

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO – PPGEEL**

**ALESSANDRA CAROLINE FRAGOSO**

**CÁLCULO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO  
PARA APLICAÇÃO EM BARRAMENTO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

**JOINVILLE**

**2026**

**ALESSANDRA CAROLINE FRAGOSO**

**CÁLCULO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO  
PARA APLICAÇÃO EM BARRAMENTO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEEL, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer

**JOINVILLE**

**2026**

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da  
Biblioteca Universitária Udesc,  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Fragoso, Alessandra Caroline

Cálculo do circuito equivalente de capacitor de filme plástico para aplicação em barramento CC de conversores estáticos / Alessandra Caroline Fragoso. -- 2026.

112 p.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2026.

1. Capacitor de filme plástico metalizado. 2. Circuito equivalente do capacitor. 3. Indutância série equivalente. 4. Resistência série equivalente. I. Batschauer, Alessandro Luiz . II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

**ALESSANDRA CAROLINE FRAGOSO**

**CÁLCULO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DE CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO  
PARA APLICAÇÃO EM BARRAMENTO CC DE CONVERSORES ESTÁTICOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEEL, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

**BANCA EXAMINADORA**

Dr. Alessandro Luiz Batschauer

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Membros:

Dr. Alessandro Luiz Batschauer

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Dr. Fabrício Bradaschia

Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Dr. Djonny Weinzierl

Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC

Joinville, 16 de janeiro de 2026.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, por ter aceitado conduzir o meu trabalho de pesquisa, me auxiliando na organização da investigação e da comprovação dos resultados e pelo conhecimento repassado.

Aos demais professores do curso de pós-graduação em engenharia elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina (Udesc) pela excelência da qualidade técnica e pelos ensinamentos compartilhados.

Aos meus pais e meu irmão, pela compreensão nos meus momentos ausentes e momentos de impaciência, pelo incentivo e por acreditarem em mim em todos os momentos.

Aos meus gestores, pelo apoio e troca de conhecimentos durante todo o curso e na condução do trabalho de pesquisa.

A todos que colaboraram direta ou indiretamente na execução deste trabalho e que foram aqui involuntariamente omitidos.

*"It always seems impossible until it's done."*

(Nelson Mandela)

## RESUMO

Os projetos de capacitores aplicados em barramento de corrente contínua (CC) de conversores estáticos possuem como um dos requisitos a redução da resistência série equivalente (RSE) e da indutância parasita, visto a aplicação de semicondutores de larga banda proibida (WBG), que proporcionam operação em temperaturas, tensões e frequências muito mais elevadas. Portanto, este trabalho tem o objetivo de mapear o capacitor de filme plástico metalizado, verificando a influência dos materiais, das dimensões e da forma construtiva, tanto do elemento capacitivo, quanto das conexões e terminais, na indutância parasita e nas perdas. Desta forma, permitindo a elaboração do cálculo do circuito equivalente em fase de projeto, quando as características elétricas e mecânicas estão sendo definidas, sendo possível avaliar o *design* com melhor custo-benefício, sem a necessidade de fabricação de protótipos e realização de medições. Por meio de pesquisa bibliográfica, é criada a base teórica necessária para o equacionamento, que aplicado às características construtivas do capacitor sob análise, possibilita o desenvolvimento dos cálculos dos componentes do circuito equivalente. Os valores calculados de indutância série equivalente (LSE) e RSE são verificados por meio da comparação com valores medidos em diferentes modelos de capacitores, em que é comprovada a eficácia do cálculo, visto que as variações encontradas são admissíveis, levando em consideração a variabilidade normal das matérias-primas, dos processos de fabricação e as incertezas do processo de medição.

**Palavras-chave:** Capacitor de filme plástico metalizado; Circuito equivalente do capacitor; Indutância série equivalente; Resistência série equivalente.

## ABSTRACT

The capacitor designs applied in DC-link of power electronic converters include, among their requirements, the reduction of equivalent series resistance (ESR) and parasitic inductance, given the use of wide-bandgap (WBG) semiconductor devices, which enable operation at significantly higher temperatures, voltages, and switching frequencies. Therefore, this work aims to model metallized plastic film capacitors by assessing the influence of materials, dimensions, and construction features, both of the capacitive element and of the connections and terminals, on parasitic inductance and losses. This approach enables the development of an equivalent circuit model during the design phase, when electrical and mechanical characteristics are still being defined, allowing evaluation of the most cost-effective design without the need for prototype manufacturing and measurement. Through a literature review, the theoretical foundation required for the analytical formulation is established. When applied to the construction characteristics of the capacitor under analysis, this formulation enables the calculation of the components of the equivalent circuit. The calculated values of equivalent series inductance (ESL) and ESR are validated by comparison with measurements from different capacitor models. The results confirm the effectiveness of the proposed calculation method, as the variations observed fall within acceptable limits, considering the normal variability of raw materials, manufacturing processes, and measurement uncertainties.

