

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Daniel Meireles da Costa

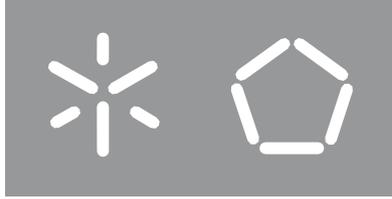
**Caracterização Elétrica de Barramentos Laminados
para *DC-links***

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Vitor Duarte Fernandes Monteiro
e do
Engenheiro Luiz Fernando Dias

Julho de 2022



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Daniel Meireles da Costa

**Caracterização Elétrica de Barramentos Laminados
para *DC-Links***

Dissertação de Mestrado
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica
Industrial e Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação do
Professor Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro
e do
Engenheiro Luiz Fernando Dias

Julho de 2022

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição-Não Comercial

CC BY-NC

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>

Guimarães, 18 de julho de 2022

(Tiago Daniel Meireles da Costa)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Vítor Duarte Fernandes Monteiro, a quem desejo expressar a minha gratidão pelo seu apoio, incentivo e crítica exigente que sempre manifestou.

Ao Eng. Luiz Fernando Dias pelo apoio e incentivo demonstrados durante o estágio curricular realizado no âmbito deste trabalho, na empresa Vishay Eletrónica Portugal, em Vila Nova de Famalicão.

À equipa de R&D, agradeço ter permitido a utilização dos laboratórios e equipamentos de medição, imprescindível para a validação das diferentes técnicas propostas.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Eletrónica da Escola de Engenharia da Universidade do Minho quero agradecer pelo incentivo e amizade.

Quero ainda agradecer aos meus pais e irmão, a quem nunca conseguirei retribuir todos os sacrifícios que, por mim, suportaram e, da mesma forma, o apoio incondicional que sempre me transmitiram nas horas de maior dificuldade.

Por fim, resta-me agradecer à minha noiva, a Catarina, pelos sacrifícios, paciência inesgotável e apoio incondicional sempre demonstrado ao longo da realização deste trabalho.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Guimarães, 18 de julho de 2022

(Tiago Daniel Meireles da Costa)

RESUMO

O crescente desenvolvimento de soluções para mobilidade elétrica e para a geração distribuída de energia elétrica, como a fotovoltaica, leva à procura por circuitos de eletrônica mais baratos, mais leves, mais eficientes e mais robustos. Os transistores de potência com tecnologias baseadas em *Silicon Carbide* (SiC) e *Gallium Nitride* (GaN) são resultado dessa evolução, suportando condições mais severas e alcançando níveis mais altos de eficiência através de perdas reduzidas durante a sua comutação, sendo esta mais rápida, de muitas dezenas a centenas de kHz.

O aumento da frequência de operação torna ainda mais rigorosos os requisitos sobre elementos parasitas, em particular a indutância parasita inerente ao banco de condensadores que constitui o *DC-link* dos inversores. Em aplicações atualmente em desenvolvimento, esses requisitos têm sido geralmente abaixo de 10 nH e até “sub-nano” para aplicações específicas.

Ao longo deste documento, será discutida em profundidade a indutância parasita de condensadores de filme implantados como *DC-links*, como descrevê-los através de um modelo matemático (melhorando o tempo de desenvolvimento de novos produtos) e soluções de desenho para minimizar a sua indutância equivalente. Estas soluções são validadas com a construção de amostras reais testadas em laboratório.

No decurso da dissertação, na Vishay Eletrónica Portugal (VEP), foi elaborado um estudo relativo aos *DC-links* com condensadores de filme de baixa indutância. Foi criado um modelo de cálculo de indutância de acordo com a geometria dos conjuntos de condensadores, e ainda um conjunto de diretivas para orientar a futura construção dos conjuntos de condensadores.

Foram desenhados oito protótipos de *DC-link*, através das ferramentas de *software* SolidWorks e Paint3D que foram posteriormente construídos na Vishay, com o objetivo de verificar a influência da utilização dos princípios de mitigação de indutância e a fiabilidade do modelo de cálculo elaborado. Foram obtidos resultados experimentais que permitiram elaborar um artigo que descreve o trabalho realizado pelo autor ao longo da dissertação de mestrado.

PALAVRAS-CHAVE

CIRCUITO EQUIVALENTE, CONDENSADORES DE FILME, *DC-LINK*, INDUTÂNCIA PARASITA, INVERSORES.

ABSTRACT

The increasing adoption of electric vehicles and distributed generation, such as photovoltaic, lead to the demand of cheaper, lighter, more efficient, and robust circuits. Power switches based on *Silicon Carbide* (SiC) and *Gallium Nitride* (GaN) are a result of this evolution, withstanding harsher conditions and reaching higher levels of efficiency through a faster switching, from many dozens to hundreds of kHz.

Increasing the operation frequency turns the requisites over parasitic elements even more strict, in particular the stray inductance inherent to the capacitor bank that constitutes the inverters' DC-link. In applications currently under development, these requisites have been usually below 10 nH and even “sub-nano” for specific applications.

In this text, it will be discussed in depth the parasitic inductance of film capacitors deployed as DC-links, how to mathematically describe them (improving new products development time) and design solutions to minimize the total inductance of the set. These solutions are validated with the construction of real samples tested in laboratory.

During the dissertation, at Vishay Eletrónica Portugal (VEP), a study was carried out on DC-links with low inductance film capacitors. An inductance calculation model was created according to the geometry of the capacitor sets, as well as a set of directives to guide the future construction of the capacitor sets.

Eight DC-link prototypes were modeled, using Paint3D and SolidWorks software, which were later built at Vishay, to verify the influence of the use of inductance mitigation principles and the reliability of the calculated calculation model. Through the obtained experimental results, an article was prepared that describes the work carried out by the author throughout his master's dissertation.

KEYWORDS

DC-LINK, EQUIVALENT CIRCUIT, FILM CAPACITORS, INVERTERS, PARASITIC INDUCTANCE

ÍNDICE

Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract.....	v
Índice de Figuras.....	ix
Índice de Tabelas.....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiv
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento.....	2
1.2. Motivação.....	2
1.3. Objetivos.....	2
1.4. Contribuições Relevantes.....	3
1.5. Estrutura.....	3
2. Estado da Arte Sobre <i>DC-links</i>	5
2.1. <i>DC-link</i> em Conversores de Eletrónica de Potência.....	5
2.2. Condensadores de Filme.....	11
2.2.1. Estimação de Parâmetros.....	11
2.2.2. Medida de Parâmetros (Caracterização).....	13
2.3. Princípios de Mitigação da Indutância Parasita.....	14
2.3.1. Cancelamento.....	15
2.3.2. Contenção.....	15
2.3.3. Compensação.....	16
2.4. Exemplos do Estado da Arte de <i>DC-link</i> com Condensadores de Filme.....	16
3. Descrição Matemática de <i>DC-links</i>	18
3.1. Campo Eletromagnético.....	18
3.2. Condensadores.....	19
3.3. Barramentos e Terminais Sobrepostos.....	20
3.4. Terminais Afastados.....	21
3.5. Configurações de Montagem e Geometria.....	21

3.5.1.	Ligações dos Condensadores	22
3.5.2.	Disposição Horizontal e Vertical	22
3.5.3.	Acoplamento de Indutâncias	23
3.6.	Modelo de Cálculo de Indutância	24
4.	Metodologia para Mitigação de Indutância	25
4.1.	Ensaio em Barramentos.....	25
4.2.	Ensaio em Condensadores Individuais.....	26
4.3.	Ensaio em Barramentos com Condensadores	27
4.4.	Ensaio aos Princípios de Mitigação de Indutância	29
4.4.1.	Princípio da Compensação.....	29
4.4.2.	Princípio do Cancelamento	30
4.4.3.	Princípio da Contenção	31
4.4.4.	Princípios de Compensação e Cancelamento	32
4.4.5.	Princípios de Compensação e Contenção.....	32
4.4.6.	Princípios de Contenção e Cancelamento.....	33
4.5.	Protótipo Final.....	34
5.	Resultados Experimentais.....	37
5.1.	Medidas de Barramentos.....	37
5.2.	Medidas de Condensadores Individuais.....	39
5.3.	Medidas de Barramentos com Condensadores	40
5.4.	Medidas dos Princípios de Mitigação de Indutância	41
5.4.1.	Princípio da Compensação.....	41
5.4.2.	Princípio do Cancelamento	43
5.4.3.	Princípio da Contenção	44
5.4.4.	Princípios de Compensação e Cancelamento	46
5.4.5.	Princípios de Compensação e Contenção.....	48
5.4.6.	Princípios de Contenção e Cancelamento.....	49
5.5.	Modelo de Cálculo.....	50
5.6.	Análise de Resultados.....	53
5.7.	Definição das Diretivas	53

5.8. Protótipo Final Desenvolvido	54
6. Conclusão	56
6.1. Conclusão.....	56
6.2. Perspetivas Futuras.....	57
Referências Bibliográficas	58
Anexos	61
I. Conceitos teóricos.....	61
Condensador	61
Indutância	61
Campo Eletromagnético	62
Acoplamento de Indutâncias	62
Mitigação da Indutância Parasita.....	63
II. Outras formas de obtenção do valor de indutância	65
Cálculo através da Tensão Induzida.....	65
Cálculo através da Frequência de Oscilação Natural	65
III. Ensaio Preliminares.....	67
Analisador de Impedâncias	67
Barramentos Simples.....	67
Condensadores Individuais.....	70
IV. Procedimento Interno Elaborado	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Crescimento da frota de automóveis elétricos a nível mundial de 2010 a 2021, retirado de [1].	1
Figura 2 – Topologias de inversores AC-AC E DC-AC, retirado de [3], [4].	5
Figura 3 – Resultados de simulação no software PSIM - valor da tensão e corrente ao longo do tempo para condensador de 1000 μF .	6
Figura 4 – Resultados de simulação no software PSIM - valor da tensão e corrente ao longo do tempo para condensador de 10000 μF .	6
Figura 5 – Custo relativo das diferentes partes do inversor, retirado de [7].	7
Figura 6 – Circuito equivalente do condensador de filme, adaptado de [9].	7
Figura 7 – Circuito equivalente do condensador de filme simplificado, adaptado de [9].	8
Figura 8 – Comparação das principais tecnologias de condensadores utilizadas nos DC-links, retirado de [13].	8
Figura 9 – Exemplo de Condensadores eletrolíticos de alumínio 094 PME-SI Vishay.	9
Figura 10 – Exemplo de condensador cerâmico DSCC 05002 Vishay.	9
Figura 11 – Exemplo de Condensador de filme MKP 1848 Vishay.	10
Figura 12 – Exemplo de DC-link com barramentos laminados, retirado de [21].	11
Figura 13 – Ilustração do enrolamento das fitas de filme.	11
<i>Figura 14 – Condutor cilíndrico de comprimento l e raio r.</i>	12
<i>Figura 15 – Par de condutores de comprimento l e raio r separados por uma distância d.</i>	12
<i>Figura 16 – Condutor plano de comprimento l largura w e espessura t.</i>	13
<i>Figura 17 – Par de condutores planos de comprimento l largura w separados por uma distância d.</i>	13
Figura 18 – Resposta em frequência para a medição de um condensador - Impedância e Resistência em função da frequência.	14
Figura 19 – Disposição das armaduras e terminais dos condensadores cerâmicos de baixa indutância da AVX, retirado de [29].	15
Figura 20 – Valor da indutância relativo e absoluto em função do número de condensadores em paralelo, retirado de [20].	16
Figura 21 – Comparação entre o antigo e o novo modelo de conjunto de condensadores de filme de baixa indutância da TDK, retirado de [30].	17

Figura 22 – Conjunto de condensadores de filme de baixa indutância da WIMA, retirado de [31].	17
Figura 23 – Esquemático do condensador de filme e as suas variáveis características.....	20
Figura 24 – Exemplo de barramento e terminais sobrepostos e variáveis características.	20
Figura 25 – Exemplo de terminais afastados e variáveis características.	21
Figura 26 – Exemplo de ligação dos condensadores e características geométricas.	22
Figura 27 – Dois condensadores em disposição horizontal.....	23
Figura 28 – Dois condensadores em disposição vertical.....	23
Figura 29 – Circuito equivalente simplificado do modelo de cálculo da indutância.	24
Figura 30 – Conjunto de terminais, sem sobreposição.	26
Figura 31 – Barramento totalmente sobreposto.	26
Figura 32 – Condensador simples com dois terminais planos.	27
Figura 33 – Modelo de barramento com condensadores dispostos na vertical e sem oposição. 28	
Figura 34 – Modelo de barramento com condensadores dispostos na vertical e com oposição. 28	
Figura 35 – Conjunto de terminais, sem sobreposição (a), com sobreposição (b).	29
Figura 36 – Barramento, com sobreposição de 50% (a), com sobreposição de 100% (b).....	30
Figura 37 – Conjuntos de condensadores, sem oposição Sam-6C (a), com oposição Opo-6C (b).	30
Figura 38 – Condensador de 52 mm (a) Conjunto de dois condensadores de 27,5 mm (b) Conjunto de dois condensadores de 52 mm (c).	31
Figura 39 – Conjuntos de condensadores, sem sobreposição Sim-6C (a), com sobreposição Opo- 6C (b).	32
Figura 40 – Conjuntos de condensadores, sem sobreposição Sim-1C (a), com sobreposição Sam- 6C (b).	33
Figura 41 – Conjuntos de condensadores, sem inversão Sam-6C (a), com inversão Opo-6C (b).	34
Figura 42 – Protótipo P1-Marc – Seis condensadores em linha com retorno de corrente junto a cada condensador.	35
Figura 43 – Protótipo P2-MBISG-mod – Doze condensadores em duas linhas com rede central e oposição do sentido de corrente.	35
Figura 44 – Protótipo P3-Copos – Seis condensadores inseridos no barramento com copos de ligação aos terminais.	36

Figura 45 – Conjunto de terminais elaborado para o teste.	37
Figura 46 – Barramento totalmente sobreposto utilizado no ensaio.	38
Figura 47 – Condensadores individuais utilizados no ensaio.	39
Figura 48 – Barramento com seis condensadores sem oposição de polaridades.	40
Figura 49 – Barramento com seis condensadores com oposição de polaridades.	41
Figura 50 – Conjuntos de terminais utilizados no ensaio, sem sobreposição (a), com sobreposição (b).	42
Figura 51 – Barramentos utilizados no ensaio, 50% sobreposto (a), 100% sobreposto (b).	42
Figura 52 – Sam-6C - Barramento com seis condensadores sem alternância de polaridades. ...	43
Figura 53 – Opo-6C - Barramento com seis condensadores com alternância de polaridades. ...	44
Figura 54 – Condensador de 25 μF com 52 mm de comprimento.	45
Figura 55 – Conjunto de dois condensadores de 12,5 μF e 27 mm de comprimento.	45
Figura 56 – Conjunto de dois condensadores de 12,5 μF e 52 mm de comprimento.	45
Figura 57 – Sim-6C - Barramento sem sobreposição com seis condensadores sem alternância de polaridades.	47
Figura 58 – Opo-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores em alternância de polaridades.	47
Figura 59 – Sim-1C - Barramento sem sobreposição com um condensador.	48
Figura 60 – Sam-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores sem alternância de polaridades.	48
Figura 61 – Sam-1C - Barramento sobreposto com um condensador.	49
Figura 62 – Opo-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores em alternância de polaridades.	50
Figura 63 – Exemplo de calculo de indutância através do modelo elaborado.	52
Figura 64 – P2-MBISG-mod - Protótipo final elaborado.	55
Figura 65 – Circuito equivalente do condensador de filme simplificado.	61
Figura 66 – Representação do campo eletromagnético produzido por uma corrente elétrica. ...	62
Figura 67 – Sinal de corrente amortecido para um circuito RLC série.	65
Figura 68 – Barramento I.	68
Figura 69 – Barramento II.	68
Figura 70 – Barramento III.	69
Figura 71 – Protótipo de terminais em forma de copo.	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidades e tensões utilizadas em inversores de diferentes veículos elétricos.....	10
Tabela 2 – Dimensões do conjunto de terminais sem sobreposição.....	26
Tabela 3 – Dimensões do barramento totalmente sobreposto.....	26
Tabela 4 – Dimensões dos condensadores utilizados no ensaio.	27
Tabela 5 – Características dos barramentos utilizados nos testes.	28
Tabela 6 – Características dos condensadores utilizados nos testes.	28
Tabela 7 – Dimensões do conjunto de terminais sem sobreposição (a).....	29
Tabela 8 – Dimensões do conjunto de terminais totalmente sobreposto (b).	29
Tabela 9 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste do princípio de Compensação.....	30
Tabela 10 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste do princípio do Cancelamento. ...	30
Tabela 11 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste do princípio do Cancelamento.	31
Tabela 12 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste do princípio da Contenção.	31
Tabela 13 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Compensação e Cancelamento.	32
Tabela 14 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Compensação e Cancelamento.	32
Tabela 15 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Compensação e Contenção.....	33
Tabela 16 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Compensação e Contenção.....	33
Tabela 17 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Cancelamento e Contenção.....	34
Tabela 18 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Cancelamento e Contenção.....	34
Tabela 19 – Dimensões dos condensadores utilizados no protótipo P1-Marc.	35
Tabela 20 – Dimensões dos condensadores utilizados no protótipo P2-MBISG-mod.....	36
Tabela 21 – Resultados obtidos para o ensaio ao conjunto de terminais e barramento de dimensões reduzidas.	38

Tabela 22 – Resultados obtidos para o ensaio ao conjunto de terminais e barramento de dimensões reduzidas.	38
Tabela 23 – Valor de indutância obtido para diferentes condensadores da Vishay.	40
Tabela 24 – Resultados da medição de barramentos com condensadores.	41
Tabela 25 – Resultados obtidos no ensaio do princípio da compensação.	42
Tabela 26 – Resultados obtidos no ensaio do princípio do cancelamento.	44
Tabela 27 – Resultados obtidos no ensaio do princípio da contenção.	46
Tabela 28 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de compensação e cancelamento.	47
Tabela 29 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de compensação e contenção.	49
Tabela 30 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de contenção e cancelamento.	50
Tabela 31 – Resultados obtidos através do modelo de cálculo para quatro topologias em estudo.	51
Tabela 32 – Resultados dos ensaios aos princípios de mitigação de indutância parasita.	53
Tabela 33 – Valor de indutância medido e calculado do Protótipo P2-MBISG-mod.	55
Tabela 34 – Resultados obtidos no analisador de impedâncias para os barramentos um, dois e três.	69

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>	Conversor de Analógico para Digital
Al	<i>Aluminium</i>	Alumínio
AVX	<i>Aerovox Corporation</i>	
CSI	<i>Current Source Inverter</i>	Inversor Fonte de Corrente
DC	<i>Direct Current</i>	Corrente Contínua
DUT	<i>Device Under Test</i>	Dispositivo em Teste
ESL	<i>Equivalent Series Inductance</i>	Indutância Série Equivalente
ESR	<i>Equivalent Series Resistance</i>	Resistência Série Equivalente
GaN	<i>Gallium Nitride</i>	Nitrato de Gálio
Hz	<i>Hertz</i>	
LCR	<i>Inductance Capacitance Resistance</i>	Indutância Capacidade Resistência
MKP	<i>Metallized Polypropylene Film</i>	Filme de Polipropileno Metalizado
MLC	<i>Multilayer Ceramic</i>	Cerâmico Multicamada
MPPF	<i>Metallized Polypropylene Film</i>	Filme de Polipropileno Metalizado
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>	Placa de Circuito Impresso
PSIM	<i>Power Simulation</i>	
R&D	<i>Research and Development</i>	Investigação e Desenvolvimento
SiC	<i>Silicon Carbide</i>	Carbeto de Silício
TDK	<i>Tokyo Denki Kagaku Corporation</i>	
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>	Fonte de Alimentação Ininterrupta
VEP	<i>Vishay Eletrónica Portugal</i>	
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>	Inversor Fonte de Tensão
WIMA	<i>WIMA Corporation</i>	

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das tecnologias dos semicondutores ao longo dos anos fez aumentar a exigência em termos de desempenho de outros componentes que constituem o circuito, em particular o *DC-link*, trazendo enormes desafios às empresas que os fabricam. Desta forma, os componentes que integram o mesmo circuito que os semicondutores, tal como os condensadores, têm requisitos técnicos muito exigentes para que, quando associados aos semicondutores, consigam desempenhar corretamente a sua função. Pelo facto de estes equipamentos serem instalados em veículos e em casas, surge a necessidade de os tornar mais compactos e mais leves, bem como reduzir o seu custo. Ao conseguirem trabalhar em frequências elevadas, torna-se necessário minimizar a indutância parasita dos condensadores de filme para que estes consigam desempenhar corretamente a sua função.

O crescimento exponencial da mobilidade elétrica, como denota o gráfico da Figura 1, que ascende aos 16 milhões de veículos em 2021, e a micro geração de energia elétrica com fontes renováveis, como por exemplo os painéis solares fotovoltaicos, surge associada a este contexto, uma vez que a sua crescente utilização, com produtos cada vez mais eficientes, faz aumentar a procura por novas tecnologias de semicondutores para os inversores utilizados nestes produtos [1].

