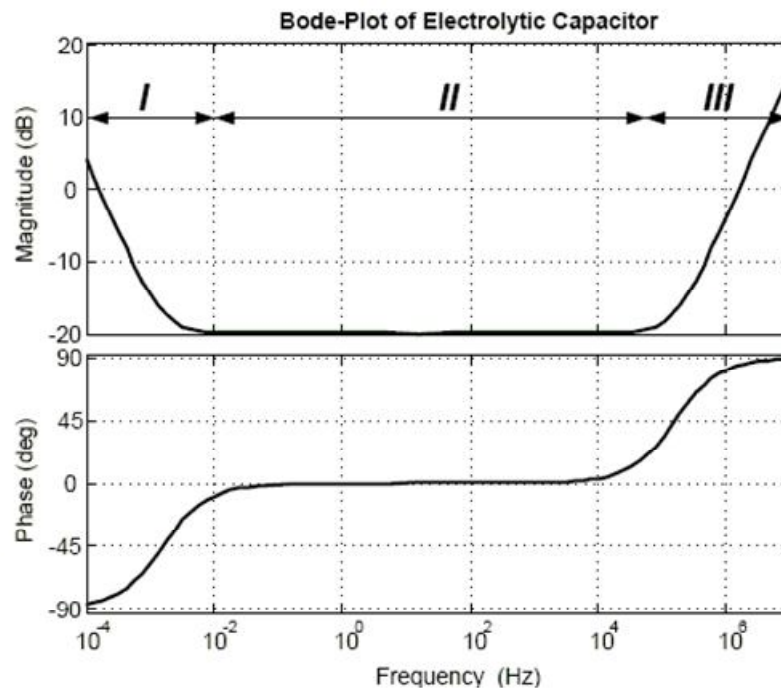


Figura 2.6 – Diagrama de bode da impedância equivalente do capacitor eletrolítico

### 2.5.5 Resistência Série Equivalente (ESR)

O resistor equivalente série (ESR) é o responsável pelas perdas internas do capacitor, devido à ondulação da corrente alternada circulando pelo mesmo. Este resistor equivalente é composto de três parcelas e que são mostradas na equação (2.3) [9].

$$ESR = R1 + R2 + R3 \quad (2.3)$$

onde R1 = resistência sensível à frequência como resultado da espessura do óxido de alumínio;

R2 = resistência sensível à temperatura como resultado do eletrólito e

R3 = resistência devido aos seguintes componentes:

- comprimento da placa;
- separadores;
- fios das conexões internas;
- resistência de contato ôhmico.

O efeito da parcela dependente da frequência, R1, é apresentado pelos fabricantes, vinculadas à frequência de “ripple”, geralmente 100 ou 1000 Hz [7]. Este efeito é causado pelas perdas

de energia no alinhamento dos dipolos dos dielétricos e o tempo que leva para os dipolos se re-orientarem. [3] Este efeito é mais significativo para capacitores de tensão nominal mais elevada, devido a maior espessura de sua camada de óxido. Para aplicações em que a corrente de “ripple” é composta por uma única frequência, a ESR pode ser simplesmente ajustada usando um multiplicador [3]. A quantidade de calor gerada pela circulação de uma corrente alternada pelo capacitor depende apenas da ESR do mesmo [1].

Para reduzir o ESR, é necessário o controle das características do eletrólito, do papel separador, do correto alinhamento durante bobinamento do elemento, da posição das abas, bem como o aumento da superfície da placa obtida pelo processo de decapagem. Todos estes fatores influenciam no valor do ESR do capacitor [1]. A combinação paralela de DCR e C modelam a camada de óxido dielétrico do capacitor, como mostrado na figura 2.5. A equação 2.4 descreve a impedância complexa do capacitor da figura 2.5.

$$Z_{cap} = \frac{1}{\frac{1}{DCR} + j2\pi fC} + R2 + R3 + j2\pi fESL \quad (2.4)$$

Onde  $Z_{cap}$  = Impedância complexa do capacitor e  $f$  = frequência (Hz)

O valor de ESR pode ser calculado como  $ESR = \text{parte real de } (Z_{cap})$

$$\text{Parte real de } Z_{cap} = \frac{DCR}{1 + (2\pi f)^2 C^2 DCR^2} + R2 + R3 \quad (2.5)$$

$$ESR = R1 + R2 + R3 = \frac{DCR}{1 + (2\pi f)^2 C^2 DCR^2} + R2 + R3 \quad (2.6)$$

Desta forma, a parte de ESR dependente da frequência pode ser escrito como:

$$R1 = \frac{DCR}{1 + (2\pi f)^2 C^2 DCR^2} \quad (2.7)$$

### **2.5.6 Faixa de Temperatura de operação**

A faixa de temperatura de operação é aquela na qual o componente irá operar, quando energizado, dentro dos limites indicados na especificação. Capacitores são projetados para operar em uma faixa de temperatura, na qual o limite superior é fixado pela tensão de formação. Tensões de formação maiores permitem operação do capacitor em temperaturas mais elevadas, mas não permitem a construção de capacitores com capacitância elevada. O limite inferior da temperatura de trabalho é fixado em grande parte pela resistividade a frio do eletrólito. Um valor mais elevado de resistividade a frio aumenta a ESR do capacitor de 10 a 100 vezes e reduz a capacitância disponível. Normalmente os capacitores podem operar em faixas de temperatura tais como:

- -20°C a 55°C;
- -25°C a 85°C;
- -40 °C a 85°C;
- -55°C a 85°C;
- -40°C a 105°C;
- -55°C a 105°C e
- -55°C a 125°C.

### **2.5.7 Faixa de Temperatura de armazenamento**

É a faixa de temperatura na qual os capacitores podem ser armazenados quando desenergizados, mantendo ao mesmo tempo a conformidade com seus limites elétricos especificados. No caso de longos períodos de armazenamento, os capacitores devem ser mantidos em salas de baixa temperatura ambiente e em atmosfera livre de gases alógenos como o cloro e flúor que podem corroer o alumínio. Faixas típicas de temperatura de armazenamento são de -55°C até o limite superior da temperatura de trabalho [3].

### **2.5.8 Tensão c.c. Nominal**

É a máxima tensão de pico c.c., incluindo a tensão de “ripple”, que pode ser aplicada continuamente entre os terminais e dentro da faixa de temperatura nominal.

Para capacitores eletrolíticos de alumínio, são considerados como baixa tensão aqueles de até 100 volts e acima deste valor alta tensão.

### **2.5.9 Sobretensão nominal**

É o máximo valor c.c. de sobretensão ao qual o capacitor pode ser submetido, a 25 °C, por curtos períodos não superiores a 30s, em intervalos não freqüentes, (não menos que 5 minutos). O processo de medição da máxima tensão de surto consiste em submeter o capacitor a uma tensão de 10 a 15% acima de sua tensão de pico nominal nas condições nominais de temperatura através de um resistor de  $1000\Omega \pm 10\%$ . O capacitor deverá ser energizado durante 30s, seguido por um período de 4,5 minutos durante o qual o capacitor é descarregado através de um resistor de carga ou de equalização. Este ciclo de carga e descarga é repetido durante um período de 120 h. Os requisitos de pós-teste são que os parâmetros DCR, ESR, e DF satisfaçam os valores iniciais, e não deve haver qualquer indício de danos mecânicos ou de vazamento de eletrólito [3].

### **2.5.10 Transiente de sobretensão**

Os capacitores eletrolíticos de alumínio geralmente podem suportar elevados transientes de sobretensão de energia limitada. A aplicação de uma tensão superior à sua capacidade nominal de sobretensão, provoca uma elevada corrente de fuga e um modo de operação de tensão constante semelhante à operação de um diodo Zener. O capacitor pode falhar entrando em curto-circuito se o eletrólito não suportar o estresse de tensão. Durante este processo ocorre a formação de hidrogênio, aumentando a pressão interna que pode levar o capacitor à ruptura. No entanto, existem projetos especiais desenvolvidos para utilizar este efeito “Zener”, para proteger equipamentos contra transientes de sobretensão tais como descargas atmosféricas [21].

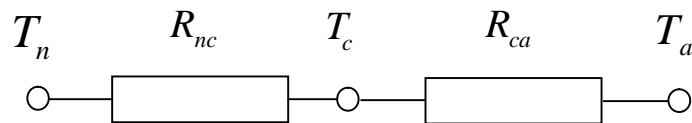
### **2.5.11 Corrente de “Ripple”**

É a corrente alternada que flui no capacitor. Esta corrente é a responsável pelo aquecimento do capacitor, e o máximo permitido para a mesma é definida nas especificações do fabricante. Uma elevação de temperatura no capacitor além da sua máxima permitida, irá causar falhas, reduzindo drasticamente a expectativa de vida do capacitor. A expectativa de vida dos

capacitores eletrolíticos de alumínio, que operam na temperatura máxima permitida, é tipicamente de 1000 a 10.000 horas.

Comumente, capacitores cuja temperatura máxima nominal é de 85°C permitem um aumento de temperatura de 10°C, e têm uma máxima temperatura permitida de 95°C. No entanto, os tipos mais comuns de 105°C permitem um aumento de temperatura de apenas 5°C, e tem uma temperatura máxima de 110°C. Além disso, a máxima temperatura permitida pode variar por tipo e fabricante. Correntes de “ripple” nominais normalmente presumem que o capacitor é arrefecido por convecção e que todo o invólucro está em contacto com o ar.

Para facilitar o entendimento, a figura 2.7 ilustra o fluxo térmico onde é considerada a temperatura do núcleo ( $T_n$ ), resistência térmica entre núcleo e carcaça ( $R_{nc}$ ), temperatura da carcaça ( $T_c$ ), resistência térmica entre carcaça e ambiente ( $R_{ca}$ ) e finalmente a temperatura ambiente ( $T_a$ ).



2.7 – Fluxo térmico do núcleo do capacitor à temperatura ambiente

Um coeficiente de convecção de  $0,006 \text{ W/}^\circ\text{C/in}^2$ , representado pela resistência térmica  $R_{ca}$  na figura 2.7, é utilizado para calcular o aumento de temperatura do ar para a carcaça. No projeto de capacitores de diâmetro menor que 25mm, é seguro considerar que a temperatura do núcleo do capacitor é a mesma da carcaça. A potência dissipada é o valor da corrente eficaz de “ripple” ao quadrado vezes a ESR. Geralmente, o valor ESR a 25 °C, 120 Hz é utilizado para calcular a potência dissipada. Em capacitores de grande tamanho, assumir que o núcleo do capacitor e sua carcaça estão na mesma temperatura poderá conferir aos mesmos, de forma equivocada, uma capacidade de corrente de “ripple” acima do real suportado. Em algumas situações, há uma diferença de temperatura de 3 a 5°C entre a carcaça do capacitor e o seu interior [19].

## **2.6 Configuração de banco de Capacitores**

### **2.6.1 Conexão de capacitores em paralelo**

Capacitores podem ser ligados em paralelo para aumentar a capacitância e capacidade de corrente de “ripple”. Com o objetivo de minimizar as indutâncias parasitas os capacitores do banco são conectados através de um barramento laminar. Geralmente, um plano do circuito atua como pólo positivo e outro como pólo negativo, conectando todos os capacitores ao barramento. Enquanto, para baixas frequências, a corrente de “ripple” se divide entre os capacitores proporcionalmente aos valores de capacitância, em altas frequências a corrente se divide proporcionalmente aos valores de ESR. Um circuito de partida suave deve ser inserido no sistema para evitar elevados surtos de corrente que podem danificar os capacitores. Para esta função é comumente usado o resistor de pré-carga, que é curto-circuitado após a partida. Outra proteção é um fusível ligado a cada capacitor. Sua corrente nominal é definida como duas vezes o valor da máxima corrente de “ripple” esperada para o capacitor [1].

### **2.6.2 Conexão de capacitores em série**

Capacitores podem ser conectados em série para aumentar a capacidade de suportar a tensão. Durante o carregamento, a tensão sobre cada um dos capacitores é inversamente proporcional à capacitância individual. Quando a tensão no conjunto alcançar o valor final, a tensão sobre cada capacitor é proporcional ao inverso da corrente de fuga de cada capacitor, isto é, quem determina a tensão final sobre cada capacitor é o divisor resistivo formado pelos resistores responsáveis pelas perdas no dielétrico DCR. Uma solução para equalizar a tensão sobre cada capacitor é adicionar um resistor externo em paralelo com cada capacitor. Este resistor além de equalizar a tensão sobre os capacitores tem também como função promover a descarga dos capacitores quando do desligamento do equipamento. Geralmente o valor deste resistor é em torno de 1/10 do valor do resistor DCR do capacitor. Assim, o resistor equivalente ao paralelismo do resistor DCR com o resistor externo é aproximadamente igual ao resistor externo de modo que a divisão da tensão sobre cada capacitor depende agora do divisor resistivo formado pelos resistores externos.

### 2.6.3 Conexão de capacitores série-paralelo

Os capacitores são conectados, como mostrado na Figura 2.8, com uma ligação comum entre as múltiplas combinações séries, com as seguintes vantagens e desvantagens:

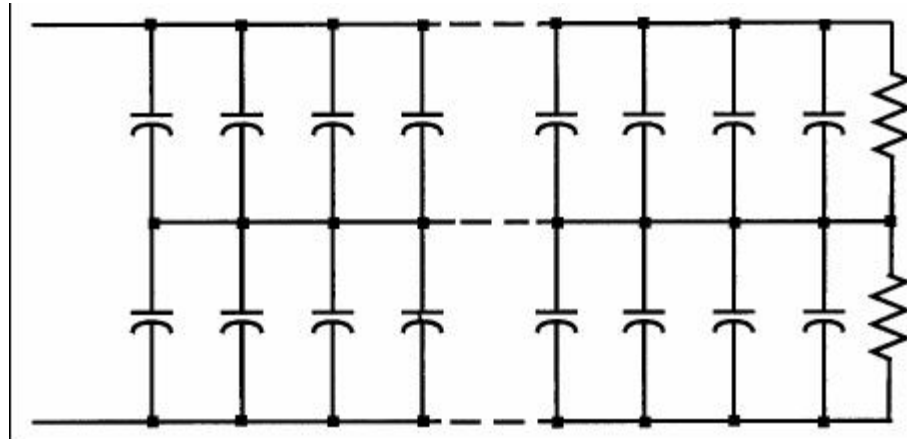


Figure 2.8 - Capacitores conectados em série-paralelo

**Vantagens:** Neste arranjo, são usados apenas dois resistores externos para equilibrar a tensão sobre cada conjunto.

**Desvantagem:** Se um dos capacitores entrar em curto-circuito, a outra metade do banco recebe toda a tensão do barramento, levando os demais capacitores a também entrarem em falha. Em resumo, se a falha for um curto em um dos capacitores, o banco inteiro entrará em falha por sobretensão.

### 2.6.4 Conexão de capacitores paralelo-série

Os capacitores são conectados, como mostrado na Figura 2.8, com múltiplas combinações série ligados em paralelo apresentando as seguintes vantagens e desvantagens.

**Vantagens:** Se um capacitor entrar em curto então o capacitor em série com ele também irá falhar, mas os demais do banco não serão afetados.

**Desvantagens:** Com o aumento do número de resistores externos de equilíbrio, a construção é mais complexa; muitos resistores precisarão ser instalados e o custo aumenta.

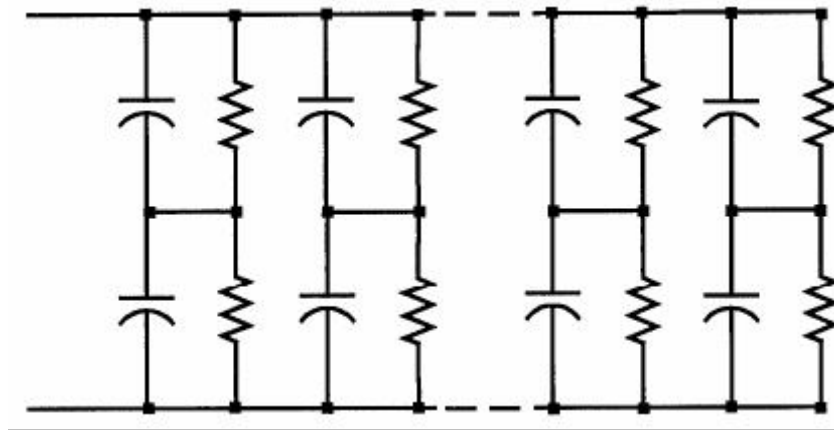


Figura 2.9 - Conexão dos capacitores em paralelo-série

### 2.6.5 Conexão não-polarizada

O capacitor eletrolítico só funciona corretamente quando ligamos o pólo positivo à placa de alumínio anodizada (anodo) e o pólo negativo à outra placa (catodo). Se invertermos estas conexões inicia-se um processo eletrolítico que depositará uma camada de óxido sobre a placa de catodo. Durante este processo ocorre geração interna de calor e gás que pode destruir o capacitor. Por outro lado, a capacitância total diminui sensivelmente devido ao aumento de espessura da camada de óxido. Este processo de oxidação do catodo se inicia para tensões negativas superiores a 2V ( a placa de catodo é coberta com uma oxidação natural, que corresponde a uma camada anódica de cerca de 2V).

Existem capacitores eletrolíticos não polarizados ou bipolares. Nestes, em lugar da placa de catodo normalmente usada, utiliza-se uma segunda placa de anodo, formada nas mesmas condições da placa de catodo. Neste caso, o capacitor pode ser alimentado por uma tensão alternada, mas para evitar problemas de aquecimento esta tensão deve ser mantida consideravelmente abaixo do valor da tensão nominal contínua.

O capacitor eletrolítico bipolar necessita de até o dobro do volume de um capacitor eletrolítico polarizado de mesma capacitância e tensão, pois o valor da capacitância é igual a metade das capacitâncias parciais (catodo e anodo). A corrente de fuga de um capacitor eletrolítico bipolar é de aproximadamente o dobro da corrente de fuga de um capacitor eletrolítico polarizado.

Capacitores eletrolíticos de alumínio não polarizados estão disponíveis para aplicações em ciclos momentâneos como partida de motores e inversão de tensão, mas é importante ressaltar que o elevado fator de dissipação (DF) dos capacitores eletrolíticos de alumínio, de 2% a 150%, provoca aquecimento excessivo e uma vida útil reduzida na maioria das aplicações em corrente alternada.

## **2.7 Estratégias de refrigeração**

O calor gerado no interior dos capacitores é dissipado através da caneca metálica, sendo que o fundo da caneca apresenta uma melhor capacidade de dissipação que as laterais da caneca. Como consequência, alguns modelos de capacitor podem ser fixados diretamente a um chassi metálico. Esta montagem tanto pode ser feita fixando os capacitores com terminais especiais diretamente na chapa de montagem quanto os pressionando contra a chapa de montagem e usando um barramento para interligar os terminais elétricos. Este método de montagem duplica a capacidade da corrente de “ripple” para uma mesma elevação de temperatura.

A resistência térmica entre o invólucro metálico e a placa de montagem para capacitores apenas apoiados na chapa, é de aproximadamente 2,5 °C /W. Este valor reduz para menos de 1 °C/W se os capacitores forem pressionados no chassi de montagem. Em capacitores de maior dimensão, especialmente aqueles com envasamento, há um significativo aumento de temperatura a partir da carcaça para o núcleo, e o centro do capacitor é o ponto mais quente.

## **2.8 Prazo de validade**

Capacitores eletrolíticos de alumínio, armazenados por mais de 5 anos podem ter aumento dos níveis de corrente de fuga c.c.. Esta corrente de fuga deve ser medida antes de colocá-lo em uso para verificar se ela atende aos requisitos da aplicação. Sendo necessário, pode-se aplicar o processo de reforma que consiste na recomposição da camada de óxido, o que é possível aplicando a tensão nominal sobre o mesmo de maneira controlada, evitando sobreaquecimento e excessiva formação de gases. O tempo de recuperação irá depender do tempo de armazenamento, alguns fabricantes, seguem curvas típicas de acordo com a aplicação. A figura 2.10 exemplifica um caso do fabricante ABB.

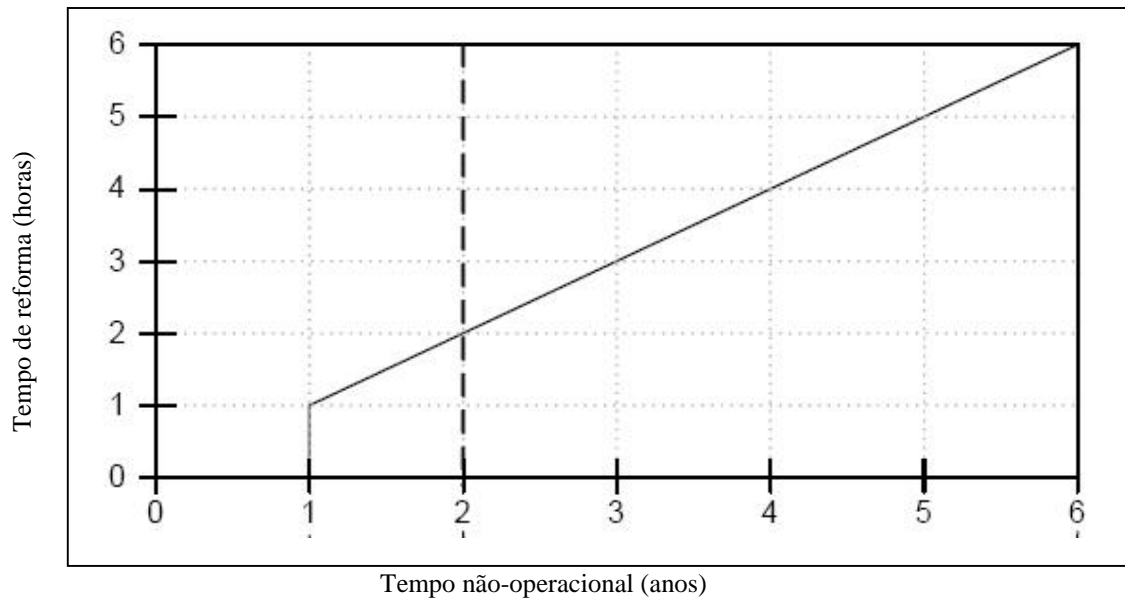


Figura 2.10 – Tempo de reforma em função tempo de armazenamento para capacitores eletrolíticos inversor ABB

## 2.9 Considerações de aplicação

### 2.9.1 Soldagem

Condições estritas de soldagem, como temperatura, duração e distância mínima do equipamento de soldagem do corpo do capacitor devem ser consideradas para a proteção do mesmo. O contato com a manga de isolamento ou de outras peças de plástico com o ferro de solda deve ser evitado. Além disso, qualquer força mecânica como flexão, estiramento, torção, ou inclinação de capacitores depois de soldá-los em uma placa de circuito impresso, deve ser evitada.