**Keywords:** Metallized plastic film capacitor; Equivalent circuit of the capacitor; Equivalent series inductance; Equivalent series resistance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Crescimento do mercado de dispositivos de potência de SiC.....	16
Figura 2 – Aplicação de capacitor de barramento CC em veículos elétricos e híbridos.....	17
Figura 3 – Capacitor cilíndrico.....	20
Figura 4 – Capacitor esférico.....	21
Figura 5 – Capacitor de placas paralelas.....	21
Figura 6 – Filme metalizado.....	23
Figura 7 – Representação da largura e do comprimento do filme metalizado.....	24
Figura 8 – Elemento capacitivo circular.....	26
Figura 9 – Demonstração do posicionamento das placas no elemento capacitivo.....	27
Figura 10 – Representação das voltas de filme metalizado no elemento capacitivo.....	29
Figura 11 – Capacitor montado.....	32
Figura 12 – Circuito equivalente distribuído considerando as diversas voltas do capacitor.....	34
Figura 13 – Circuito equivalente distribuído simplificado.....	34
Figura 14 – Representação física do capacitor.....	35
Figura 15 – Circuito com resistor central.....	36
Figura 16 – Circuito equivalente distribuído para quinze <i>mini-squares</i> .....	37
Figura 17 – Representação transformação triângulo-estrela.....	39
Figura 18 – Transformação triângulo-estrela aplicada ao circuito equivalente distribuído.....	40
Figura 19 – Perfil de metalização com borda estendida.....	43
Figura 20 – Perfil de metalização padrão.....	43
Figura 21 – Perfil de metalização em rampa.....	43
Figura 22 – Região de metalização do elemento capacitivo.....	48
Figura 23 – Divisão do terminal sextavado.....	51
Figura 24 – Representação da circulação de corrente no elemento capacitivo.....	54
Figura 25 – Fitas de conexão posicionadas em “V”.....	59
Figura 26 – Estrutura construtiva capacitor com um elemento capacitivo.....	68
Figura 27 – Circuito equivalente resistivo do capacitor com um elemento capacitivo.....	76
Figura 28 – Fita de conexão 2 do capacitor modelo 1.....	78

Figura 29 – Circuito equivalente indutivo do capacitor com um elemento capacitivo. .....	82
Figura 30 – Estrutura construtiva capacitor com dois elementos capacitivos. ....	82
Figura 31 – Circuito equivalente resistivo do capacitor com dois elementos capacitivos. ....	86
Figura 32 – Fita de conexão 2 do capacitor modelo 6.....	88
Figura 33 – Circuito equivalente indutivo do capacitor com dois elementos capacitivos. ....	93
Figura 34 – Medição da resistência série equivalente.....	97
Figura 35 – Circuito do ensaio de duplo pulso. ....	98
Figura 36 – Forma de onda da corrente no capacitor durante o ensaio.....	99
Figura 37 – Medição da indutância série equivalente. ....	100
Figura 38 – Medição da corrente no capacitor durante o duplo pulso.....	100
Figura 39 – Região de condução do segundo pulso, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor. ....	101
Figura 40 – Medição da variação da corrente no tempo, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor. ....	101
Figura 41 – Medição da variação da tensão, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor. ....	102

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades elétricas e magnéticas.....	65
Tabela 2 – Características elétricas e mecânicas dos modelos selecionados. ....	66
Tabela 3 – Valores dos componentes do circuito equivalente distribuído do capacitor modelo 1. ....	71
Tabela 4 – Resistência série equivalente e indutância série equivalente calculadas dos capacitores selecionados. ....	93
Tabela 5 – Avaliação das características do projeto. ....	95
Tabela 6 – Resistência série equivalente e indutância série equivalente obtidos pelas medições dos capacitores selecionados.....	103
Tabela 7 – Comparativo entre valores calculados e medidos de resistência série equivalente e indutância série equivalente dos capacitores selecionados. ....	103
Tabela 8 – Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 62,5 mm e borda livre 2,5 mm. ....	110
Tabela 9 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 62,5 mm e borda livre 4,0 mm. ....	111
Tabela 10 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 75,0 mm e borda livre 2,5 mm. ....	111
Tabela 11 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 110,0 mm e borda livre 4,0 mm. ....	112

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGR	<i>Compound annual growth rate</i> – Taxa de crescimento anual composta
CC	Corrente contínua
CCT	Centro de ciências tecnológicas
DC	<i>Direct current</i> – Corrente contínua
DF	<i>Dissipation factor</i> – Fator de dissipação
$di/dt$	Derivada de corrente em relação ao tempo
$dv/dt$	Derivada de tensão em relação ao tempo
EMI	<i>Electromagnetic interference</i> - Interferência eletromagnética
ESL	<i>Equivalent series inductance</i> – Indutância série equivalente
ESR	<i>Equivalent series resistance</i> – Resistência série equivalente
LSE	Indutância série equivalente
PEN	<i>Polyethylene naphthalate</i> – Polietileno naftalato
PET	<i>Polyethylene terephthalate</i> – Polietileno tereftalato
PP	<i>Polypropylene</i> – Polipropileno
PPGEEL	Programa de pós-graduação em engenharia elétrica
PPS	<i>Polyphenylene sulfide</i> – Sulfeto de polifenileno
RLC	Resistência-indutância-capacitância
RSE	Resistência série equivalente
Si	<i>Silicon</i> - Silício
SiC	<i>Silicon carbide</i> – Carbetto de silício
Udesc	Universidade do Estado de Santa Catarina
WBG	<i>Wide bandgap</i> – Larga banda proibida