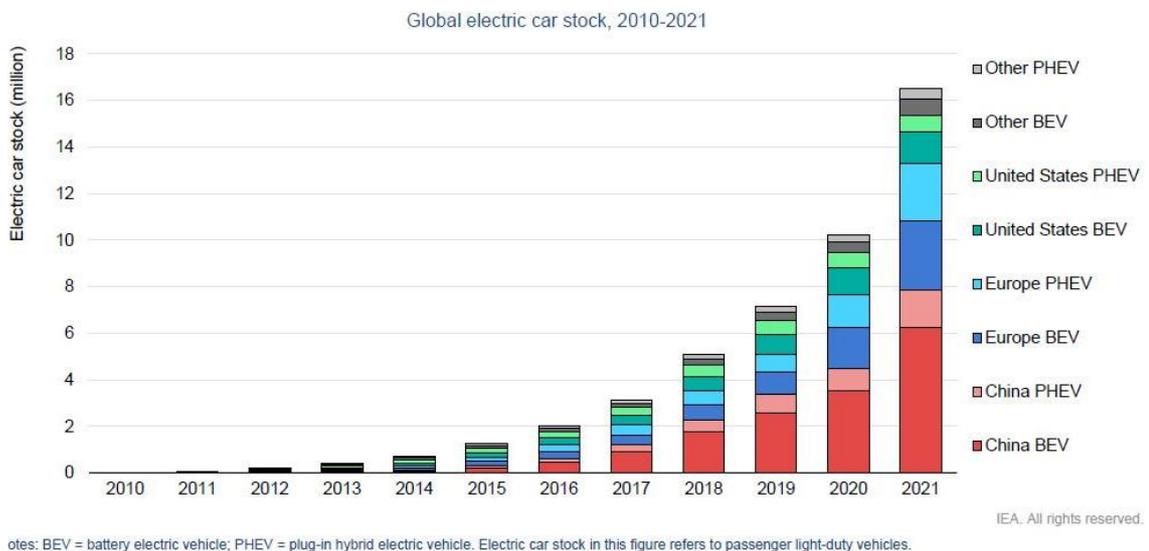


Figura 1 – Crescimento da frota de automóveis elétricos a nível mundial de 2010 a 2021, retirado de [1].

1.1. Enquadramento

O presente documento descreve o trabalho realizado pelo autor ao longo do desenvolvimento da sua dissertação de mestrado, inserida no plano de estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Eletrónica Industrial e Computadores, enquanto membro do grupo de investigação e desenvolvimento de produto (R&D) da Vishay Eletrónica Portugal (VEP). Este trabalho aborda a questão da indutância parasita dos conjuntos de condensadores de filme, produzidos para integrar o *DC-link* dos inversores utilizados na indústria automóvel e na produção de energia solar fotovoltaica.

1.2. Motivação

Este trabalho é motivado pela necessidade de desenvolver um modelo de cálculo para estimar o valor de indutância parasita mínimo que se consegue obter de acordo com o volume e disposição dos terminais, de forma que seja possível prever o valor de indutância para uma dada geometria, reduzindo o custo e o tempo do desenvolvimento. Existe também a necessidade de verificar experimentalmente quais as melhores práticas a adotar na mitigação do problema, que serão posteriormente transformadas em diretivas de construção dos conjuntos de condensadores.

1.3. Objetivos

O trabalho tem como objetivo lato o desenvolvimento de ferramentas de cálculo da indutância parasita presente nos conjuntos de condensadores incluindo barramentos laminados, caso existam, e ainda a definição de diretivas de construção do conjunto de condensadores que permitam minimizar o valor da indutância. Tendo isto em conta são de seguida discriminadas as metas que se pretendem atingir:

- i) Elaboração de modelo matemático para estimar a indutância de duas placas paralelas.
- ii) Elaboração de modelo matemático para estimar a indutância de barramentos de conjuntos de condensadores.
- iii) Elaboração de modelo matemático para estimar a indutância de barramentos laminados de acordo com a disposição dos condensadores.
- iv) Elaboração de um protótipo com valores de indutância parasita reduzidos.

- v) Criação de diretivas de construção de conjuntos de condensadores com indutância parasita reduzida.

1.4. Contribuições Relevantes

Este trabalho incide sobre uma das características mais críticas, exigidas aos condensadores de filme, e as suas conclusões podem ser diretamente incorporadas nas fases preliminares do desenho de novos produtos, reduzindo os custos de prototipagem e o tempo de desenvolvimento. Globalmente, as diretivas aqui apresentadas visam a produção de circuitos mais eficientes e robustos, características chave para a transição energética em curso. Assim, esta dissertação posiciona-se como uma contribuição para a evolução tecnológica, nomeadamente no desenvolvimento de inversores com perdas reduzidas.

As contribuições mais relevantes decorrentes do trabalho efetuado foram:

- O estudo do estado da arte relativo aos condensadores de filme de baixa indutância.
- Uma ferramenta de cálculo de indutância de acordo com a geometria do conjunto de condensadores.
- As diretivas de construção, com vista à redução do período de desenvolvimento e minimização do custo de elaboração de protótipos (orientações para a elaboração de protótipos de indutância reduzida).
- O resumo dos benefícios do uso de cada princípio e combinação destes (pontos chave para minimizar a indutância para atender os requisitos de um cliente).

1.5. Estrutura

Este trabalho encontra-se dividido em seis capítulos. No primeiro capítulo são apresentados o enquadramento em que se realizou esta dissertação, as motivações que levaram à escolha e desenvolvimento deste tema, os objetivos que se pretendem atingir com a realização deste trabalho e as principais contribuições que se esperam dar com o mesmo a este ramo de investigação.

No segundo capítulo, são dissertados alguns conceitos teóricos fundamentais à compreensão deste trabalho como o condensador de filme, os métodos de estimação e medida dos seus

parâmetros, bem como as diretivas para a minimização da indutância, apresentando-se também o estado da arte desta área de investigação e alguns exemplos existentes no mercado.

No terceiro capítulo, apresenta-se a análise matemática, do ponto de vista da indutância, feita a cada secção do conjunto de condensadores, de forma a ser possível entender a sua contribuição para o valor final e a sua interação com os elementos constituintes do conjunto.

No quarto capítulo apresentam-se as metodologias aplicadas na realização da dissertação, bem como a descrição dos protótipos e dos testes realizados aos mesmos.

No quinto capítulo, encontram-se descritos os resultados dos testes realizados, tanto ao modelo de calculo, como aos protótipos. Apresentam-se também as diretivas de construção elaboradas de acordo com os resultados obtidos e um protótipo final realizado de acordo com as diretivas.

Por último, no sexto capítulo, são apresentadas as conclusões da realização do trabalho, bem como as perspetivas de trabalhos futuros.

Nos anexos deste documento encontram-se descritos alguns conceitos teóricos que dão suporte ao tema desta dissertação, pelo que se sugere a sua leitura para uma melhor compreensão dos assuntos retratados ao longo deste trabalho.

2. ESTADO DA ARTE SOBRE *DC-LINKS*

2.1. *DC-link* em Conversores de Eletrônica de Potência

O *DC-link* é uma terminologia que identifica o barramento de tensão contínua, existente em diferentes topologias de conversores. Os exemplos ilustrados na Figura 2 mostram o *DC-link* (em vermelho) antes do estágio de conversão. O estágio de retificação nem sempre está presente pois existem situações em que a energia provém de fontes de tensão contínua, como por exemplo as baterias e conversores DC-DC dos painéis solares fotovoltaicos. Este conjunto de condensadores, normalmente ligados ao módulo de potência através de barramentos laminados, têm como função principal compensar as rápidas (e limitadas) variações de corrente resultantes da comutação dos semicondutores que originam os *ripples* de tensão [2].

Este princípio pode ser observado na Figura 3 e Figura 4, onde se utilizou o *software* PSIM para demonstrar o efeito da capacidade no *ripple* da tensão do barramento DC de um inversor que alimenta um motor trifásico. Através dos resultados de simulação observa-se uma diminuição do valor do *ripple* para um aumento da capacidade, tornando o uso do condensador indispensável para a mitigação do problema. Para controlar o valor de tensão no barramento são utilizadas diversas técnicas de controlo, sendo que, algumas pressupõem a utilização de um condensador por forma a reduzir o valor do *ripple* da tensão.¹

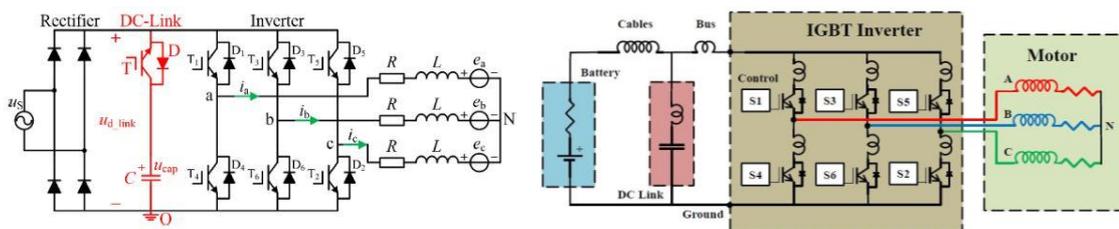


Figura 2 – Topologias de inversores AC-AC E DC-AC, retirado de [3], [4].

¹ Existem também técnicas de controlo do barramento DC que dispensam a utilização de condensadores, denominadas de *capacitor-less*, em inversores fonte de corrente (CSI). Estas garantem uma corrente constante no barramento DC com recurso a semicondutores, bobinas indutoras, e complexos algoritmos de controlo.

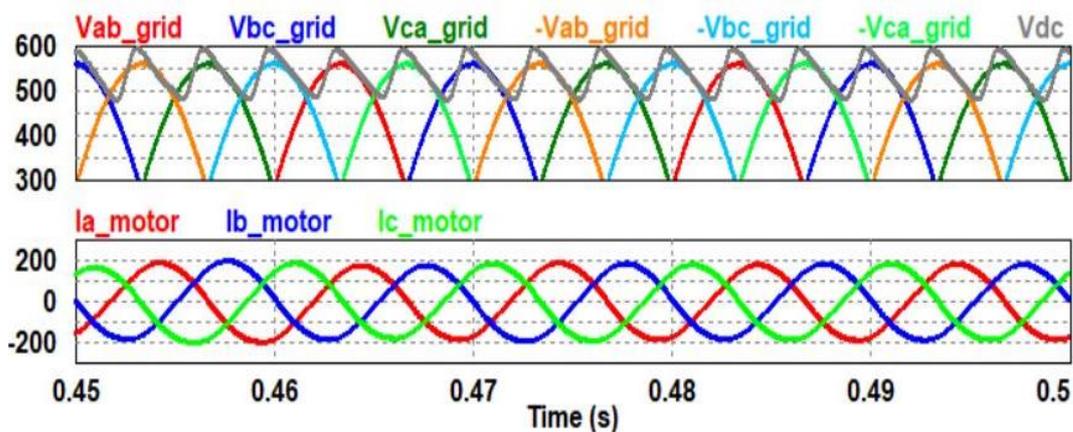


Figura 3 – Resultados de simulação no software PSIM - valor da tensão e corrente ao longo do tempo para condensador de 1000 μF .

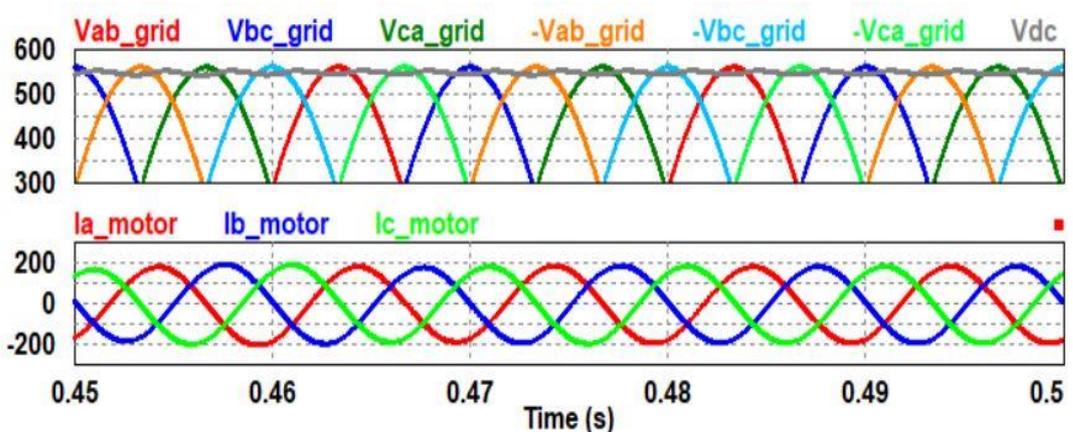


Figura 4 – Resultados de simulação no software PSIM - valor da tensão e corrente ao longo do tempo para condensador de 10000 μF .

O condensador é constituído por dois condutores planos, designados por armaduras, sobrepostas e separadas por um material isolador, designado de dielétrico, formando, quando lhe é aplicado um sinal de tensão, um campo elétrico no qual se acumulam cargas elétricas [5]. Apesar de idealmente ser descrito apenas pela sua principal função, este tem também outras características parasitas que maioritariamente estão relacionadas com os materiais utilizados na sua construção, tanto no dielétrico, como nas superfícies condutoras e terminais. Existem diversos modelos para descrever o comportamento do condensador, sendo que, estes diferem entre si na sua complexidade e número de comportamentos descritos, descrevem fenómenos como por exemplo o *dielectric absorption*, que representa a aptidão de um condensador para recuperar carga após uma ligeira descarga [6].

A escolha das técnicas de controlo do barramento DC revela o balanço entre a qualidade de forma de onda e o volume ou custo do inversor. Sendo que, o condensador representa cerca de 14% do custo total do inversor [7] como mostra a Figura 5, torna-se necessária à sua otimização para

minimizar o custo. No que diz respeito ao volume a solução com condensadores no *DC-link* tem cerca de metade do volume em relação à solução com bobinas, o que a torna numa solução preferencial [8].

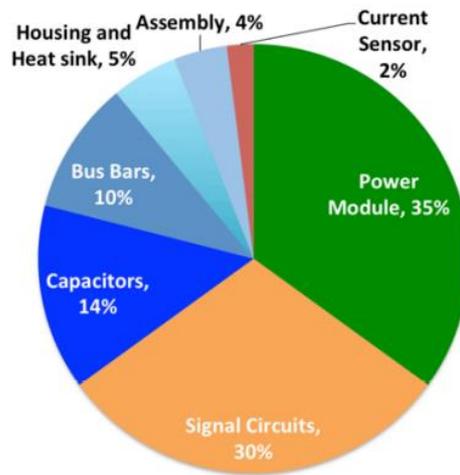


Figura 5 – Custo relativo das diferentes partes do inversor, retirado de [7].

Na Figura 6 é possível ver o circuito equivalente comumente aplicado para representar o condensador de filme, que prevê os principais fenómenos, composto por um condensador ideal (C), uma indutância em série (L_{ESL} do inglês *Equivalent Series Inductance*), e duas resistências, uma em série (R_{ESR} – *Equivalent Series Resistance*), e a outra em paralelo (R_p) com o condensador ideal. [9]

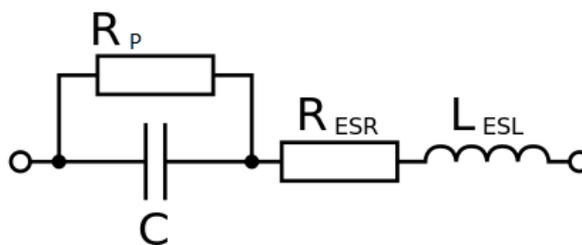


Figura 6 – Circuito equivalente do condensador de filme, adaptado de [9].

Para determinar o valor da capacidade (C) é utilizada a equação 1 que relaciona a capacidade do condensador com a área (A) sobreposta das armaduras e a distância (d) entre ambas, preenchida pelo dielétrico, tendo em conta a sua permissividade (ϵ).

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

Relativamente aos elementos parasitas, é necessário recorrer a analisadores de impedância, ou pontes LCR, para encontrar o valor da resistência série e da indutância série em função da

frequência, que pode variar dos poucos Hz até aos MHz. O ponto de ressonância é caracterizado pela equivalência entre as reatâncias indutiva e capacitiva.

O valor da resistência em paralelo pode ser medido através da corrente de fuga, quando o condensador está sujeito a uma tensão constante, após a sua carga [10]. Para as considerações a desenvolver neste trabalho, o valor da resistência em paralelo é significativamente elevado o que não afeta as apreciações feitas na sua ausência, sendo por isso desconsiderado, tornando o modelo do condensador mais simplificado como mostra a Figura 7 [9].

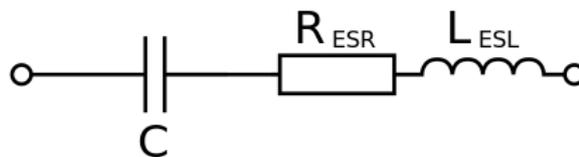


Figura 7 – Circuito equivalente do condensador de filme simplificado, adaptado de [9].

Na construção dos *DC-links* são usadas, principalmente, três tecnologias, ou tipos, de condensadores distintos: os eletrolíticos de folha de alumínio (Al), os cerâmicos (MLC), e os de filme (MPPF), sendo esta distinção feita pelo tipo de dielétrico utilizado na construção de cada condensador [11], [12]. Na Figura 8 estão descritas as características que destacam as diferentes tecnologias de condensadores utilizadas nos *DC-links*.

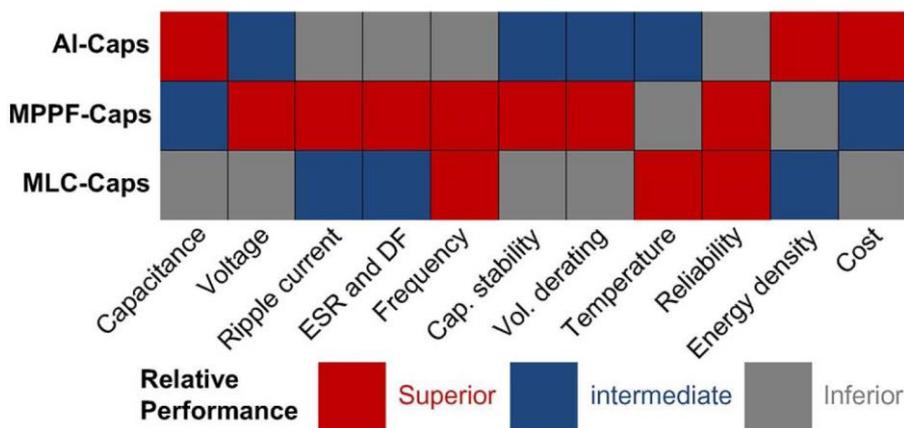


Figura 8 – Comparação das principais tecnologias de condensadores utilizadas nos *DC-links*, retirado de [13].

Os condensadores eletrolíticos de alumínio, observáveis na Figura 9, têm como principal vantagem a sua densidade volumétrica, ou seja, são capazes de armazenar uma dada quantidade de carga elétrica num espaço mais reduzido, por outro lado, têm como principal desvantagem a sua resistência série parasita e o seu tempo de vida útil, devido à baixa robustez do seu dielétrico.

São utilizados, essencialmente, em aplicações DC, como por exemplo, fontes de alimentação comutadas, UPS, barramento DC de acionamentos eletromecânicos, desfibriladores e equipamentos de multimédia.



Figura 9 – Exemplo de Condensadores eletrolíticos de alumínio 094 PME-SI Vishay.

Os condensadores cerâmicos, observável na Figura 10, têm como principal característica a sua baixa indutância parasita, o que os torna particularmente úteis em aplicações onde a frequência se situa na ordem dos GHz, tendo como principal desvantagem a sua densidade volumétrica. São muito utilizados em circuitos ressonantes [14].

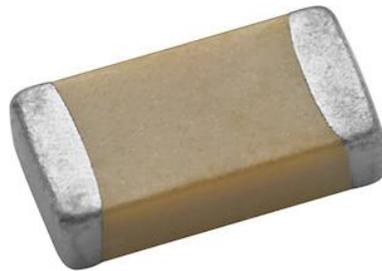


Figura 10 – Exemplo de condensador cerâmico DSCC 05002 Vishay.

No caso dos condensadores de filme, observável na Figura 11, a sua principal vantagem é o fenómeno *self-healing* onde, na ocorrência de uma rutura no dielétrico, causada por falhas construtivas ou picos de tensão, o calor libertado pelo arco elétrico evapora a metalização removendo e isolando as condições de curto-circuito, em tempos inferiores a 10 μ s [15].

Como as suas características elétricas são adequadas para circuitos que trabalham a frequências na ordem das dezenas de kHz, e possuem uma característica distinta que lhes permite ser tolerante a falhas conferindo-lhe uma expectativa de vida útil que alcança a centena de milhar de horas de operação, tornam-se na tecnologia mais utilizada para a construção dos *DC-links* [12].



Figura 11 – Exemplo de Condensador de filme MKP 1848 Vishay.

Nas aplicações que exijam maior robustez, como no setor automóvel, são utilizados conjuntos de condensadores de filme em paralelo para permitir um aumento do seu valor de capacidade, com elevada expectativa de vida útil².

Na Tabela 1 pode observar-se o valor da capacidade e tensão dos conjuntos de condensadores utilizados para diferentes veículos elétricos [16], [17].

Tabela 1 – Capacidades e tensões utilizadas em inversores de diferentes veículos elétricos.

Veículo	Capacidade no <i>DC-link</i>	Tensão no <i>DC-link</i>
BMW i3	475 μF	355 V
Jaguar iPace	600 μF	500 V
Nissan Leaf	1186,5 μF	360 V
Tesla Model S	1200 μF	366 V

Para construir as ligações entre os terminais dos condensadores são, vulgarmente, utilizadas chapas metálicas, constituídas essencialmente por cobre, devido às suas características elétricas, formando assim os barramentos. Devido ao efeito pelicular, em que a corrente elétrica circula em maior concentração junto do limite exterior do condutor, que se agrava com o aumento da frequência, é comum existirem barramentos feitos de ligas de metais, banhados por cobre, para que a superfície seja a parte mais condutora [18]. Na Figura 12 é possível ver um modelo de *DC-link* com barramentos laminados [4], [19], [20].

² É possível construir um *DC-link* com um único condensador com a mesma capacidade, mas isso inviabiliza a sua utilização, pois não suporta elevadas temperatura por longos períodos e o seu valor de indutância também pode limitar a sua aplicação.



Figura 12 – Exemplo de *DC-link* com barramentos laminados, retirado de [21].