### 2.9.2 Montagem

Quanto menor a temperatura de operação dos capacitores eletrolíticos de alumínio maior sua expectativa de vida. Assim, os capacitores devem ser instalados no ponto mais refrigerado da placa de circuito impresso. Devem ser mantidos afastados de componentes que dissipam mais calor como resistências, transistores de potência, diodos e transformadores.

Além disso, como são normalmente polarizados deve-se tomar cuidado para não efetuar montagem com polaridade invertida. Os capacitores devem ser montados de tal forma que a

válvula de alívio fique no topo, ou pelo menos na parte mais elevada do capacitor, isso assegura que o eletrólito será expelido se a válvula operar.

### **2.10 Descarte de capacitores eletrolíticos**

Capacitores eletrolíticos de alumínio com eletrólito não-sólido contêm principalmente folhas de alumínio de alta pureza, papel separador, eletrólito, carcaça de alumínio, capa e partes de selagem (fenólicos, termoplásticos, borracha), manga isolante (polipropileno, poliéster ou polivinil clorídrico) e, muitas vezes, válvulas de segurança feitas de borracha sintética [1]. Em caso de descarte, deve ser incinerado a temperaturas acima 1200 °C, e os resíduos podem ser dispostos em aterros adequados.

## 2.11 Modos de falha

Os modos de falha dos capacitores eletrolíticos podem ser classificados como mostrado na Figura 2.10

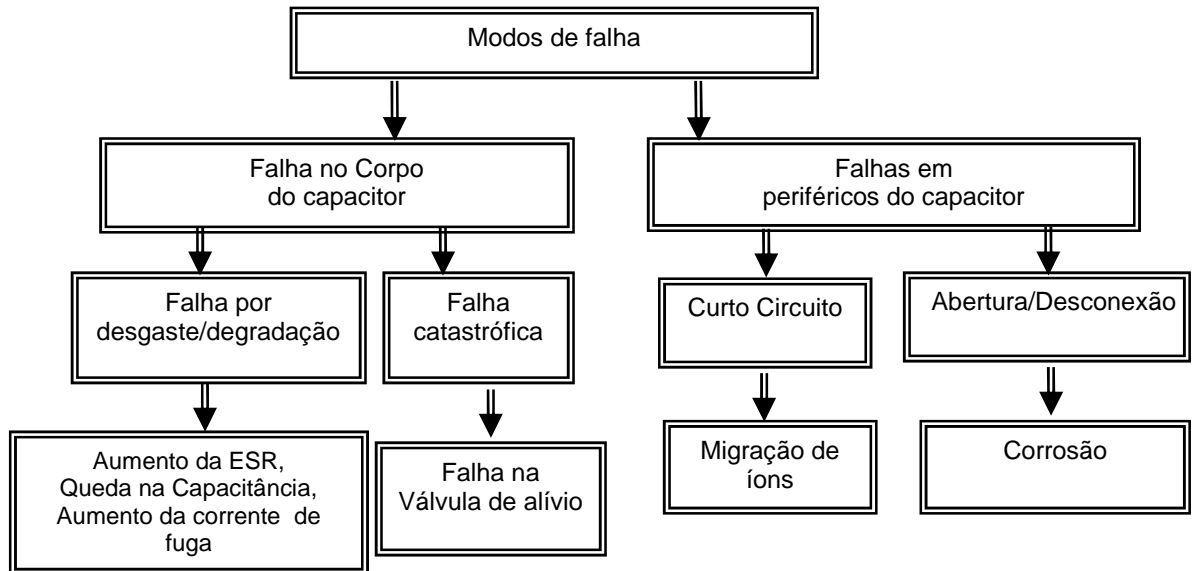


Figura 2.10 – Modos de falha do capacitor eletrolítico [1]

Numa falha catastrófica, a função do capacitor é completamente perdida, sendo assim facilmente detectável. Na falha por degradação, as características tais como, ESR, capacitância, rigidez dielétrica e corrente de fuga, deterioraram-se gradativamente rumo ao estágio onde é considerado como falha. Entretanto o ponto considerado como falha irá depender do desempenho exigido pelo sistema eletrônico no qual o capacitor é utilizado.

### 2.11.1 Falha na válvula de pressão (Excesso na geração de gás)

Capacitores eletrolíticos de alumínio possuem características, que rapidamente reparam defeitos no filme de óxido conforme mecanismo apresentado na Figura 2.11 e a equação (2.8). A oxidação no anodo provocará redução no catodo, resultando na geração de gás hidrogênio ( $H_2$ ). No entanto, quando utilizado dentro das condições nominais indicada no catálogo do fabricante, a quantidade de gás hidrogênio gerado é extremamente pequena, o que permite que ele seja dissipado pela ação da despolarização do eletrólito ou através do elemento de selagem, não gerando maiores problemas. Porém, se usado em condições extremas, isto é, se os limites de temperatura de trabalho, tensão de operação e corrente de “ripple” excederem os

especificados pelo fabricante, os danos ao filme dielétrico aumentarão, provocando um aumento da geração de hidrogênio devido ao efeito de auto-reparação. Isto fará com que a pressão interna aumente rapidamente, levando à abertura da válvula de alívio ou rompimento do invólucro do capacitor.

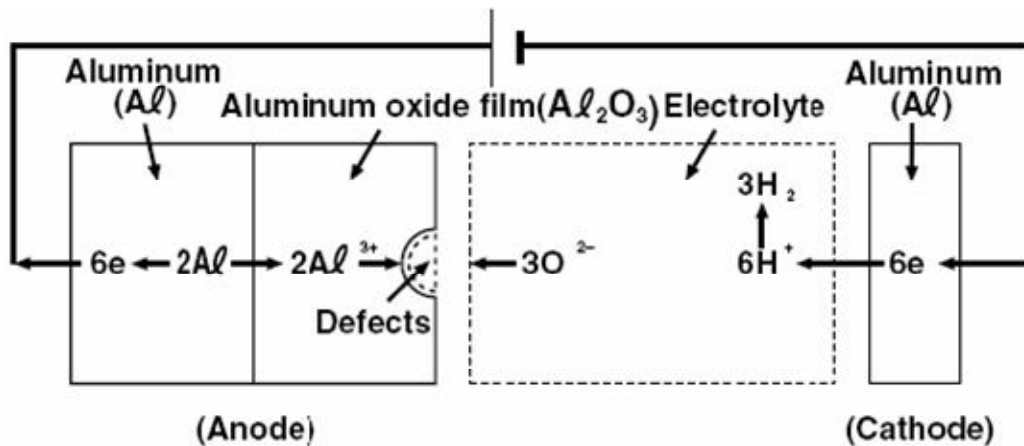


Figura 2.11 – Mecanismo da geração de gás



### 2.11.2 Falha causando abertura do capacitor

A falha com abertura pode ocorrer devido a qualquer das seguintes razões:

- Dano mecânico nos terminais de conexão,
- Corrosão devido à infiltração de um material corrosivo,
- Evaporação do eletrólito por causa da abertura do orifício e
- Fase final de deterioração progressiva.

A primeira ocorre por causa de uma ligação inadequada no momento da produção ou quando os terminais são submetidos à tensão mecânica excessiva, vibração ou impacto.

A segunda ocorre quando íons halogenados ( $Cl^-$ ) penetram na fase de produção, ou quando o capacitor é limpo com produtos halogenados que contaminam o capacitor. Isto leva à corrosão das folhas de eletrodo ou dos terminais, até levar à condição de abertura.

A terceira razão está associada à evaporação do eletrólito causando a secagem do capacitor e finalmente a quarta razão ocorre ao final da vida útil do capacitor, quando o eletrólito gradualmente vai penetrando pela selagem, causando a queda da capacitância e aumento da corrente de fuga.

### **2.11.3 Curto Circuito**

Um bom eletrólito rapidamente repara qualquer defeito no filme de óxido dos eletrodos [1]. No entanto, um dano significativo na camada do filme de óxido provoca concentrações de corrente, levando à falha catastrófica, tal como curto-circuito nos eletrodos do capacitor. Além disso, defeitos como metal ou outras partículas condutoras sobre as folhas dos eletrodos durante o processo de produção ou estresse mecânico dos terminais do capacitor podem resultar também em um curto-circuito dos eletrodos.

### **2.11.4 Falha por degradação**

Os parâmetros do capacitor se alteram (decréscimo da capacitância e aumento da ESR) devido à emissão de eletrólito pela selagem existente na superfície. Estas características serão estudadas no Capítulo 3 e 4,

### **2.11.5 Falhas nos periféricos do capacitor**

O vazamento de eletrólito dos capacitores eletrolíticos de alumínio pode influenciar componentes à sua volta, de duas formas:

- Desconexão: O eletrólito corrói as trilhas da placa de circuito impresso abrindo a ligação entre os componentes;
- Curto-circuito: íons emitidos pelo eletrólito, sob a influência de campo elétrico, migram entre duas trilhas levando ao curto-circuito.

Um diagrama detalhado dos diferentes modos de falha de um capacitor de alumínio é apresentado na figura 2.12.

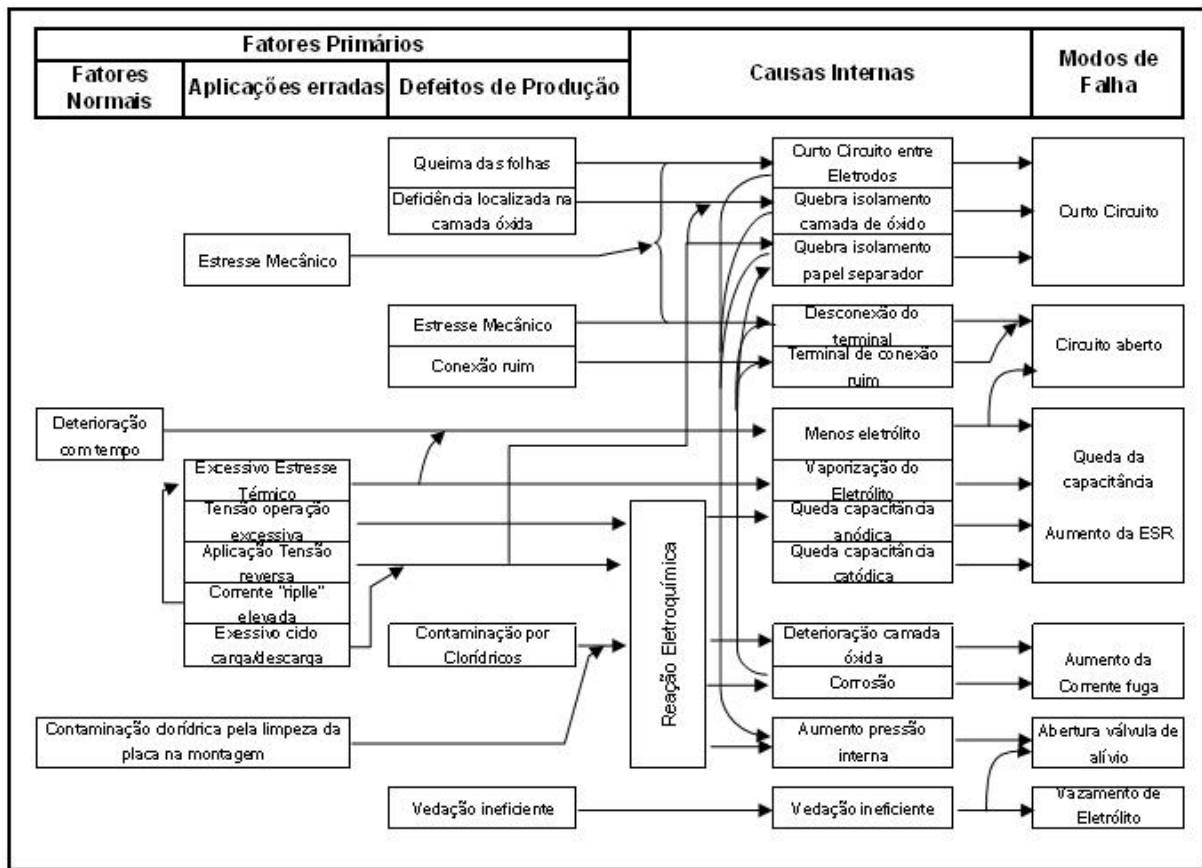


Figura 2.12 – Modos de falha do capacitor eletrolítico [19]

Nesta parte do capítulo foram revisadas as diversas características construtivas, especificações e funcionamento dos capacitores eletrolíticos, bem como os seus modos de falha. Estas informações servirão para entendimento e desdobramento das análises e estudos a serem expostas nos próximos capítulos.

## CAPÍTULO 3 – ANÁLISE DE TRABALHOS ANTERIORES

Os capacitores eletrolíticos são os responsáveis por quase 60% das falhas de equipamentos de Eletrônica de Potência como mostrado na figura 3.1 e relatado em [5]. Este fato tem motivado pesquisas que permitam prever a vida útil destes componentes. Neste capítulo será apresentado o estado da arte das pesquisas relacionadas ao monitoramento e predição da vida útil destes componentes.

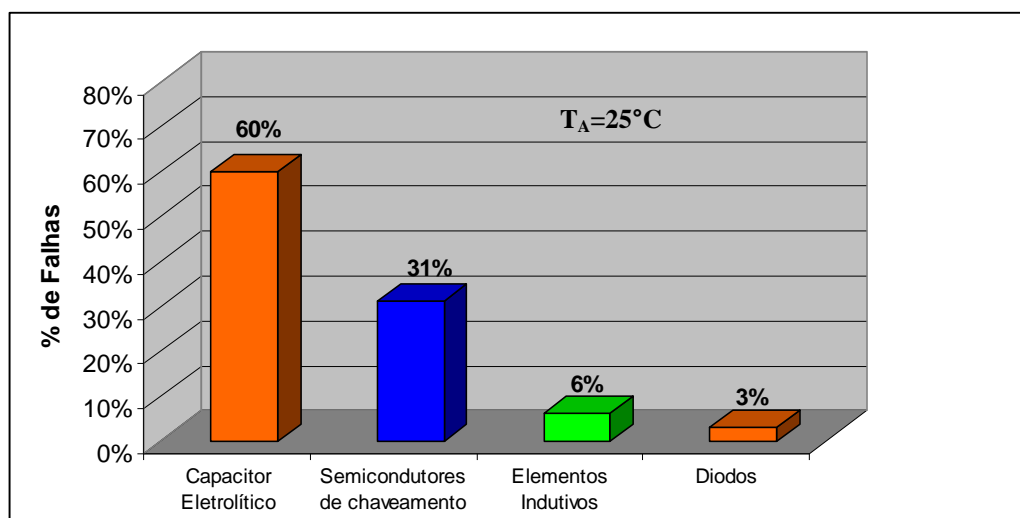


Figura 3.1 – Distribuição de falhas em sistemas de eletrônica de potência [5]

### 3.1 Diagnóstico através da medição do valor da capacitância

Dong-Choon Lee et Al. [4] cita que a medição da capacitância é o método mais simples de se monitorar e efetuar o diagnóstico do estado do capacitor. Neste artigo considera-se que um capacitor, no final de sua vida útil, perde cerca de 25% de sua capacitância inicial [5]. Neste trabalho é proposta uma estimativa “on-line” da capacitância através da injeção de uma corrente, utilizando o retificador do conversor de frequência que é um conversor PWM. O ensaio consiste em injetar uma corrente de frequência menor que a da rede, corrente esta que flui pelos capacitores do barramento c.c., com a etapa inversora desligada. Esta corrente origina uma ondulação (“ripple”) sobre a tensão do barramento c.c. que é medida utilizando-se filtros passa banda.

Para o cálculo do valor da capacitância  $C$ , conforme a expressão (3.1) se faz necessário conhecer também a ondulação da corrente no capacitor, que normalmente não é medida ou

não é disponibilizada pelos fabricantes de inversores. No trabalho de Lee, esta corrente foi estimada a partir da leitura da corrente de entrada c.a. e dos tempos de condução dos dispositivos de chaveamento.

$$C = \frac{\tilde{I}_{rms}}{\omega_{in} \tilde{V}_{rms}} \quad (3.1)$$

Onde  $\omega_{in}$  é a frequência angular da componente de “ripple” da corrente,  $\tilde{I}_{rms}$  é a corrente eficaz da componente alternada (“ripple”) da corrente e  $\tilde{V}_{rms}$  é o valor eficaz da componente alternada da tensão sobre o capacitor.

As experiências de Lee foram realizadas injetando-se uma corrente com frequência de 30Hz.

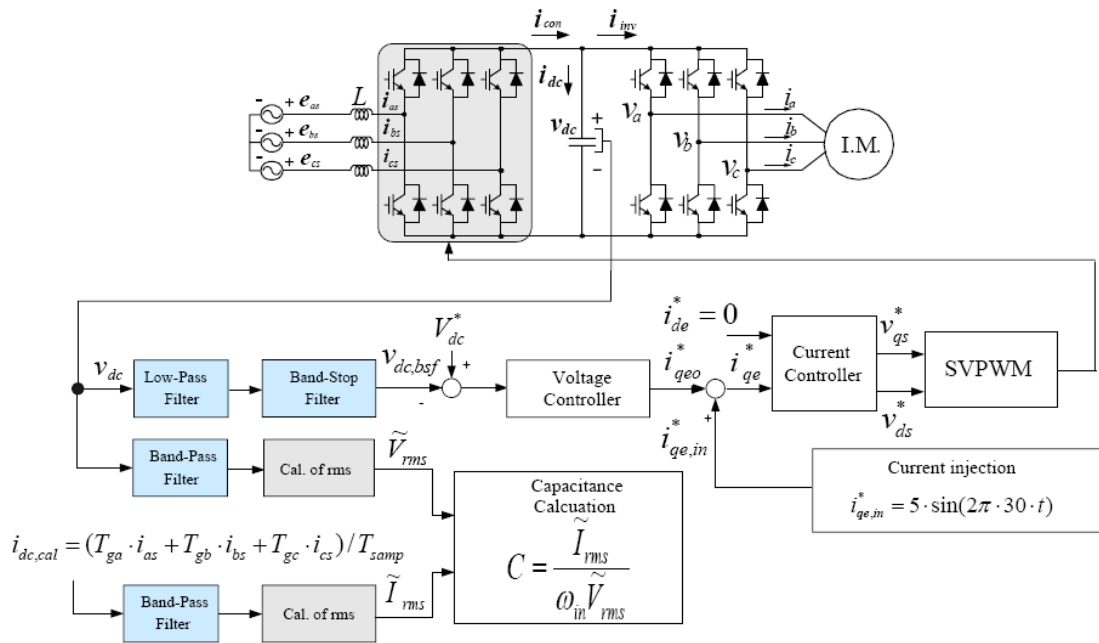


Figura 3.2 Diagrama em blocos para estimação da capacitância c.c. em conversores [4]

A reconstrução da corrente no barramento c.c. em função das correntes de cada fase e das ordens de condução de cada semicondutor é dada pela expressão (3.2),

$$i_{dc} = S_a i_{as} + S_b i_{bs} + S_c i_{cs} \quad (3.2)$$

A forma de onda da corrente no capacitor possui uma componente de baixa frequência (injetada pelo retificador de entrada) e componentes de alta frequência devido ao chaveamento dos semicondutores. Estas componentes de alta frequência tornam difícil a medição do valor eficaz da componente de baixa frequência da corrente. Segundo o autor, uma solução para a medição da componente de baixa frequência consiste na eliminação das componentes de alta frequência aplicando um filtro passa-baixa e em seguida um filtro passa banda para extrair o valor eficaz da corrente injetada. Este processo se apresenta mais complexo.

No entanto, usando o tempo de condução e a corrente de cada fase, o valor médio da corrente do elo c.c., em cada período de amostragem, pode ser calculado como mostrado na equação (3.3).

$$\bar{i}_{dc} = (T_{ga}i_{as} + T_{gb}i_{bs} + T_{gc}i_{cs}) / T_{samp} \quad (3.3)$$

Onde  $T_{ga}$ ,  $T_{gb}$ , e  $T_{gc}$  são os tempos de condução para cada fase e  $T_{samp}$  é o período de amostragem. A figura 3.3 apresenta a relação entre as correntes de cada fase e a corrente do barramento c.c. em função do comando de cada chave. Se a compensação do tempo morto dos dispositivos de chaveamento for adequada, seu efeito em (3.3) pode ser desconsiderado [4].