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Área da superfície gaussiana
$a$	Distância entre a origem da indução magnética e o ponto sob análise
$a_{ECzy\_f\_x}$	Maior distância em relação ao centro da fita de conexão y na região compreendida pelo elemento capacitivo z do modelo x
$a_{ECzy\_i\_x}$	Menor distância em relação ao centro da fita de conexão y na região compreendida pelo elemento capacitivo z do modelo x
$af$	Maior distância da origem da indução magnética na região sob análise
$a_{ftyz\_f\_x}$	Maior distância em relação ao centro do elemento capacitivo z na região compreendida pela fita de conexão y do modelo x
$a_{ftyz\_i\_x}$	Menor distância em relação ao centro do elemento capacitivo z na região compreendida pela fita de conexão y do modelo x
$a_i$	Menor distância da origem da indução magnética na região sob análise
$B$	Indução magnética
$BL_x$	Borda livre do filme do modelo x
$b_{f\_x}$	Largura do filme do modelo x
$b_{fity\_x}$	Largura da fita y do modelo x
$b_{hex}$	Largura do hexágono
$b_{sixty\_x}$	Largura da região sextavada do terminal y do modelo x
$C_{EC\_x}$	Capacitância total do elemento capacitivo do modelo x
$C_{eq\_x}$	Capacitância equivalente do circuito equivalente distribuído do modelo x
$C_{MS\_x}$	Capacitância do <i>mini-square</i> do modelo x
$C_{proj\_x}$	Capacitância total projetada do elemento capacitivo do modelo x
$C_x$	Capacitância do modelo x
$C_{y_x}$	Capacitância do circuito equivalente distribuído na posição y do modelo x
$Def_x$	Defasagem entre filmes do modelo x
$DF$	Fator de dissipação

$DF_f$	Fator de dissipação do dielétrico em baixas frequências
$DF_{PP}$	Fator de dissipação do polipropileno
$d$	Distância entre placas
$d_{Al}$	Densidade do alumínio
$d_{cily\_x}$	Diâmetro da região cilíndrica do terminal y do modelo x
$d_{EC\_x}$	Diâmetro externo do elemento capacitivo do modelo x
$d_{eixo\_x}$	Diâmetro do eixo do modelo x
$d_{fty\_x}$	Distância entre fitas da fita y do modelo x
$d_m$	Densidade do material
$d_{rosy\_x}$	Diâmetro da região da rosca do terminal y do modelo x
$d_{Zn}$	Densidade do zinco
$E$	Campo elétrico
$e_{Al\_std}$	Espessura da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa
$e_{AL\_step\_x}$	Espessura da camada de alumínio para o perfil de metalização com borda estendida do modelo x
$e_{BR}$	Espessura da borda reforçada
$e_{BR\_std}$	Espessura da borda reforçada para os perfis de metalização padrão e em rampa
$e_{BR\_step\_x}$	Espessura da borda reforçada para o perfil de metalização com borda estendida do modelo x
$e_{f\_x}$	Espessura do filme base do modelo x
$e_{fty\_x}$	Espessura da fita y do modelo x
$e_m$	Espessura da metalização do filme
$e_{met\_x}$	Espessura da metalização do elemento capacitivo do modelo x
$e_{Zn\_std}$	Espessura da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa
$e_{Zn\_step\_x}$	Espessura da camada de zinco para o perfil de metalização com borda estendida do modelo x
$f$	Frequência
$H$	Campo magnético
$H_{EC}$	Campo magnético do elemento capacitivo
$h_{cily\_x}$	Altura da região cilíndrica do terminal y do modelo x

$h_{EC\_x}$	Altura do elemento capacitivo do modelo x
$h_{rosy\_x}$	Altura da região da rosca do terminal y do modelo x
$h_{sixty\_x}$	Altura da região sextavada do terminal y do modelo x
$I$	Corrente elétrica
$I_B$	Corrente que origina a indução magnética
$I_{EC}$	Corrente elétrica que circula no elemento capacitivo
$I_1$	Corrente que circula no primeiro condutor, a qual gera o fluxo magnético
$i$	Corrente elétrica
$k$	Coefficiente de correção, que depende da interação entre fitas
$L$	Indutância
$L_{EC\_x}$	Indutância parasita do elemento capacitivo do modelo x
$L_{ECz\_eq\_x}$	Indutância equivalente do elemento capacitivo z, considerando a autoindutância e a indutância mútua do modelo x
$L_{ext}$	Indutância externa do condutor
$L_{fty\_eq\_x}$	Indutância equivalente da fita de conexão y, considerando a autoindutância e a indutância mútua do modelo x
$L_{fty\_x}$	Autoindutância da fita y do modelo x
$L_{int}$	Indutância interna do condutor
$LSE_{cap\_x}$	Indutância série equivalente do capacitor do modelo x
$l$	Comprimento percorrido pelo campo elétrico
$l_{f\_x}$	Comprimento do filme do modelo x
$l_{fta}$	Comprimento da primeira fita da conexão em “V”
$l_{ftb}$	Comprimento da segunda fita da conexão em “V”
$l_{fty\_sob\_x}$	Comprimento sobreposto da fita y do modelo x
$l_{fty\_x}$	Comprimento da fita y do modelo x
$l_H$	Comprimento da circunferência gerada pelo vetor campo magnético
$l_m$	Comprimento do material
$l_{Myz\_x}$	Comprimento da área de interesse entre y e z do modelo x
$l_v$	Comprimento do filme por volta
$M_{ab}$	Indutância mútua entre dois pontos no espaço
$M_{ECz\_fty\_x}$	Indutância mútua no elemento capacitivo z originada pela fita de conexão y do modelo x