2.2. Condensadores de Filme

São construídos através da sobreposição de duas fitas de filme plástico onde foi depositada uma fina camada de metal, por exemplo alumínio e zinco, num processo denominado de metalização, formando as armaduras. A sua sobreposição é ligeiramente desfasada, para que cada terminal faça ligação a apenas uma armadura. Nos extremos do condensador, onde serão ligados os terminais, é adicionada uma camada de metal através da sua pulverização a aproximadamente 80° Celsius. Posteriormente são soldados aos barramentos, ou são-lhes adicionados segmentos de fio de cobre pré estanhado para aplicação em placa de circuito impresso (PCB). A Figura 13 mostra o enrolamento das fitas que compõem o condensador, e a disposição dos terminais nos topos do condensador que lhe confere uma ligação equipotencial a toda a armadura.

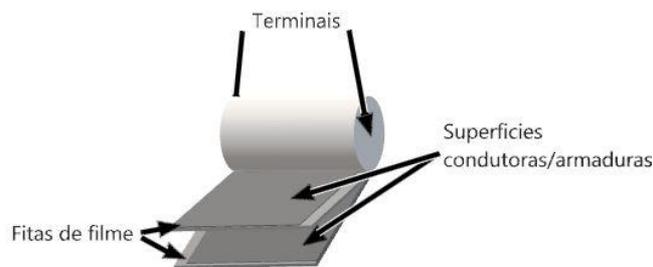


Figura 13 – Ilustração do enrolamento das fitas de filme.

2.2.1. Estimação de Parâmetros

Os parâmetros dos conjuntos de condensadores (*DC-links*) podem ser estimados através de equações matemáticas que relacionam as dimensões com as características dos materiais utilizados na sua construção. O valor da capacidade e resistência parasita dos condensadores está associado com as dimensões das armaduras e com o perfil de metalização utilizado e pode ser calculado através de uma proporcionalidade direta. Já o valor da indutância parasita pode ser

estimado através das leis de Maxwell, onde através da geometria, e considerando uma distribuição uniforme da corrente, é possível determinar o valor da indutância [22], [23]. Estes cálculos têm de ter em consideração diferentes topologias e segmentos de condutores tornando as seguintes equações (2 a 5) distintas, onde:

- L representa o valor da indutância;
- μ_0 representa a permeabilidade no vácuo com um valor de $4\pi \times 10^{-7}$ H/m;
- l representa o comprimento;
- w representa a largura;
- t representa a espessura;
- r representa o raio;
- d representa a distância entre os condutores.

O valor da indutância do barramento é obtido por aproximação pois depende da corrente elétrica que o atravessa, por ser equipotencial em toda a extensão forma-se correntes de *loop*, tornando difícil determinar com exatidão o valor da indutância [24].

Condutor redondo:

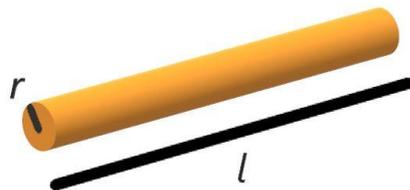


Figura 14 – Condutor cilíndrico de comprimento l e raio r .

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[\ln \left(\frac{2l}{r} \right) - \frac{3}{4} \right] \quad (2)$$

Condutores redondos com retorno próximo;

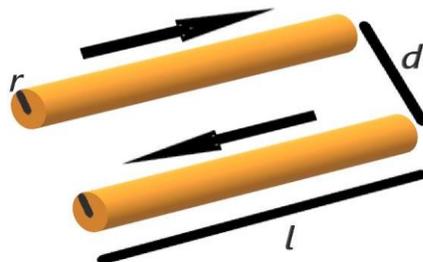


Figura 15 – Par de condutores de comprimento l e raio r separados por uma distância d .

$$L \approx \frac{\mu_0}{\pi} l \left[\ln \left(\frac{d}{r} \right) \right] \quad (3)$$

Condutor plano;

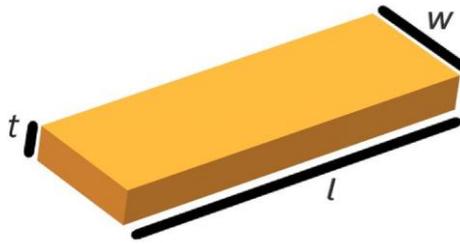


Figura 16 – Condutor plano de comprimento l largura w e espessura t .

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + \frac{1}{2} + 0.2235 \left(\frac{w+t}{l} \right) \right] \quad (4)$$

Condutor plano com retorno próximo;

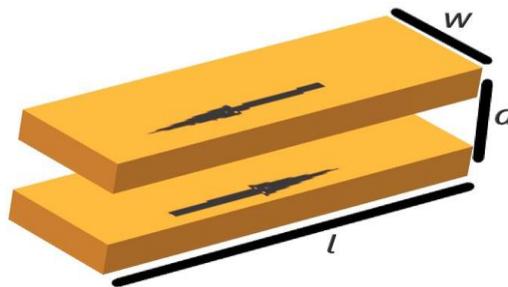


Figura 17 – Par de condutores planos de comprimento l largura w separados por uma distância d .

$$L \approx \mu_0 l \frac{d}{w} \quad (5)$$

2.2.2. Medida de Parâmetros (Caracterização)

Para a medição dos conjuntos de condensadores, são utilizados analisadores de impedância (LCR *meter*), que fazem a caracterização pela resposta em frequência dos diferentes componentes. Existem equipamentos com princípio de funcionamento analógico que utilizam amplificadores operacionais para obter os valores de tensão e corrente em relação a um elemento de referência. Mas há também equipamentos digitais que leem os sinais de tensão e corrente com auxílio de ADC e fazem os cálculos dos valores dos componentes.

Na curva Z da Figura 18 é possível ver a impedância característica de um condensador. Na fase descendente, predomina a reactância capacitiva do modelo equivalente da Figura 7, na fase ascendente predomina a reactância indutiva causada pela indutância parasita. O ponto onde a impedância é mais baixa é denominado ponto de ressonância, onde as reactâncias se anulam e,

portanto, a única componente da impedância que resta é a resistiva, e é por isso que as curvas de impedância e ESR se encontram neste ponto [10].

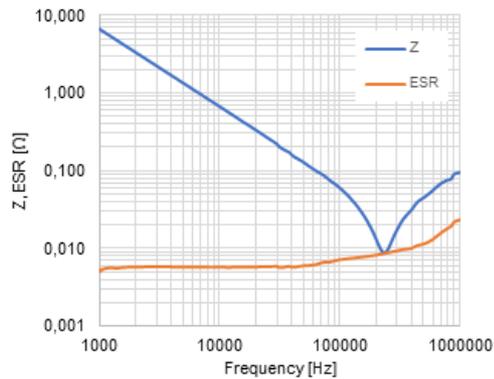


Figura 18 – Resposta em frequência para a medição de um condensador - Impedância e Resistência em função da frequência.

A análise gráfica permite perceber que o valor da resistência série R_{ESR} aumenta ligeiramente com a frequência, sendo que o seu valor é definido para a frequência de trabalho a que será sujeito. O valor da indutância L_{ESL} é encontrado para uma dada frequência assim como o valor da capacidade C^3 [10], [25], [26], [27].

Existem ainda outras técnicas de medição do valor da indutância através da tensão induzida e da frequência de oscilação natural que se encontram descritas no anexo II – Outras formas de obtenção do valor de indutância.

2.3.Princípios de Mitigação da Indutância Parasita

A indutância é uma propriedade dos condutores elétricos. Uma variação no fluxo de eletrões que passam por um condutor cria (induz) nele próprio e nos próximos uma força eletromotriz que se opõe à variação de corrente que a gerou. A indutância é uma consequência de duas leis da física:

- A Lei de Ampère, em que uma corrente constante que percorre um condutor cria um campo magnético constante à sua volta.
- A Lei de Faraday, em que um campo magnético variável induz uma tensão nos condutores próximos.

A indutância parasita é inevitável nos componentes reais, desta forma tornam-se úteis alguns princípios que visam minimizar os seus efeitos [24].

³ Na medição através de uma ponte LCR, antes da ressonância observa-se um valor de indutância negativo, o que significa que o valor da capacidade anula, matematicamente, o valor da indutância.

2.3.1. Cancelamento

O princípio de cancelamento baseia-se em sobrepor dois campos eletromagnéticos com direções opostas e magnitudes iguais de forma que o campo resultante seja nulo. É utilizado em condensadores cerâmicos como se observa na Figura 19, que mostra o estado da arte dos condensadores cerâmicos produzidos pela AVX onde, através da sobreposição das armaduras e dispendo os terminais de ambos os lados do condensador, se criam fluxos de corrente sobrepostos e em direções contrárias, fazendo com que o campo eletromagnético produzido por cada par de armaduras se anule aquando da carga e descarga do condensador.

Este princípio também pode ser aplicado aos conjuntos de condensadores de filme invertendo a polaridade entre os condensadores mais próximos, tendo em conta que existe uma distância mínima entre polaridades a respeitar para que não ocorra um curto-circuito, de acordo com a norma IEC 60664-1, que define as distâncias e critérios de isolamento, pois estes conjuntos de condensadores estão sujeitos a diferenças de potencial desde os quatrocentos aos novecentos Volts DC [28].

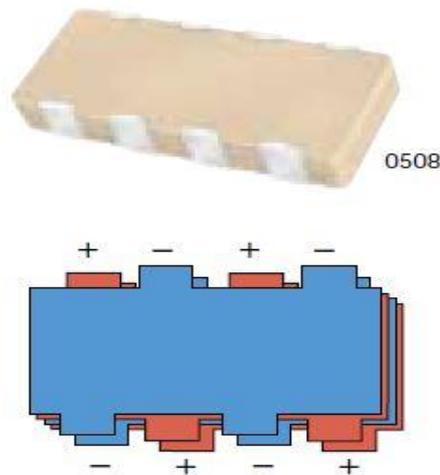


Figura 19 – Disposição das armaduras e terminais dos condensadores cerâmicos de baixa indutância da AVX, retirado de [29].

2.3.2. Contenção

A contenção de um campo eletromagnético tem como principal objetivo limitar a força eletromotriz induzida num circuito elétrico próximo, fazendo com que a indutância por ele produzida se limite ao espaço mais reduzido possível, não afetando outros componentes. Este princípio é empregue

na construção dos conjuntos de condensadores sempre que se opta pela colocação de vários condensadores ao invés de um único condensador, e ainda quando o seu comprimento é o mais reduzido possível.

Tal como na adição de duas resistências do mesmo valor em paralelo, onde neste caso se soma o inverso da resistência ou admitância, o valor da resistência equivalente reduz para metade. No caso da adição de indutâncias em paralelo ocorre algo semelhante com o valor da indutância equivalente, embora no caso dos condensadores não se aplique diretamente devido à presença do elemento capacitivo. Ao serem adicionados condensadores (*windings*) em paralelo, o valor da indutância decresce sob a forma de uma exponencial invertida onde, a partir de cinco condensadores não se verifica uma redução significativa no valor de indutância. O resultado desta observação pode ser visto na Figura 20 [20].

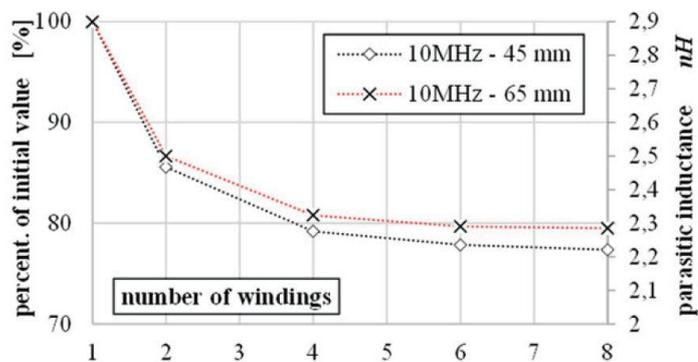


Figura 20 – Valor da indutância relativo e absoluto em função do número de condensadores em paralelo, retirado de [20].

2.3.3. Compensação

O princípio da compensação de uma indutância tem como objetivo diminuir o seu valor para uma dada frequência e pode ser realizado através da adição de uma capacidade em paralelo. Este princípio é empregue através da sobreposição das chapas que constituem o barramento e terminais. Desta forma, a cada comprimento do barramento ou terminais, é adicionada uma capacidade parasita, através da qual se aumenta a frequência de ressonância, reduzindo o efeito da indutância para as frequências de operação do conjunto.

2.4. Exemplos do Estado da Arte de *DC-link* com Condensadores de Filme

A Figura 21 mostra o estado da arte dos conjuntos de condensadores de baixa indutância produzidos pela TDK. Estes recorrem-se dos princípios acima descritos para minimizar o valor da

indutância parasita, utilizando a oposição dos condensadores para cancelar o campo eletromagnético por eles produzido, a contenção é realizada através do número de condensadores utilizados e a compensação é feita pela sobreposição do barramento. É ainda possível perceber que as alterações feitas na disposição dos condensadores e a alternância das polaridades se traduziu numa redução para metade do valor de indutância do novo modelo.



Figura 21 – Comparação entre o antigo e o novo modelo de conjunto de condensadores de filme de baixa indutância da TDK, retirado de [30].

O estado da arte dos conjuntos de condensadores de filme de baixa indutância produzidos pela WIMA pode ser observado na Figura 22, onde são utilizados tanto o princípio da compensação como o da contenção através da sobreposição do barramento e do número de condensadores utilizados na sua elaboração.

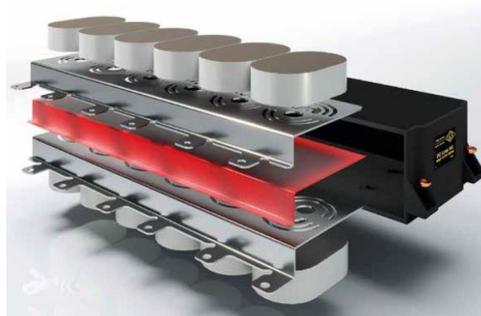


Figura 22 – Conjunto de condensadores de filme de baixa indutância da WIMA, retirado de [31].

3. DESCRIÇÃO MATEMÁTICA DE *DC-LINKS*

Do ponto de vista matemático, é possível aproximar satisfatoriamente os elementos constituintes do conjunto de condensadores a um modelo, onde através da sua análise se obtém um valor de indutância equivalente.

Ao longo deste capítulo, são feitas análises matemáticas a diferentes secções dos conjuntos de condensadores, de forma a obter um modelo matemático que as descreva do ponto de vista da sua indutância. Por fim é apresentado um modelo equivalente onde é possível verificar a indutância de cada secção e a sua contribuição para o valor do conjunto.

3.1. Campo Eletromagnético

Num componente genérico, o seu valor de indutância depende da sua geometria da permeabilidade magnética e do fluxo magnético que o atravessa, pois através da análise matemática, verifica-se que para que exista indutância num componente tem de existir um campo magnético, que pode ser criado pela sua própria corrente (auto indutância), como pela corrente de um condutor próximo (indutância mútua).

As equações apresentadas dizem respeito a casos particulares da física, contudo a sua análise permite obter uma clara ideia sobre os comportamentos dos campos magnéticos e a sua descrição.

O campo magnético produzido por um circuito pode ser descrito pela equação 6, que através do valor da corrente $i(t)$ que o percorre permite calcular a intensidade do campo magnético H a uma distância r . O valor do campo magnético que efetivamente afeta outro circuito pode ser descrito pela equação 7 e depende da permeabilidade do meio ($\mu_0 \mu_r$) e do valor de intensidade do campo magnético naquele local H .

$$H = \frac{i(t)}{2\pi r} \quad (6)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (7)$$

De forma a ser possível determinar o valor de indutância de um circuito elétrico, deve ser considerado o valor do fluxo que é enlaçado pelo circuito \emptyset , para determinar este valor recorre-se da equação 8, onde através do valor de intensidade do campo magnético que efetivamente atinge

o circuito B e do valor da área A que compõem o circuito exposta ao mesmo se obtêm o fluxo concatenado pelo circuito.

$$\Phi = B A \quad (8)$$

Através da lei de Faraday, descrita pela equação 9, obtém-se o valor da força eletromotriz induzida, derivando o valor do fluxo enlaçado pelo circuito em ordem ao tempo.

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (9)$$

O valor de indutância de um circuito relaciona-se com valor do fluxo enlaçado pelo circuito e o valor da corrente que o percorre, como mostra a equação 10.

$$L = \frac{\Phi}{i} \quad (10)$$

Através da aplicação da equação 10 para cada caso de acordo com as características do circuito, como, por exemplo, para o caso de uma bobina com n voltas de comprimento l e área A , percorrida por uma corrente i produz um fluxo Φ_B . Se a corrente for variável no tempo, através da lei de Faraday podemos obter a força eletromotriz induzida (equação 11).

$$\varepsilon_B = - \frac{d(n\Phi_B)}{dt} \quad (11)$$

Se o meio de propagação do campo magnético não incluir materiais ferromagnéticos, o valor da corrente é proporcional ao fluxo magnético, logo a equação 11 pode ser descrita através do valor de indutância e corrente que percorre a bobina (equação 12) e o valor de indutância pode por sua vez ser descrito através de um quociente entre o fluxo enlaçado pela bobina e a corrente que a percorre (equação 13). Substituindo o fluxo enlaçado pelas suas variáveis obtém-se a equação 14 através da qual se calcula a indutância da bobina dependendo do valor da permeabilidade do meio, do seu comprimento, do número de espiras ao quadrado e do valor da área de uma espira.

$$\varepsilon_B = - \frac{d(Li)}{dt} = - L \frac{d(i)}{dt} \quad (12)$$

$$L = \frac{n \Phi_B}{i} \quad (13)$$

$$L = \frac{(n l)(\mu_0 n i)A}{i} = \mu_0 l n^2 A \quad (14)$$

3.2. Condensadores

Os condensadores, apesar de se assemelharem aos condutores elétricos, do ponto de vista da indutância não se comportam da mesma maneira, já que a sua indutância não é majoritariamente

causada pela geometria das armaduras que os constituem, mas sim pela geometria e distância dos seus terminais colocados nos topos.

Desta forma, e através da equação 15, reformulada através da equação para condutores de secção reta sobrepostos, é possível relacionar a indutância dos condensadores com as características dos seus terminais e a distância que os separa, sendo que, cerca de dez por cento deste valor corresponde à indutância causada pelas armaduras.

Esta equação foi elaborada durante a realização do presente trabalho com base nos resultados dos ensaios a condensadores individuais. Na Figura 23 pode observar-se o modelo de um condensador e as suas variáveis características.

$$L_{Con} \approx \mu_0 \cdot l \left(\frac{t}{w} \right) \quad (15)$$

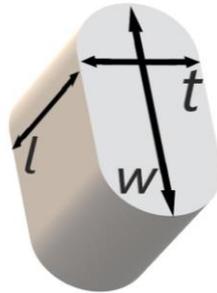


Figura 23 – Esquemático do condensador de filme e as suas variáveis características.

3.3. Barramentos e Terminais Sobrepostos

Os barramentos que interligam os condensadores aos terminais, são, na maioria dos casos, compostos por duas chapas metálicas sobrepostas, como se ilustra na Figura 24, separadas por um material dielétrico. São por isso considerados como dois condutores planos paralelos e sobrepostos. Esta consideração é também aplicável aos terminais quando estes se encontram sobrepostos.

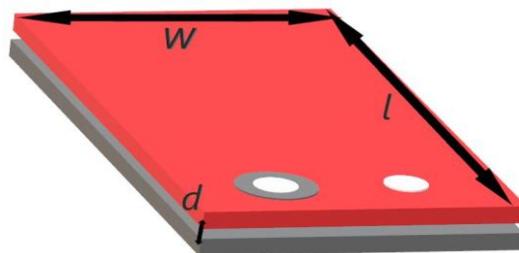


Figura 24 – Exemplo de barramento e terminais sobrepostos e variáveis características.

Através da equação 5, para condutores de secção retangular com retorno de corrente, obtém-se o valor de indutância do barramento e terminais sobrepostos (L_{Bar}), dando origem à equação 16, onde d representa a distância de separação das placas, causada pelo material isolante, w e l representam respetivamente a largura e o comprimento do barramento.

$$L_{Bar} \approx \mu_0 \cdot l \left(\frac{d}{w} \right) \quad (16)$$

3.4. Terminais Afastados

Os terminais dos conjuntos de condensadores são formados por chapas metálicas e encontram-se separados por uma distância que lhes permite o isolamento elétrico de acordo com a diferença de potencial a que estão sujeitos. Quando se encontram afastados, como na Figura 25, são considerados como dois condutores planos paralelos adjacentes que utilizam o ar como dielétrico.

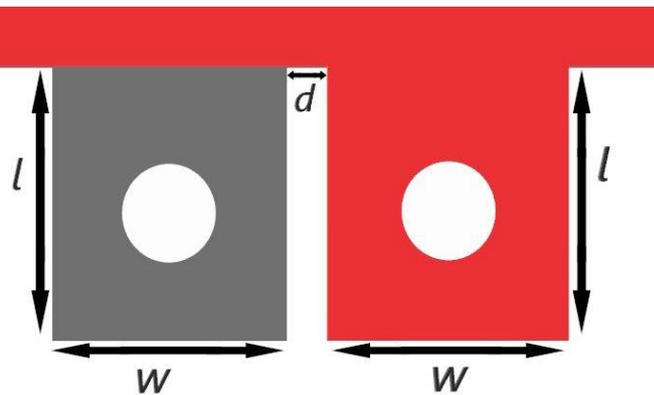


Figura 25 – Exemplo de terminais afastados e variáveis características.

O valor de indutância dos terminais (L_{Ter}) pode ser obtido através da equação 17 que relaciona as características geométricas dos terminais com o seu valor de indutância equivalente, onde d representa a distância entre os terminais, w e l representam respetivamente a largura e o comprimento.

$$L_{Ter} \approx \frac{\mu_0}{\pi} \cdot l \cdot \cosh^{-1} \left(\frac{d+w}{w} \right) \quad (17)$$

3.5. Configurações de Montagem e Geometria

Do ponto de vista matemático torna-se difícil aproximar todas as possibilidades de montagem dos conjuntos de condensadores, desta forma serão abordadas apenas algumas geometrias e disposições indicadas pela Vishay, tendo em vista o processo de fabrico existente.