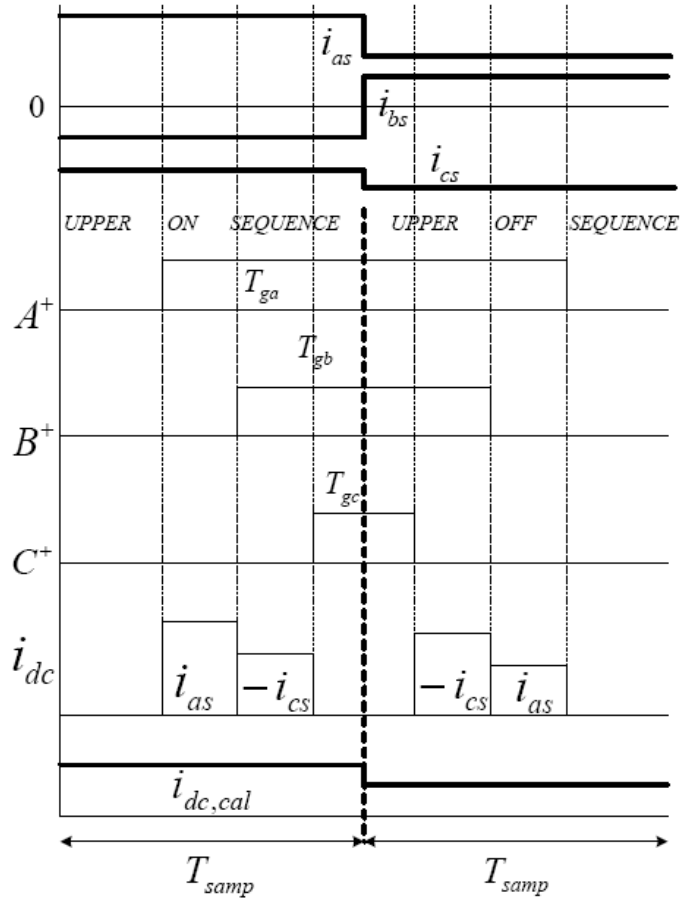


Figura 3.3 – Corrente média e instantânea no capacitor em função da corrente de cada fase e dos pulsos de comando dos semicondutores [4]

Para extrair as componentes de baixa frequência da corrente estimada no barramento c.c. e da tensão sobre o capacitor, os autores usaram um filtro passa banda de segunda ordem, sendo sua função de transferência dada pela equação (3.4).

$$H_{BPF}(s) = \frac{K_{BPF} (\omega_{BPF} / Q_{BPF}) s}{s^2 + (\omega_{BPF} / Q_{BPF}) s + \omega_{BPF}^2} \quad (3.4)$$

Onde  $K_{BPF}$  é o ganho,  $Q_{BPF}$  é o fator de qualidade,  $f_{BPF}$  é a frequência de corte e  $\omega_{BPF} = 2\pi f_{BPF}$ .

A resposta deste filtro não é tão sensível ao fator de qualidade uma vez que não existem outras frequências importantes próximas à frequência de 30Hz, ou seja, a seletividade é fácil de ser implementada, mesmo para uma variação do fator de qualidade.

A Figura 3.6 mostra a resposta em frequência do filtro passa banda para o caso em que  $K_{BPF}=1$ ,  $Q_{BPF}=4$  e  $f_{BPF}=30\text{Hz}$ .

Um filtro rejeita banda de segunda ordem, cuja função de transferência é dada pela equação (3.5), é acrescentado de modo a garantir que a ondulação da tensão do barramento c.c. não afete o comportamento da malha de controle da tensão sobre o capacitor. A entrada desta malha de controle deve ser apenas o valor médio da tensão sobre o capacitor. Os gráficos das figuras 3.4 e 3.5 mostram as tensões do barramento c.c. em função dos dois filtros citados e seus respectivos espectros de frequência.

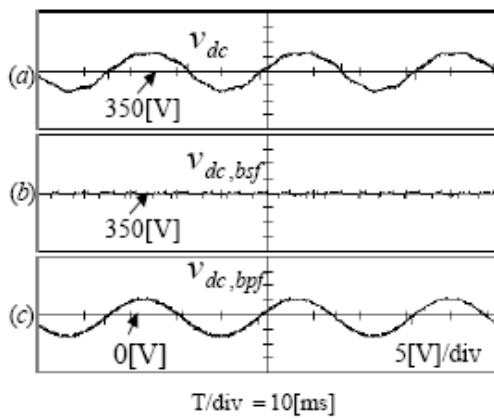


Figura 3.4 - Tensões do barramento c.c (a) medida, (b) após filtro rejeita banda e (c) após filtro passa banda [4]

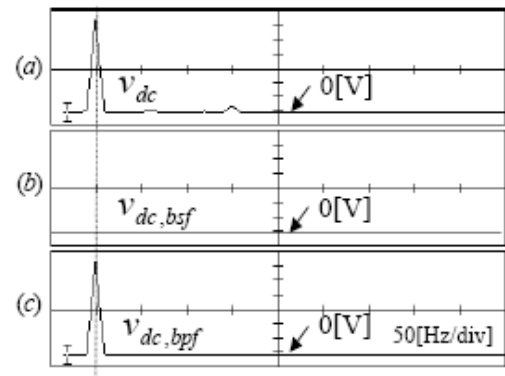


Figura 3.5- Espectro harmônico das tensões c.c. (a) medida, (b) após filtro rejeita banda e (c) após filtro passa banda [4].

$$H_{BSF}(s) = \frac{K_{BSF}(s^2 + \omega_{BSF}^2)}{s^2 + (\omega_{BSF}/Q_{BSF})s + \omega_{BSF}^2} \quad (3.5)$$

Onde  $K_{BSF}$  é o ganho,  $Q_{BSF}$  é o fator de qualidade,  $f_{BSF}$  é a frequência de corte e  $\omega_{BSF} = 2\pi f_{BSF}$ . A Figura 3.7 mostra a resposta em frequência do filtro rejeita banda para o caso de  $K_{BSF}=1$ ,  $Q_{BSF}=2$  e  $f_{BSF}=30\text{Hz}$ .

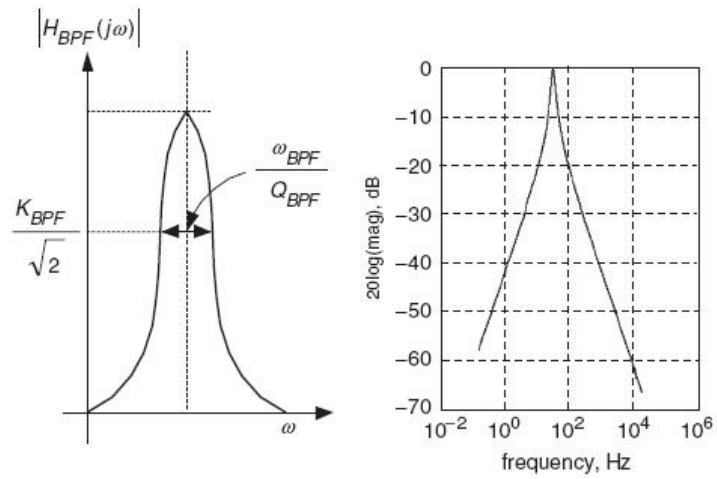


Figura 3.6 – Curva de ganho filtro passa banda [4]

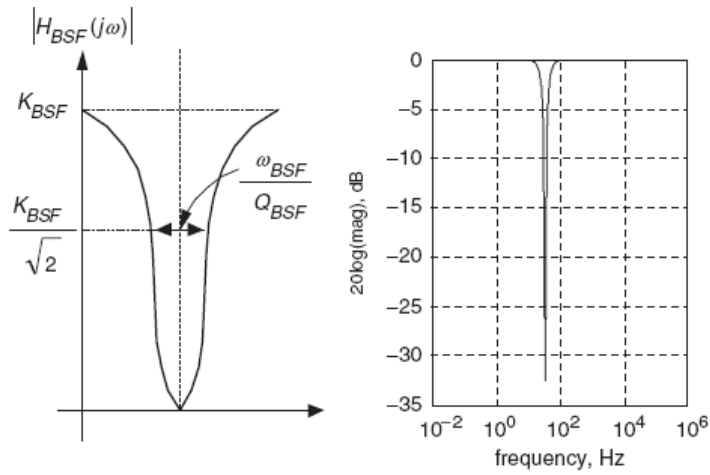


Figura 3.7 – Curva de ganho filtro rejeita banda [4]

### Cálculo do valor eficaz

O valor eficaz da ondulação da tensão e da corrente filtrados é calculado através da equação (3.6)

$$\tilde{V}_{dc} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{v}_{dc}^2(k)} \quad (3.6)$$

e

$$\tilde{I}_{dc} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{i}_{dc}^2(k)} \quad (3.7)$$

Onde  $N$  é o número de pontos amostrados em um ciclo da componente de baixa frequência do sinal a ser medido. A capacitância poderá assim ser calculada substituindo (3.6) e (3.7) em (3.1)

Os resultados experimentais de Dong-Choon Lee et Al [4], apresentam boa precisão para o propósito do monitoramento condicional, com erro na estimação do valor da capacitância de 1,5% em relação ao valor medido.

Apesar dos bons resultados apresentados nos experimentos de [4], usualmente os retificadores dos conversores de frequência empregam diodos como semicondutores não permitindo assim o controle da tensão c.c., o que restringe a aplicação do método anteriormente descrito.

Outro fator a ser considerado é que, embora [4] não aceite o ESR como um bom parâmetro para diagnosticar a condição do capacitor eletrolítico, foi evidenciado em [12] que ao final da vida útil do capacitor enquanto que o valor da capacitância decresce de 25%, o valor de ESR aumenta em mais de 6 vezes. Sendo assim, embora a ESR possa sofrer variações com a temperatura, este parâmetro pode ser considerado como o melhor indicador da vida útil do capacitor.

### **3.2 Diagnóstico usando a ESR – Deterioração e perda de eletrólito**

As propostas mais comuns de monitoramento são baseadas na medição da *ESR*. Alterações nas propriedades físicas e químicas do capacitor eletrolítico irão afetar o valor de *ESR* [1]. A condutividade do eletrólito do capacitor aumenta devido ao aumento da temperatura, desta forma, o valor da ESR irá inicialmente diminuir com a temperatura. Ao mesmo tempo, uma temperatura mais elevada irá acelerar a vaporização do eletrólito e desta forma, temperaturas mais elevadas e de forma contínua irão reduzir a quantidade de eletrólito, o que levará como resultado global ao aumento do valor *ESR* [17, 18]. Nestas referências, um modelo de predição é apresentado onde se estima o valor da ESR tomando como base a estimativa da temperatura do núcleo do capacitor. O valor da ESR a frio é calculado utilizando a expressão (3.8).

$$ESR / ESR_0 = (V_0 / V)^2 \quad (3.8)$$

Onde  $ESR$  = Resistência série equivalente,  $ESR_0$  = valor inicial de  $ESR$ ,  $V$  = volume do eletrólito e  $V_0$  = volume inicial do eletrólito.

Para este modelo, é importante conhecer com precisão o valor inicial do volume do eletrólito no capacitor, o que na prática é uma informação difícil de se obter para cada capacitor empregado. O modelo pressupõe que a taxa da perda de eletrólito é diretamente proporcional à pressão de vapor do mesmo, como mostrado na equação (3.9).

A constante  $k$  em (3.9) é utilizada para caracterizar a qualidade da vedação final.

$$dV / dt = kP \quad (3.9)$$

onde  $t$  = tempo (h),  $k$  = constante de taxa de perda (Unidades/mmHg/h),  $P$  = pressão do vapor do eletrólito (mmHg).

A pressão de vapor de um líquido depende da temperatura absoluta e das propriedades químicas do líquido, como mostrado na equação (3.10). Os valores de  $A$  e de  $B$  são tabelados e podem ser facilmente encontrados na literatura técnica [12]. Os eletrólitos não são compostos simples e idealmente deveriam ter seus valores  $A$  e  $B$  medidos, mas o composto principal de um capacitor eletrolítico é o etilenoglicol.

$$P = e^{\left(\frac{-A}{T} + B\right)} \quad (3.10)$$

Para o etilenoglicol,  $A = 7060$  e  $B=21,63$ .

No próximo passo o valor de  $ESR$  quente ( $ESR_{hot}$ ) é estimado usando a equação (3.11). O valor da temperatura no núcleo do capacitor  $T$  é calculado usando

$$ESR_{hot} / ESR = D + Ye^{-T/F} \quad (3.11)$$

Os valores das constantes são experimentalmente encontrados em [17] para um capacitor de 400V e são definidos como sendo:

$$D = 0,4$$

$$Y = 5,26E+8$$

$$F = 14,23(1/K)$$

A alteração da temperatura do núcleo é estimada pela equação (3.12) como sendo

$$T = T_{Ambiente} + \Delta T \quad (3.12)$$

Onde  $T_{Ambiente}$  = Temperatura do ar ambiente (°K), e  $\Delta T$  = Elevação da temperatura do núcleo do capacitor.

O Valor de  $\Delta T$  pode ser calculado pela equação (3.13) como sendo

$$\Delta T = \frac{ESR_{hot} I^2}{HS} \quad (3.13)$$

Onde  $I$  = Valor eficaz da corrente de “ripple” do capacitor

$H$  = Transferência de calor por unidade da área da superfície

$S$  = Área da Superfície (m<sup>2</sup>)

A maior parte do calor gerado internamente no capacitor é dissipada por convecção natural, e neste caso, a resistência térmica da carcaça do capacitor para o ar é a maior contribuição à resistência térmica efetiva do capacitor.

Tipicamente o raio do elemento é menor que a parte interna da caneca, o que cria um espaço de ar “morto” que deve ser levado em conta. Na equação (3.14) de [9] pode ser vista esta consideração.

$$H = \frac{G}{1 + 110R \ln(R / R_E)} \quad (3.14)$$

Onde  $R_E$  = raio do elemento (m), e  $R$  = raio do capacitor (m)

$G$  é experimentalmente encontrado para capacitores encapsulados [12] como sendo

$$G = 6,8 \text{ (W/m}^2 \text{ °C)}$$

Tipicamente um capacitor tem uma transferência térmica por condução para placa de circuito impresso ou barramentos de conexão, mas para simplificar considera-se aqui apenas a condução por convecção natural. A equação (3.15) é a área total da superfície do capacitor analisada como um cilindro e suas duas superfícies finais.

$$S = 2\pi(RZ + R^2) \quad (3.15)$$

Onde  $Z$  = altura do capacitor (m) e  $R$  = raio do cilindro do capacitor (m).

A solução da equação (3.9) é feita numericamente empregando a equação (3.16), onde  $\Delta t$  é escolhido para ser suficientemente pequeno. Para cada passo de cálculo os novos valores de ESR,  $ESR_{hot}$ ,  $T$  e  $P$  são calculados de modo a estabelecer o novo volume do eletrólito  $V_t$  para o próximo passo de cálculo.

$$V_t = V_{t-1} - kP\Delta t \quad (3.16)$$

Onde  $\Delta t$  = passo de cálculo (h)

Esta rotina é executada até que o valor de ESR exceda um limite estabelecido a partir do qual se considera que o dispositivo apresenta uma falha. A figura (3.8) apresenta o fluxo da rotina para execução dos cálculos.

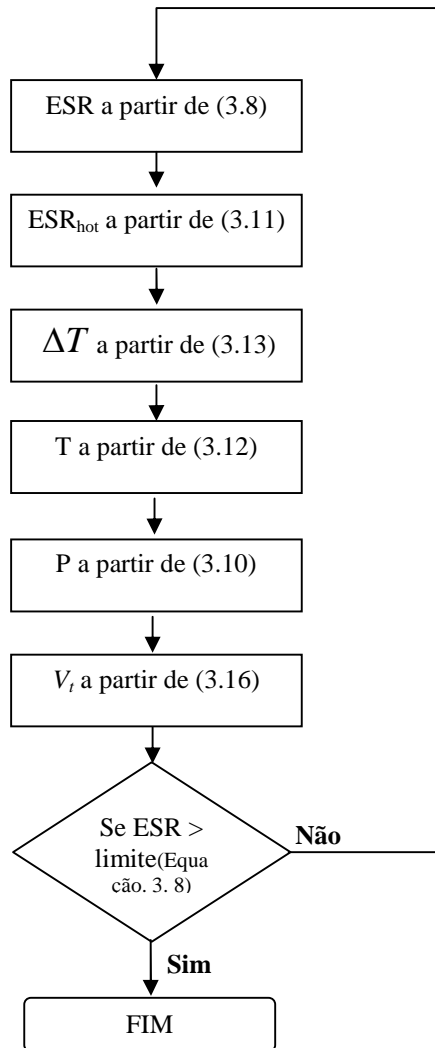


Figura 3.8 – Fluxograma pra estimativa da ESR[17]

Como apresentado em [17] este modelo é baseado no processo de deterioração do eletrólito e na perda do mesmo através do vazamento do vapor do eletrólito pela vedação do capacitor. Ele considera a relação entre a alteração no valor do ESR devido a perda de eletrólito, a variação da temperatura e transferência de calor do corpo do capacitor para o meio ambiente. O modelo também inclui o efeito do diâmetro da caneca na expectativa de vida útil. A análise detalhada deste trabalho [17] foi feita por [20] concluindo que este modelo sobreestimou a vida útil do capacitor. A perda e a deteriorização do eletrólito devem ser melhor entendidas e os modelos devem levar em conta a operação intermitente dos capacitores[20].

### 3.3 Diagnóstico de capacitores usando ESR - assinatura de tensão e corrente

Uma alteração no valor do ESR do capacitor afetará as formas de onda da tensão e da corrente sobre o capacitor. Harada et Al. [12] usou dois conversores c.c./c.c. para mostrar como as formas de onda de tensão e de corrente no capacitor podem ser usadas para monitorar a condição de um capacitor eletrolítico. Neste trabalho [12], assume-se que a constante de tempo do circuito é substancialmente maior do que o período de chaveamento, a corrente no indutor e a tensão na carga são escolhidas como variáveis de estado. O circuito equivalente é mostrado na figura 3.9 e a partir daí são calculadas as ondulações da tensão e da corrente no capacitor.

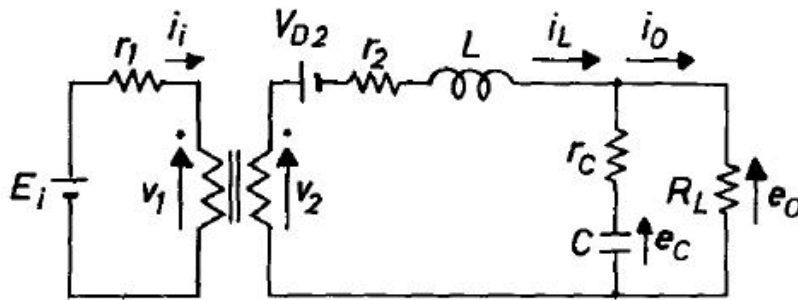


Figura 3.9 - Circuito equivalente do conversor tipo “forward” durante o instante de condução do transistor [12]

A relação entre os valores pico-a-pico das ondulações da tensão e da corrente no capacitor é denominada de  $\gamma_1$  e é plotada em relação à corrente de carga para um capacitor em bom estado e para um capacitor deteriorado, como mostrado na figura 3.10. Harada et Al., conclui que a relação  $\gamma_1$ , é diretamente proporcional ao valor da ESR do capacitor, portanto, pode ser utilizado para acompanhamento da condição do mesmo. No entanto, vale ressaltar que é utilizado o modelo matemático do conversor para estimar a tensão e a corrente do capacitor, portanto, o método depende da topologia do conversor, assim sendo este modelo deve ser modificado antes de se utilizá-lo em circuitos de diferentes topologias.

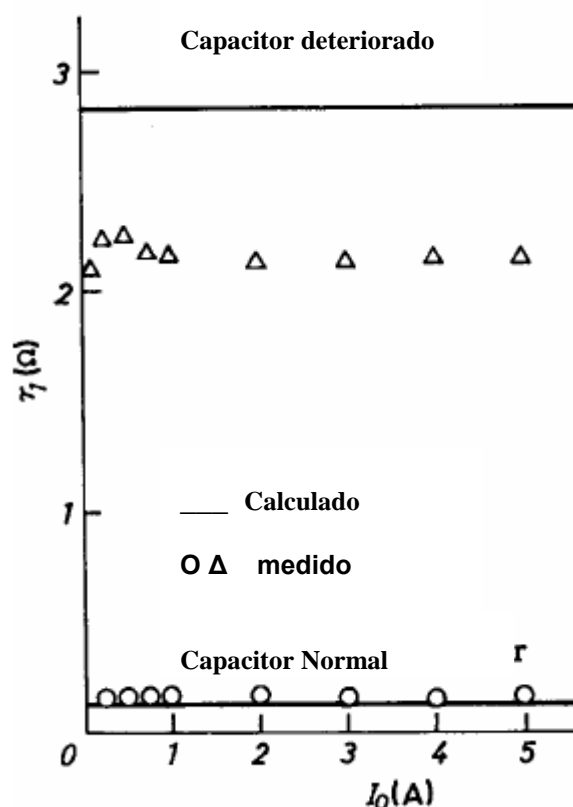


Figura 3.10 -  $\gamma_1$  versus corrente de carga,  $I_0$  (Onde  $\gamma_1 = (\text{Valor de pico-a-pico do "ripple" da tensão}) / (\text{Valor de pico-a-pico do "ripple" de corrente})$ ) [12]

O valor da ondulação da tensão no capacitor é diretamente proporcional à *ESR*. Usando este conceito Lahyani e outros, [8] apresenta um algoritmo alternativo para prever a falha em conversores estáticos usando a ondulação da tensão. P. Venet [22], avalia o *envelhecimento* de um capacitor, cuja *ESR* foi determinada pela corrente e tensão, comparando-o com um capacitor em bom estado, cuja *ESR* foi pré-calculada através da medição das ondulações da corrente e da tensão, à uma determinada temperatura de operação.

Para P. Venet [22] a *ESR* é o melhor indicador da condição do capacitor, sabendo que o valor de *ESR* varia com a temperatura como apresentado na equação (3.17), e que seu efeito é modelado por

$$ESR = \alpha + \beta \cdot e^{-\frac{T_{C0}}{\delta}}, \quad (3.17)$$

Onde  $T_{C0}$  é a temperatura no núcleo do capacitor em Kelvin, e  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\delta$  dependem do tipo de capacitor.