$M_{fity\_ECz\_x}$	Indutância mútua na fita de conexão y originada pelo elemento capacitivo z do modelo x
$M_{fity\_sob\_x}$	Indutância mútua entre fitas sobrepostas da fita y do modelo x
$M_{fityz\_V\_x}$	Indutância mútua entre as fitas de conexão y e z posicionadas em “V” do modelo x
$MS_x$	Dimensional do <i>mini-square</i> do modelo x
$M_{21}$	Indutância mútua entre o primeiro e o segundo condutor
$m_m$	Massa do material
$n$	Número de voltas
$nMS_x$	Quantidade de <i>mini-squares</i> no comprimento do filme do modelo x
$PAI_{Zn}$	Relação, em massa, entre o alumínio e o zinco
$PRy_x$	Posição de $Ry$ no filme do modelo x
$Q$	Carga elétrica
$Q^+$	Carga elétrica positiva
$Q^-$	Carga elétrica negativa
$R$	Resistência
$R(\Omega/\square)$	Resistividade superficial
$R_{A,B,C}$	Resistores circuito estrela
$R_{AB,CA,BC}$	Resistores circuito triângulo
$R_{AL\_std}$	Resistividade superficial da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa
$R_{AL\_step}$	Resistividade superficial da camada de alumínio para o perfil de metalização com borda estendida
$R_{AT\_step\_x}$	Resistividade superficial da área ativa para o perfil de metalização com borda estendida do modelo x
$R_{BR\_std}$	Resistividade superficial da borda reforçada para os perfis de metalização padrão e em rampa
$R_{BR\_step\_x}$	Resistividade superficial da borda reforçada para o perfil de metalização com borda estendida do modelo x
$R_{BRa\_x}$	Resistividade superficial da borda reforçada do primeiro filme do modelo x
$R_{BRb\_x}$	Resistividade superficial da borda reforçada do segundo filme do modelo x

$R_{D\_x}$	Componente resistiva das perdas no dielétrico do modelo x
$R_{eq\_x}$	Resistência equivalente do circuito equivalente distribuído do modelo x
$R_{fy\_x}$	Resistência da fita y do modelo x
$R_{met\_x}$	Resistência total da metalização do elemento capacitivo do modelo x
$R_{pEC\_x}$	Resistência que representa as perdas no dielétrico do modelo x
$R_{pen\_x}$	Resistência da penetração dos grãos de zinco na região da defasagem entre filmes do modelo x
$R_{Sa\_x}$	Resistência na extremidade do primeiro filme do modelo x
$R_{Sb\_x}$	Resistência na extremidade do segundo filme do modelo x
$R_{SE}$	Resistência série equivalente
$R_{SEC\_x}$	Resistência série do elemento capacitivo do modelo x
$R_{SEcap\_x}$	Resistência série equivalente do capacitor do modelo x
$R_{SEEC\_x}$	Resistência série equivalente do elemento capacitivo do modelo x
$R_{filme\_x}$	Resistência série total da metalização do filme plástico metalizado do modelo x
$R_{sup\_x}$	Resistência superficial da camada de metalização do elemento capacitivo do modelo x
$R_{Sy}$	Resistência da região $S_y$ do terminal sextavado
$R_{tmy\_x}$	Resistência total do terminal y do modelo x
$R_{y_x}$	Resistividade superficial do circuito equivalente distribuído na posição y do modelo x
$R_{Zn\_std}$	Resistividade superficial da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa
$R_{Zn\_step}$	Resistividade superficial da camada de zinco para o perfil de metalização com borda estendida
$r$	Raio da circunferência interna ao elemento capacitivo
$r_a$	Posição do primeiro ponto no espaço
$r_{ab}$	Distância entre dois pontos no espaço
$r_b$	Posição do segundo ponto no espaço
$r_{cil}$	Raio da região cilíndrica
$r_{cir}$	Raio do círculo

$r_{EC\_x}$	Raio externo do elemento capacitivo do modelo x
$r_{eixo\_x}$	Raio do eixo do modelo x
$r_{ros}$	Raio da região da rosca
$S$	Área de interesse
$S_{Al\_std}$	Área da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa
$S_{cir}$	Área do círculo
$S_{hex}$	Área do hexágono
$S_m$	Área transversal do material
$S_y$	Regiões de análise do terminal sextavado
$S_{Zn\_std}$	Área da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa
$t$	Tempo
$V$	Diferença de potencial entre as placas
$+V$	Placa com tensão positiva
$-V$	Placa com tensão negativa
$V_{Al\_std}$	Volume da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa
$V_L$	Tensão no indutor
$V_m$	Volume do material
$V_{Zn\_std}$	Volume da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa
$W$	Energia eletromagnética
$W_{EC}$	Energia eletromagnética do elemento capacitivo
$X_c$	Reatância capacitiva
$x$	Comprimento do lado do quadrado
$Z_y$	Impedância do circuito equivalente distribuído
$\rho$	Resistividade do material
$\rho_{Al}$	Resistividade do alumínio
$\rho_{Cu}$	Resistividade do cobre
$\rho_{latão}$	Resistividade do latão (C36000)
$\rho_{Zn}$	Resistividade do zinco
$\epsilon_r$	Permissividade relativa do dielétrico