3.5.1. Ligações dos Condensadores

A ligação dos condensadores aos barramentos é feita através de segmentos de condutores planos, maioritariamente feitos de cobre, observável na Figura 26. Através da equação 4 para condutores de seção retangular é possível obter o valor de indutância para uma ligação (L_{1_Lig}) dando origem à equação 18, que relaciona o valor de indutância de cada ligação com as suas características geométricas. Uma vez que as dimensões e quantidade de ligações dependem da geometria do barramento escolhida, após a sua escolha e através do valor de indutância equivalente (equação 19), é possível determinar o valor de indutância de ligação por condensador (L_{Lig}). O valor 4 surge na equação de forma a possibilitar a soma da indutância das ligações de ambos os terminais.

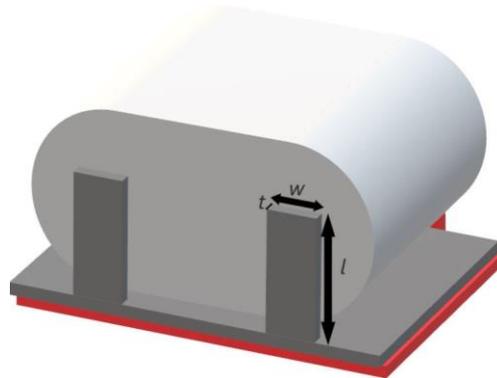


Figura 26 – Exemplo de ligação dos condensadores e características geométricas.

$$L_{1_Lig} = \frac{\mu_0}{2\pi} l \left[\ln \left(\frac{2l}{w+t} \right) + \frac{1}{2} + 0.2235 \left(\frac{w+t}{l} \right) \right] \quad (18)$$

$$L_{Lig} = L_{1_Lig} \cdot \frac{4}{n_{Lig}} \quad (19)$$

Em situações onde apenas existam ligações num dos terminais do condensador, ou seja, um dos terminais é soldado diretamente ao barramento, o número de ligações deve ser multiplicado por quatro, para que seja considerada apenas a indutância das ligações existentes.

3.5.2. Disposição Horizontal e Vertical

A disposição horizontal e vertical dos condensadores diz respeito à distância do seu centro de massa ao barramento, uma vez que estes são achatados tornando-os paralelepípedos. Para a mesma disposição dos terminais, é possível rodar o condensador de forma que este fique paralelo ao barramento (Figura 27), ou na perpendicular (Figura 28), na horizontal ou vertical, respetivamente.

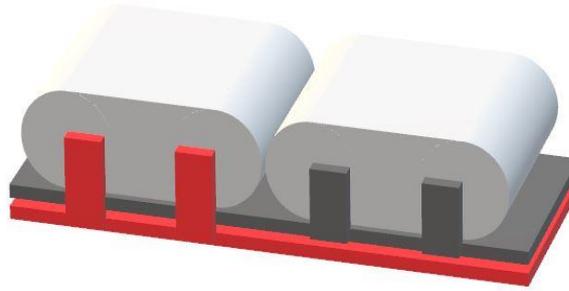


Figura 27 – Dois condensadores em disposição horizontal.

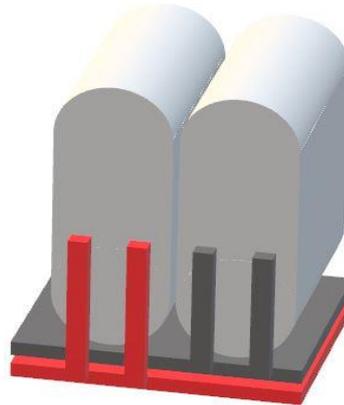


Figura 28 – Dois condensadores em disposição vertical.

Esta distância tem influência no valor de indutância, uma vez que quando na vertical os condensadores têm o seu centro mais distante do barramento, o que leva a um aumento da ligação ao barramento e, por consequência, o valor de indutância da ligação aumenta também. Quando na horizontal o comprimento da ligação é mais reduzido, assim como o seu valor de indutância.

3.5.3. Acoplamento de Indutâncias

O acoplamento de indutâncias surge quando o campo magnético criado por uma indutância cria uma força eletromotriz numa outra indutância, desta forma ocorre uma indutância mútua entre ambas, que tanto pode ser somada à indutância de cada uma delas como subtraída.

O valor desta indutância mútua pode ser calculado através da equação 20 e depende da indutância individual de cada condensador (L_{1Con}), do número de condensadores (n_{Con}), do acoplamento entre ambos (k), da distância entre eles (d) e da sua espessura (t_{Con}). Através da experimentação realizada a diversos protótipos em ambiente laboratorial, chegou-se a um valor de k de

$\frac{w-t}{(2(w-t)+(\pi t))}$ para condensadores adjacentes sem inversão de polaridades, e de $-\frac{w-t}{10(2(w-t)+(\pi t))}$ para condensadores adjacentes com inversão de polaridades.

$$L_{Mut} = L_{1_Con} \cdot n_{Con} \cdot k \cdot e^{-\frac{2d}{t_{Con}}} \quad (20)$$

No caso da inversão de polaridades é possível observar uma atenuação do valor de indutância resultante devido ao efeito provocado pela indutância mútua. Já no caso em que não ocorre inversão de polaridades, o valor de indutância resultante aumenta.

3.6. Modelo de Cálculo de Indutância

O modelo de cálculo elaborado considera a indutância presente nos terminais (L_{Ter}), no barramento (L_{Bar}), nas ligações dos condensadores (L_{Lig}), nos próprios condensadores (L_{Con}), e na interação entre os condensadores (L_{Mut}). Na Figura 29, pode observar-se o circuito equivalente simplificado do modelo elaborado. Com auxílio da equação 21 é possível obter o valor de indutância do conjunto, sendo que quando não ocorre oposição de polaridades o valor de indutância mútua é somado ao valor de indutância do conjunto, ou subtraído quando existe oposição de polaridades

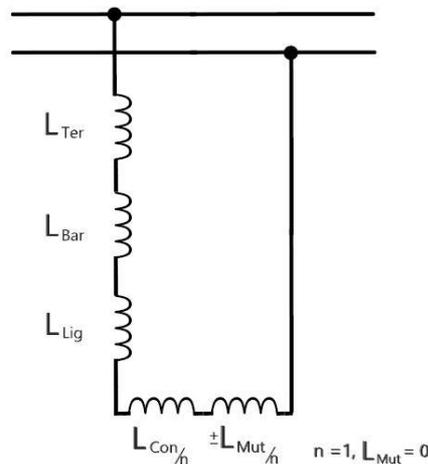


Figura 29 – Circuito equivalente simplificado do modelo de cálculo da indutância.

$$L_{ESL} = L_{Ter} + L_{Bar} + L_{Lig} + \frac{L_{1_Con}}{n_{Con}} \pm \frac{L_{Mut}}{n_{Con}} \quad (n_{Con} = 1, L_{Mut} = 0) \quad (21)$$

4. METODOLOGIA PARA MITIGAÇÃO DE INDUTÂNCIA

Na realização do trabalho foi utilizada uma abordagem de cima para baixo, do inglês *top-down*, que significa começar por algo complexo e ir decompondo para se chegar a um conhecimento profundo.

Numa primeira fase foram realizados ensaios com recurso a dois barramentos de produtos da Vishay, com diferentes topologias de forma a verificar o efeito da indutância mútua, seguidamente foram realizados ensaios em barramentos simples e condensadores individuais para aferição do seu valor e método de cálculo, em seguida, foram elaborados o circuito equivalente dos conjuntos de condensadores e o seu modelo de cálculo.

Numa segunda fase foram elaborados doze modelos de barramentos e conjuntos de condensadores e definidos seis testes para aferir a influencia da utilização individual e em conjunto dos princípios de mitigação de indutância. Na última fase foram analisados os resultados previamente obtidos, e elaboradas as diretivas de construção dos conjuntos de condensadores, que foram posteriormente empregues na construção de um protótipo final com indutância reduzida.

4.1. Ensaio em Barramentos

Para melhor se perceber a distribuição da indutância no barramento e terminais, foram realizados testes em secções planas de barramentos e terminais de dimensões conhecidas onde se verificou, através da análise matemática o seu valor teórico e posteriormente, com auxílio de ferramentas de medição, verificou-se o seu valor real.

O primeiro teste consistiu na verificação do valor de indutância de um conjunto de terminais composto por dois terminais e uma pequena secção de barramento, Figura 30, com as características descritas na Tabela 2, onde os terminais se encontram afastados, aferindo assim o seu valor de indutância e método de cálculo.

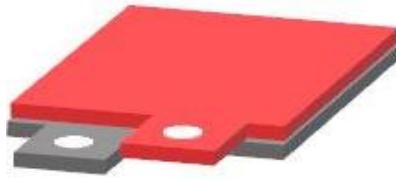


Figura 30 – Conjunto de terminais, sem sobreposição.

Tabela 2 – Dimensões do conjunto de terminais sem sobreposição.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Separação (d) (mm)
Terminais	15	10	5
Barramento	30	30	0,3

O segundo teste consistiu na medição de um barramento totalmente sobreposto, observável na Figura 31, com as características descritas na Tabela 3, com os terminais afastados. Desta forma verificou-se o valor de indutância obtido para um barramento sobreposto e o seu método de cálculo.

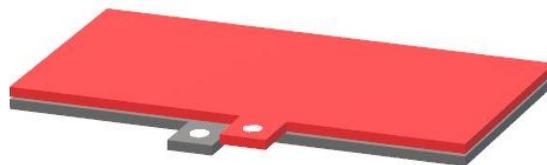


Figura 31 – Barramento totalmente sobreposto.

Tabela 3 – Dimensões do barramento totalmente sobreposto.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Separação (d) (mm)
Terminais	15	10	5
Barramento	40	65	0,3

Estes testes pretendem aferir a exatidão do método de cálculo de indutância dos barramentos e terminais afastados.

4.2. Ensaio em Condensadores Individuais

De forma a ser possível aferir qual o melhor método de cálculo do valor de indutância de um condensador individual, observável na Figura 32, foram selecionados alguns condensadores, com as dimensões descritas na Tabela 4, e feita a medição do seu valor de indutância, através da

utilização de analisadores de impedância e, posteriormente, através da realização de ensaios em curto-circuito.

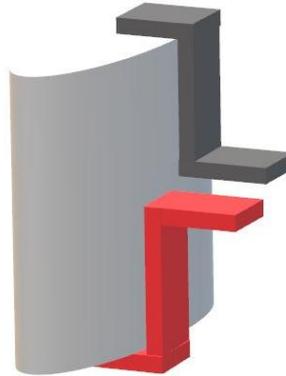


Figura 32 – Condensador simples com dois terminais planos.

Tabela 4 – Dimensões dos condensadores utilizados no ensaio.

Condensador	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 ⁴ 8 μ F	37,5	22,1	11,4
MKP 1848 43 μ F	52,0	62,2	15,5
MKP 1848 55 μ F	37,5	35,3	24,3

Após a verificação dos resultados foi deduzida uma equação que relaciona a permissividade e as características geométricas do condensador com o seu valor de indutância. De salientar que as medidas acima descritas, para cada condensador, dizem respeito ao elemento capacitivo que se encontra embebido em epóxi e são inferiores às medidas exteriores do encapsulamento.

4.3. Ensaio em Barramentos com Condensadores

Para verificar a influência do valor de indutância mútua, foram escolhidos dois barramentos de produtos da Vishay, com diferentes configurações de colocação dos condensadores, onde apenas um deles apresenta alternância de polaridades entre os condensadores adjacentes, as suas dimensões podem ser vistas na Tabela 5.

⁴ “MKP 1848” diz respeito a uma série de condensadores de filme produzidos pela Vishay
Caracterização Elétrica de Barramentos Laminados para *DC-links*

Tabela 5 – Características dos barramentos utilizados nos testes.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Altura (h) (mm)
Sem inversão	38	128	60
Com inversão	40	135	60

Neste ensaio foram utilizados seis condensadores de $55,6 \mu\text{F}$ em cada barramento, as suas dimensões podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características dos condensadores utilizados nos testes.

Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
30	43	25

O primeiro ensaio consistiu na utilização de um barramento onde os condensadores se dispõem sem alternância de polaridades, observável na Figura 33.

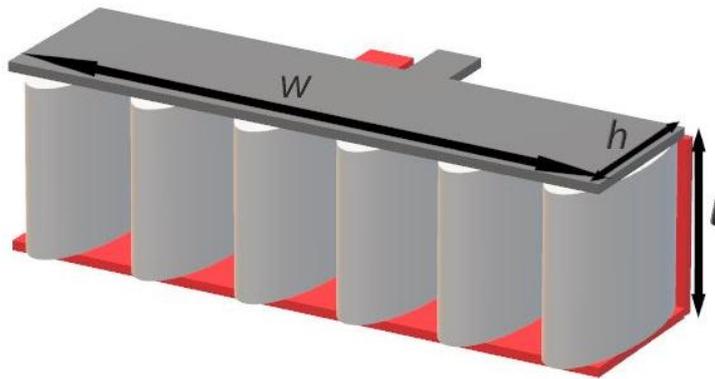


Figura 33 – Modelo de barramento com condensadores dispostos na vertical e sem oposição.

De seguida utilizou-se outro barramento onde os condensadores foram dispostos com alternância de polaridades entre condensadores adjacentes, observável na Figura 34.

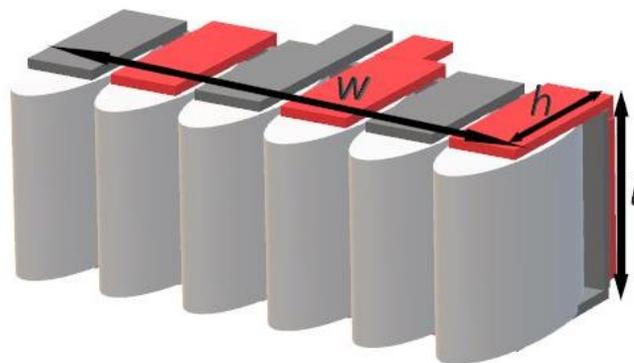


Figura 34 – Modelo de barramento com condensadores dispostos na vertical e com oposição.

Estes ensaios pretendem verificar a influência que a indutância mútua, causada pela proximidade dos condensadores, tem na atenuação do valor de indutância equivalente do conjunto.

4.4. Ensaio aos Princípios de Mitigação de Indutância

4.4.1. Princípio da Compensação

Para verificar a influência da utilização do princípio de compensação foram realizados dois testes. Para o primeiro teste foram escolhidos dois modelos de terminais, Figura 35, com as dimensões descritas na Tabela 7 e na Tabela 8, onde apenas (b) é totalmente sobreposto. Através da análise dos resultados obtidos, verificou-se o valor de indutância obtido para o uso do princípio de compensação nos terminais.



Figura 35 – Conjunto de terminais, sem sobreposição (a), com sobreposição (b).

Tabela 7 – Dimensões do conjunto de terminais sem sobreposição (a).

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Separação (d) (mm)
Terminais	15	10	5
Barramento	30	30	0,3

Tabela 8 – Dimensões do conjunto de terminais totalmente sobreposto (b).

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Separação (d) (mm)
Terminais	15	30	0,3
Barramento	30	30	0,3

O segundo teste consistiu na medição de dois barramentos, com as dimensões descritas na Tabela 9, onde um deles apresenta uma sobreposição de cinquenta por cento Figura 36 (c) e o outro é totalmente sobreposto Figura 36 (d). Desta forma verificou-se o valor de indutância obtido para diferentes sobreposições dos barramentos dos conjuntos de condensadores.

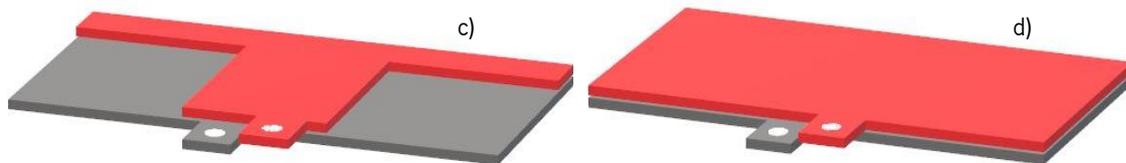


Figura 36 – Barramento, com sobreposição de 50% (a), com sobreposição de 100% (b).

Tabela 9 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste do princípio de Compensação.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Separação (d) (mm)
Terminais	15	10	5
Barramento	40	65	0,3

Estes testes pretendem aferir a influencia da utilização do princípio da compensação nos barramentos e terminais dos conjuntos de condensadores.

4.4.2. Princípio do Cancelamento

Para verificar a influência da utilização do princípio do cancelamento foram realizados dois ensaios semelhantes aos primeiros (Figura 33 e Figura 34) diferenciando-se pela utilização de barramentos com sobreposição total, observáveis na Figura 37, com as dimensões descritas na Tabela 10, nos quais foram adicionados seis condensadores de $25 \mu\text{F}$, com as dimensões descritas na Tabela 11. Foram elaborados dois conjuntos com barramentos e condensadores com as mesmas dimensões e tipologia de terminais de forma a verificar apenas o efeito da ligação em alternância de polaridades.

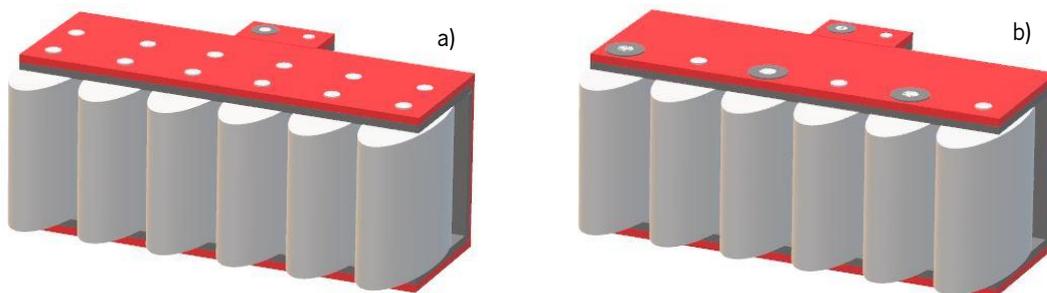


Figura 37 – Conjuntos de condensadores, sem oposição Sam-6C (a), com oposição Opo-6C (b).

Tabela 10 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste do princípio do Cancelamento.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Altura (h) (mm)
Sem inversão (a)	55	107	32
Com inversão (b)	55	107	22

Tabela 11 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste do princípio do Cancelamento.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 25 μ F	52	49	17

Estes testes pretendem verificar a influencia da utilização do princípio do cancelamento nos conjuntos de condensadores através da alternância de polaridades.

4.4.3. Princípio da Contenção

De forma a verificar a influência da utilização do princípio de contenção foram elaborados três modelos de condensadores, observáveis na Figura 38, onde o primeiro (a) é composto por um único condensador, o segundo (b) é composto por dois condensadores com metade da distância entre terminais, e o terceiro (c) é composto por dois condensadores com metade da espessura do primeiro. A capacidade de cada conjunto foi mantida, assim como a tipologia dos terminais, alterando-se apenas o número de condensadores e as suas dimensões. Na Tabela 12 estão descritas as características dos condensadores utilizados.

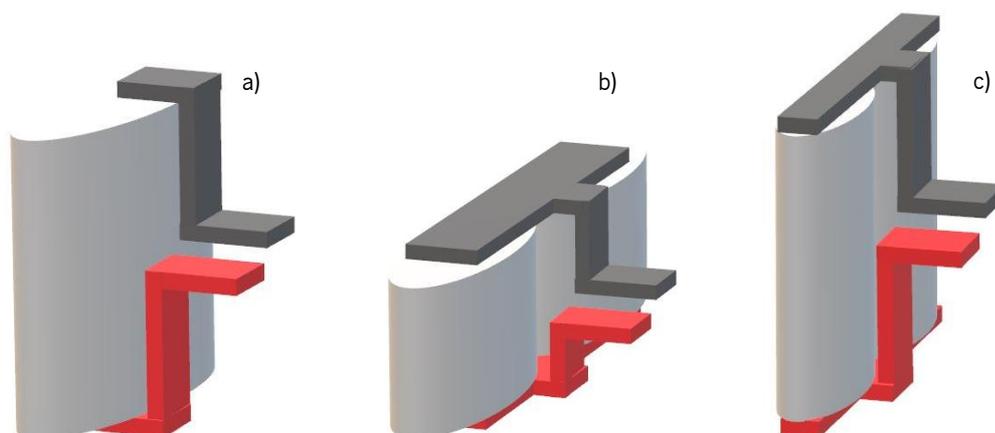


Figura 38 – Condensador de 52 mm (a) Conjunto de dois condensadores de 27,5 mm (b) Conjunto de dois condensadores de 52 mm (c).

Tabela 12 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste do princípio da Contenção.

Condensador	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 25 μ F (a)	52	49	17
MKP 1848 12,5 μ F (b)	28	49	17
MKP 1848 12,5 μ F (c)	52	28	15

Estes testes pretendem verificar a influencia da utilização do princípio de contenção nos conjuntos de condensadores.

4.4.4. Princípios de Compensação e Cancelamento

De forma a verificar a influência da utilização dos princípios de compensação e cancelamento foram elaborados dois conjuntos de condensadores, observáveis na Figura 39, com as dimensões descritas na Tabela 13, onde o primeiro (a) é composto por um barramento sem sobreposição e seis condensadores sem alternância de polaridades, e o segundo (b) é composto por um barramento totalmente sobreposto e seis condensadores em alternância de polaridades. Na Tabela 14 estão descritas as dimensões dos condensadores utilizados.