A partir de um modelo que permite calcular a  $ESR$  para o capacitor em estudo, P. Venet conclui ser aplicável o monitoramento conforme diagrama básico apresentado na figura 3.11

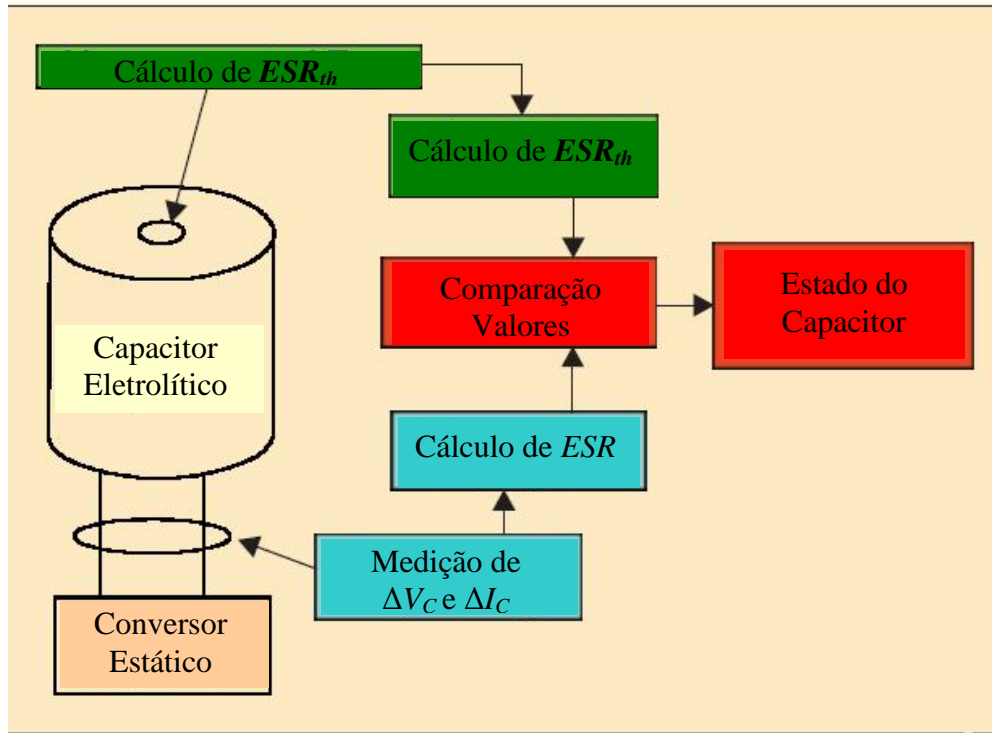


Figura 3.11 – Princípio do monitoramento do Capacitor em tempo real [22]

A referência [22] utiliza o gráfico da variação da  $ESR$  versus a temperatura do núcleo do capacitor  $T_{co}$ , apresentado na figura 3.12, para evidenciar que se a  $ESR_{th}$  não for compensada após o cálculo da  $ESR$ , o resultado pode ser um erro no diagnóstico.

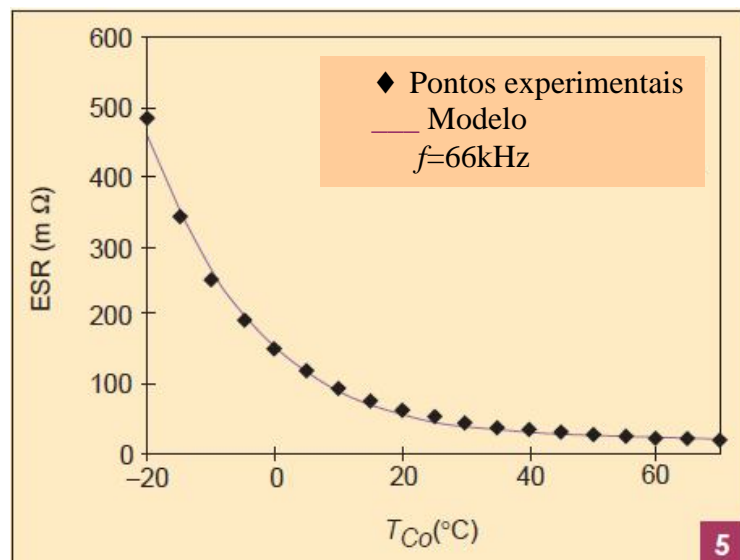


Figura 3.12 – Variação da  $ESR$  versus temperatura núcleo  $T_{co}$  para um capacitor de 2200 $\mu$ F , 10V [22]

Outra importante pesquisa usada como referência e que analisa a variação da ESR foi realizada por IMAN [1], que utiliza algoritmos baseados em *FFT* e estimação de parâmetros para identificar a evolução do valor da *ESR* do capacitor. Suas experiências foram concentradas em laboratório e aplicadas em capacitores de menor tamanho ( $\varnothing < 25\text{mm}$ ). Usando estimação de parâmetros, a partir da medição da corrente e da tensão no capacitor de um conversor tipo *Boost*, é aplicado o esquema para identificação da capacitância e ESR conforme figura 3.13. Seus experimentos utilizando *FFT*, de forma resumida, consistiram em submeter os capacitores a temperaturas elevada de trabalho ( $115^\circ\text{C}$ ), enquanto sua função no conversor era monitorada através da coleta dos sinais de corrente e tensão. Aplicando *FFT* para analisar a amplitude dos sinais na faixa da frequência de chaveamento do conversor, é demonstrado que à medida que o capacitor é deteriorado estas amplitudes se elevam e conseqüentemente o valor da *ESR*. A figura 3.14 ilustra parte destes resultados. Como sugerido pelo próprio autor para futuros trabalhos, existe ainda uma necessidade de evolução para aplicação industrial em maior escala, além da necessidade de pesquisa envolvendo também sistemas não estacionários, ou de carga variável. Outros detalhes sobre seus experimentos, os quais balizaram este trabalho, serão abordados no capítulo 4.

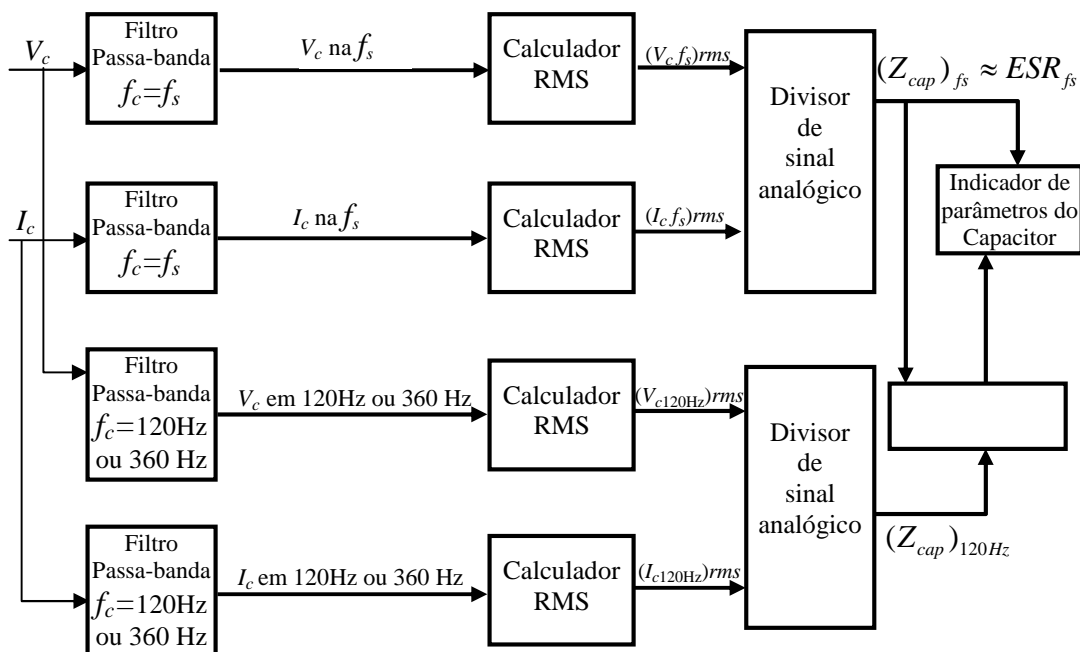


Figura 3.13 - Esquema para estimação de parâmetros [1]

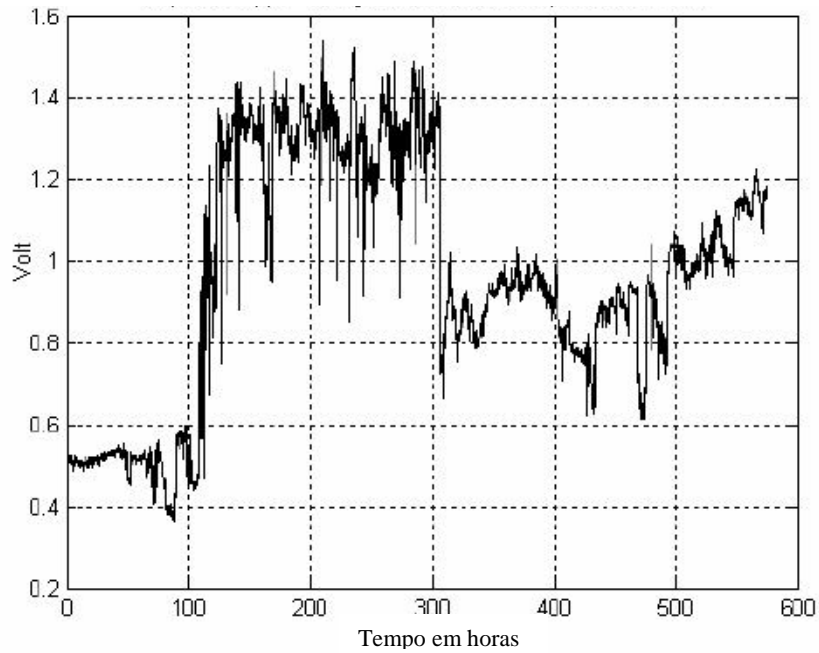


Figura 3.14 - Componente fundamental da ondulação de tensão no capacitor (cada valor no eixo y representa uma amostra da *FFT* em 10 kHz) [1]

Os vários estudos realizados demonstram a possibilidade de identificar a degradação dos capacitores eletrolíticos principalmente através da variação da resistência série equivalente. Todavia, percebe-se ainda, que a aplicação industrial ainda não foi explorada, nem pelos fabricantes de inversores nem pelas indústrias de aplicação. Outra variação de topologia industrial existente é a aplicação de grandes fontes c.c. para alimentação de múltiplos inversores, o que trás outras variáveis aos sistemas, conforme será explorado no capítulo seguinte.

## CAPITULO 4 – EXPERIMENTOS DE CAMPO - ANÁLISE DOS CAPACITORES DE UM INVERSOR ABB

A aplicação de inversores de frequência conforme topologia utilizada na Laminação à Frio de Aços Inoxidáveis da Aperam América do Sul (ex-Acesita) é muito comum na indústria. Apenas neste departamento em específico, existem 95 inversores de frequência, com 394 capacitores de potência instalados. Os experimentos de campo foram realizados em um inversor reserva, alimentado por um barramento c.c. comum a vários outros inversores de processo. Este inversor teste alimenta um motor de 7,5kW. Um diagrama básico do inversor estudado é apresentado no apêndice A e na figura 4.1 é apresentado o diagrama de blocos do conversor, na qual *CI* representa a associação série dos 03 capacitores. Estes capacitores estão fisicamente dispostos como mostrado na figura 4.3.

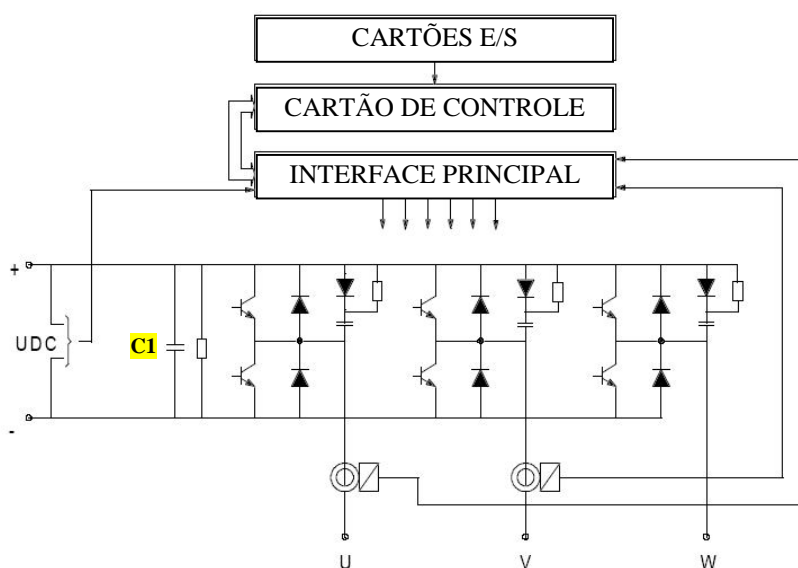


Fig. 4.1- Inversor teste – diagrama básico

Para coleta dos dados foi utilizado um osciloscópio Tektronix modelo THS700, tendo então os seus dados transferidos para um computador e analisados utilizando o software Sigview versão 2.1.2. Sensores de corrente e tensão também foram utilizados para tratamento dos sinais.

O fato motivador para a escolha deste trabalho foi a ocorrência de falha em um destes capacitores, que veio a provocar uma grande perda de produção no processo de recozimento e decapagem de bobinas de aço inoxidável. Apesar de na indústria sempre se aplicar o conceito de vida útil média de 10 anos para estes dispositivos, a troca total dos mesmos numa linha de

produção como a citada acima, demandaria elevado valor de desembolso, na ordem de USD \$218 mil. Neste tipo de decisão, embora pouco comum, devido a fatores econômicos, resulta na não utilização da vida útil dos capacitores em sua totalidade, já que os mesmos não se deterioram igualmente, devido às distintas aplicações dentro do processo.

#### **4.1 Medição da capacitância C**

Conforme exposto no capítulo 3, D.C. Lee [4] considerou a aplicação de 30Hz a partir do PWM de entrada de um inversor regenerativo para definição do valor de C. Para o caso dos inversores estudados do fabricante ABB, esta etapa em PWM não existe, além disso, a solução apresentada se mostra computacionalmente mais complexa.

Mesmo considerando que a melhor maneira de acompanhar a vida útil do capacitor seja através da medição da ESR, foi também analisado e testado um método para medição da capacitância série do barramento c.c. do inversor ACV 700.

É importante para os processos industriais que os métodos de inspeção preditiva sejam aplicados com o mínimo de interferência no equipamento ou processo produtivo, isto significa que quanto menos invasivo o método, melhor para o equipamento e para a otimização dos recursos humanos e materiais.

No manual do fabricante encontra-se a seguinte recomendação em relação aos capacitores do barramento c.c. “... os capacitores são dimensionados para uma vida útil mínima de 100 Mil horas, quando operando em carga nominal, mas na média das instalações esta vida útil é maior. A vida útil depende da carga do conversor de frequência e da temperatura ambiente. A condição do capacitor do barramento c.c. pode ser verificada através da medição da capacitância após 100 mil horas de trabalho, na sequência, este intervalo deve ser reduzido para 20 mil horas”

Considerando os diversos modos de falha de um capacitor já apresentados na figura 2.10, e considerando o desenvolvimento de métodos de medição não invasivos, este intervalo de 20 mil horas é elevado, somando-se aí a ponderação de que as indústrias buscam cada vez mais o aumento da confiabilidade das linhas de produção.

O método aqui apresentado, leva em consideração a medição da capacitância global do barramento c.c. no momento em que o drive é energizado. Na aplicação em questão, o inversor do fabricante ABB recebe a tensão contínua de um barramento comum a outros inversores. Este barramento é alimentado por um retificador trifásico totalmente controlado (figura 4.9). Dentro do inversor esta tensão é aplicada sobre três capacitores em série, conforme apresentado na figura 4.2.

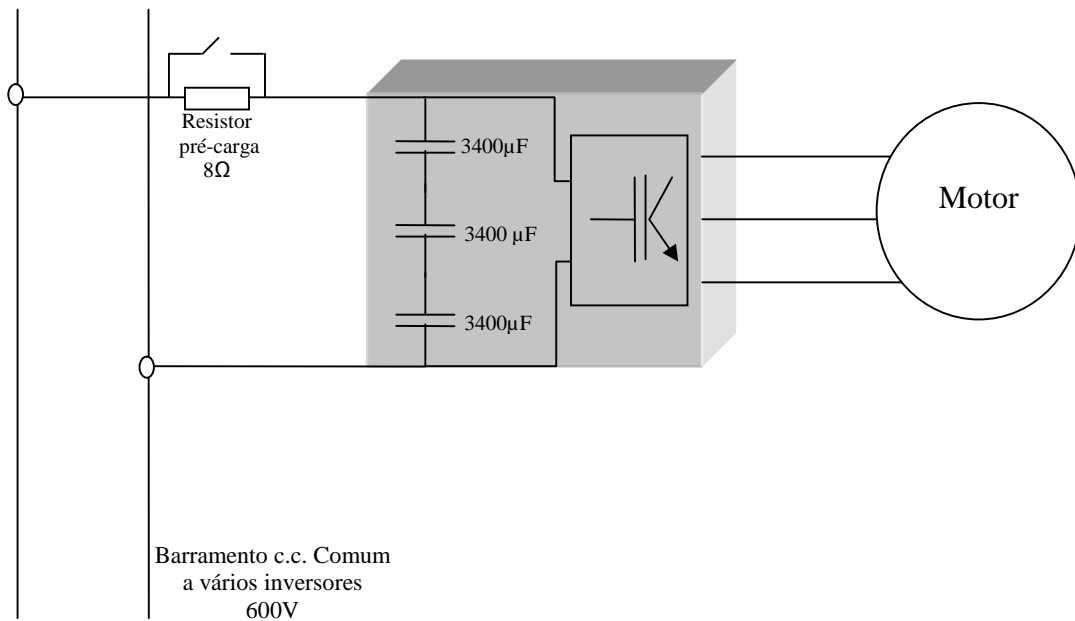


Figura 4.2 – Esquema básico da alimentação c.c. do inversor modelo ACV700 da ABB.

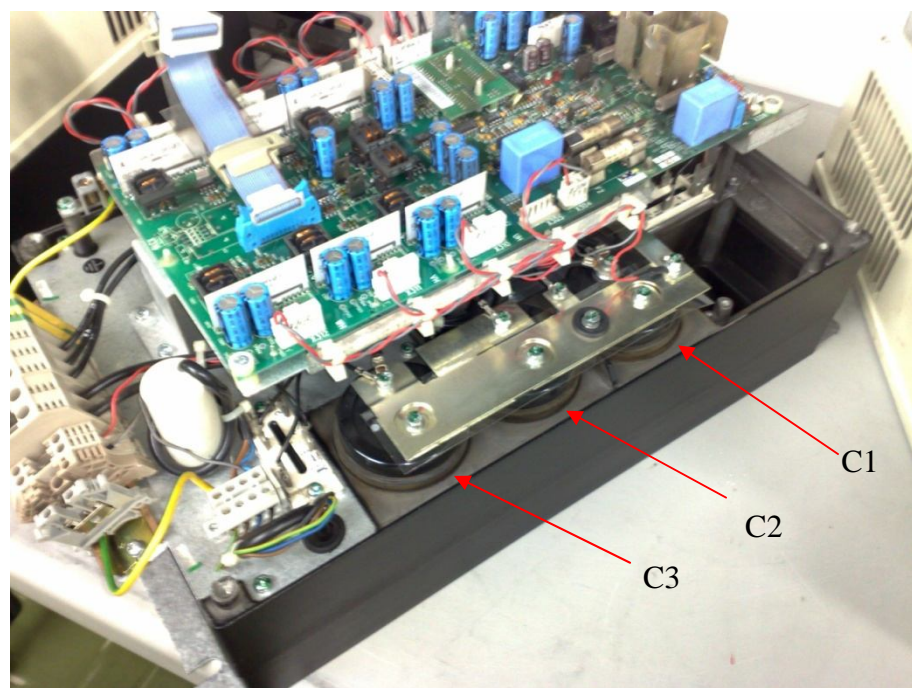


Figura 4.3 – Localização dos capacitores no Inversor teste

Numa planta industrial é comum o desligamento dos drives como o aqui estudado, liberando o equipamento para intervenção mecânica, por exemplo, durante paradas de produção para manutenção preventiva ou para “setup” operacional. O método aqui apresentado analisa a curva de carga destes capacitores durante o religamento do inversor. A curva de carregamento de tensão de um capacitor segue a expressão (4.1)

$$V_c = V_{in}(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4.1)$$

Já a corrente no capacitor pode ser expressa por

$$I_c = \frac{V_{in}}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4.2)$$

onde R no circuito analisado é o valor do resistor de pré-carga.

Conhecendo a corrente de partida e a tensão do barramento, no momento  $t = 0$  o valor de R pode ser calculado como sendo

$$R = \frac{V_{in}}{I_c} \quad (4.3)$$

A partir da medição do tempo necessário ( $T_{RC}$ ) para que a tensão no capacitor alcance 63% do valor final da tensão no barramento c.c., pode-se determinar o valor do capacitor a partir da expressão (4.1). O valor de  $T_{RC}$  representa uma constante de tempo  $\tau$ , valor este que é igual ao produto RC. Neste caso, o valor da resistência R é calculado em função da máxima corrente durante o ligamento do inversor e terá sempre um valor próximo ao valor da resistência de pré-carga do circuito. Ainda assim, para que os testes tenham maior facilidade de execução e a resistência dos cabos seja considerada, o cálculo de R se mostra mais vantajoso do que sua medição direta.

Sabendo que os capacitores estão associados em série, e sua equação da capacitância resultante é regida pela equação

$$\frac{1}{C_{eq}} = \sum_n \frac{1}{C_n} \quad (4.4)$$

deduz-se que o valor encontrado será a resultante da associação dos três capacitores. Analisando esta expressão, observa-se que para uma redução de 20% na capacitância individual, caso ocorra, a redução no valor global da capacitância será de 7,6%. Considerando que apenas um capacitor tenha seu valor de capacitância reduzido (pior caso), embora pouco provável, ainda permite que seja percebida uma alteração na tendência histórica das medições.

Um circuito para simulação desta medição foi implementada no software de simulação PSIM. O gráfico da figura 4.4 apresenta a curva de carga e os valores de tempo, capacitância e tensão pra uma constante de tempo. O resultado desta simulação retornou um valor de capacitância compatível com os valores atribuídos aos 03 capacitores do circuito série. Neste caso, foi inserido o valor de 3.400  $\mu\text{F}$  para cada capacitor, o que matematicamente resulta numa capacitância equivalente de 1.133  $\mu\text{F}$ . A simulação estimou um valor de 1136 $\mu\text{F}$ , comprovando a viabilidade de se partir para a medição direta no inversor.