$\epsilon_{r\_PP}$	Permissividade relativa do polipropileno
$\epsilon_0$	Permissividade do vácuo
$\mu$	Permeabilidade magnética do meio
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa do material / meio
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo
$\phi B$	Fluxo magnético
$\phi B_2$	Fluxo magnético que atravessa o segundo condutor
$\varphi_{yz\_x}$	Ângulo formado entre os vetores da indução magnética originado em z e da área de interesse em y do modelo x
$\delta$	Profundidade pelicular de circulação de corrente no condutor
$\theta_{yz\_x}$	Ângulo formado entre as fitas y e z na conexão "V" do modelo x
$\Delta$	Variação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVO .....	19
1.1.1	<b>Objetivo principal .....</b>	<b>19</b>
1.1.2	<b>Objetivos secundários .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>CAPACITOR .....</b>	<b>20</b>
2.1	CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO METALIZADO.....	22
2.1.1	<b>Filme plástico metalizado .....</b>	<b>22</b>
2.1.2	<b>Elemento capacitivo.....</b>	<b>25</b>
2.1.3	<b>Capacitor montado.....</b>	<b>30</b>
2.2	CONCLUSÃO.....	32
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO CAPACITOR</b> <b>.....</b>	<b>33</b>
3.1	RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE.....	33
3.1.1	<b>Resistência série do filme metalizado .....</b>	<b>34</b>
3.1.2	<b>Perdas no dielétrico .....</b>	<b>41</b>
3.1.3	<b>Resistência da camada metalizada do elemento capacitivo .....</b>	<b>42</b>
3.1.4	<b>Resistência série equivalente do elemento capacitivo .....</b>	<b>50</b>
3.1.5	<b>Resistência das conexões elétricas e dos terminais .....</b>	<b>50</b>
3.1.6	<b>Resistência série equivalente do capacitor .....</b>	<b>52</b>
3.2	INDUTÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE.....	53
3.2.1	<b>Indutância do elemento capacitivo .....</b>	<b>53</b>
3.2.2	<b>Indutância das conexões elétricas e dos terminais .....</b>	<b>57</b>
3.2.3	<b>Indutâncias mútuas.....</b>	<b>58</b>
3.2.4	<b>Indutância série equivalente do capacitor .....</b>	<b>62</b>
3.3	CONCLUSÃO.....	63
<b>4</b>	<b>PROJETO DE CAPACITOR .....</b>	<b>64</b>
4.1	METODOLOGIA DE PROJETO .....	64
4.2	ELABORAÇÃO DO PROJETO E CÁLCULO DO CIRCUITO EQUIVALENTE .....	66
4.2.1	<b>Cálculo dos parâmetros para o capacitor com um elemento capacitivo</b> <b>.....</b>	<b>68</b>

<b>4.2.2</b>	<b>Cálculo dos parâmetros para o capacitor com dois elementos capacitivos.....</b>	<b>82</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resultado geral.....</b>	<b>93</b>
4.3	CONCLUSÃO.....	94
<b>5</b>	<b>RESULTADOS PRÁTICOS .....</b>	<b>97</b>
5.1	MEDIÇÃO RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE .....	97
5.2	MEDIÇÃO INDUTÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE .....	98
5.3	VALORES MEDIDOS.....	102
5.4	COMPARATIVO ENTRE VALORES CALCULADOS E MEDIDOS.....	103
5.5	CONCLUSÃO.....	104
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>
	<b>APÊNDICE A – PERFIL DE METALIZAÇÃO.....</b>	<b>110</b>

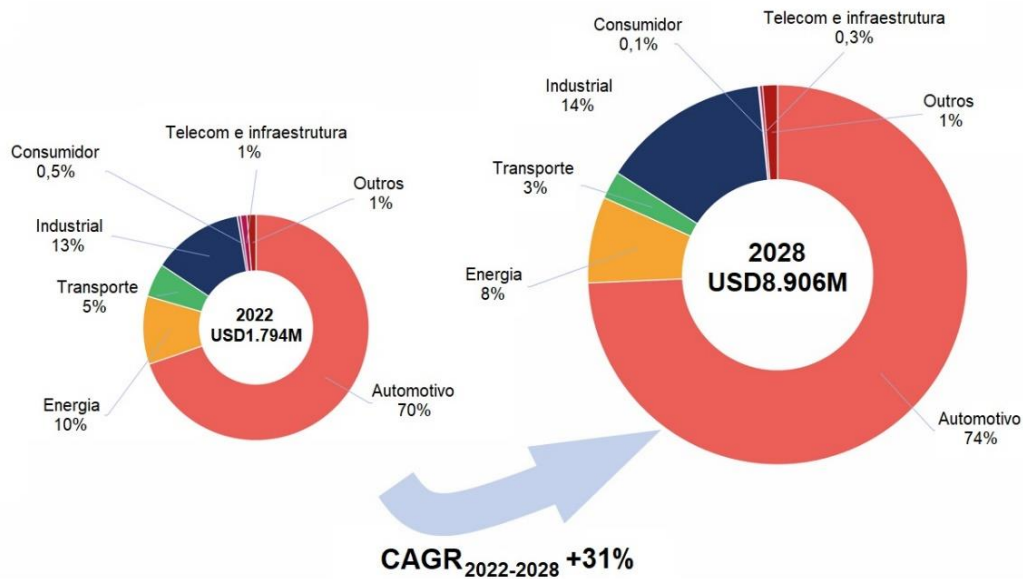
## 1 INTRODUÇÃO

A eletrônica de potência é uma das áreas da engenharia elétrica, sendo responsável pelo estudo dos conversores estáticos. Os conversores estáticos realizam o processamento de energia elétrica entre uma fonte de entrada e uma carga na saída, por meio da combinação de componentes passivos, como resistores, indutores e capacitores, e componentes ativos, como os interruptores, que são dispositivos semicondutores. A aplicação de conversores estáticos é ampla, encontrando-se em controle de motores, tração automotiva, carregadores de bateria, processamento de energias alternativas, entre outras [1].

A utilização de semicondutores de WBG, dentre os quais os fabricados com carbeto de silício (SiC), já é uma realidade em substituição aos equivalentes em silício (Si), proporcionando operação em temperaturas, tensões e frequências muito mais elevadas. Estes semicondutores tornam os módulos de eletrônica de potência mais versáteis e com maior eficiência energética, permitindo avanços no processamento de energia elétrica, aplicado em tração elétrica automotiva e energias renováveis, como solar e eólica. No entanto, o aumento da frequência de operação eleva os níveis das derivadas de corrente ( $di/dt$ ) e de tensão ( $dv/dt$ ) em relação ao tempo, fazendo com que o sistema fique mais suscetível aos efeitos causados por estas derivadas em elementos parasitas, como indutores e capacitores [2] [3].