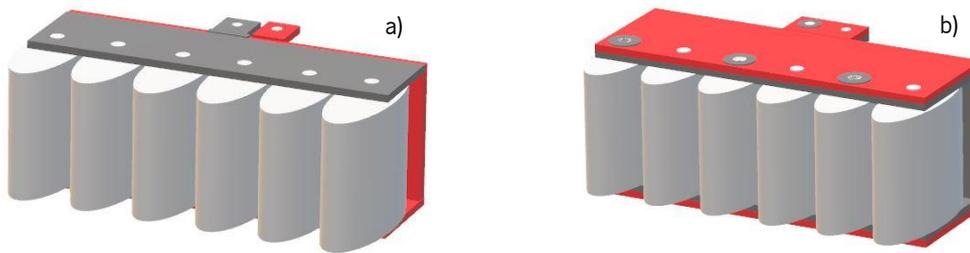


Figura 39 – Conjuntos de condensadores, sem sobreposição Sim-6C (a), com sobreposição Opo-6C (b).

Tabela 13 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Compensação e Cancelamento.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Altura (h) (mm)
Sem sobreposição (a)	53	107	25
Com sobreposição (b)	55	107	22

Tabela 14 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Compensação e Cancelamento.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 25 μ F	52	49	17

Estes testes pretendem aferir as diferenças no valor de indutância equivalente quando são aplicados os princípios de compensação e cancelamento na elaboração do conjunto de condensadores.

4.4.5. Princípios de Compensação e Contenção

De forma a verificar a influência da utilização dos princípios de compensação e contenção foram elaborados dois conjuntos de condensadores, observáveis na Figura 40, com as dimensões descritas na Tabela 15, onde o primeiro é composto por um barramento sem sobreposição e um condensador – Sim-1C (a), e o segundo é composto por um barramento totalmente sobreposto e

seis condensadores sem alternância de polaridades – Sam-6C (b). Na Tabela 16 estão descritas as dimensões dos condensadores utilizados.

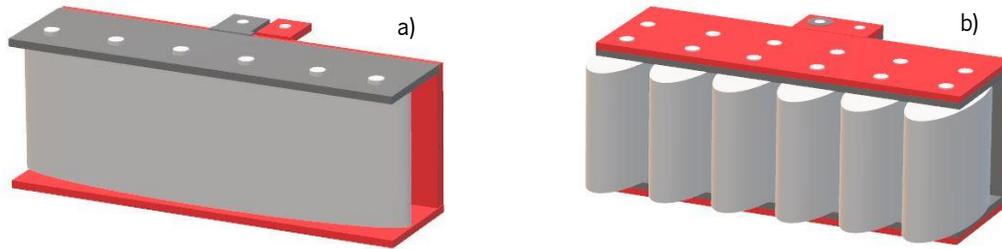


Figura 40 – Conjuntos de condensadores, sem sobreposição Sim-1C (a), com sobreposição Sam-6C (b).

Tabela 15 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Compensação e Contenção.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Altura (h) (mm)
Sem sobreposição (a)	53	107	25
Com sobreposição (b)	55	107	32

Tabela 16 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Compensação e Contenção.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 150 μ F	52	118	40
MKP 1848 25 μ F	52	49	17

Estes testes pretendem aferir as diferenças no valor de indutância equivalente quando são aplicados os princípios de compensação e contenção na elaboração do conjunto de condensadores.

4.4.6. Princípios de Contenção e Cancelamento

De forma a verificar a influência da utilização dos princípios de cancelamento e contenção foram elaborados dois conjuntos de condensadores, observáveis na Figura 41, com as dimensões descritas na Tabela 17, onde o primeiro é composto por um barramento totalmente sobreposto e um condensador – Sam-1C, e o segundo é composto por um barramento totalmente sobreposto e seis condensadores em alternância de polaridades – Opo-6C. Na Tabela 18 estão descritas as características dos condensadores utilizados.

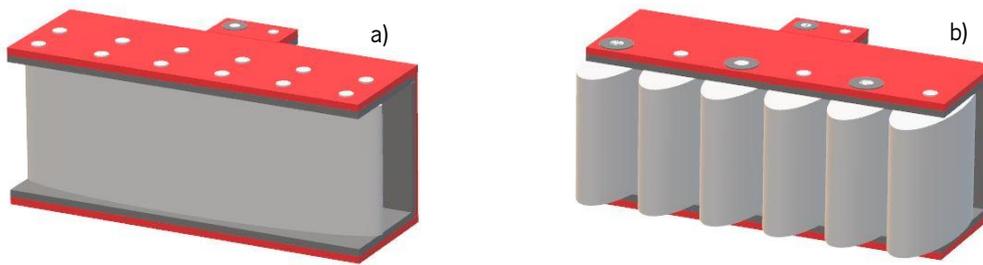


Figura 41 – Conjuntos de condensadores, sem inversão Sam-6C (a), com inversão Opo-6C (b).

Tabela 17 – Dimensões dos barramentos utilizados no teste dos princípios de Cancelamento e Contenção.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Altura (h) (mm)
Sem inversão (a)	55	107	32
Com inversão (b)	55	107	22

Tabela 18 – Dimensões dos condensadores utilizados no teste dos princípios de Cancelamento e Contenção.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 150 μ F	52	118	40
MKP 1848 25 μ F	52	49	17

Estes testes pretendem aferir as diferenças no valor de indutância equivalente quando são aplicados os princípios de cancelamento e contenção na elaboração do conjunto de condensadores.

4.5. Protótipo Final

Posteriormente e de acordo com as diretivas de construção, foram propostos três protótipos de barramentos laminados com condensadores para realização de testes. Estes testes pretenderam aperfeiçoar o modelo de cálculo e as diretivas de construção, tendo em conta as diferentes influências observadas na sua realização. Os resultados dos valores de indutância dos protótipos foram obtidos através de analisadores de impedância do fabricante Agilent.

O primeiro protótipo (P1-Marc), ilustrado na Figura 42 foi elaborado de acordo com um design existente, sendo composto por seis condensadores de 25 μ F, com as características descritas na Tabela 19, com uma chapa de cobre ao lado de cada condensador para fazer a ligação do terminal mais afastado, e um barramento sobreposto colocado sobre o outro terminal dos condensadores.

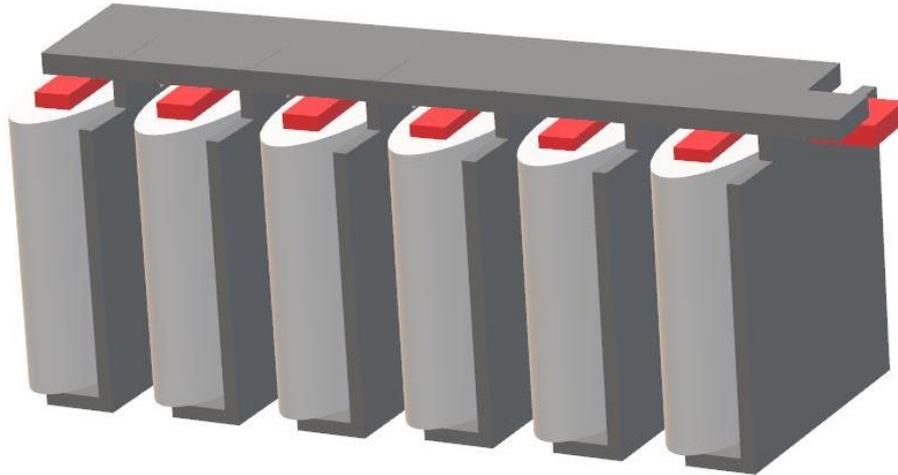


Figura 42 – Protótipo P1-Marc – Seis condensadores em linha com retorno de corrente junto a cada condensador.

Tabela 19 – Dimensões dos condensadores utilizados no protótipo P1-Marc.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 25 μ F	52	49	17

O segundo protótipo (P2-MBISG-mod), ilustrado na Figura 43 foi elaborado através da melhoria de um produto da Vishay já no mercado, sendo composto por doze condensadores de 24 μ F, com as características descritas na Tabela 20, dispostos na horizontal em duas filas sobre o barramento. A versão original, apresenta os condensadores dispostos em duas filas com rede central sem alternância de polaridades, sendo a melhoria introduzida neste protótipo, o uso do princípio do cancelamento através da inversão de polaridades.

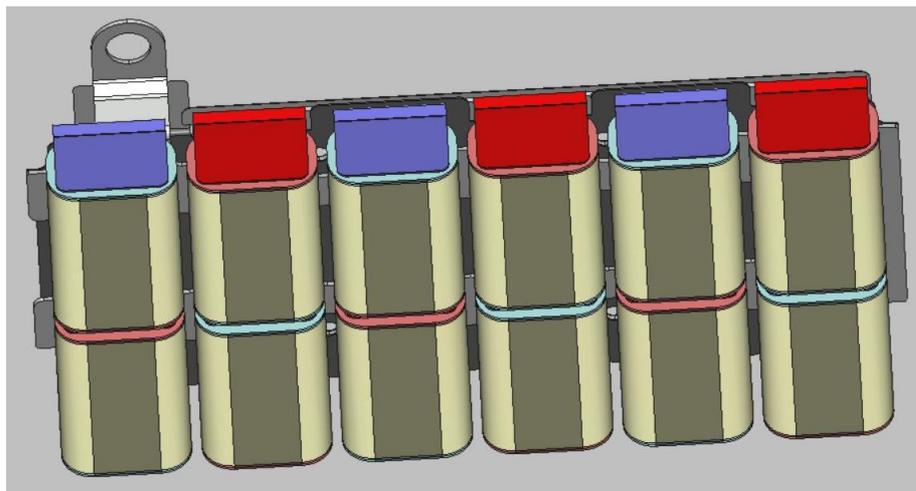


Figura 43 – Protótipo P2-MBISG-mod – Doze condensadores em duas linhas com rede central e oposição do sentido de corrente.

Tabela 20 – Dimensões dos condensadores utilizados no protótipo P2-MBISG-mod.

	Comprimento (l) (mm)	Largura (w) (mm)	Espessura (t) (mm)
MKP 1848 24 μ F	38	25	16

Foi ainda proposto um terceiro protótipo (P3-Copos), ilustrado na Figura 44, elaborado com recurso ao princípio da contenção, onde se reduz o campo eletromagnético produzido pelos condensadores ao mínimo possível. Este modelo de barramento foi desenvolvido após a experimentação que foi realizada ao condensador individual, onde se obteve o menor valor de indutância.

Este barramento é composto por seis condensadores dispostos na vertical em duas filas inseridas simetricamente no barramento, com a ligação aos terminais dos condensadores efetuada através de “copos” feitos com chapa de cobre. O protótipo não foi realizado, devido à inviabilidade técnica causada pela dificuldade de implementação no processo de fabrico existente na Vishay, desta forma ficou apenas pela fase de ideação.

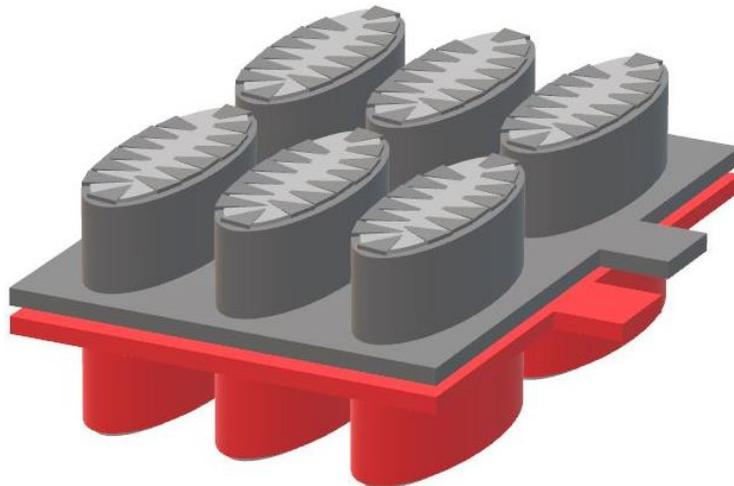


Figura 44 – Protótipo P3-Copos – Seis condensadores inseridos no barramento com copos de ligação aos terminais.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo encontram-se descritos os resultados obtidos para os diferentes testes realizados ao longo da realização do estudo. Estes resultados descrevem como o valor de indutância é afetado pelos campos eletromagnéticos e pelas características físicas dos circuitos elétricos que compõem os conjuntos de condensadores.

Numa primeira fase foram realizados ensaios preliminares em secções de barramentos para determinar a melhor forma de cálculo do seu valor de indutância, seguidamente foram feitos ensaios em condensadores individuais com o mesmo objetivo e por fim foram realizados ensaios em conjuntos de condensadores com barramento para aferir o valor de indutância obtido para o uso de cada princípio de mitigação e na sua conjugação

5.1. Medidas de Barramentos

De forma a ser possível observar o valor da indutância de um barramento e terminais foram construídos dois barramentos com terminais, com dimensões conhecidas. O barramento ilustrado na Figura 45, com dimensões acima descritas na Tabela 2, foi construído com duas chapas de cobre com uma espessura de 0,5 mm.

Este conjunto de terminais com um barramento reduzido tem como objetivo determinar o valor da indutância presente nos seus terminais, através do método de cálculo e, através de medida com o analisador de impedâncias. Os resultados obtidos para este conjunto de terminais encontram-se na Tabela 21.

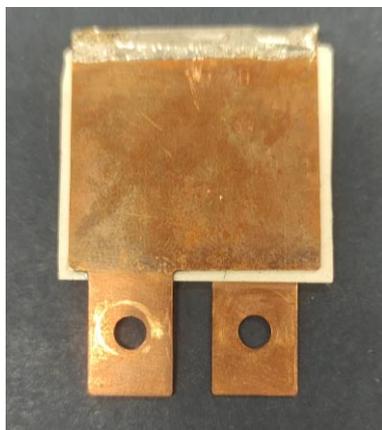


Figura 45 – Conjunto de terminais elaborado para o teste.

Tabela 21 – Resultados obtidos para o ensaio ao conjunto de terminais e barramento de dimensões reduzidas.

Indutância do conjunto (nH)	
Medido	11,5 @ 1,5 MHz
Calculado	6,2

O barramento, ilustrado na Figura 46, com dimensões descritas na Tabela 3, foi construído com duas chapas de cobre com 0,5 mm de espessura, sobrepondo-se na totalidade.

Este barramento foi elaborado de forma a ser possível aferir o seu valor de indutância, através do método de calculo e medida com o analisador de impedâncias. Os resultados obtidos para este barramento encontram-se na Tabela 22.

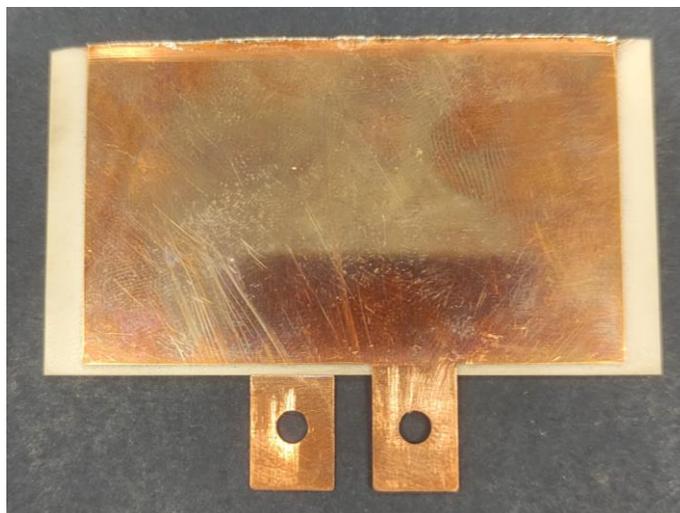


Figura 46 – Barramento totalmente sobreposto utilizado no ensaio.

Tabela 22 – Resultados obtidos para o ensaio ao conjunto de terminais e barramento de dimensões reduzidas.

Indutância do conjunto (nH)	
Medido	11,4 @ 1,5 MHz
Calculado	6,0

Para estes ensaios, tendo em conta as limitações do analisador de impedâncias, foi feita uma ligação entre as chapas ao longo da extremidade do barramento que se encontra mais afastada dos terminais, de forma a possibilitar a medição do valor de indutância dos barramentos, uma vez que, antes de ser feita a referida ligação entre as chapas a frequência de ressonância encontrava-se na ordem das dezenas de MHz. Desta forma anulou-se a capacidade produzida pela sobreposição das chapas, possibilitando a leitura do valor de indutância a 1,5 MHz. Considerando

um *offset* de cerca de 5,5 nH entre o valor calculado e o valor medido, devido ao método utilizado na medição, pode concluir-se que os valores calculados apresentam um erro inferior a 5 % . Estes resultados mostram que os terminais dos barramentos têm uma contribuição significativa para o valor de indutância do conjunto, neste caso em particular (onde não existem condensadores) o valor de indutância dos terminais é de aproximadamente 95 % do valor do conjunto.

5.2. Medidas de Condensadores Individuais

De forma a poder aferir qual a melhor forma de se obter o valor de indutância para um condensador, foram realizadas medições em condensadores individuais com características semelhantes, diferindo sobretudo na sua distância entre terminais (fitas com diferentes larguras) e na posição de colocação. Os condensadores utilizados podem ser vistos na Figura 47.



Figura 47 – Condensadores individuais utilizados no ensaio.

A Tabela 23 mostra os valores obtidos no analisador de impedâncias para os diferentes condensadores medidos.

Tabela 23 – Valor de indutância obtido para diferentes condensadores da Vishay.

Condensador	Largura de fita	Indutância medida (nH)
MKP 1848 8 μ F (Horizontal)	37,5 mm	29,5
MKP 1848 43 μ F (Horizontal)	52 mm	40,1
MKP 1848 55 μ F (Vertical)	37,5 mm	53,8

Os resultados obtidos na realização deste ensaio permitiram perceber que, a indutância se relaciona de forma direta com a largura de fita dos condensadores, e que a posição de colocação dos condensadores tem influência no valor da indutância devido ao aumento do comprimento dos terminais.

5.3. Medidas de Barramentos com Condensadores

Para a medição dos conjuntos de condensadores, foram selecionados dois modelos de barramentos distintos, um sem oposição de polaridades, observável na Figura 48, e o outro com oposição, observável na Figura 49, ambos com colocação dos condensadores na vertical. Em ambos os conjuntos foi soldado um condensador e medido o seu valor de indutância. De seguida foi adicionado mais um condensador a cada conjunto e feita nova medição. Depois foram adicionados mais dois em cada conjunto, ficando cada um com quatro condensadores e feita nova medição. Por último, foram adicionados mais dois condensadores a cada conjunto e repetida a medição. Os resultados destas experiências encontram-se na Tabela 24.



Figura 48 – Barramento com seis condensadores sem oposição de polaridades.



Figura 49 – Barramento com seis condensadores com oposição de polaridades.

Tabela 24 – Resultados da medição de barramentos com condensadores.

Nº de Condensadores	Valor medido (nH)	
	Barramento sem oposição	Barramento com oposição
1	29,5	36,5
2	25,8	21,0
4	22,4	16,5
6	21,5	15,5

Através da análise dos resultados⁵ obtidos, verifica-se que a indutância mútua tem uma contribuição significativa no valor final do conjunto, traduzindo-se num benefício quando se utiliza a inversão de polaridades.

5.4. Medidas dos Princípios de Mitigação de Indutância

5.4.1. Princípio da Compensação

Para a verificação do princípio de compensação foram realizados dois testes, um deles a dois conjuntos de terminais, observáveis na Figura 50, e o outro a dois barramentos, observáveis na Figura 51, onde a sua principal diferença se encontra na sobreposição (princípio da

⁵ As diferenças observadas para um condensador em cada barramento, devem-se ao facto de os barramentos apresentarem valores distintos de indutância causada pela sua geometria.

compensação). Os valores obtidos para as medições e cálculos realizados a cada conjunto de terminais e barramento encontram-se na Tabela 25.

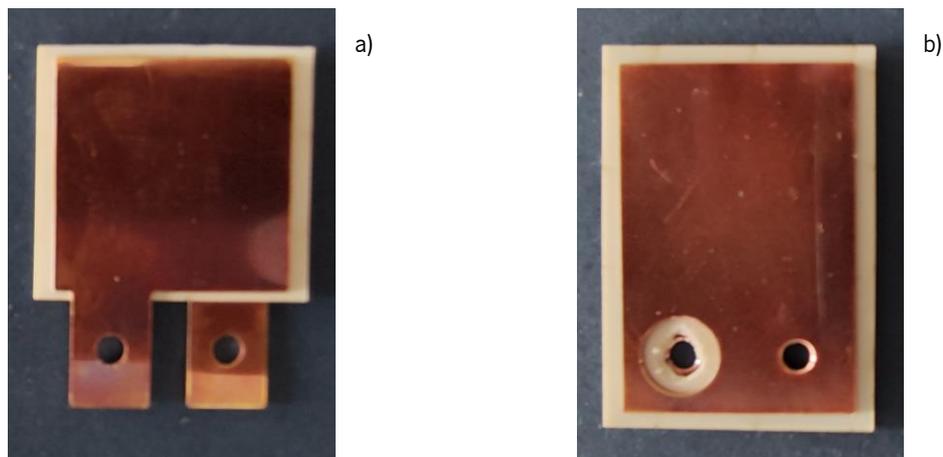


Figura 50 – Conjuntos de terminais utilizados no ensaio, sem sobreposição (a), com sobreposição (b).

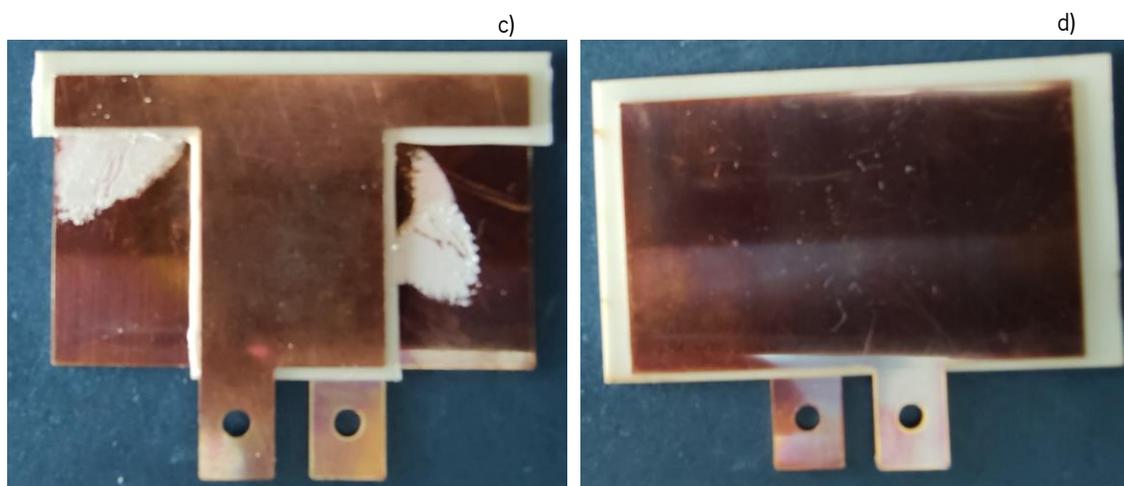


Figura 51 – Barramentos utilizados no ensaio, 50% sobreposto (a), 100% sobreposto (b).