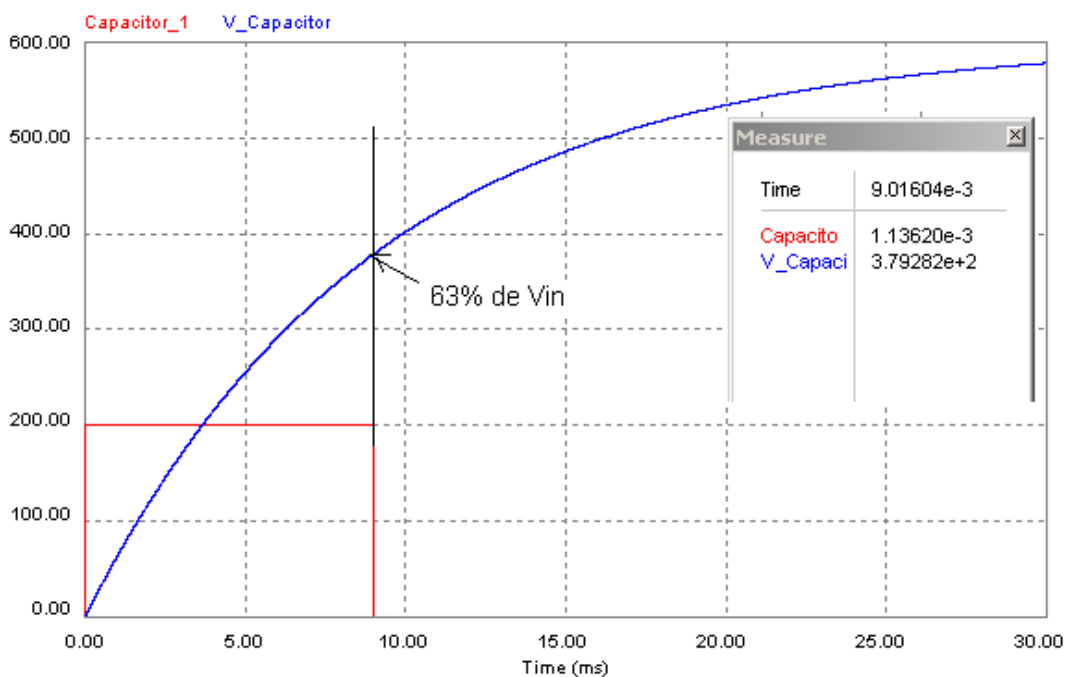


Figura 4.4 - Curva de carga do capacitor simulada no software PSIM

#### 4.1.1 Experimento da medição da capacitância

Para a realização deste experimento no campo, foi coletado com um osciloscópio o sinal de tensão de carregamento da associação série dos 03 capacitores, direto no barramento, conforme traço 1 do osciloscópio, representado na figura 4.5. Para identificação da resistência série do circuito, a qual inclui o resistor de pré-carga, foi monitorada também a corrente

inicial de carga, conforme traço 2 figura 4.5. Neste caso foi utilizado alicate amperímetro com frequência de resposta de 100kHz, diretamente nos cabos de entrada c.c. do barramento. Conhecendo-se o valor da tensão média do barramento c.c., (600Vc.c.) e a corrente máxima no ligamento, pode se calcular o valor de R e depois ao valor do capacitor (equações 4.1 e 4.2). Valor de R nominal é de  $8\Omega$ , enquanto o calculado foi de  $5,82\Omega$

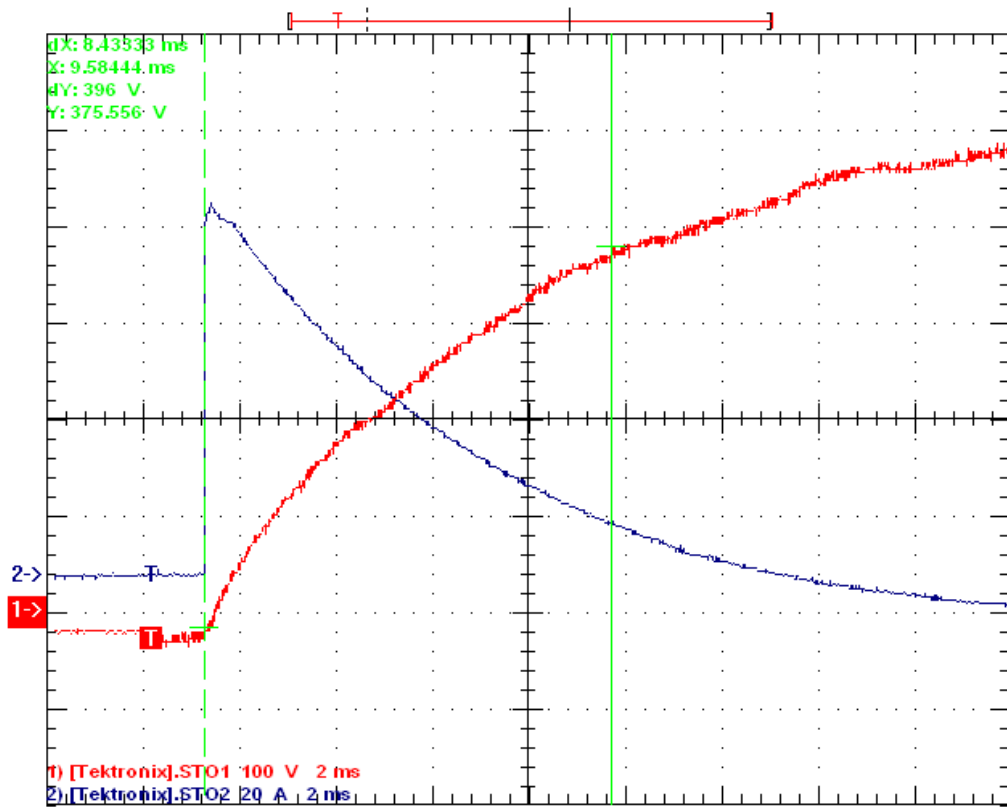


Figura 4.5 – Tensão e Corrente de partida na associação série dos capacitores reservas

A tabela 2 resume os resultados encontrados para esta experiência, onde os capacitores em teste eram sobressalentes dos inversores da planta.

Tabela 02 – Resultados para medição da capacitância série dos capacitores reservas

Capacitor	Valor de C medido individualmente capacitômetro ( $\mu\text{F}$ )	Valor de C Calculado para associação série( $\mu\text{F}$ )	Valor de C resultante da simulação( $\mu\text{F}$ )	Valor de C Experimental( $\mu\text{F}$ )
C1	3364	1053	1056	1081
C2	3112			
C3	3017			

Após a troca por um segundo conjunto de 03 capacitores, foi repetida a operação, gerando o gráfico da figura 4.6 e a tabela 3.

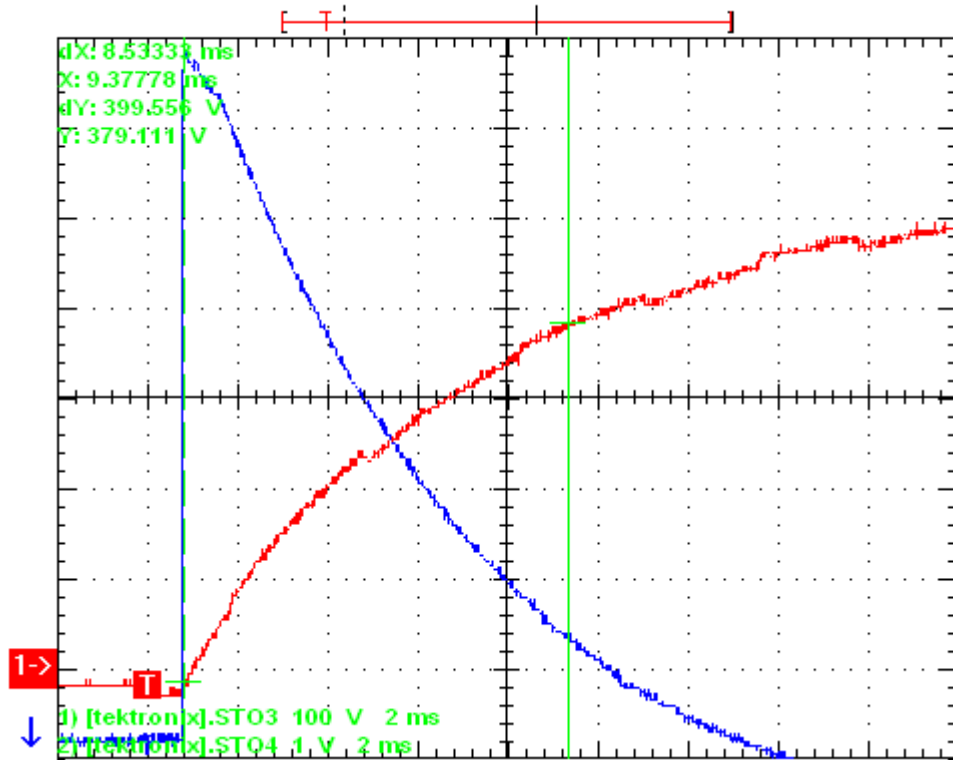


Figura 4.6 – Tensão e Corrente de partida na associação série dos capacitores usados(originais)

Tabela 03 – Resultados para medição da capacitância série do segundo grupo de capacitores(originais)

Capacitor	Valor de C medido individualmente capacímetro ( $\mu\text{F}$ )	Valor de C Calculado para associação série( $\mu\text{F}$ )	Valor de C resultante da simulação( $\mu\text{F}$ )	Valor de C Experimental( $\mu\text{F}$ )
C1	3455	1098	1101	1088
C2	3069			
C3	3390			

A medição da capacitância dos capacitores originais a partir dos experimentos realizados foi de  $1088\mu\text{F}$ . Os mesmos capacitores tiveram suas capacitâncias medidas com um capacímetro e o valor encontrado foi de  $1098\mu\text{F}$ . O erro entre as duas medições foi de 0,9%. O mesmo procedimento foi adotado para os capacitores reservas. A medição encontrada a partir dos

resultados experimentais foi de  $1081\mu\text{F}$  enquanto que a medição com o capacitmetro encontrou um valor de  $1053\mu\text{F}$ . O erro entre as duas medições foi de 2,65%. Como a proposta é o acompanhamento preditivo, em se mantendo os mesmo procedimentos de coleta de dados e medição, a variação relativa dos valores no tempo passa a ser mais representativa que os valores absolutos.

O método apresentado mostra que é possível o cálculo dos valores de capacitância, a partir de sinais externos ao drive, sendo estes a corrente c.c. de entrada e a tensão do barramento c.c.. Deve-se ressaltar aqui, que como se trata de análise para manutenção condicional, tais procedimentos irão definir a necessidade ou não de desmontagem por exceção. Em outras palavras, se os resultados apresentam uma tendência de redução da capacitância equivalente, pode-se partir então para a identificação de qual ou de quais capacitores estão com a vida útil comprometida. A medição desta capacitância equivalente pode ser associada às medições da ESR conforme será abordado no próximo tópico, para direcionar o diagnóstico. A aplicação também se mostra viável, quando se considera que na maioria das empresas, já existe um corpo técnico responsável pelo acompanhamento preditivo de variáveis como vibração, temperatura, espectro de corrente de máquinas, etc.

## **4.2 Medição da ESR**

Conforme já abordado por alguns autores e exposto no capítulo anterior, uma das formas para se chegar ao ESR é a análise do domínio da frequência dos sinais de tensão e corrente do capacitor. Seguindo esta linha de análise, trabalhou-se no inversor de frequência reserva, modelo ACV 700, da linha de recozimento e decapagem (RB4) da Aperam América do Sul (ex. Acesita), buscando a melhor relação entre aplicabilidade do método e confiabilidade do diagnóstico.

Buscou-se então estabelecer um procedimento que permitisse a medição da resistência série equivalente (ESR) dos capacitores do barramento c.c. e a partir daí aplicar o conceito da manutenção por condição, baseado na tendência histórica dos valores.

### **4.2.1 Simulação do inversor no PSIM**

Objetivando conhecer e consolidar algumas características dos sinais que seriam analisados durante os experimentos, foi simulado o circuito de potência do conversor ABB, o qual foi composto pela fonte de alimentação, os capacitores do barramento c.c. e o inversor na saída. No apêndice D é apresentado o diagrama do circuito simulado.

Nesta simulação foi possível alterar o valor da ESR e da capacitância dos capacitores, de forma a perceber as variações ocorridas nos sinais de tensão e corrente dos mesmos.

A figura 4.7 apresenta a FFT do sinal de corrente e tensão sobre um dos 03 capacitores, onde foi simulada uma ESR de  $25\text{m}\Omega$  e sua capacitância mantida em  $3.400\mu\text{F}$ . Na figura 4.8, estes valores foram alterados para  $100\text{m}\Omega$  e  $2.720\mu\text{F}$  (20% redução). Nos dois casos foram analisadas as variações na tensão e corrente na faixa de frequência de 3,6 kHz, que neste caso é a frequência de chaveamento do inversor da simulação. Analisando as duas simulações, nota-se que para um aumento de 4 vezes na ESR e redução da capacitância, a amplitude da corrente reduz à metade enquanto a tensão sobre o capacitor se eleva em 50%. Esta simulação permitiu ratificar a afirmação feita por [12] que, considerando os mecanismos de deterioração de um capacitor, o valor da ESR, em termos percentuais, irá subir bem mais do que a redução que ocorre no valor da capacitância, quando se analisa os valores eficazes em frequências mais elevadas. Para uma predição baseada em valores históricos, seu monitoramento é mais representativo.

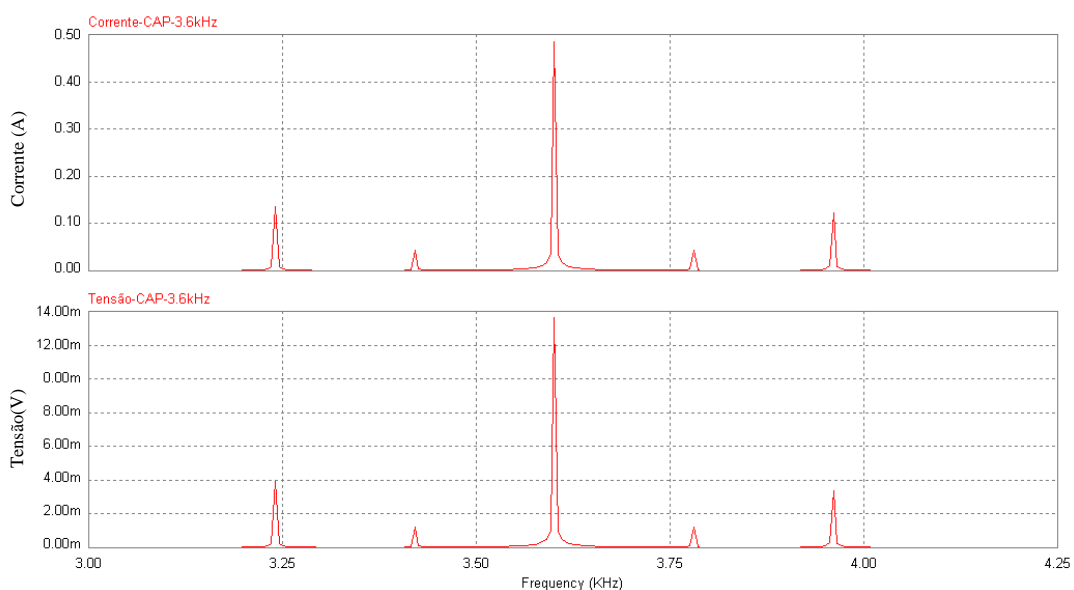


Figura 4.7 Simulação capacitor saudável: ESR =  $25\text{m}\Omega$  e C= $3.400\mu\text{F}$

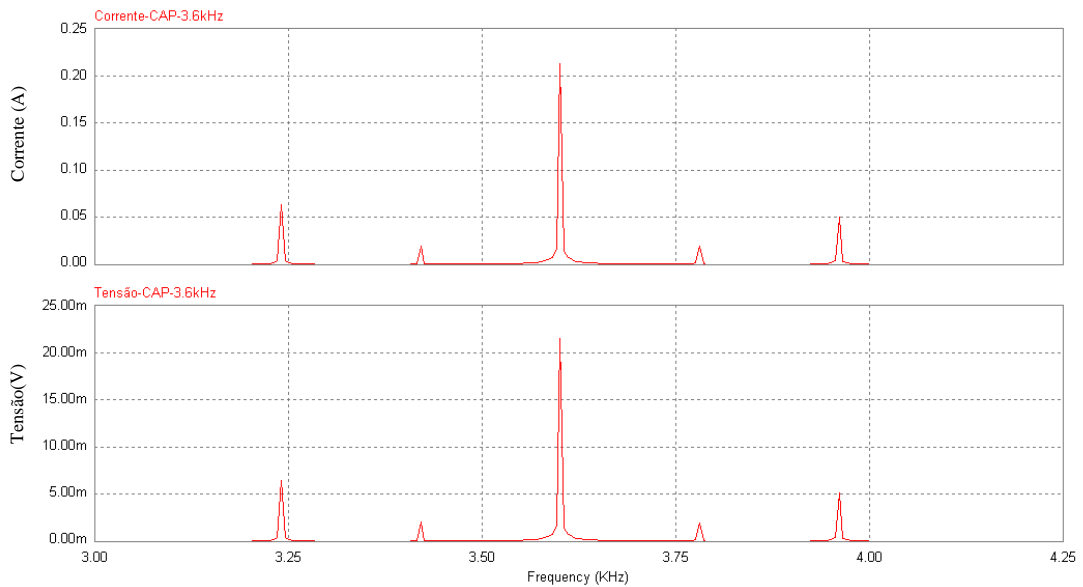


Figura 4.8 Simulação capacitor deteriorado: ESR = 100mΩ e C=2.720μF

#### 4.2.2 Experimento de campo

Conforme pode ser observado na figura 4.9, foi inserido um sensor de corrente em série com os 03 capacitores do circuito, o que exigiu a confecção de um barramento de cobre geometricamente diferente da configuração original. Os cabos deste sensor foram levados à régua de conexões externas do inversor e em seguida à placa de alimentação e tratamento de sinal (figura 4.10)

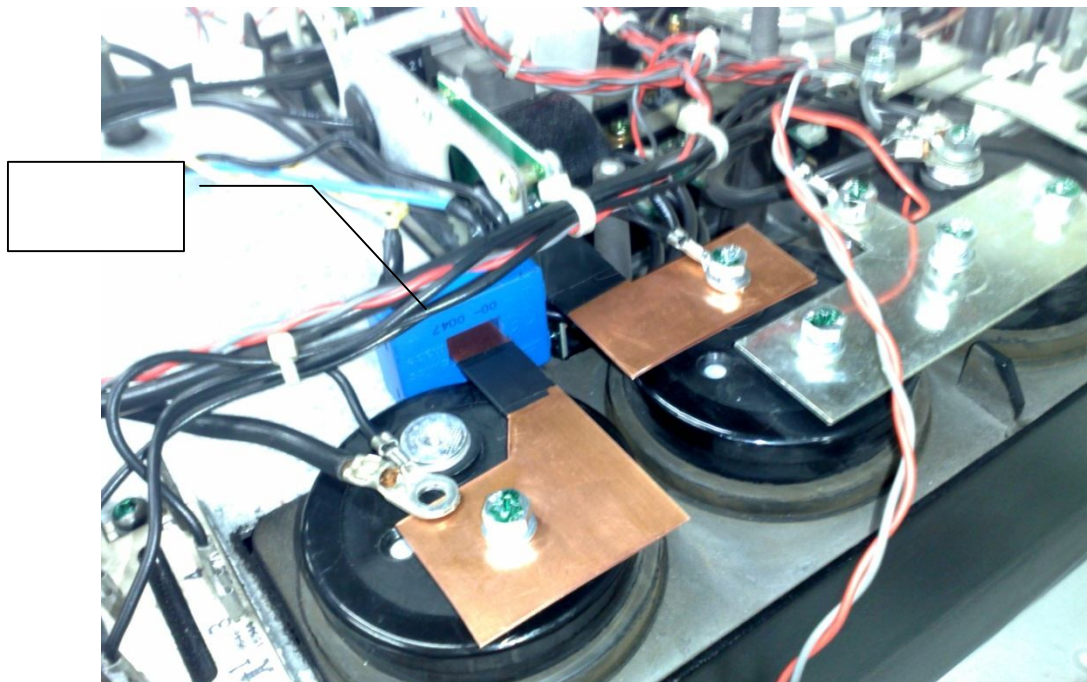


Figura 4.9 – Inversor teste – Alteração no circuito visando a medição da corrente nos capacitores

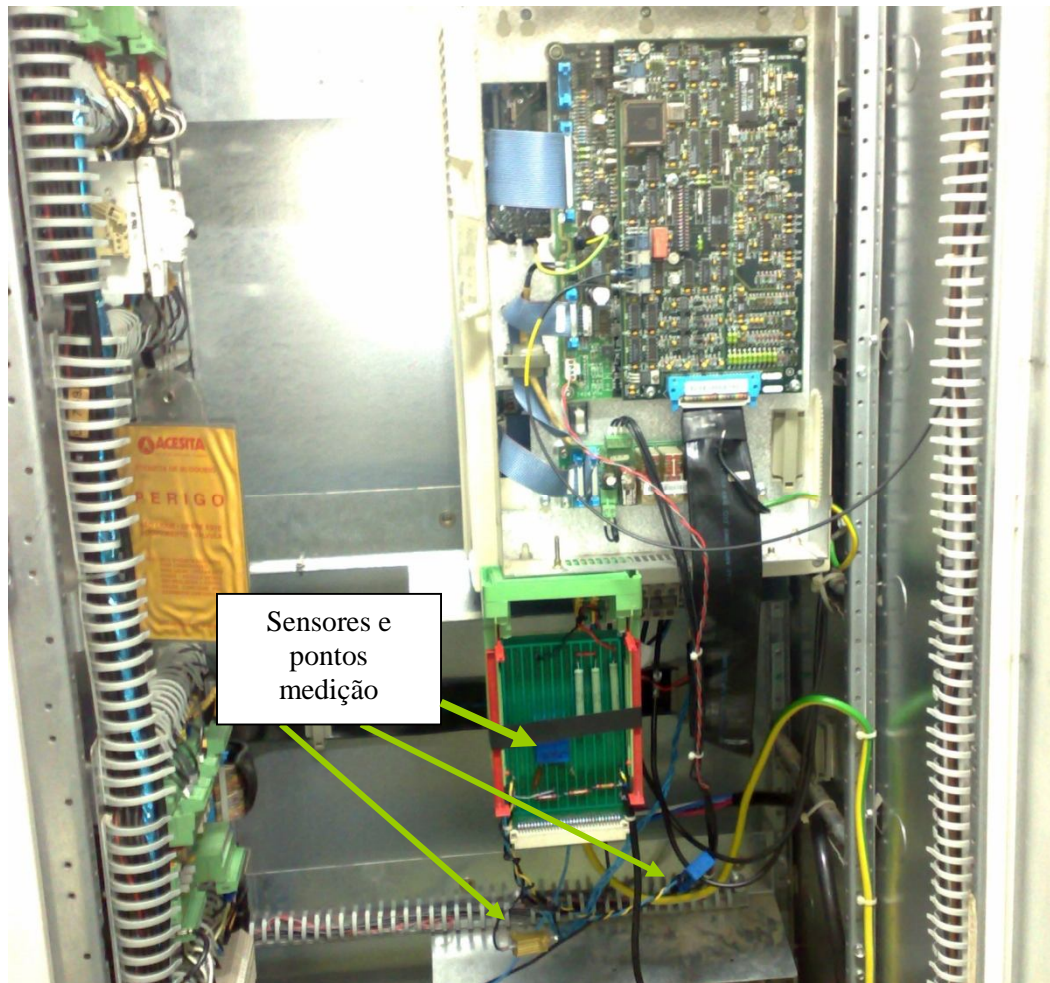


Figura 4.10 – Inversor teste: Visão geral incluindo placa de tratamento dos sinais

As medições foram realizadas com o inversor de frequência acionando um motor funcionando com velocidade nominal (1800rpm) e a vazio. Iniciadas as primeiras medições de corrente nos capacitores, foi observado um sinal de corrente muito influenciado pelo barramento de alimentação dos diversos motores existentes na planta, conforme figura 4.11(a).