Conforme apresentado em [4], o mercado de dispositivos de potência de SiC possui previsão de atingir aproximadamente 9 bilhões de dólares até 2028, considerando o aumento da aplicação no mercado automotivo, juntamente com aplicações industriais. Na Figura 1, é demonstrada a previsão de evolução do mercado e a divisão entre as principais aplicações.

Figura 1 – Crescimento do mercado de dispositivos de potência de SiC.

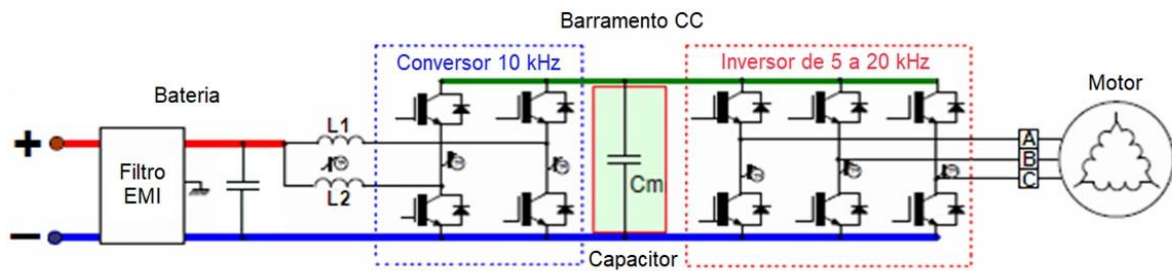


Fonte: Adaptada de [4].

Desta forma, com o objetivo de acompanhar o avanço dos semicondutores, os demais componentes que constituem os módulos de potência dos conversores estáticos também precisam evoluir, sendo que um dos principais componentes envolvidos neste processo é o capacitor aplicado no barramento CC do conversor, que tem a função de absorver a ondulação de corrente e manter a tensão em corrente contínua estável. A LSE que se encontra no caminho da corrente dos semicondutores é a principal responsável pelos picos de tensão no momento da abertura do interruptor e estes picos podem ocasionar falhas prematuras nos semicondutores, principalmente os de SiC, por operarem com tensão de bloqueio próxima da tensão limite, e no capacitor. As indutâncias do capacitor e dos barramentos de conexão possuem contribuição significativa nesta indutância parasita, portanto, demandam ser minimizadas para reduzir os impactos no circuito [5] [6] [7].

Na Figura 2 é apresentada uma das aplicações do capacitor em barramento CC, no sistema de tração de veículos elétricos e híbridos, onde a energia é transferida da bateria para o motor [8].

Figura 2 – Aplicação de capacitor de barramento CC em veículos elétricos e híbridos.



Fonte: Adaptada de [8].

Com a tendência de elevação da frequência de chaveamento, que resulta em circuitos mais compactos, com menor peso e volume dos elementos passivos, como capacitores e indutores, é imprescindível que as indutâncias parasitas em todos os elementos do conversor sejam reduzidas, incluindo a indutância do capacitor do barramento CC [9]. Adicionalmente, com a elevação da frequência de chaveamento, as perdas de comutação aumentam e, somadas com o aumento da temperatura de operação, fazem com que as perdas do capacitor também precisem ser minimizadas, visando manter o ponto de maior aquecimento (*hotspot*) em patamares aceitáveis para o correto funcionamento, conforme projeto do produto.

O desenvolvimento de capacitores com menores níveis de RSE e LSE é fundamental para a aplicação em conversores que utilizam semicondutores WBG. No entanto, para que seja possível esta evolução no capacitor, primeiramente faz-se necessário o conhecimento detalhado de suas características elétricas e mecânicas e como cada componente e detalhe da estrutura impactam na indutância parasita e nas perdas, para que, assim, seja identificado o *design* de produto que melhor se adequa à aplicação.

Há diversos trabalhos e artigos que tratam deste assunto, com o intuito de mensurar as perdas e a indutância parasita dos capacitores. No entanto, como a análise do circuito equivalente é muito dependente do *design* do produto e de sua aplicação, as avaliações são muito específicas para o modelo de capacitor sob investigação. Em [10], há uma abordagem profunda, tanto das perdas quanto da LSE, porém aplicada em capacitores de baixa potência, com conexão via cabos. Em [11], é avaliado o modelo de circuito distribuído para cálculo da indutância, porém aplicável em capacitores de multicamadas empilhadas. Em [12], é elaborado e ajustado modelo

de circuito equivalente para capacitor de filme plástico metalizado, porém com base na comparação entre modelo e medições, não havendo equacionamento dos componentes. Em [13], é realizado o cálculo da autoindutância e da indutância mútua de capacitores para filtro de linha, desta forma, a análise é realizada para frequências acima da frequência de ressonância. Em [14], há a apresentação do circuito equivalente distribuído para a representação do capacitor, no entanto, nem todos os componentes são calculados, sendo que alguns são definidos com base em medições.

Visando preencher as lacunas de bibliografias já existentes, é desenvolvido este trabalho, para mapear e quantificar a influência dos materiais, das dimensões e do *design*, tanto do elemento capacitivo, quanto das conexões e terminais, na indutância parasita e nas perdas. Por meio desta análise, o objetivo é desenvolver o cálculo dos componentes do circuito equivalente de capacitor de filme plástico metalizado, para a aplicação em barramento CC de conversores estáticos, durante a fase de projeto, enquanto as características elétricas e mecânicas estão sendo estabelecidas, possibilitando a tomada de decisão com base na análise do melhor custo-benefício, sem a necessidade de fabricação de protótipos e realização de medições.