Tabela 25 – Resultados obtidos no ensaio do princípio da compensação.

	Indutância dos Terminais (nH)		Indutância do Barramento (nH)	
	Sem Sobreposição (a)	Com Sobreposição (b)	Sobreposição de 50% (c)	Sobreposição de 100% (d)
Medido	11,5	6,4	11,6	11,4
Calculado	6,1	0,6	6,3	6,0

As diferenças observadas entre os valores medidos e os calculados devem-se ao facto de que as medições foram realizadas a 1,5 MHz abaixo da frequência de ressonância dos elementos calculados. Para se poder realizar estas medições e, devido às limitações dos equipamentos, foi feito um curto-circuito ao longo da extremidade mais afastada dos terminais, o que modifica o seu

circuito equivalente que, em vez de ser composto por um condensador em serie com duas bobinas (desprezando a resistência parasita), estes elementos passam a estar em paralelo. Os valores encontrados, apesar das diferenças observadas, têm um desvio de cerca 5,5 nH para o valor calculado.

Através da análise dos resultados observa-se que a sobreposição dos terminais tem grande influência no valor da indutância, já no caso de uma sobreposição parcial ou total do barramento as diferenças são pouco significativas.

5.4.2. Princípio do Cancelamento

Para o ensaio do princípio do cancelamento foram utilizados dois barramentos totalmente sobrepostos com seis condensadores, um sem alternância de polaridades – Sam-6C, observável na Figura 52, e o outro com alternância de polaridades – Opo-6C fazendo uso do princípio do cancelamento, observável na Figura 53. Os resultados das medições e cálculos efetuados aos conjuntos elaborados encontram-se na Tabela 26.

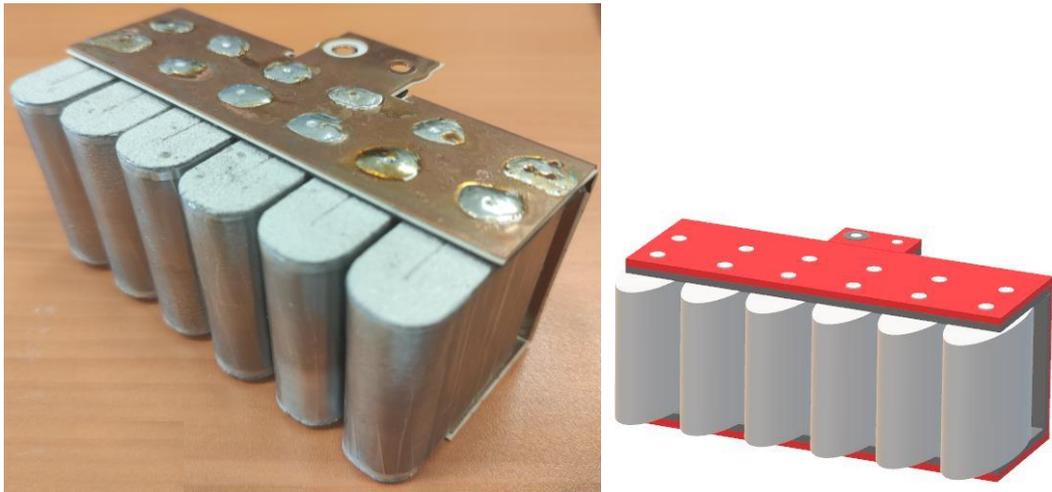


Figura 52 – Sam-6C - Barramento com seis condensadores sem alternância de polaridades.

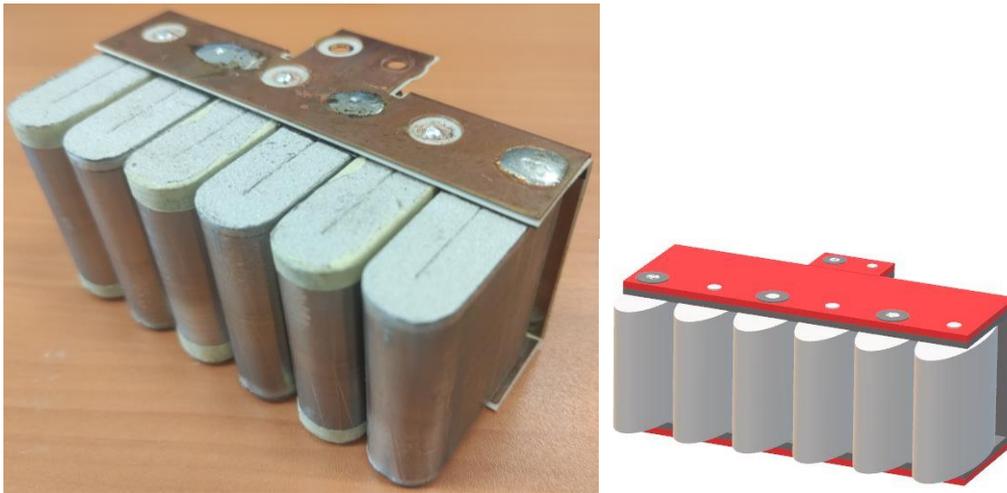


Figura 53 – Opo-6C - Barramento com seis condensadores com alternância de polaridades.

Tabela 26 – Resultados obtidos no ensaio do princípio do cancelamento.

	Indutância do conjunto (nH)	
	Barramento sem oposição (Sam-6C)	Barramento com oposição (Opo-6C)
Medido	12,3	7,6
Calculado	11,6	7,2

Através da análise dos resultados, verifica-se que a indutância mútua causada pela proximidade dos condensadores é negativa quando estes se encontram em alternância de polaridades, resultando num valor de indutância do conjunto inferior, em relação ao caso onde esta não se verifica.

5.4.3. Princípio da Contenção

No ensaio do princípio da contenção foram construídos três conjuntos de condensadores com a mesma capacidade utilizando num deles um único condensador, observável na Figura 54, e nos outros dois condensadores com metade da capacidade fazendo uso do princípio da contenção, observáveis na Figura 55 e Figura 56.

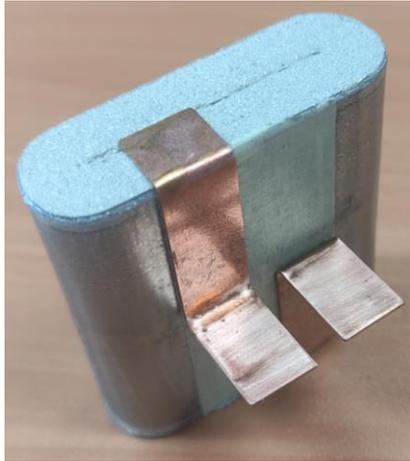


Figura 54 – Condensador de 25 μF com 52 mm de comprimento.



Figura 55 – Conjunto de dois condensadores de 12,5 μF e 27 mm de comprimento.

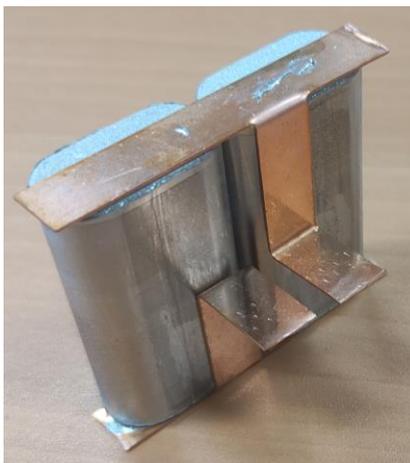


Figura 56 – Conjunto de dois condensadores de 12,5 μF e 52 mm de comprimento.

Na Tabela 27 encontram-se os resultados obtidos, para cada condensador, no ensaio do princípio da contenção

Tabela 27 – Resultados obtidos no ensaio do princípio da contenção.

	Indutância do conjunto (nH)		
	1 Condensador 52 mm	2 condensadores 27,5 mm	2 condensadores 52 mm
Medido	21,5	17,8	21,3
Calculado	21,9	18,3	23,6

Através da realização dos ensaios ao princípio de contenção verificou-se, que o valor de indutância dos conjuntos de condensadores onde este princípio foi empregue obtiveram um valor mais reduzido, embora, no caso onde o comprimento do condensador se manteve, a redução não foi significativa. Desta forma, este princípio obteve maior significado quando se utilizaram condensadores com comprimento inferior.

5.4.4. Princípios de Compensação e Cancelamento

Após a realização de ensaios individuais a cada princípio, foram feitos ensaios onde se combinaram dois princípios de cada vez.

No ensaio onde se combinaram os princípios de compensação e cancelamento foram elaborados dois conjuntos de condensadores onde um deles é composto por um barramento sem sobreposição e seis condensadores – Sim-6C, observável na Figura 57, e o outro é composto por um barramento totalmente sobreposto e seis condensadores em alternância de polaridades – Opo-6C utilizando ambos os princípios, observável na Figura 58. Os resultados das medições e cálculos efetuados aos conjuntos elaborados encontram-se na Tabela 28.

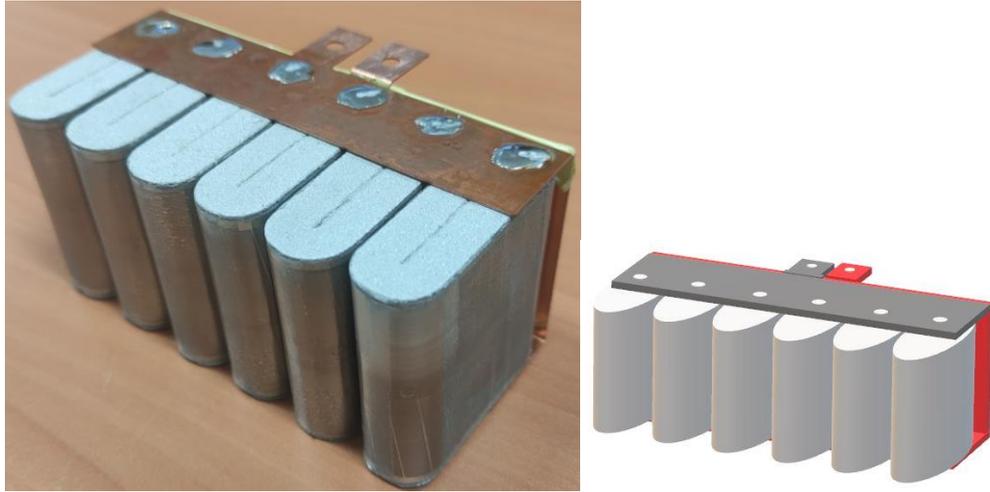


Figura 57 – Sim-6C - Barramento sem sobreposição com seis condensadores sem alternância de polaridades.

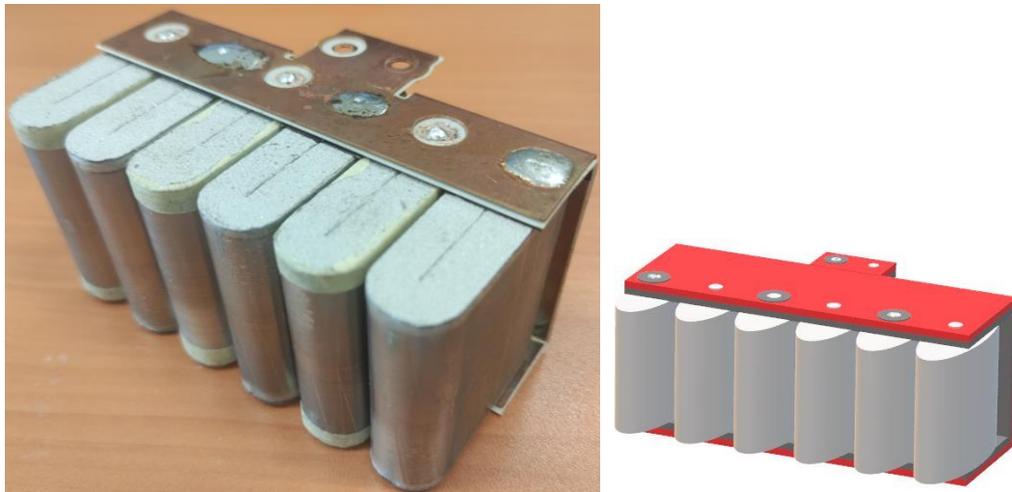


Figura 58 – Opo-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores em alternância de polaridades.

Tabela 28 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de compensação e cancelamento.

	Indutância do conjunto (nH)	
	Sem compensação e cancelamento (Sim-6C)	Com compensação e cancelamento (Opo-6C)
Medido	17,3	7,6
Calculado	16,7	7,2

Após a realização das medições e cálculos do valor de indutância de ambos os conjuntos, percebeu-se que a utilização destes dois princípios em simultâneo representa uma redução de cerca de 55 % no valor de indutância quando comparado com uma solução onde estes princípios não são empregues.

5.4.5. Princípios de Compensação e Contenção

No ensaio aos princípios de compensação e contenção foram elaborados dois conjuntos de condensadores com a mesma capacidade, em que num deles é constituído por um barramento sem sobreposição e apenas um condensador – Sim-1C, observável na Figura 59, e o outro conjunto é composto por um barramento totalmente sobreposto e seis condensadores sem alternância de polaridades – Sam-6C fazendo uso de ambos os princípios, observável na Figura 60. Os resultados das medições e cálculos efetuados aos conjuntos elaborados encontram-se na Tabela 29.

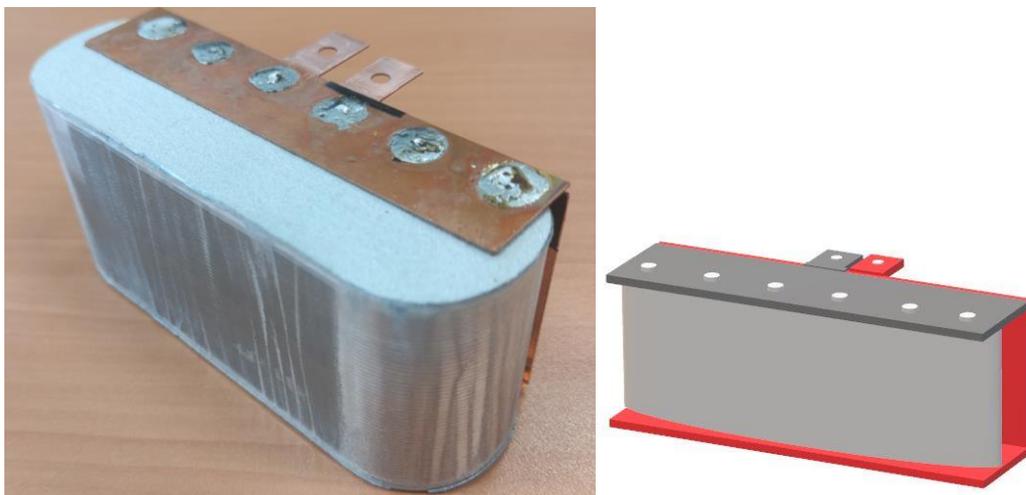


Figura 59 – Sim-1C - Barramento sem sobreposição com um condensador.



Figura 60 – Sam-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores sem alternância de polaridades.

Tabela 29 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de compensação e contenção.

	Indutância do conjunto (nH)	
	Sem compensação e contenção (Sim-1C)	Com compensação e contenção (Sam-6C)
Medido	18,9	12,3
Calculado	17,4	11,6

Através da realização destes ensaios foi possível observar que o valor de indutância do conjunto com maior número de condensadores se apresentou mais reduzido, sendo cerca de 65 % do valor obtido na ausência dos princípios de contenção e compensação.

5.4.6. Princípios de Contenção e Cancelamento

Para o ensaio aos princípios de contenção e cancelamento foram utilizados dois conjuntos de condensadores com a mesma capacidade, onde um deles é composto por um barramento totalmente sobreposto e um único condensador – Sam-1C, observável na Figura 61 e o outro é composto por um barramento totalmente sobreposto e seis condensadores em alternância de polaridades – Opo-6C, observável na Figura 62. Os resultados das medições e cálculos efetuados aos conjuntos elaborados encontram-se na Tabela 30.

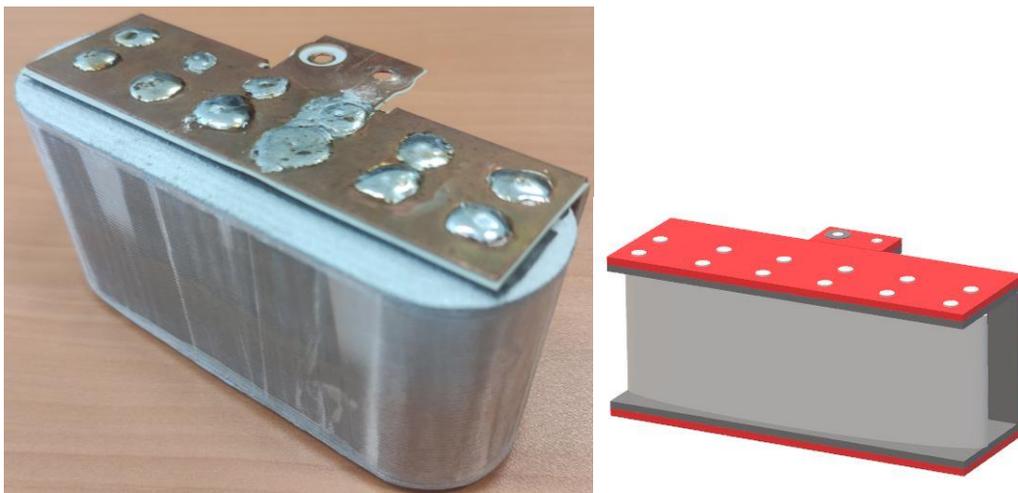


Figura 61 – Sam-1C - Barramento sobreposto com um condensador.

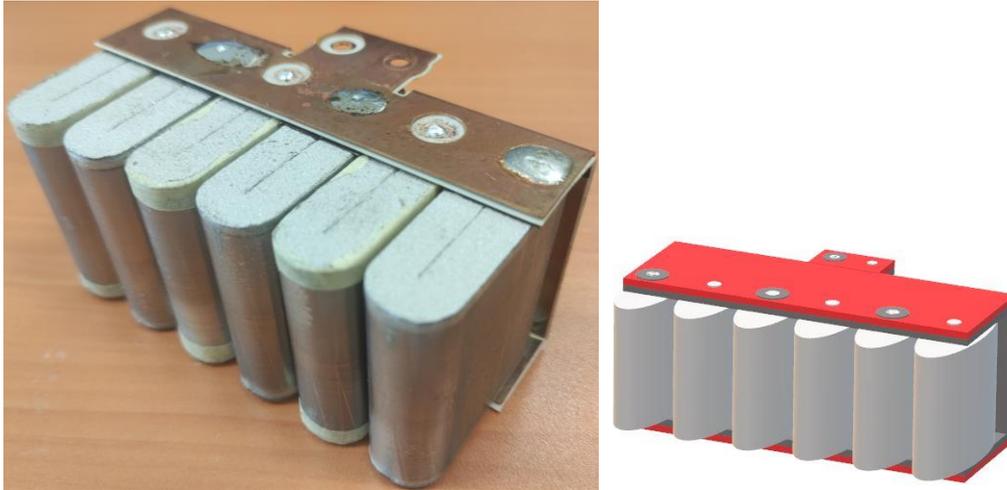


Figura 62 – Opo-6C - Barramento sobreposto com seis condensadores em alternância de polaridades.

Tabela 30 – Resultados obtidos no ensaio dos princípios de contenção e cancelamento.

	Indutância do conjunto (nH)	
	Sem contenção e cancelamento (Sam-1C)	Com contenção e cancelamento (Opo-6C)
Medido	16,7	7,6
Calculado	17,3	7,2

Após a realização deste ensaio percebeu-se que o valor de indutância obtido na utilização dos princípios de contenção e cancelamento é inferior a metade do valor obtido quando estes não são empregues.

5.5. Modelo de Cálculo

O modelo de cálculo elaborado considera quatro topologias de condutores distintas, uma para os terminais, outra para o barramento, outra para as ligações dos condensadores ao barramento, e outra para os próprios condensadores. De seguida é calculada a indutância mútua tendo em conta a colocação dos condensadores, e fatores de correção de acordo com a topologia do barramento. O modelo de cálculo foi elaborado com auxílio da ferramenta Excel, onde são adicionadas as dimensões físicas dos vários elementos do conjunto. Na Figura 63 é possível observar um exemplo do cálculo de indutância de um conjunto de condensadores através do modelo de cálculo elaborado na ferramenta Excel.

O modelo foi testado para diferentes configurações de conjuntos de condensadores. Na Tabela 31 é possível observar os resultados das medições e cálculos efetuados, através do modelo elaborado, para quatro conjuntos de condensadores e a sua diferença relativa.

Tabela 31 – Resultados obtidos através do modelo de cálculo para quatro topologias em estudo.

	Indutância do conjunto (nH)			
	P1-Marc	P2-MBISG-mod	Sim-6C	Opo-6C
Medido	13,3	4,6	17,3	7,6
Calculado	14,6	4,7	16,7	7,2
Diferença (%)	9	2	3	7

Através das medições e cálculos realizados aos quatro conjuntos de condensadores observa-se uma diferença entre os resultados apontando para um erro inferior a dez por cento, o que mostra alguma precisão na determinação do valor de indutância através do modelo de cálculo elaborado.