A análise das frequências dominantes na forma de onda da corrente nos capacitores, apresentada na figura 4.11(b) permitiu-nos verificar o aparecimento de outras componentes harmônicas provenientes dos demais *drives* conectados ao barramento c.c. utilizado. A expectativa era encontrar frequências dominantes na faixa dos 4,0 kHz, que é a frequência de chaveamento dos IGBTs do inversor.

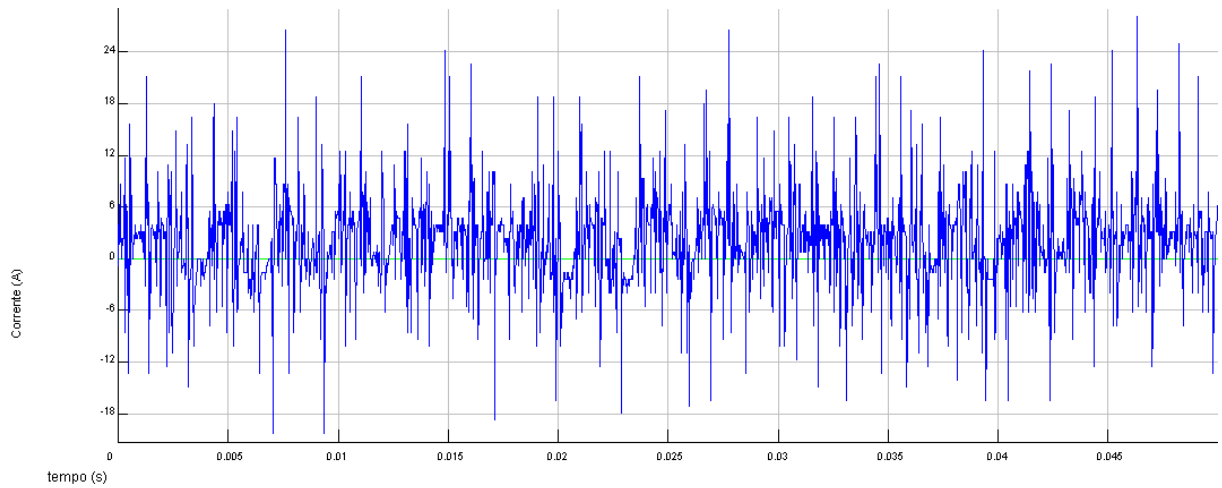


Figura 4.11(a) – Sinal de corrente nos capacitores – presença de harmônicos

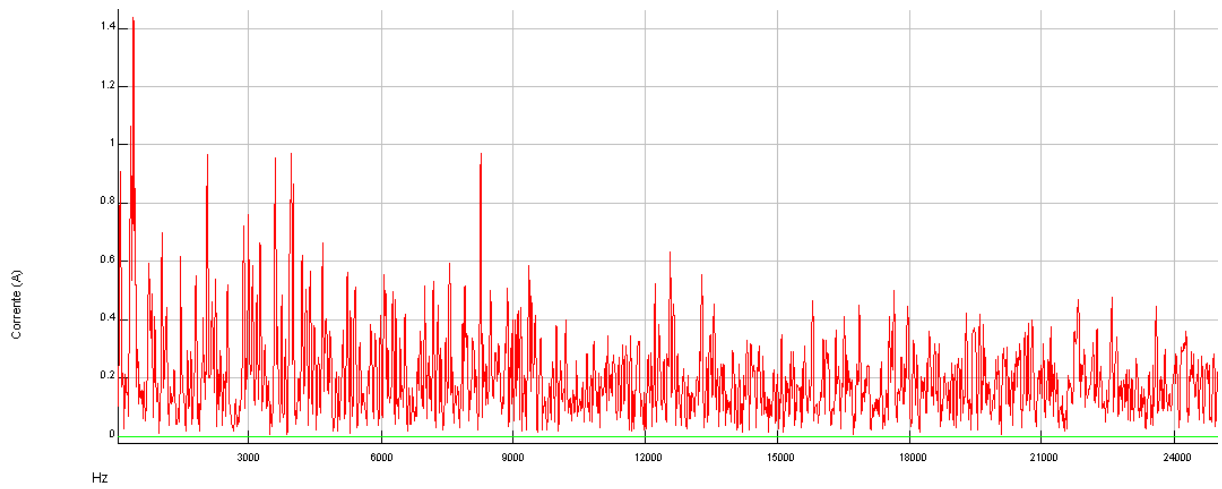


Figura 4.11(b) – FFT do sinal de corrente nos capacitores – harmônicos do barramento c.c.

A figura 4.12 apresenta a arquitetura usada no acionamento dos motores da linha de laminação a frio podendo-se notar a interligação dos *drives* adjacentes, o que cria condições para que ocorra a citada interferência harmônica.

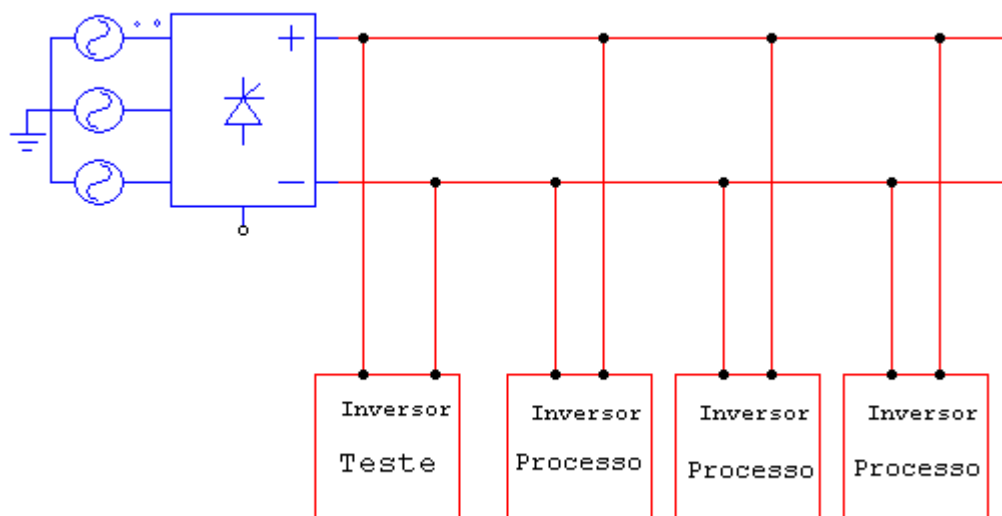


Figura 4.12 – Arquitetura drives ABB

Durante uma oportunidade de parada programada da produção, todos os inversores do processo foram desligados exceto o inversor teste no qual foram coletados novamente a corrente e a tensão no capacitor. As harmônicas oriundas dos outros *drives* foram notoriamente eliminadas. A partir da identificação desta nova condição, a melhor relação sinal/ruído permitiu que as medições seguissem conforme apresentado a seguir.

#### 4.2.2.1 ESR estimada na faixa de frequência chaveamento

A figura 4.13 apresenta o sinal no tempo para a corrente nos capacitores com o motor funcionando à velocidade nominal. A partir deste sinal, foi realizada a análise espectral da corrente nos capacitores e o resultado é mostrado na figura 4.14.

A análise no domínio da frequência mostra o aparecimento de bandas bem definidas com amplitudes máximas nas frequências múltiplas de 360Hz, revelando também uma maior amplitude na frequência de 3955 Hz, que neste caso, é a frequência de chaveamento dos transistores do inversor. O gráfico apresenta um detalhe do espectro harmônico na faixa de 0 até 8.000Hz.

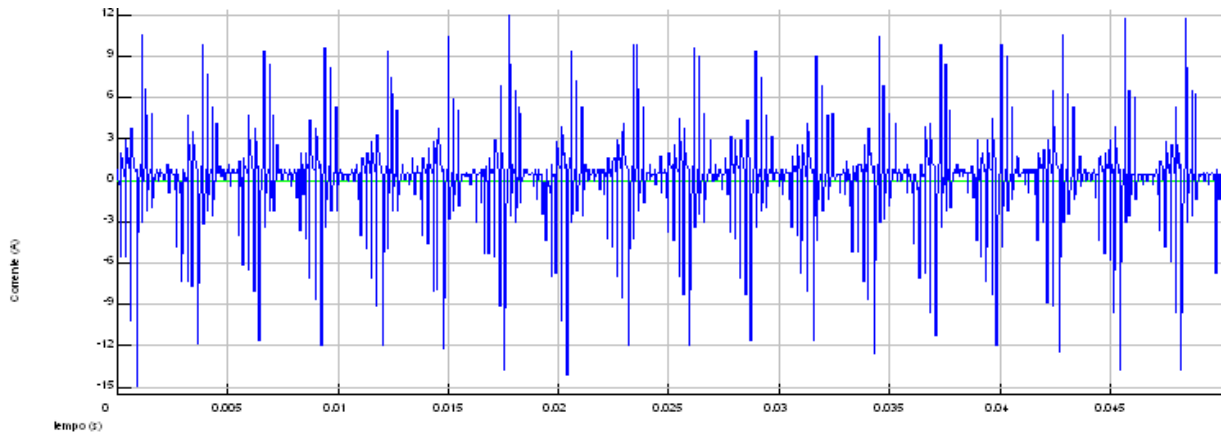


Figura 4.13 – Sinal corrente no tempo –  $I_{rms}$  no capacitor = 2,55 A. Corrente saída do drive de 5,9 A.

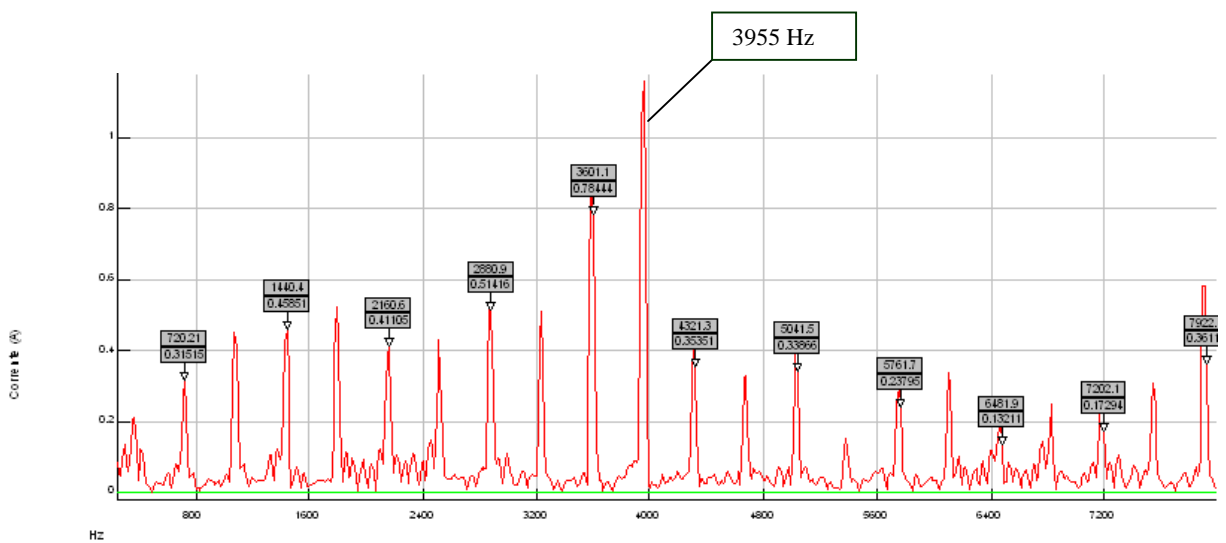


Figura 4.14 – Identificação das harmônicas de 360 Hz e frequência chaveamento

Os fabricantes de capacitores, como a EPCOS, costumam fornecer em sua folha de dados os valores típicos da  $ESR$  para seus capacitores, como mostrado na figura 4.15. Na figura 4.16 é apresentada a resposta em frequência da impedância de um capacitor eletrolítico de  $470 \mu F$ ,  $ESR = 200 \text{ m}\Omega$  e  $ESL = 100 \text{ nH}$  [1]. No Apêndice C pode ser observado uma tabela da EPCOS com diferentes valores de  $ESR$ , para diferentes capacitores, para valores de frequência na faixa de 100Hz a 10kHz. A figura 4.16 demonstra que na faixa de média frequência a impedância do capacitor é predominantemente resistiva, assim sendo a  $ESR$  pode ser calculada como sendo

$$ESR = \frac{V_{fs}}{I_{fs}} \quad (4.5)$$

onde  $V_{fs} = RMS$  da tensão de ripple do capacitor na frequência de chaveamento do inversor e  $I_{fs} = RMS$  da corrente de ripple do capacitor na frequência de chaveamento do inversor.

Impedance Z versus frequency f  
 Typical behavior at 20 °C

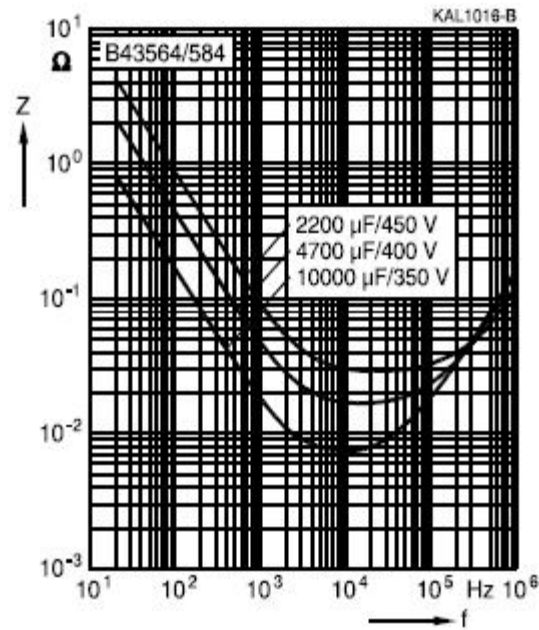


Figura 4.15 Impedância x frequência para um capacitor da EPCOS [3]

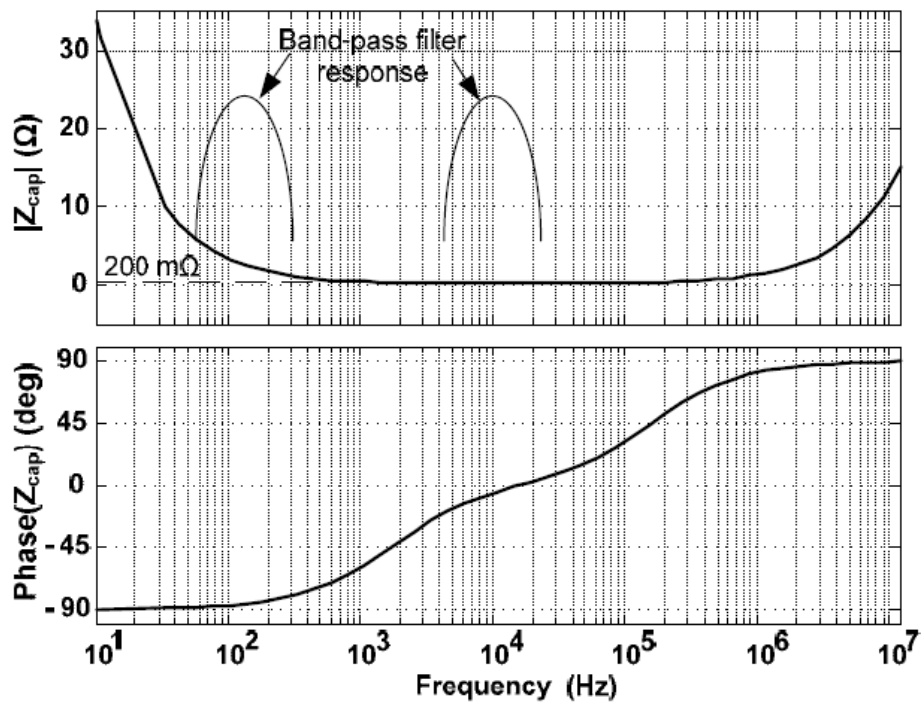


Figura 4.16– Resposta em frequência da impedância de um capacitor eletrolítico 470  $\mu F$  [1]

Para o cálculo da ESR, inicialmente o sinal da corrente e da tensão em cada capacitor são filtrados por um filtro passa banda de segunda ordem com a função de transferência apresentada na equação 3.4. A banda passante do filtro passa banda é de 100Hz sendo a

frequência inferior igual a 3,9kHz e a frequência superior igual a 4kHz. Observando a figura 4.16 pode-se perceber que na frequência de chaveamento do inversor a resistência série equivalente é preponderante. Por este motivo a banda passante do filtro será ajustada de modo a extrair a informação deste harmônico presente nas formas de onda da tensão e corrente no capacitor. As figuras 4.17(a,b) e 4.18 apresentam as formas de onda da tensão e da corrente no capacitor após a filtragem respectivamente.

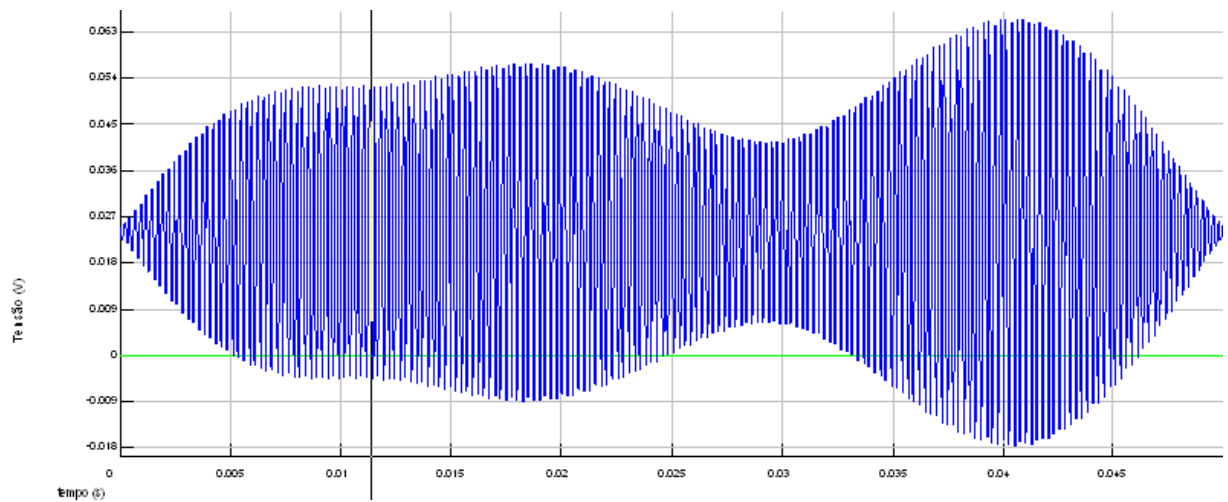


Figura 4.17(a) – Tensão no capacitor após filtro passa banda

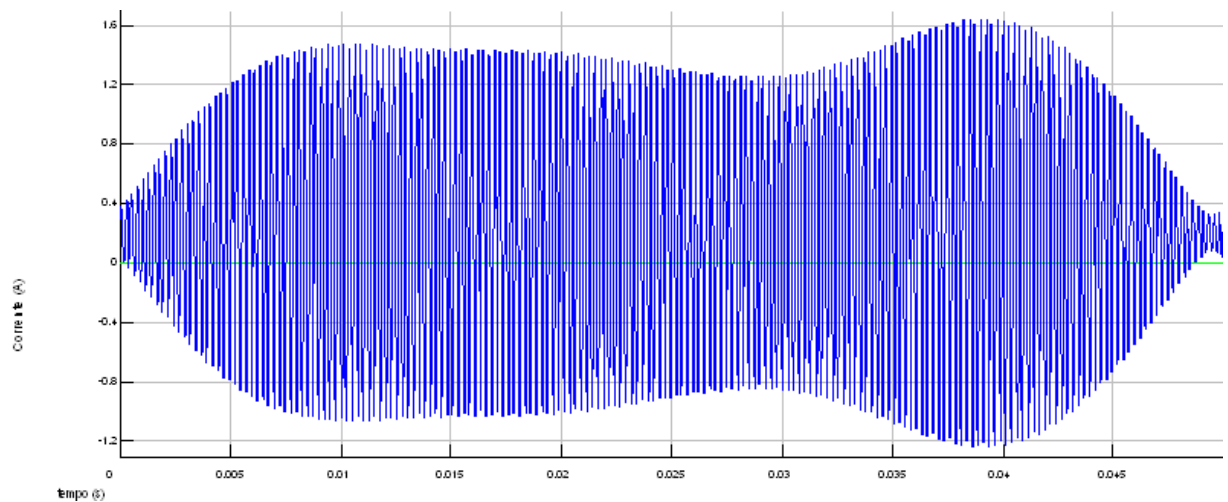


Figura 4.18 – Corrente no capacitor após filtragem

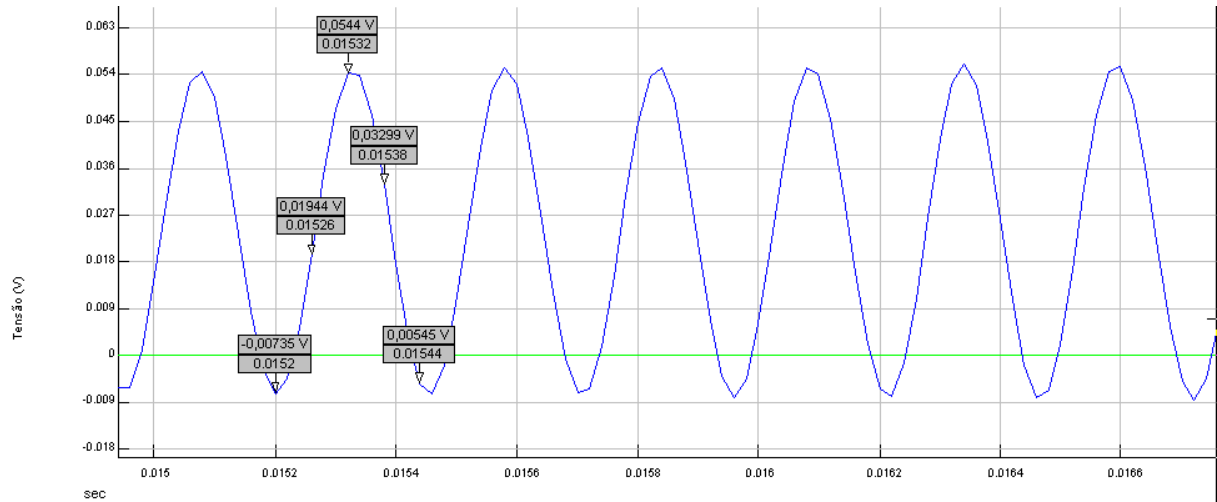


Figura 4.17(b) – “Zoom” da figura 4.17 - Cálculo tensão *rms* no capacitor (após filtro passa banda)

Método (*software Sigview*) executado para o cálculo da tensão *rms* sobre o capacitor, conforme equação 3.6, para os valores ilustrados na figura 4.17(a)

$$\tilde{V}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \tilde{v}_{dc}^2(k)}$$

$$\tilde{V}_{rms} = \sqrt{\frac{1}{5} (-0,00735^2 + 0,01944^2 + 0,0544^2 + 0,03299^2 - 0,00545^2)} = 31mV$$

O mesmo processo foi aplicado para determinar a corrente *rms* sobre o capacitor, conforme equação 3.7, resultando em  $I_{rms} = 829,0mA$

Sendo assim, conforme equação 4.5,  $ESR = \frac{V_{fs}}{I_{fs}}$ ,  $ESR = \frac{31mV}{890mA} = 37m\Omega$

De forma análoga, quando aplicado o mesmo raciocínio explicado neste tópico, para os outros 02 capacitores, obtêm-se os resultados apresentados na tabela 04.