Os tipos de capacitores normalmente aplicados no barramento CC de conversores são os eletrolíticos com folha de alumínio e os de filme plástico. Neste trabalho, são considerados os capacitores de filme plástico metalizado, podendo possuir diversos perfis de metalização, com elemento capacitivo circular de dupla terminação, alimentação radial, conexão elétrica por meio de fitas e terminal parafuso fêmea. A seleção dos capacitores de filme plástico está relacionada ao fato de que este tipo de capacitor possui como alguns dos diferenciais em relação aos capacitores eletrolíticos, níveis inferiores de RSE e LSE. Portanto, o mapeamento e o equacionamento destes fatores fazem-se mais relevantes nos capacitores de filme plástico.

Este trabalho é derivado de características construtivas específicas, e não foi encontrada literatura equivalente que permitisse a comparação dos resultados. Desta forma, a avaliação do equacionamento é realizada experimentalmente, pela comparação dos valores calculados e medidos.

No Capítulo 2 é realizada explicação sobre os capacitores, diferentes modelos existentes, e posteriormente apresentado o capacitor de filme plástico, realizando

detalhamento do filme plástico metalizado, do elemento capacitivo e do capacitor montado. No Capítulo 3 são desenvolvidos e explicados os cálculos da RSE e da LSE, realizando a divisão do cálculo em etapas, para facilitar o entendimento. No Capítulo 4 é apresentado o projeto do capacitor, com a aplicação dos cálculos desenvolvidos no Capítulo 3. No Capítulo 5 são mostrados os resultados práticos, alcançados por meio da medição da RSE e da LSE, e realizado o comparativo entre valores calculados e medidos. No Capítulo 6 são descritas as conclusões do trabalho.

## 1.1 OBJETIVO

### 1.1.1 Objetivo principal

Realização do mapeamento detalhado do capacitor de filme plástico metalizado aplicado no barramento CC de conversores estáticos, quantificando a influência dos materiais, das dimensões e do *design*, tanto do elemento capacitivo, quanto das conexões e terminais, na indutância parasita e nas perdas. Por meio desta análise, elaborar um circuito equivalente teórico do capacitor, durante a fase de projeto, enquanto as características elétricas e mecânicas estão sendo estabelecidas, possibilitando a tomada de decisão com base na análise do melhor custo-benefício, sem a necessidade de fabricação de protótipos para análise prévia e validação.

### 1.1.2 Objetivos secundários

- a) Mapear as estruturas elétrica e mecânica do capacitor aplicado no barramento CC de conversores estáticos;
- b) Compreender a influência dos materiais, das dimensões e do *design* na indutância parasita e nas perdas do capacitor de filme plástico;
- c) Pesquisar sobre sistemas de medição de RSE e de LSE em capacitores;
- d) Realizar análise crítica dos valores medidos e calculados.

## 2 CAPACITOR

Os capacitores são componentes elétricos que possuem a capacidade de armazenar energia elétrica por meio de um campo elétrico eletrostático, desta forma, são utilizados nas mais diversas aplicações em circuitos elétricos, tendo como principal função o armazenamento de carga elétrica. Os capacitores são genericamente constituídos de dois condutores de formas arbitrárias, denominados de placas, e de um material isolante separando-os, denominado de dielétrico [15].

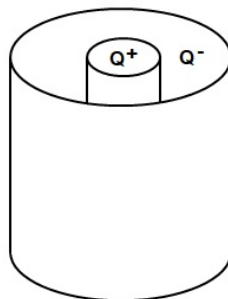
A capacitância determina a capacidade do capacitor em armazenar carga elétrica, por meio da aplicação de uma diferença de potencial entre as placas, e esta grandeza é um fator geométrico, pois depende apenas das características construtivas do capacitor, como tamanho, forma, distância entre as placas e material do dielétrico [15].

A permissividade do dielétrico é a propriedade que determina a quantidade de energia eletrostática que pode ser armazenada por unidade de volume em um material e é representada pelo produto entre a permissividade do vácuo ( $\epsilon_0$ ) e a permissividade relativa do dielétrico ( $\epsilon_r$ ) [15].

São três os principais tipos de capacitores existentes: capacitor cilíndrico, capacitor esférico e capacitor de placas paralelas [15].

O capacitor cilíndrico possui como condutor interno uma haste maciça, carregada com cargas elétricas positivas ( $Q^+$ ) uniformemente distribuídas em sua superfície, e como condutor externo uma casca cilíndrica coaxial, carregada com cargas elétricas negativas ( $Q^-$ ) uniformemente distribuídas em sua superfície interna, conforme demonstrado na Figura 3 [15].

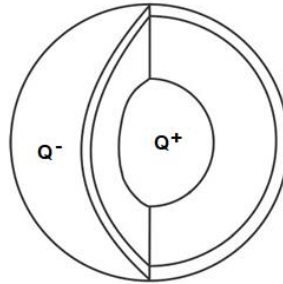
Figura 3 – Capacitor cilíndrico.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O capacitor esférico possui uma esfera maciça como condutor interno, a qual é carregada com cargas elétricas positivas ( $Q^+$ ), e uma esfera oca como condutor externo, a qual é carregada com cargas negativas ( $Q^-$ ), conforme apresentado na Figura 4 [15].

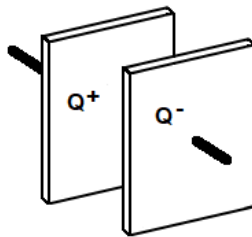
Figura 4 – Capacitor esférico.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O capacitor de placas paralelas possui os dois condutores sendo placas planas, uma delas carregada com cargas elétricas positivas ( $Q^+$ ) e a outra carregada com cargas elétricas negativas ( $Q^-$ ), conforme mostrado na Figura 5 [15].