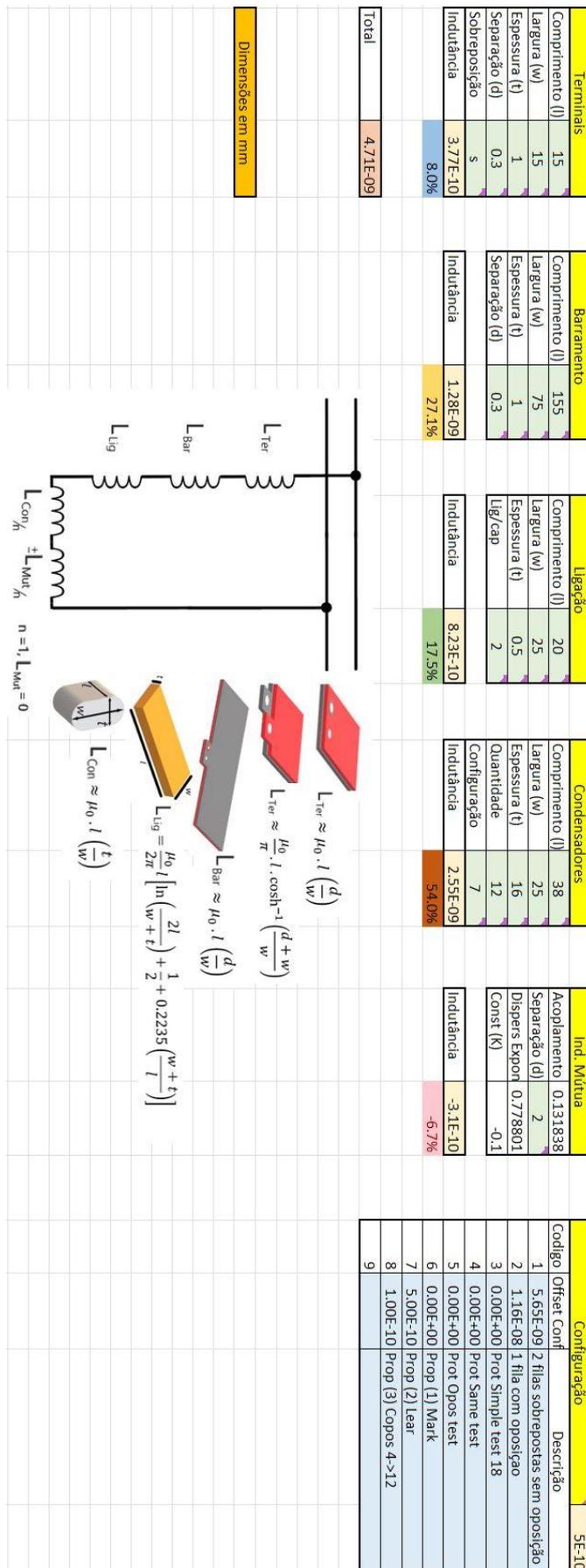


Figura 63 – Exemplo de calculo de indutância através do modelo elaborado.

5.6. Análise de Resultados

Após a realização dos testes e através da verificação dos resultados foi construída a Tabela 32, onde se pode verificar a redução percentual obtida na utilização dos princípios de mitigação de indutância quando comparado com uma solução da mesma capacidade, mas sem o uso destes. Destes resultados destacam-se, a redução obtida sempre que o princípio do cancelamento é empregue (apenas este, ou na combinação com outro) por obter a maior redução, e o princípio da contenção por apresentar a redução menos significativa.

Tabela 32 – Resultados dos ensaios aos princípios de mitigação de indutância parasita.

Princípio	Contenção	Compensação	Cancelamento
Contenção	8 a 26 %	35 %	54 %
Compensação	35 %	11 a 29 %	56 %
Cancelamento	54 %	56 %	25 a 28 %

Através da análise dos resultados dos testes, verificou-se que a utilização do princípio de compensação tem mais significado nos terminais do que nos barramentos, com reduções de 44 % e 1,5 % respetivamente.

De acordo com os resultados obtidos, para o caso de um conjunto de condensadores onde não foi aplicado nenhum princípio de mitigação e onde seja possível redesenhar o mesmo, mas com a utilização dos princípios, é possível obter uma redução de, aproximadamente 8 % utilizando o princípio da contenção, aproximadamente 35 % combinando os princípios da contenção e compensação, aproximadamente 60 % combinando os três princípios (contenção, compensação e cancelamento). Como desvantagens existe uma maior complexidade de desenho e elaboração devido às normas de fabrico e, em alguns casos, maior custo devido ao acréscimo de material.

5.7. Definição das Diretivas

Para a definição de diretivas, foi tido em conta o resultado dos testes feitos na utilização de cada princípio de mitigação e na conjugação destes, onde se verificou a atenuação provocada pela implementação de cada princípio e o custo/dificuldade de implementação num produto para o mercado.

A definição das diretivas pretende aperfeiçoar as técnicas de construção do conjunto de condensadores de modo que o seu valor de indutância seja o mínimo possível de acordo com as métricas fornecidas pelo cliente.

Após a verificação dos resultados, percebeu-se que grande parte da indutância está presente nos terminais e nos condensadores e uma pequena parte, menor que dez por cento, encontra-se no barramento propriamente dito. Desta forma, procedeu-se ao aperfeiçoamento das diretivas para orientar a futura construção de conjuntos de condensadores, definindo-se as seguintes regras:

- Os condensadores devem ser dispostos em alternância de polaridades.
- Os terminais e barramentos devem sobrepor-se, sendo isolados por um dielétrico de baixa espessura;
- Deve, sempre que possível, preferenciar-se a utilização de condensadores com largura de fita reduzida;
- Sempre que possível deve dispor-se os condensadores na horizontal fazendo com que o seu centro fique o mais próximo possível do barramento;
- Os condensadores devem ser colocados o mais próximo possível do barramento, e o mais próximo possível dos adjacentes;
- As ligações dos condensadores devem ser curtas e largas, preferindo-se o maior número possível de ligações.
- A largura dos barramentos deve ser reduzida ao mínimo possível que permita a inserção dos condensadores;
- Na utilização de várias filas de condensadores, estes devem ser dispostos em filas à mesma distância do barramento, aumentando a largura do mesmo;

Este conjunto de regras foi validado pela elaboração de um protótipo final onde as diretivas foram empregues na sua construção.

5.8. Protótipo Final Desenvolvido

Dos três modelos propostos para o estudo foram elaborados dois, aos quais foram realizadas medições e cálculo do seu valor de indutância. Os barramentos e terminais foram desenhados de acordo com as diretivas propostas, assim como o número de condensadores e a sua disposição.

Para ambos foi calculado o seu valor de indutância tendo em conta o modelo de calculo elaborado e de seguida construído o protótipo e realizada a medição do valor de indutância.

Após a verificação dos resultados foi selecionado o que obteve o valor de indutância mais reduzido. Na Figura 64, é possível observar o protótipo final, elaborado com recurso às diretivas supramencionadas.

Na Tabela 33 encontram-se os resultados obtidos para o protótipo final elaborado, tanto através do modelo de calculo elaborado, como através das medições realizadas no *LCR meter*.

Tabela 33 – Valor de indutância medido e calculado do Protótipo P2-MBISG-mod.

	Indutância do conjunto (nH)
Medido	4,6
Calculado	4,7

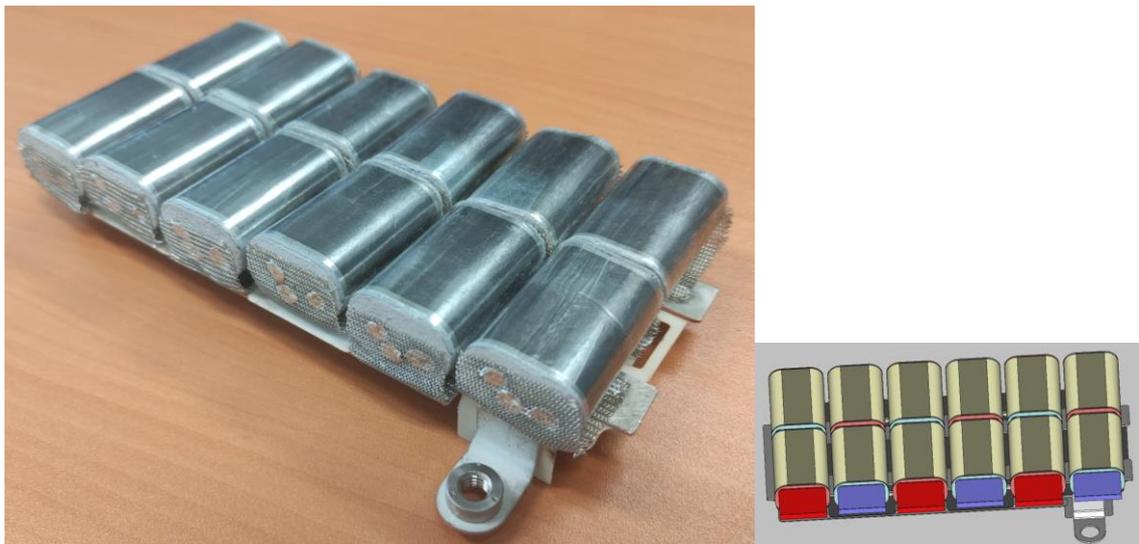


Figura 64 – P2-MBISG-mod - Protótipo final elaborado.

6. CONCLUSÃO

6.1. Conclusão

Com a realização deste trabalho foi possível perceber que a indutância presente nos conjuntos de condensadores representa uma limitação na sua utilização no que diz respeito às frequências de operação. Este problema está cada vez mais presente nas soluções de eletrónica de potência, uma vez que, a procura por soluções mais eficientes tem levado a um aumento nas frequências de operação dos semicondutores, o que faz com que os *DC-links* tenham restrições mais elevadas no que toca à sua indutância parasita.

Ao longo da realização do trabalho, foram investigados métodos de cálculo e mitigação de indutância parasita tendo culminado na elaboração de um modelo de cálculo de indutância parasita e num conjunto de diretivas de construção dos conjuntos de condensadores. Foram também elaborados vários protótipos com o objetivo de aperfeiçoar o modelo de cálculo e testar as reduções de indutância para o uso dos princípios de mitigação. Desta forma, foi possível perceber que a adoção dos princípios de mitigação de indutância contribui significativamente para a sua redução.

As equações de cálculo dos valores de indutância, presente em cada secção dos conjuntos de condensadores, foram elaboradas de acordo com os princípios do eletromagnetismo e as leis da física, e a sua combinação teve em conta os resultados obtidos ao longo da realização do trabalho, formalizando um modelo geral de cálculo onde são consideradas as diferentes secções do conjunto de condensadores e a sua combinação. Desta forma, e tendo em conta as características geométricas do conjunto de condensadores, é possível determinar o seu valor de indutância equivalente com um erro de aproximadamente 10 %.

O conjunto de diretivas de construção dos conjuntos de condensadores teve por base as observações realizadas aos protótipos elaborados no decorrer do trabalho, em conjunto com os processos produtivos, e terminou com a criação de um procedimento interno para toda a equipa de R&D da Vishay, que pode ser consultado nos anexos deste documento.

Por último foi idealizado e construído um protótipo final onde foram empregues as diretivas de construção, obtendo-se resultados de indutância equivalente abaixo dos 5 nH, sendo este valor inferior ao de outros fabricantes. Este protótipo foi previamente calculado através do modelo elaborado, onde se verificou a sua fiabilidade.

6.2. Perspetivas Futuras

O estudo aqui apresentado foi concebido reduzindo o número de possibilidades de montagem e geometria de forma a conseguir perceber-se as principais interações entre a geometria e disposição de condensadores e o seu valor de indutância equivalente. Desta forma perspetiva-se um alargamento do trabalho aos mais diversificados modelos de conjuntos de condensadores, tendo em conta o crescimento do número de produtos da Vishay.

Futuramente, e de forma a dar continuidade ao estudo aqui apresentado, perspetiva-se a utilização do modelo de cálculo de indutância para desenvolver um *software* que permita facilitar o cálculo e simulação de diferentes modelos de conjuntos de condensadores tendo em vista a minimização do seu valor de indutância.

Como as restrições de indutância parasita dos conjuntos de condensadores são cada vez mais rigorosas torna-se difícil para os LCR meter conseguirem obter os valores corretos, uma vez que a sua precisão se encontra fora das tolerâncias para as requeridas gamas de medida. Neste sentido, seria útil a construção de um equipamento de elevada precisão para gamas de medida inferiores a 1 nH de fácil adaptação para medições em diferentes conjuntos de condensadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. Energy Agency, “Global EV Outlook 2022 Securing supplies for an electric future,” 2022. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [2] J. Jenkins, “A closer look at the DC Link,” *Charged EVs Magazine*, Nov. 10, 2020.
- [3] B. Zheng, Y. Cao, X. Li, and T. Shi, “An Improved DC-Link Series IGBT Chopping Strategy for Brushless DC Motor Drive with Small DC-Link Capacitance,” *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 36, no. 1, pp. 242–252, Mar. 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3008902.
- [4] M. A. Brubaker, H. C. Kirbie, and T. A. Hosking, “Integrated DC link capacitor/bus structures to minimize external ESL contribution to voltage overshoot,” 2012. doi: 10.1109/ITEC.2012.6243453.
- [5] S. Huo, D. Xu, L. Liu, and X. Bian, “Analysis of Internal Electric Field and Optimization of Insulation Structure in Metallized Film Capacitors,” in *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP*, Oct. 2020, vol. 2020-October, pp. 300–303. doi: 10.1109/CEIDP49254.2020.9437485.
- [6] J. Svarny, *Laboratory Fixture for Measurement of Dielectric Absorption of Capacitors*. Pilsen: International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering, 2018.
- [7] R. W. Doncker, “DC Underlay Grids for Charging stations - EVs and Grids Partners for Charging in the Urban Environment?,” *ECPE online Workshoop*. ECPE, 2021.
- [8] B. Riegler and A. Mutze, “Volume Comparison of Passive Components for Hard-Switching Current- and Voltage-Source-Inverters,” Nov. 2021, pp. 1902–1909. doi: 10.1109/ecce47101.2021.9595392.
- [9] R. W. Brown, “Equivalent series and parallel equivalent circuits for metallized film capacitors,” *TENCON 2007 IEEE Region 10 Conference*, Aug. 2007, doi: 10.1109/TENCON.2007.4429072.
- [10] H. Zhang and Q. Jiang, “Accurate Measurement of Key Parameters of Film Capacitors for EV Power Control Unit,” *2019 IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference, IFEEC 2019*, Nov. 2019, doi: 10.1109/IFEEC47410.2019.9014981.
- [11] R. Alizadeh, M. Schupbach, T. Adamson, J. C. Balda, and Y. Zhao, *Busbar Design for Distributed DC-Link Capacitor Banks for Traction Applications*, ECCE 2018. IEEE Energy Conversion Congress & Expo, 2018.

- [12] J. Schnack, J.-P. Goerdes, S. Stahl, U. Schuemann, R. Mallwitz, and H.-P. Tiedemann, "Design of Bypass Network for Fast Switching Inverters using an Innovative Hybrid DC-Link," Aug. 2021, pp. 1–8. doi: 10.1109/cpe-powereng50821.2021.9501194.
- [13] H. Wang and F. Blaabjerg, "Reliability of capacitors for DC-link applications in power electronic converters - An overview," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Sep. 2014, vol. 50, no. 5, pp. 3569–3578. doi: 10.1109/TIA.2014.2308357.
- [14] J. Cain, "Parasitic Inductance of Multilayer Ceramic Capacitors," 2020.
- [15] V. Roederstein, "General Technical Information Film Capacitors," Mar. 2022. [Online]. Available: www.vishay.com/doc?91000
- [16] A. Patzak and D. Gerling, "Design of a multi-phase inverter for low voltage high power electric vehicles," Mar. 2015. doi: 10.1109/IEVC.2014.7056143.
- [17] T. Burress, "Benchmarking State-of-the-Art Technologies Oak Ridge National Laboratory 2013 U.S. DOE Hydrogen and Fuel Cells Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting," May 2013.
- [18] S. Srdic, C. Zhang, and S. Lukic, *A Low-Inductance Sectional Busbar for Snubberless Operation of SiC-Based EV Traction Inverters*, ECCE 2019. IEEE, 2019.
- [19] Z.-N. Ariga and K. Wada, "Laminated Bus Bar Structure for Low Induced Noise," 2012.
- [20] J. Schnack, V. Golev, and J. P. Gordes, *Low-Inductance DC-Link Design dedicated to SiC-based Highly Integrated Inverters*, CIPS 2020 11th. Berlin: IEEE International Conference of Power Electronics, 2020.
- [21] "DC-Link Capacitor | Film Capacitor | Eagtop." <http://www.passivedevice.com/1-3-film-capacitor.html> (accessed Dec. 20, 2021).
- [22] R. Bayerer, "Geometry of conductors and their inductance," Oct. 2021.
- [23] Spartaco. Caniggia and Francescaromana. Maradei, *Signal integrity and radiated emissions of high-speed digital systems*. Wiley, 2008.
- [24] P. Clayton, *INDUCTANCE - Loop and Partial*. 2009.
- [25] M. Simic, "Realization of complex impedance measurement system based on the integrated circuit AD5933," in *2013 21st Telecommunications Forum Telfor, TELFOR 2013 - Proceedings of Papers*, 2013, pp. 573–576. doi: 10.1109/TELFOR.2013.6716294.
- [26] R. Malaric, P. Mostarac, G. Petrovic, and J. Havelka, "Method for nonlinear fitting and impedance analysis with LCR meter," in *Proceedings of the 23rd International Conference*

- Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2016*, Aug. 2016, pp. 410–414. doi: 10.1109/MIXDES.2016.7529776.
- [27] B. Waltrip, S. Avramov-Zamurovic, and A. Koffman, “Inductance measurement using an LCR meter and a current transformer interface,” in *Conference Record - IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2005, vol. 2, pp. 1005–1007. doi: 10.1109/imtc.2005.1604290.
- [28] British Standards Institution, *Insulation coordination for equipment within low-voltage supply systems. Part 1, Principles, requirements and tests.*, 3rd ed. IEC, 2020.
- [29] J. Cain, A. Martin, B. Smith, J. Galvagni, Y. Chase, and J. Prymak, “AVX Low Inductance Capacitors,” 2021.
- [30] L. Cabo and F. Rodríguez, “Innovative power capacitor technologies for wide band-gap semiconductors Advanced design features for high-frequency applications,” 2019.
- [31] WIMA, “WIMA_Customized_DC_Link,” Jun. 2021.
- [32] J. Schnack, V. Golev, U. Schumann, and R. Mallwitz, *An Investigation in DC-Link Capacitors for reduced Parasitic Inductances*, PCIM Europe 2019. Nuremberg: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2019.
- [33] S. Zhao and W. Chou, “Analytic Model of the Voltage Oscillation in a Power Conversion System with DC-Link Capacitors,” in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Oct. 2021, pp. 5554–5560. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595713.
- [34] M. Kumar, R. K. Yakala, and S. Pramanick, *Improved Interconnect Layout of DC Link Capacitor Bank to Minimize Parasitic Inductance and its Effect on Performance of SiC MOSFET*, IEEE PESGRE 2020. Kerala: IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, 2020.
- [35] G. Stevens, “Determining the self-inductance by short circuit testing GST 2020-07-17,” Jul. 2020.

ANEXOS

I. CONCEITOS TEÓRICOS

Condensador

O condensador é descrito pela sua principal função de armazenar cargas sob a forma de um campo elétrico. Do seu ponto de vista ideal, esta suposição torna-se útil para a análise dos circuitos elétricos, contudo, existem alguns fenómenos intrínsecos ao condensador que são descritos por circuitos equivalentes, onde existe, predominantemente, o condensador, resistência e indutância ideais.

Através da análise do circuito equivalente simplificado do condensador de filme, observável na Figura 65, verifica-se a existência de dois principais componentes que afetam o seu funcionamento, criando perdas por efeito de Joule, no caso da resistência, e impedindo as variações da corrente, no caso da indutância.

Apesar dos efeitos provocados por ambos os componentes indesejados, o valor da reactância indutiva é proporcional à frequência, fazendo com que o seu valor se sobreponha à reactância capacitiva, após a frequência de ressonância, tornando o condensador inútil a partir dessa frequência. O valor de resistência é residual devido à forma de construção do condensador tornando-se pouco significativo relativamente ao valor de indutância.

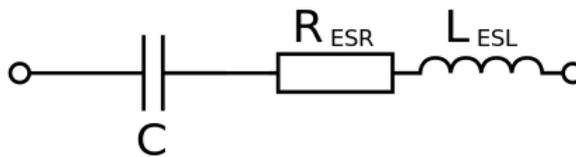


Figura 65 – Circuito equivalente do condensador de filme simplificado.

Indutância

A indutância é descrita como a capacidade de armazenar energia sob a forma de um campo magnético, ou seja, é também a capacidade que um dado material tem para transformar a energia de um campo magnético numa corrente elétrica.

Este princípio é utilizado nos transformadores, onde o enrolamento primário produz um campo eletromagnético que é transmitido, através de meios ferromagnéticos, para o enrolamento do

secundário onde é induzida uma corrente neste enrolamento. É também possível observar que, aquando da ligação do transformador, o valor da corrente de magnetização, do inglês *in-rush current*, é cerca de catorze vezes superior ao valor nominal (depende do transformador), isto deve-se à autoindução que limita o valor de corrente nos enrolamentos, pois caso não existisse indutância, o valor de corrente seria limitado pela resistência do enrolamento e teria um valor de pico constante independentemente da corrente dos enrolamentos.

Campo Eletromagnético

Os condutores, ao serem percorridos por uma corrente elétrica produzem, à sua volta, um campo eletromagnético (Lei de Ampère). Do ponto de vista dos condensadores, estes também se comportam como um condutor quando são percorridos por uma corrente elétrica durante a carga e descarga, logo, nestes momentos, surge um campo eletromagnético à sua volta.