Tabela 04 - Resultado para os 03 capacitores

Capacitor	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	ESR calculado(m $\Omega$ )	Valor medido capacitores (capacímetro $\mu$ F)
C1	0,0308	0,821	37,0	3364
C2	0,1077	1,161	92,2	3112
C3	0,1627	1,171	139,0	3017
$\sum ESR$			268,2	

Pode se notar que, de forma coerente, os capacitores 2 e 3 que tiveram maior valor de ESR, também apresentaram valores de capacitância menor.

Em uma montagem industrial em que o barramento c.c. é resultado da associação série e/ou paralelo de vários capacitores, a medição da corrente e da tensão em cada capacitor pode implicar em mudanças que afetam o funcionamento do conversor. Por este motivo, avaliamos o valor da ESR do conjunto de todos os capacitores do barramento c.c., neste caso da associação de 03 capacitores conectados em série.

As figuras 4.19 (a) e (b) apresentam, respectivamente, o sinal no tempo para a tensão do barramento c.c. e corrente dos capacitores, para o motor funcionando na velocidade nominal. As figuras 4.20 (a) e (b) mostram a análise espectral da tensão no barramento c.c. e da corrente nos capacitores para a mesma situação.

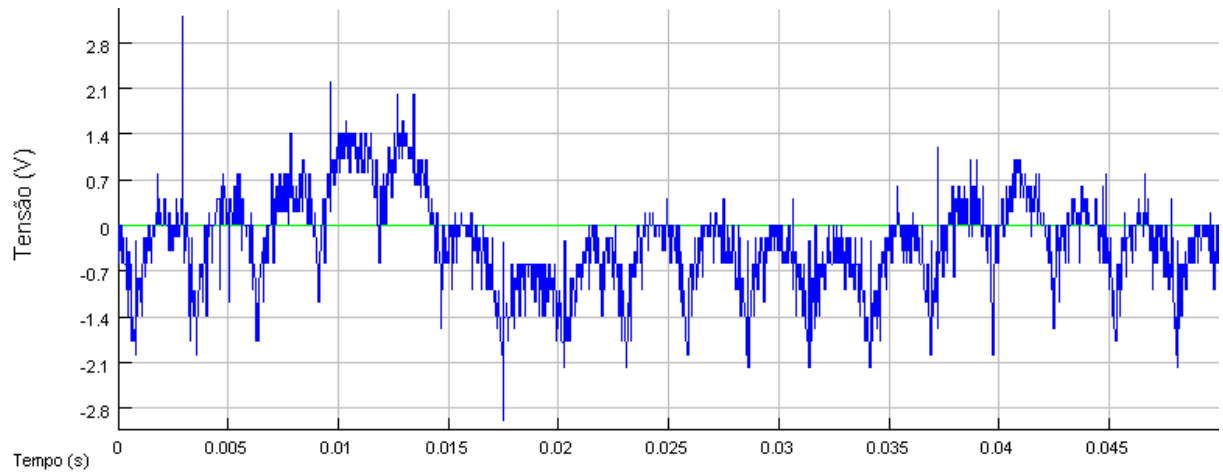


Figura 4.19 (a) – Tensão no barramento c.c.

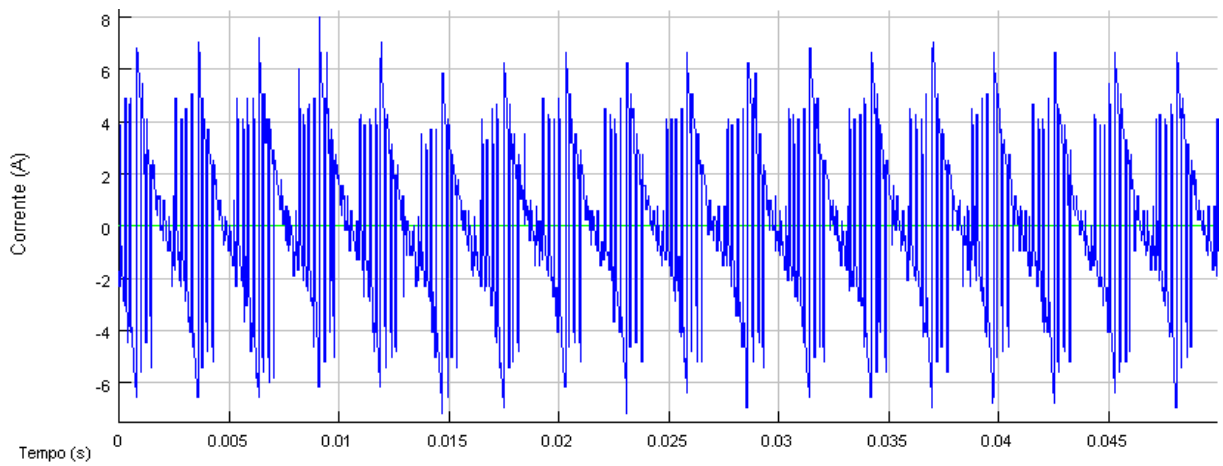


Figura 4.19 (b) – Corrente nos capacitores

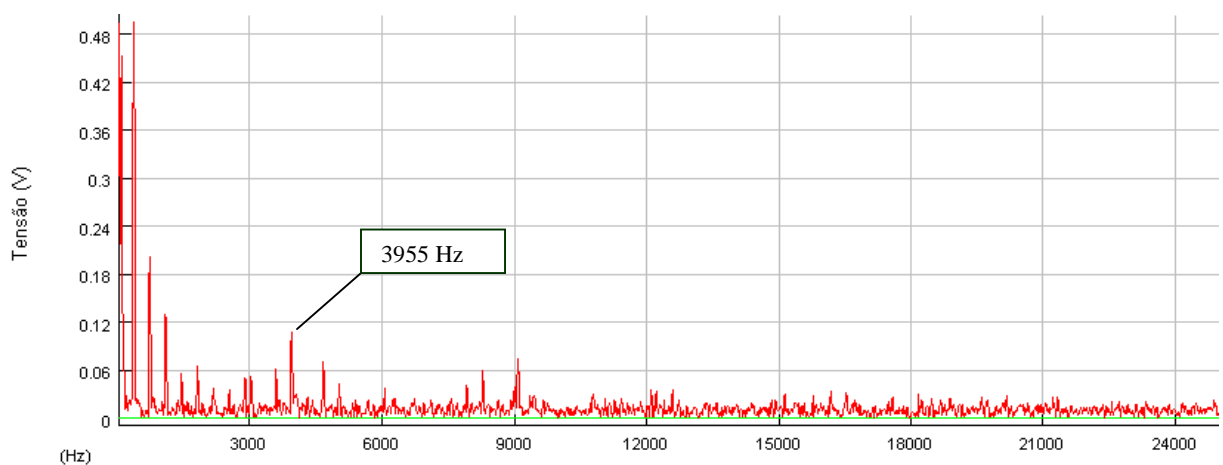


Figura 4.20 (a) – FFT do sinal de tensão do barramento c.c.

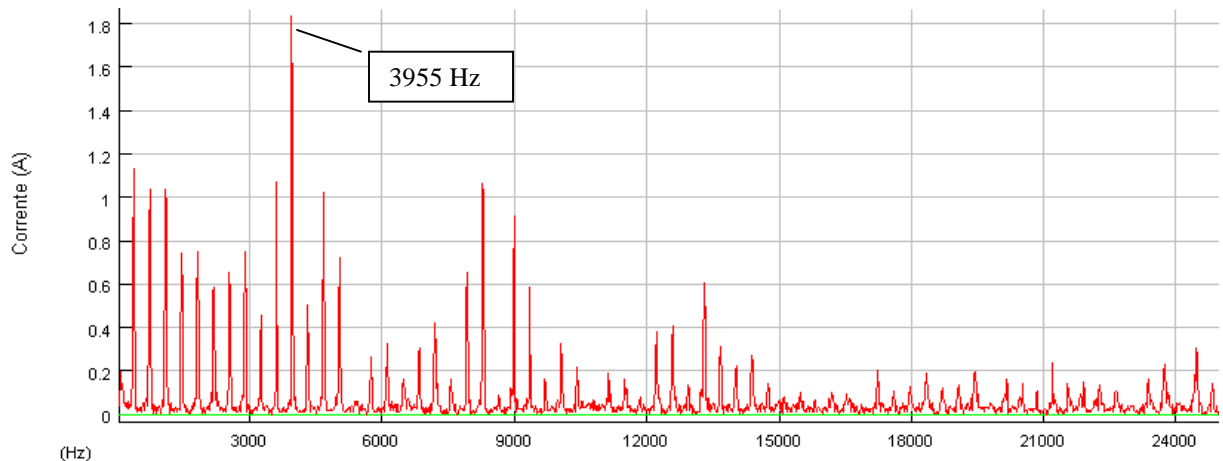


Figura 4.20 (b) - FFT do sinal de corrente dos capacitores

Aplicando o mesmo procedimento adotado na medição anterior, os valores obtidos para o conjunto de três capacitores em série são apresentados abaixo:

Tensão eficaz da componente harmônica de 3955Hz presente no barramento c.c.:

$$V_{rms} = 285mV$$

Corrente eficaz da componente harmônica de 3955Hz circulando pelos capacitores do barramento c.c.:

$$I_{rms} = 1,280A$$

Resultando em um valor de ESR igual a  $226m\Omega$ .

Pode se perceber que a diferença entre o valor de ESR resultante da medição do conjunto de três capacitores e o valor de ESR obtido pelo somatório das ESR individuais apresentado na tabela 4 é de 15% menor ( $42 m\Omega$ ). Apesar da diferença relativamente elevada isto não inviabiliza a aplicação do procedimento, já que o acréscimo relativo dos valores da ESR é que será utilizado para identificar e antecipar a falha nos capacitores. Outro fator que sustenta esta afirmação é que o valor da ESR pode ser até 6 vezes maior que o valor inicial, antes do capacitor entrar em falha [4].

Nas figuras 4.20(c) e 4.20(d) pode-se observar a defasagem entre corrente e tensão nos capacitores para as situações de frequência de chaveamento (3,9kHz) e frequência de entrada (360Hz) respectivamente. Nestas figuras é evidenciado a redução da defasagem entre corrente

e tensão para frequências mais elevadas, ou seja, a *ESR* é predominantemente resistiva, conforme também citado na análise do diagrama de Bode da figura 4.16.

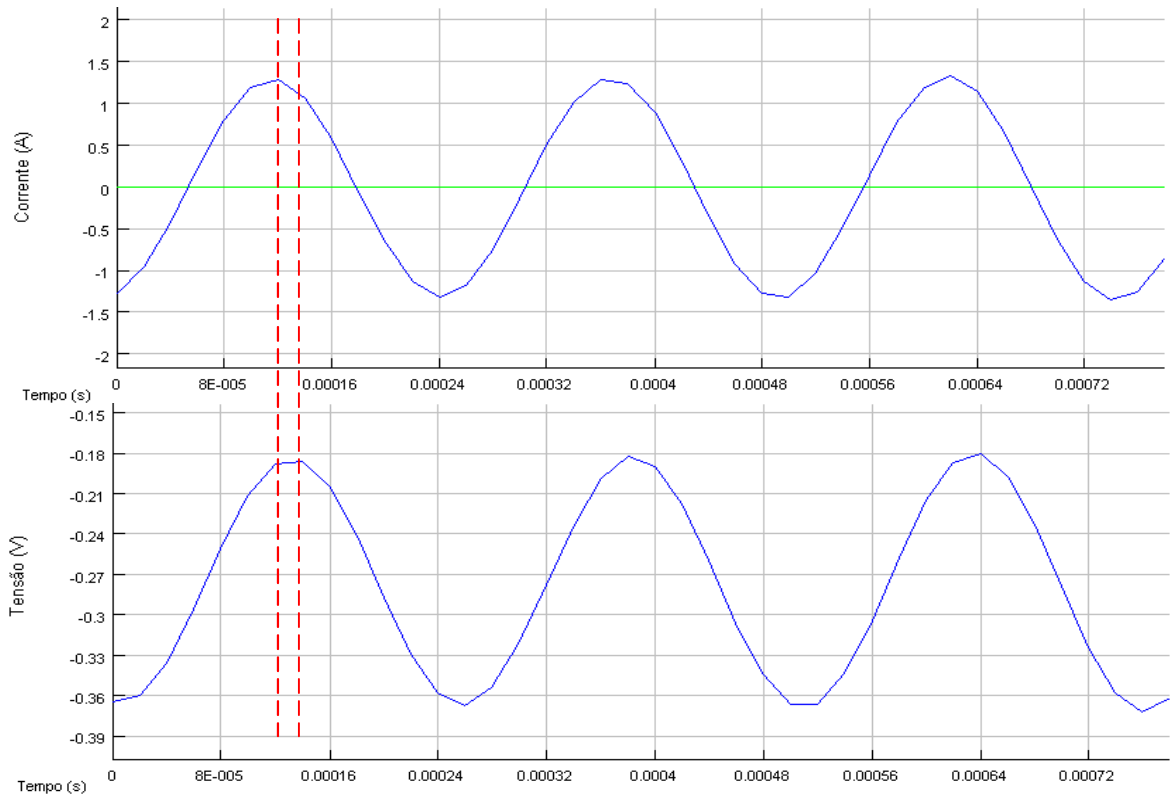


Figura 4.20 (c) - Defasagem entre corrente e tensão dos capacitores na frequência chaveamento (3,9kHz)

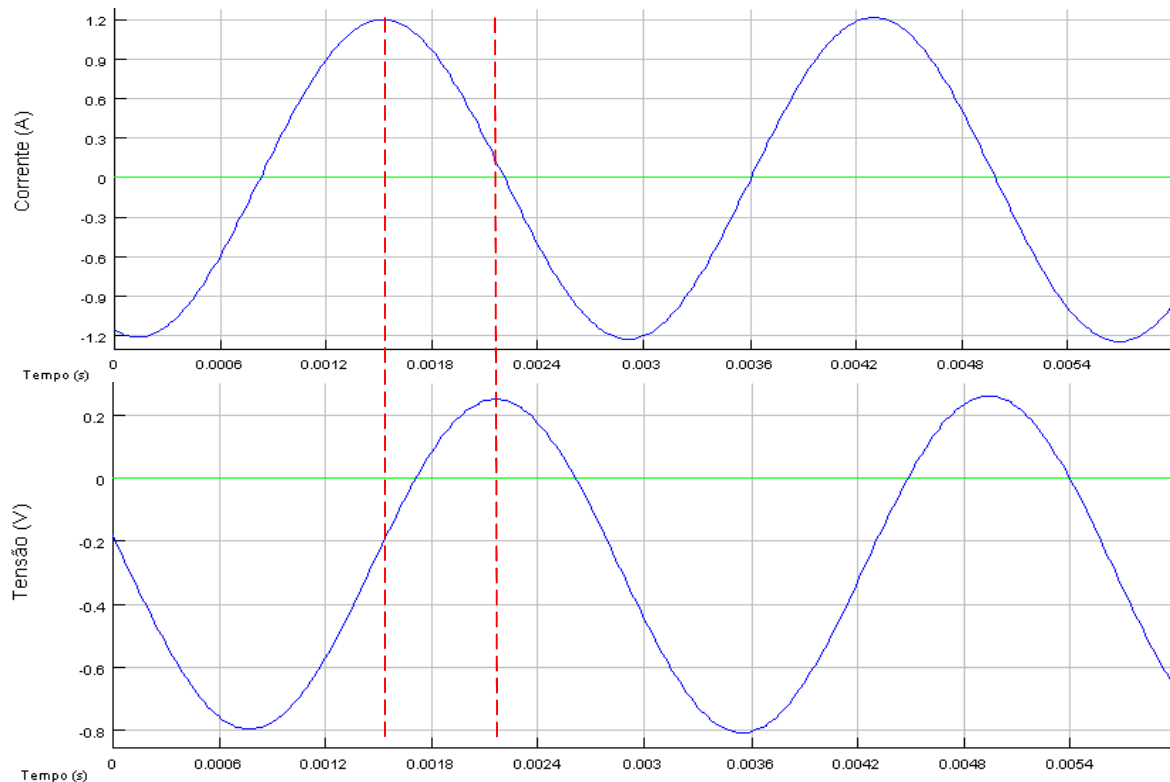


Figura 4.20 (d) - Defasagem medida entre corrente e tensão dos capacitores na frequência 360Hz

#### 4.2.2.2 ESR estimada na faixa de frequência do retificador de entrada

Baseado na resposta em frequência da impedância do capacitor eletrolítico apresentado na figura 4.16, a impedância do capacitor eletrolítico na faixa de baixa frequência é dominada por  $X_c$ , e na média frequência por  $ESR$ . Aplicando então o raciocínio anterior e filtrando os sinais de tensão e corrente no capacitor C1 de modo a obtermos os seus valores eficazes na frequência de 360Hz, é possível estabelecer o valor de sua capacitância. As figuras 4.21 e 4.22 mostram as formas de onda da tensão e da corrente no capacitor após a filtragem.

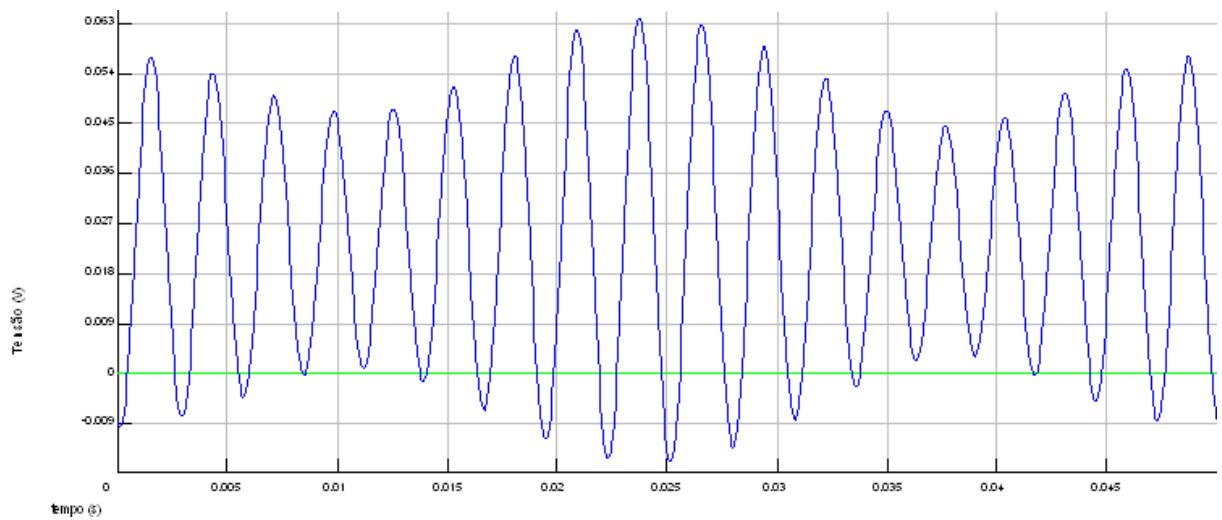


Figura 4.21– Filtro entre 330Hz e 390Hz do sinal da tensão no capacitor C1

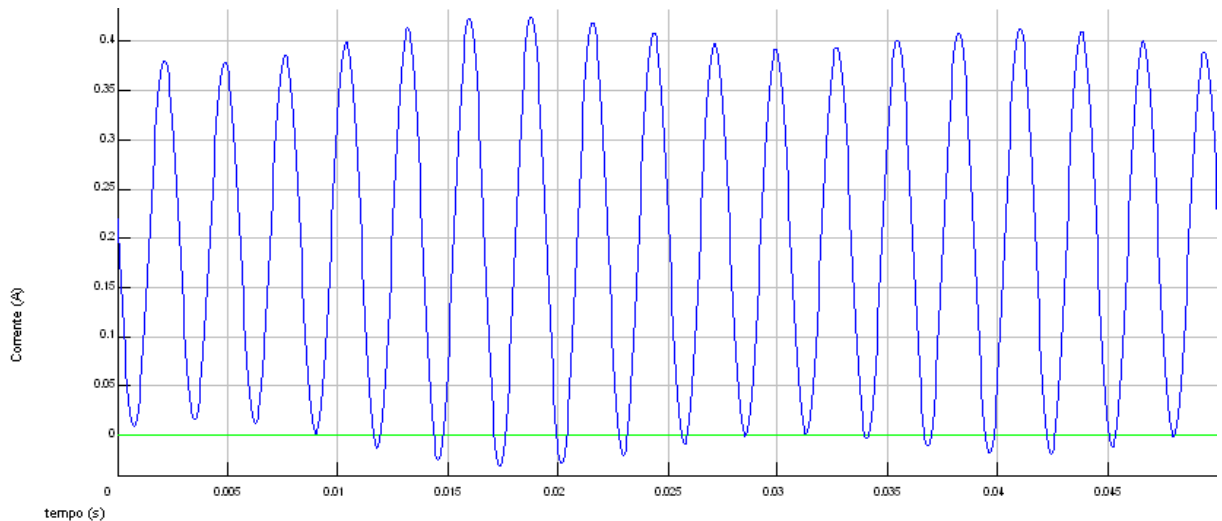


Figura 4.22 – Filtro entre 330Hz e 390Hz do sinal da corrente no capacitor C1

Na frequência de 360Hz, a impedância equivalente é de:

$$Z = \frac{32,08mV}{244mA} = 131,48m\Omega$$

Resultando em um valor de capacitor igual a 3364 $\mu$ F, igual ao valor medido com o capacitmetro. Este resultado demonstra mais uma maneira de se chegar com precisão, ao valor das capacitâncias dos capacitores de entrada, desta vez utilizando a corrente fornecida pelo barramento c.c.

Os capacitores eletrolíticos estão presentes nos barramentos c.c. de inversores de frequência e de Sistemas Ininterruptos de Energia e são altamente susceptíveis a falhas que podem causar paradas de linha de produção com prejuízos importantes para a indústria. Neste capítulo foi mostrado que é possível tecnicamente implementar um sistema de monitoramento da vida útil de um capacitor eletrolítico de alumínio. A metodologia apresentada permite avaliar a “saúde” do capacitor eletrolítico antes da ocorrência de uma falha e planejar a sua substituição em uma parada planejada para manutenção. Desta forma os custos de intervenção e as perdas de produção advindas de falhas destes componentes serão significativamente reduzidos.

Nas análises e testes realizados foi possível determinar o valor da *ESR* e o valor da capacitância a partir da medição da variação da tensão e da corrente no capacitor, parâmetros estes que indicam o estado de saúde do capacitor.

Os resultados obtidos permitiram confirmar que, devido a topologia utilizada na linha de produção estudada (vários inversores no mesmo barramento c.c.), a qualidade dos sinais de tensão e corrente fica comprometida quando se tem os outros conversores de frequência do processo em funcionamento simultâneo.

Para que se obtenha precisão e repetibilidade, já que as cargas existentes na linha de produção são variáveis, os testes devem ser realizados durante paralisação da produção para fins de manutenção preventiva ou de *setup* operacional. Devido ao baixo custo e facilidade de se medir a capacitância *C* usando o tempo de carga no momento de ligamento do inversor, este teste sugere que tal procedimento seja o início de uma inspeção condicional, que irá levar à medição do valor da *ESR*, como forma de consolidar um diagnóstico de falha.

## **CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO GERAL E PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

### **5.1 Relevância do tema**

Até o momento ainda não se tem muitos artigos que tratem este assunto, conforme pesquisas realizadas em fontes como o IEEE, sendo então mais comum encontrarmos artigos e trabalhos internacionais sobre o assunto. Nos países industrializados, cerca de 50% da energia é consumida por motores de indução trifásicos [33] e apesar da crescente aplicação de inversores de frequência nestes motores, a manutenção preditiva dos componentes destes inversores, em especial dos capacitores dos barramentos de corrente contínua, não cresceu ou não evoluiu da mesma forma. Este fato pode estar associado exatamente ao fato de que o meio acadêmico e os centros de pesquisas estão mais focados em desenvolvimento de novos produtos e novas características dos produtos já existentes. Porém para os profissionais das indústrias que aplicam estas novas tecnologias, a manutenção dos mesmos é um fator de grande relevância, quando se considera as elevadas perdas de produção ou riscos de segurança para as pessoas ou equipamentos envolvidos em falhas eletroeletrônicas.

### **5.2 Resultados práticos e próximos passos**

Este trabalho conseguiu trazer algumas pesquisas até então no campo acadêmico, para uma aplicação industrial, o que efetivamente permitirá uma evolução na maneira de se praticar a manutenção preditiva em inversores de frequência.

Os experimentos permitiram concluir que é possível acompanhar a vida útil dos capacitores, observando o valor de sua Resistência Série Equivalente (*ESR*) que pode se elevar em até 6 vezes até a falha do capacitor e do valor de sua Capacitância, sendo esta última de alteração menos importante (até 20% de redução). Para aplicação do método, recomenda-se então, devido facilidade de execução, monitorar o valor da capacitância do capacitor em uso e posteriormente, quando alterações significativas (~15% do valor inicial) começarem a acontecer, evoluir para a determinação da *ESR*.

Os sistemas de gestão de manutenção existentes no mercado permitem o acompanhamento da tendência histórica de valores resultantes de inspeção condicional, como resistência de

isolamento, corrente de trabalho, etc. Desta forma, o mesmo processo, quando aplicado para os valores coletado de *ESR* e *C*, irão permitir uma tomada de decisão com maior precisão. Esta análise irá subsidiar a abertura de ordens de serviço para inspeção individual dos capacitores e troca quando necessário.

### **5.3 Recomendações e trabalhos futuros**

Uma grande contribuição para previsibilidade de falha nos capacitores do barramento c.c. de inversores de frequência, é a inclusão dos cálculos dos valores da *ESR* e da Capacitância nos *DSP(Digital Signal Processor)* de novos conversores, permitindo uma indicação *on-line* e o envio de avisos e alarmes para os sistemas de supervisão, auxiliando na manutenção preditiva.

Esta sugestão é de grande interesse dos fabricantes, já que não implica em custos de hardware. Para os profissionais de manutenção que optarem por investir numa rotina de inspeção como a aqui descrita, é importante criar procedimentos documentados com parâmetros bem definidos, de forma que a fidelidade dos dados adquiridos e seu tratamento tenham sempre o mesmo padrão de execução, independente da diferença de habilidade entre executores. Ainda para facilitar este tipo de manutenção preditiva, o desenvolvimento de medidor de *ESR*[13] portátil de baixo custo se apresenta como uma alternativa viável, já que geralmente o inversor de frequência tem seu barramento c.c. disponível em régua de conexão externa, facilitando o acesso técnico em análise preditiva.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. M. Iman, “Condition Monitoring of Electrolytic Capacitors for Power Electronics Applications” Dissertation Georgia Institute of Technology, 2007
- [2] A. Kardec, J. Nascif, “Manutenção Função Estratégica” , Rio de Janeiro, 2º Edição, 2002
- [3] EPCOS, Aluminum Electrolytic Capacitors – General technical information, 2008
- [4] D.C. Lee, K.J. Lee, J.K. Seok and J.W. Choi, “On-Line Capacitance Estimation of dc Link Electrolytic Capacitor by Input Current Injection for ac/dc PWM Converters”, Paper on ISBN: 90-75815-07-7, Toulouse, EPE 2003
- [5] Military Handbook 217 F, “Reliability prediction of electronic equipment,” Feb. 28, 1995
- [6] F. Renken, “Analytic Calculation of the c.c.-Link Capacitor Current for Pulsed Three-Phase Inverters” Siemens VDO Automotive AG
- [7] V. A. Sankaran, F.L. Rees, C.S. Avant, “Electrolytic Capacitor Life Testing and Prediction” , IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997
- [8] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P. Viverge, “Failure Prediction of Electrolytic Capacitors During Operation of a Switch mode Power Supply” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 6, November 1998
- [9] M. L. Gasperi, “Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors, IEEE, 1996
- [10] A. M. Imam, T. G. Habetler, R. G. Harley, D. Divan, “Failure Prediction of Electrolytic Capacitor Using DSP methods”, IEEE 01453106 -2005
- [11] A. M. R. Amaral, A. J. Marques Cardoso, “Use of ESR to Predict Failure of Output Filtering Capacitors in Boost Converters”, IEEE, 2004
- [12] K. Harada, A. Katsuki, and M. Fujiwara, “Use of ESR for deterioration diagnosis of electrolytic capacitors”, IEEE Trans. Power Electron., vol.8, no. 4, pp. 355361, 1993.

- [13] A.M.R. Amaral, A. J. Marques Cardoso, “An ESR Meter for High Frequencies”, IEEE PEDS 2005.
- [14] J. W. Kola, T. M. Wolbank, M. Schrod, “Analytical Calculation of the RMS Current Stress on the c.c. Link Capacitor of Voltage c.c. Link PWM Converter Systems” Ninth International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication No. 468, IEEE, 1999
- [15] IEEE 00075202 – 1991 “Evaluation of Electrolytic Capacitors for High Peak Current Pulse Duty”
- [16] A. H. Wijenayake, D. H. Braun, M. L. Gasperi, T. P. Gilmore, D.C. Pixler, “Modeling and Analysis of dc Link Bus Capacitor and Inductor Heating Effect on AC Drives (Part I)”, IEEE Industry Application Society Annual Meeting , New Orleans, Louisiana, October 5-9, 1997
- [17] M. L. Gasperi, “Life prediction model for aluminum electrolytic capacitors,” *IEEE Thirty-First IAS Annual Meeting, IAS '96.*, New Orleans, LA., Vol. 3, 6-10 Oct. 1996 Pages: 1347 - 1351
- [18] M. L. Gasperi, “A method for predicting the expected life of bus capacitors,” in *IEEE Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97.*, San Diego, CA. , Vol. 2, 5-9, Oct. 1997, Pages:1042 - 1047
- [19] “Technical Guide of Aluminum Electrolytic Capacitor,” Panasonic, Matsushita Electronic Components Co Ltd, Capacitor Division, March 2000
- [20] P. Venet, A. Lahyani, P. J. Viverge, and G. Grellet, “Use of the output voltage of a switchmode power supply to predict failure of filtering electrolytic capacitors,” in *EPE'97 Proc.*, pp. 978–982, vol. 2, 1997
- [21] Cornell Dubilier, Liberty, SC 29657, “Aluminum Electrolytic Capacitors Application Guide,” <http://www.cde.com/catalogs/AEappGUIDE.pdf>, 2011

- [22] P. Venet, “Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method”, Eur. Phys. J. AP 5, 71- 83, 1999
- [23] ABB, ACV 700 Frequency Converters, Hardware Manual, 1997
- [24] ABB, ACV 700 Frequency Converters, Service Instructions, 1997
- [25] ABB, ACV 700 Frequency Converters, Installation Guide , 1997
- [26] ABB, ACV 700 Frequency Converters, General Instructions and Safety, 1997
- [27] ABB, ACV 700 Frequency Converters, Preventive Maintenance, 2003
- [28] SIGVIEW V.2.1, User Manual, 2010
- [29] HP3560A Portable Dynamic Signal Analyze, Operation and Service Guide, 1993
- [30] TEKTRONIX, TekScope™, User Manual, 1998
- [31] TEKTRONIX, WaveStar™ Software for Oscilloscopes, User Manual, 1997
- [32] K. Lee, M. Kim, J. Yoon, S. B. Lee and J. Y. Yoo, “Condition Monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in Adjustable-Speed Drives”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, No. 5, September/October 2008
- [33] J. Trovão, F. Ferreira, L. Francisco, J. Carvalho, “Efeitos da Frequência de Comutação de um Inversor PWM no Binário de um Motor de Indução Trifásico”, Lisboa, 2005
- [34] ICOTRON, Capacitores eletrolíticos de alumínio – Nota de aplicação

# APÊNDICE A: DIAGRAMA DE BLOCOS E ESPECIFICAÇÕES DO DRIVE ACV

700

Drive Sections

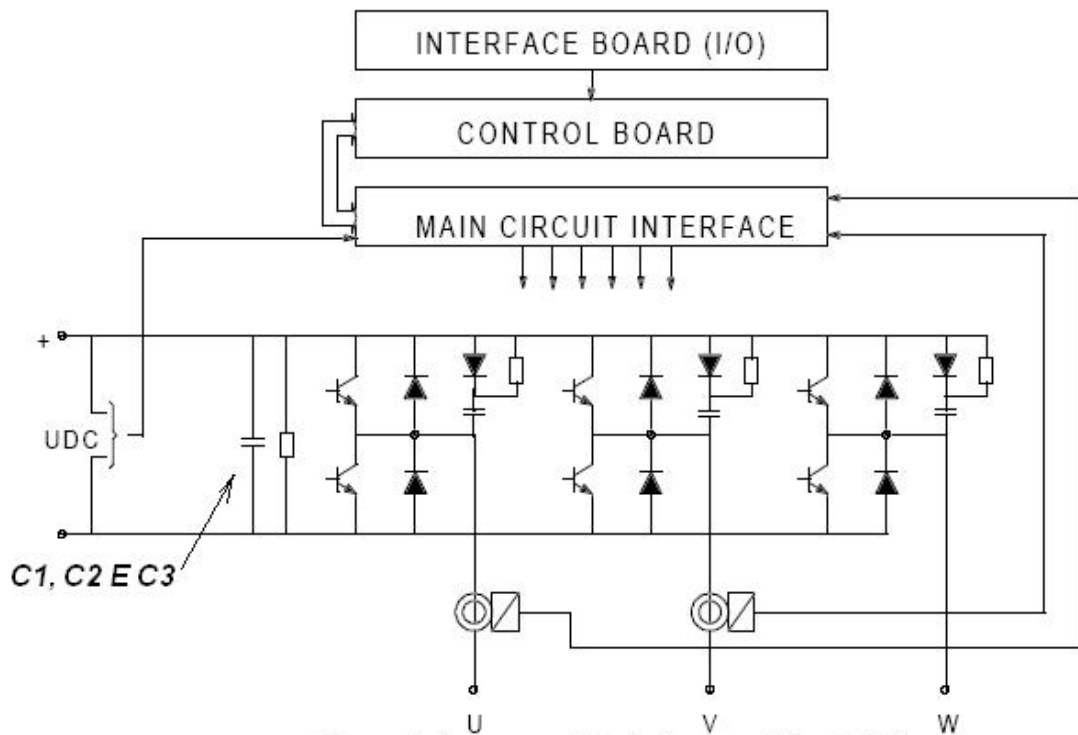


Figure 4 - 1

Block diagram of the IGBT inverter (61135961.drw).

TYPE 400 V (380, 415 V)	Nominal Current (A)	Short Overload (A)	Nominal Motor (kW)	OVERLOAD CAPACITY (A) 1)								
				DUTY CLASS 2		DUTY CLASS 3			DUTY CLASS 4			
				Cont.	150% 1 min	Cont.	150% 2 min	200% 10 s	Cont.	125% 2 h	200% 10 S	
ACV 701-0009-3M	13	19	5.5	13	19	10	14	19	10	12	19	

Type Designation	Frame Size	Unit Dimensions (without cubicle)			
		Width [mm]	Depth [mm]	Height [mm]	Weight [kg]
400 V (380, 415 V)					
ACV 701-0009-3	R4	300	310	507	20

## APÊNDICE B: ESPECIFICAÇÕES DOS CAPACITORES ABB

ABB Automation Technologies		<b>Working Instructions</b>		DOCWIACV70001	
Product Service		ACV 700			
Department:	Date:	Author:	Checked / Approved:	Revision:	Page:
TLC	11.4.2003	Ari Niskanen	Mikko Eskelinen	C	16 (32)

### ANNEX D ESR values of capacitors

#### ACV 700 (SAMI STAR) ELECTROLYTIC CAPACITOR MAX ESR VALUES

Location	C/ $\mu$ F	U/V	Code	Part Ident	ESR MAX
Capacitor battery	3300	350	09834613	C1.1...C4.13. (SAFUD/C51.1...C54.6 )	32 m $\Omega$ (20°C / 1kHz)
Capacitor battery	4700	350	09844678	C1.1...C4.13	24 m $\Omega$ (20°C / 1kHz)
Chopper of Inverter Unit (GTO)	4700	250	09834699	C9.1...C9.13	30 m $\Omega$ (20°C / 1kHz)
GTO-Inverter: PAC-Board Switch OFF capacitor	8800 / 6000	20 / 25	09833994	C41...C46	16 m $\Omega$ (20°C / 10 kHz)
GTO-Inverter: PAC-Board, Switch-ON capacitor. / GTR- Inverter: PAC- Board (only SAMI STAR)	330	40	09834087	C39, C40, C52, C53 / C1, C2	196 m $\Omega$ (25°C / 10 kHz)
Supply Unit- (+)24VDC supply	6800	63	09834184	C4	46 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	2200	350	60024022	C11, C12	86 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	4700	350	60023905	C11, C12	46 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	3300	350	10003199	C14.1 – 15.2	58 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	4700	350	10003181	C14.1 – 15.6	46 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	3400	280	60024235	C11 - 13	64 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	7300	280	60024251	C11 – 13	36 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)
Capacitor battery of Inverter Unit (IGBT)	7300	280	10003202	C14.1–16.2/C14.1 – 16.5	34 m $\Omega$ (20°C / 100 Hz)

It is strongly recommended to change electrolytic capacitors before actual ESR reaches ESR MAX value.

Please note that the estimated lifetime of the electrolytic capacitor after reaching the ESR MAX value is from 1000 to 5000 hours.

Initial ESR value is typically less than ESR MAX / 2. The average initial ESR value varies slightly between different manufacturers of capacitors.

## APENDICE C: ESPECIFICAÇÕES DOS CAPACITORES EPCOS



B43564, B43584

High ripple current – 85 °C

### Technical data and ordering codes

$C_R$	Case dimensions	$ESR_{typ}$ 100 Hz 20 °C mΩ	$ESR_{max}$ 100 Hz 20 °C mΩ	$Z_{max}$ 10 kHz 20 °C mΩ	$I_{AC,max}$ 100 Hz 40 °C A	$I_{AC,R}$ 100 Hz 85 °C A	$I_{AC,R(B)}$ 100 Hz 85 °C A	Ordering code (composition see below)
<b><math>V_R = 350</math> V DC</b>								
1500	51.6 × 80.7	62	93	74	17	6.2	11.8	B435*4C4158M000
2200	51.6 × 105.7	48	72	58	21	8.0	14.0	B435*4D4228M000
2700	64.3 × 80.7	39	59	47	24	8.8	17.5	B435*4A4278M00#
3300	64.3 × 105.7	32	48	38	29	11.0	19.0	B435*4D4338M00#
3900	64.3 × 105.7	28	42	34	31	11.6	21.0	B435*4A4398M00#
4700	64.3 × 143.2	25	38	30	34	12.8	19.4	B435*4C4478M00#
4700	76.9 × 105.7	25	38	30	34	13.1	25.0	B435*4B4478M00#
5600	76.9 × 105.7	22	33	26	38	14.2	28.0	B435*4A4568M00#
6800	76.9 × 143.2	19	29	23	43	16.0	26.8	B435*4A4688M00#
8200	76.9 × 168.7	15	23	18	53	19.8	30.5	B435*4B4828M00#
10000	76.9 × 220.7	13	20	16	57	23.0	32.0	B435*4A4109M00#
10000	91.0 × 144.5	13	20	16	58	21.5	37.4	B435*4B4109M00#
12000	76.9 × 220.7	11	17	13	57	26.2	36.8	B435*4A4129M00#
15000	91.0 × 221.0	9	14	11	80	29.9	44.2	B435*4A4159M00#
<b><math>V_R = 400</math> V DC</b>								
1500	51.6 × 80.7	62	93	74	17	6.4	12.8	B435*4A9158M000
2200	51.6 × 105.7	48	72	58	21	8.0	14.3	B435*4A9228M000
2200	64.3 × 80.7	48	72	58	21	7.9	15.2	B435*4B9228M00#
3300	64.3 × 105.7	36	54	43	27	9.9	17.6	B435*4A9338M00#
3900	76.9 × 105.7	29	44	35	32	11.8	21.5	B435*4A9398M00#
4700	76.9 × 105.7	23	35	28	37	13.8	26.8	B435*4A9478M00#
4700	91.0 × 97.0	23	35	28	40	15.1	32.0	B435*4B9478M00#
5600	76.9 × 143.2	21	32	25	40	15.0	24.7	B435*4A9568M00#
6800	76.9 × 143.2	18	27	20	46	17.1	29.7	B435*4A9688M00#
8200	91.0 × 144.5	15	23	18	53	19.8	33.6	B435*4A9828M00#
10000	76.9 × 220.7	12	18	14	57	24.7	34.3	B435*4A9109M00#
12000	91.0 × 221.0	10	15	12	74	27.6	40.0	B435*4A9129M00#

### Composition of ordering code

\* = Mounting style

- 6 = for capacitors with ring clip/clamp mounting
- 8 = for capacitors with threaded stud

# = Design

- 0 = for capacitors with standard inductance
- 3 = for capacitors with low inductance (13 nH) - only capacitors with diameter  $d \geq 64.3$  mm
- 7 = for heat sink mounting - only capacitors with diameter  $d \geq 64.3$  mm and without threaded stud

Please read *Cautions and warnings* and *Important notes* at the end of this document.

Page 10 of 20

## APENDICE D: DIAGRAMA DE SIMULAÇÃO NO PSIM