Na Figura 66 pode observar-se uma representação das linhas de campo magnético produzido por um condutor quando este é percorrido por uma corrente elétrica.

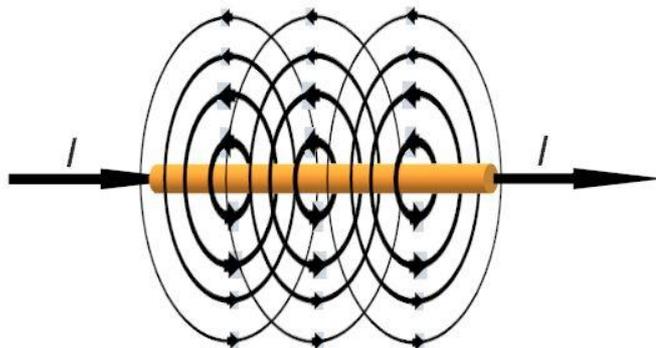


Figura 66 – Representação do campo eletromagnético produzido por uma corrente elétrica.

De salientar que existem diferenças entre o campo magnético criado por uma corrente constante e uma corrente variável no tempo. Desta forma quando a corrente tem um valor constante o campo magnético é também constante, quando a corrente é variável no tempo, o campo magnético é também variável, opondo o seu sentido sempre que a corrente passa pelo valor zero.

Acoplamento de Indutâncias

O campo magnético criado por um condutor interage com o campo magnético de um segundo condutor fazendo aumentar, ou diminuir a sua intensidade de acordo com o sentido de ambos, isto é, para dois campos com a mesma direção e sentido a sua interação cria uma maior

intensidade do campo resultante, já no caso de terem sentidos opostos, a sua interação faz diminuir a intensidade do campo resultante.

Quando duas indutâncias estão próximas, dá-se o acoplamento das mesmas criando uma indutância mútua, que tanto pode ser adicionada ao valor de ambas, como subtraída, de acordo com a sua influência no campo resultante.

Pode então dizer-se que cada indutância tem o seu valor próprio (auto indutância) e na interação com outra adquire outro valor (indutância mútua).

Mitigação da Indutância Parasita

A indutância parasita é uma propriedade dos condutores e componentes elétricos. Esta propriedade faz com que cada elemento de um circuito elétrico, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, induza nele próprio e nos elementos próximos, uma corrente elétrica que se opõem à variação da primeira.

A indutância parasita pode ser observada em qualquer elemento de um circuito elétrico, onde se verifique uma distância entre os condutores de ida e retorno da mesma corrente elétrica.

Para que o valor da indutância parasita se observe reduzido, torna-se necessário utilizar os princípios de contenção, compensação e cancelamento dos campos eletromagnéticos.

A contenção dos campos eletromagnéticos ocorre sempre que se consegue reduzir o espaço onde a permeabilidade magnética é elevada, desta forma, torna-se mais difícil existir um campo eletromagnético, reduzindo assim o valor de indutância nos condutores próximos. Pode fazer-se através da utilização de superfícies metálicas envolvendo os condutores, sendo estas superfícies o caminho de retorno da corrente do condutor que envolvem. No caso dos condensadores, utilizando uma chapa de cobre envolvendo todo o condensador, estando esta ligada a um dos terminais, irá fazer com que a corrente que atravessa o condensador tenha o seu caminho de retorno muito próximo, reduzindo assim a sua suscetibilidade aos campos eletromagnéticos circundantes.

A compensação dos campos magnéticos ocorre sempre que os condutores de ida e retorno da corrente estão próximos, fazendo com que o campo magnético produzido tenha valor inferior. Para se fazer uso deste princípio recorre-se à sobreposição dos barramentos. Apesar de nem sempre ser possível fazer a sua sobreposição na totalidade, reduz-se ao mínimo possível as secções do barramento que não se conseguem compensar de modo a reduzir o valor de indutância.

O princípio do cancelamento do campo eletromagnético pode ser utilizado através da criação de um campo eletromagnético semelhante, com a mesma direção, mas de sentido oposto, na proximidade do primeiro, o que irá fazer com que o campo eletromagnético resultante tenha uma intensidade inferior, reduzindo assim o valor da indutância dos condutores nas proximidades de ambos. Para se utilizar este princípio, utiliza-se a inversão de polaridades entre os condensadores próximos de forma que cada par de condensadores tenha dois campos eletromagnéticos semelhantes e de direções opostas, reduzindo a intensidade do campo eletromagnético resultante.

II. OUTRAS FORMAS DE OBTENÇÃO DO VALOR DE INDUTÂNCIA

Cálculo através da Tensão Induzida

Para o cálculo da indutância através da tensão induzida recorre-se à equação 22 que permite obter o valor da tensão aos terminais da indutância através da variação da corrente que a atravessa e do seu valor de indutância. Onde $v_l(t)$ representa o valor da tensão, L o valor da indutância, e, $\frac{di(t)}{dt}$ representa a variação de corrente em relação ao tempo [24].

$$v_l(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (22)$$

Sendo este teste feito por uma variação repentina da corrente aos terminais do condensador, este, tem de ser feito com o condensador carregado e, com um pulso de curta duração acionado por um semicondutor, que ao ser desligado, vai fazer surgir uma tensão aos terminais do semicondutor, e uma variação de corrente no circuito [32], [33], [10], [34]

Cálculo através da Frequência de Oscilação Natural

O cálculo através da frequência de oscilação natural é feito recorrendo da equação 23, onde f_o é o valor da frequência de oscilação, L e C representam respetivamente o valor da indutância parasita e da capacidade do condensador, R representa o valor da resistência série parasita [35].

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (23)$$

Com o auxílio de um equipamento que permite fechar o circuito aos terminais do condensador quando este está carregado, formando uma corrente sinusoidal amortecida Figura 67 onde, através da frequência do sinal de corrente, é possível determinar o valor da impedância conhecendo o valor do condensador [35].

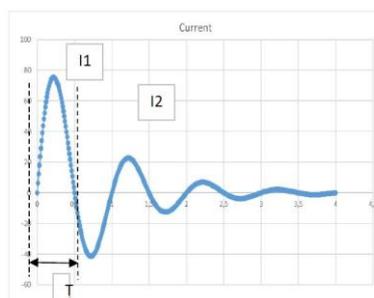


Figura 67 – Sinal de corrente amortecido para um circuito RLC série.

Através do período T da onda de corrente é possível determinar a frequência de ressonância e, recorrendo da equação 23, conhecendo o valor do condensador e as características do equipamento, é possível determinar o valor de L .

III. ENSAIOS PRELIMINARES

Analizador de Impedâncias

O equipamento utilizado (*LCR meter*) para a medição de impedâncias é o modelo E4980A do fabricante Agilent Technologies. Este equipamento deve ser ligado e aquecer durante cerca de trinta minutos antes de qualquer utilização. Para a realização das medições deve ser feita a correção dos seus parâmetros parasitas. Esta correção é feita através de três funções de correção *short*, *open* e *load*, sendo o *open* realizado apenas com o *test fixture* colocado, o *short* é realizado com um dispositivo de correção (chapa em U) colocada no *test fixture*, e o *load* realizado com uma carga, de parâmetros conhecidos, colocada no *test fixture*. Finalmente para fazer a medição de um componente (DUT do inglês *Device Under Test*) após o procedimento, basta inserir o DUT no *test fixture* e dar início à medição no botão de *trigger*.

Nos primeiros ensaios realizados no equipamento foi feita uma medição de indutância ao dispositivo de correção, onde se verificou que esta apresenta um valor entre 13 nH e 20 nH. Foi realizada a correção do tipo short com o dispositivo colocado no *test fixture* e posteriormente realizada uma nova medição onde se verificou que o valor que tinha sido previamente obtido se encontrava aproximadamente a zero. Desta forma percebeu-se que a correção através deste procedimento introduz um *offset* no valor medido na ordem dos 20 nH, o que representa uma grande dificuldade na obtenção de valores corretos na mesma ordem de grandeza.

Após ser detetado este problema deixou de se fazer este tipo de correção.

Barramentos Simples

Numa primeira fase foram construídos três modelos de barramentos simples, compostos por duas superfícies planas sobrepostas e separadas por um dielétrico com 0,3 milímetros de espessura. Foram realizadas medições ao seu valor de indutância, onde não se obteve valores positivos, ou seja, para a gama de frequências do equipamento de medição (DC até 2 MHz) os barramentos comportavam-se como condensadores, tendo uma frequência de ressonância superior aos 2 MHz. Percebeu-se então que, para obter o valor de indutância dos barramentos, teria de se anular o efeito da capacidade. Deste modo foi feito um curto-circuito na extremidade oposta aos terminais, fazendo com que as indutâncias de ambas as superfícies ficassem em série.

De forma a ser possível observar o valor da indutância de um barramento foram construídos três barramentos, com dimensões conhecidas.

O barramento um (1), ilustrado na Figura 68, tem um comprimento de 75 mm e uma largura de 87 mm, sendo formado por duas chapas de cobre com uma espessura de 1 mm e separadas por um material isolador com espessura de 0,3 mm. Os seus terminais têm 20 mm de comprimento, 13 mm de largura e encontram-se afastados 9 mm.

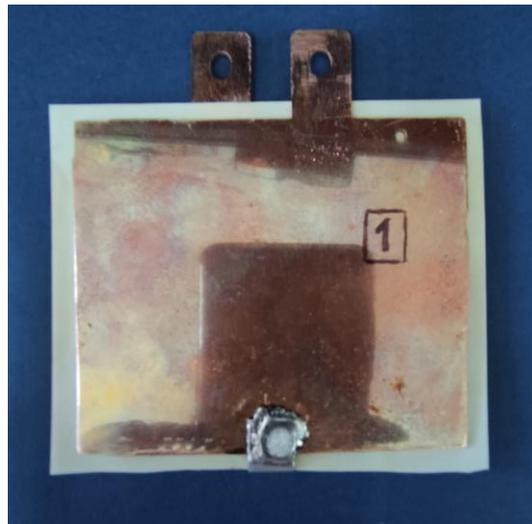


Figura 68 – Barramento I.

O barramento dois (2), ilustrado na Figura 69, tem um comprimento de 55 mm e uma largura de 166 mm, sendo formado por duas chapas de cobre com uma espessura de 1 mm e separadas por um material isolador com espessura de 0,3 mm. Os seus terminais têm 20 mm de comprimento, 16 mm de largura e encontram-se afastados 6 mm.

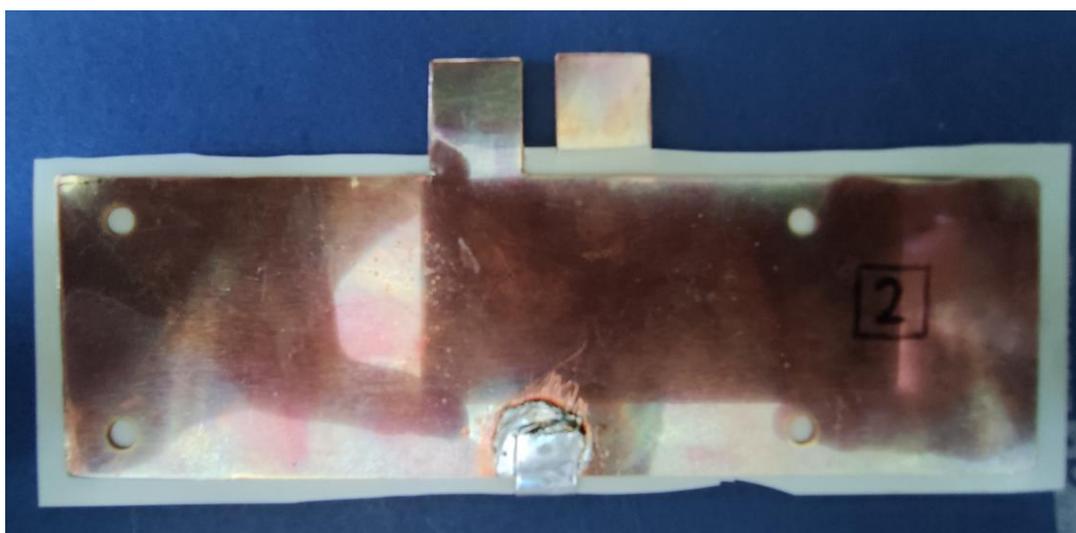


Figura 69 – Barramento II.

O barramento três (3), ilustrado na Figura 70, tem um comprimento de 115 mm e uma largura de 102 mm, sendo formado por duas chapas de cobre com uma espessura de 0.5 mm e separadas por um material isolador com espessura de 0,3 mm. Os seus terminais têm 17,5 mm de comprimento, 11 mm de largura e encontram-se afastados 14 mm.



Figura 70 – Barramento III.

Primeiramente fizeram-se os cálculos do valor de indutância de cada barramento, tendo em consideração as dimensões dos seus terminais, pois o maior valor de indutância encontra-se nestes, por estarem mais afastados um do outro do que as superfícies do barramento, tendo assim obtido os valores de indutância presentes na Tabela 34.

Após o cálculo, foi efetuada a medição do valor de indutância equivalente com o auxílio do analisador de impedâncias, surgindo ligeiras diferenças entre o valor calculado e lido. Estas diferenças devem-se a erros de medição devido à ligação ao analisador.

Tabela 34 – Resultados obtidos no analisador de impedâncias para os barramentos um, dois e três.

Barramento	Indutância nos terminais (nH)	Indutância total (nH)	Indutância medida (nH)
I	17,3	17,4	17,0
II	9,4	9,5	20,0
III	28,0	28,3	23,5

Nos ensaios realizados obtiveram-se valores próximos aos calculados, destacando-se alguma diferença pelo facto de ter sido feita uma ligação de curtas dimensões e também devido a erros de medição.

Condensadores Individuais

Nos primeiros ensaios em condensadores individuais foram selecionados vários condensadores com diferentes larguras de fita, aos quais foram soldados condutores redondos para facilitar a medição do seu valor de indutância. De forma a possibilitar a medição do condensador na vertical e na horizontal, soldaram-se condutores redondos ao longo do comprimento e largura dos terminais.

Nestes ensaios percebeu-se que quanto mais longe do ponto de medida ficar o centro do condensador, maior será o valor de indutância.

No início da fase de elaboração dos protótipos de teste, foi proposto um design com uma chapa de cobre para ligar um dos terminais, a qual fica encostada ao longo da maior superfície plana do condensador, produzindo um caminho de retorno da corrente próximo. Foi elaborado um conjunto de condensador e chapa e feita a medição da sua indutância, percebendo-se que o valor de indutância era parcialmente anulado pela proximidade da chapa ao condensador, obtendo-se o valor de 14,5 nH.

De forma a criar um caminho de retorno da corrente o mais próximo e envolvente possível, foram elaborados dois “copos” com tiras de cobre, e colocados nas extremidades do condensador, envolvendo o condensador na sua totalidade. Este protótipo pode ser observado na Figura 71. Através das medições realizadas, percebeu-se que o valor de indutância era reduzido, aproximadamente 12,1 nH, tendo em conta o valor de indutância calculado apenas para o condensador, aproximadamente 22,6 nH. Neste caso, o valor de indutância era inferior ao caso em que existe uma chapa ao longo do condensador.

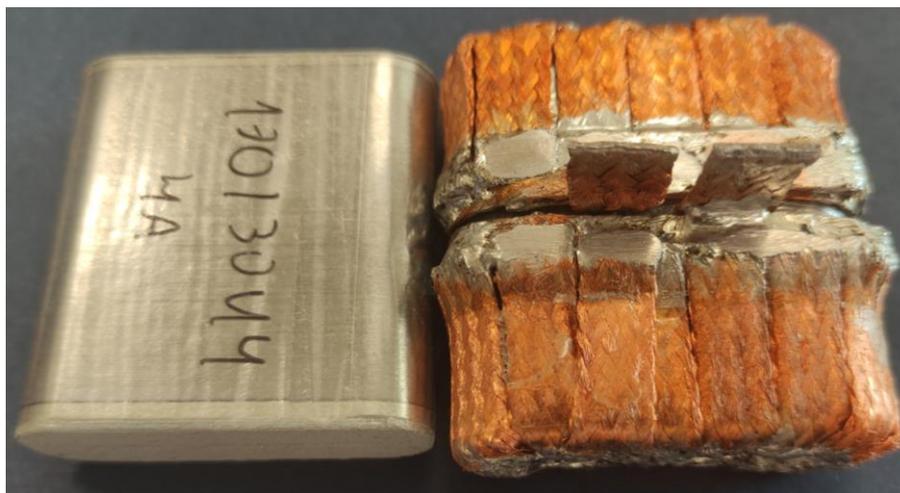


Figura 71 – Protótipo de terminais em forma de copo.

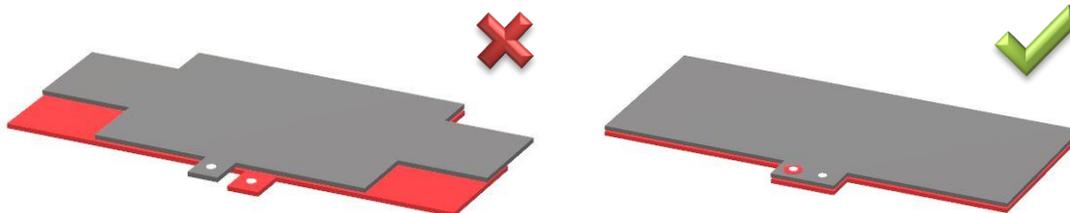
IV. PROCEDIMENTO INTERNO ELABORADO

TO: R&D
FROM: Tiago Costa REPORT NR: HQR_RnD_22-xxx
SUBJECT: Design Rules to minimize ESL in DC-links
DATE: 2022-05-19
CC: Luiz Dias; José Campos; Marc Vanoosthuysen

Design Principles to better self-inductance

1. Compensation

The Compensation principle is to make a parasitic capacitance at every centimeter of length of busbar and terminals. To do that we must have in account the principles of capacitor, so we must place the busbar and terminals overlaid to have parasitic capacitance to oppose the inductance created by the length of the Busbar and terminals. In the figure below we can observe two examples to place the busbar, in that it is possibly understand the most overlaid busbar have a better result in terms of inductance.



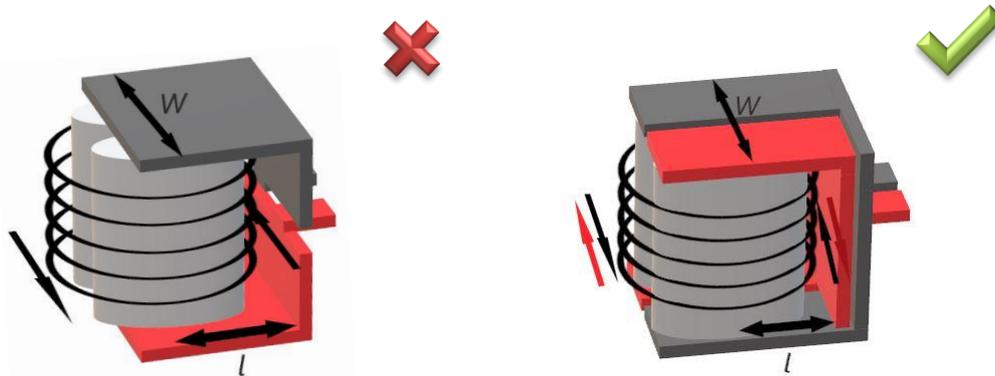
In the second example we can observe the use of the principle of compensation by overlying the totality of the busbar and terminals.

2. Cancelation

The Cancelation principle is to have too near magnetic fields with the same direction and magnitude, but in opposition, to make the resultant magnetic field weaker. To do that it is used the inversion of polarities of the capacitor cells, resulting in currents that have the same magnitude but have opposite directions making opposite magnetic fields. In the figure below we can observe

Caracterização Elétrica de Barramentos Laminados para *DC-links*

too examples of placement of the capacitors, in that is possibly understand the situation that have opposition of polarities creates a weaker resultant magnetic field.



In the second example it is possible observe to minimize the resultant magnetic field the capacitor cells must have placed near each other to make the cancelation of the magnetic field.

3. Containment

The Containment principle is to minimize the propagation of the magnetic field, that can be made by using of some little capacitor cells instead of one big cell with the total capacity. As the magnetic fields are in a perpendicular plane to the conductor, more length signifies more magnetic field, so to use that principle we need to use smaller capacitors instead of the taller. In the figure below we can observe too examples in first case is used one big capacitor cell and in the second case are used four capacitors' cells with a small size making the same total capacity.



In case of the use four cells, we can observe the magnetic fields between the capacitor are in opposition, this reduces the resultant magnetic field.

Summary of benefits of the principles

In the next table is possible to understand the benefit of the use of each principle and the conjugation of two when compared with a solution without the principles, the variations observed correspond at different tests for each principle made in different prototypes.

Principle	Containment	Compensation	Cancelation
Containment	8 -> 26 %	35 %	54 %
Compensation	35 %	11 -> 29 %	56 %
Cancelation	54 %	56 %	25 -> 28 %

In combination of the three principles, we can achieve at one reduction of 60% of the total ESL.

Design Rules to take in account to minimize ESL

In the investigation made at the R&D we find that the ESL can be minimized using the principles above mentioned, by using some technics to design the DC-links:

- The alternating of polarities must have adopted in every DC-links (unless it is impossible).
- The terminals and the busbar must be placed overlaid the much possible, separated by a dielectric material with reduced thickness.
- We must prefer solutions with capacitor cells with a reduced width of film tape.
- The capacitors must have placed near to the busbar, the much possible.
- The links of the capacitors must have small size and a bigger width, and the major number possible of links.
- The size of the busbar (in the current direction) must be reduced at the minimum possible.
- We don't have place the capacitors in lines one above the others, we must place them in lines near to the busbar, reducing the size of the links.
- We must place how much is possible the capacitors in the horizontal, making reduced size links.

We must have in mind that is not a perfect solution in all cases because of the constrains imposed by the product characteristics