Figura 5 – Capacitor de placas paralelas.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Adicionalmente, os capacitores são classificados de acordo com o material do dielétrico, sendo que cada modelo possui aplicações específicas. Os modelos mais comuns são: eletrolítico, cerâmico, de filme plástico, de tântalo e de mica.

Os tipos de capacitores normalmente aplicados no barramento CC de conversores são os eletrolíticos com folha de alumínio e os de filme plástico. Neste trabalho são considerados os capacitores de filme plástico metalizado, que são capacitores de placas paralelas.

## 2.1 CAPACITOR DE FILME PLÁSTICO METALIZADO

Os capacitores de filme plástico metalizado são apropriados para aplicações de elevada potência, em baixos e médios níveis de tensão, devido suas baixas perdas e elevada confiabilidade, por possuir a propriedade de autorregeneração. A autorregeneração ocorre quando há um curto-circuito no filme plástico e a energia do arco elétrico evapora o metal que se encontra na região próxima ao curto-circuito, isolando esta região, normalmente em alguns microssegundos, e permitindo uma elevada vida útil [9] [16].

Para que seja possível realizar o equacionamento do circuito equivalente do capacitor, primeiramente faz-se necessário mapear as partes que o constitui e de que forma estão interligadas. Portanto, esta análise foi dividida em: filme plástico metalizado, elemento capacitivo e capacitor montado.

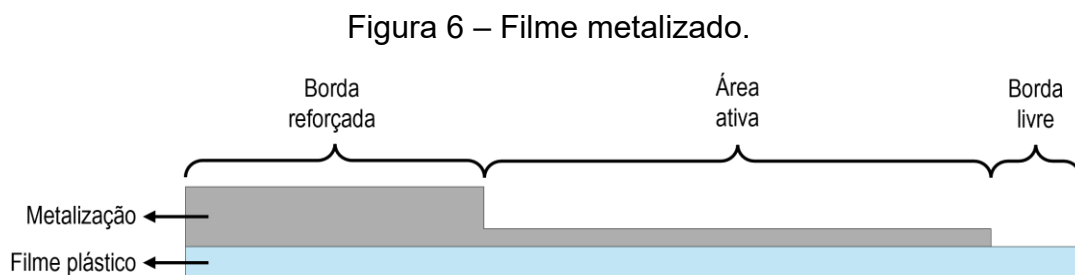
### 2.1.1 Filme plástico metalizado

O filme plástico metalizado é composto pelo filme base, que constitui o dielétrico do capacitor, sendo normalmente de polipropileno (PP), polietileno tereftalato (PET), polietileno naftalato (PEN) e sulfeto de polifenileno (PPS), e possui espessura na ordem de grandeza de alguns micrometros. O material do dielétrico é selecionado conforme níveis de tensão, frequência, temperatura e densidade capacitiva necessários para a aplicação. O filme base é coberto em um dos lados por uma camada fina de metal, com espessura na ordem de grandeza de alguns nanômetros, sendo que esta camada metalizada é composta geralmente por uma base de alumínio, com zinco sobreposto. O alumínio possui uma boa aderência ao plástico e possui resistência com relação à corrosão atmosférica. O zinco possui menor condutividade, necessitando possuir maior espessura, porém obtém uma vantagem em relação ao alumínio, que é a resistência à corrosão eletroquímica, a qual é uma reação química que ocorre no metal na presença de tensão alternada e concentração de campo elétrico. Esta camada de metal constitui a placa do capacitor e sua deposição sobre o filme plástico é realizada por um processo de evaporação a vácuo [16] [8] [10].

A especificação do perfil da camada metalizada pode variar conforme a aplicação do capacitor, estando diretamente relacionada com o grau de segurança e

a vida útil do produto. Mesmo havendo variação entre perfis de metalização, estes perfis possuem uma configuração padrão, consistindo em borda reforçada, que é a região localizada em uma das extremidades da largura do filme base e é mais espessa, para aumentar a condutividade, visto que esta borda é a responsável pela entrada da corrente no filme metalizado; borda livre, que é a região da extremidade oposta da largura do filme base e não possui metalização, visto que é a borda responsável pela isolação entre os filmes de diferentes polaridades no momento da fabricação do capacitor; e área ativa, que é a região compreendida entre a borda reforçada e a borda livre e possui menor espessura de metalização, quando comparada com a borda reforçada. É importante que a borda reforçada se estenda por apenas alguns milímetros, pois a sua maior espessura prejudica o funcionamento da característica de autorregeneração [10].

A representação do filme metalizado se encontra na Figura 6.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Para caracterizar o perfil de metalização do filme, é utilizada a propriedade elétrica de resistividade superficial, que é a resistência entre duas superfícies paralelas de um quadrado, não dependendo da área do quadrado. A medição da resistividade superficial da metalização do filme plástico é realizada na unidade de ohms por quadrado ( $\Omega/\square$ ) [10] [17].

Conforme a Segunda Lei de Ohm, a resistência do material pode ser calculada pela equação (1).

$$R = \frac{\rho \cdot l_m}{S_m} \quad (1)$$

onde,  $R$  é a resistência em ohm ( $\Omega$ );  $\rho$  é a resistividade do material em ohm-metro ( $\Omega.m$ );  $l_m$  é o comprimento do material em metro (m) e  $S_m$  é a área transversal do material em metro quadrado ( $m^2$ ).

Quando é realizada a verificação da resistividade superficial, considerando o comprimento dos lados da região quadrada sob análise como  $dx$ , obtém-se a equação (2), onde é possível confirmar que a resistividade superficial é dependente da resistividade do material e da espessura da metalização, sendo independente do tamanho da área analisada [18].

$$R(\Omega/\square) = \frac{\rho \cdot dx}{e_m \cdot dx} = \frac{\rho}{e_m} \quad (2)$$

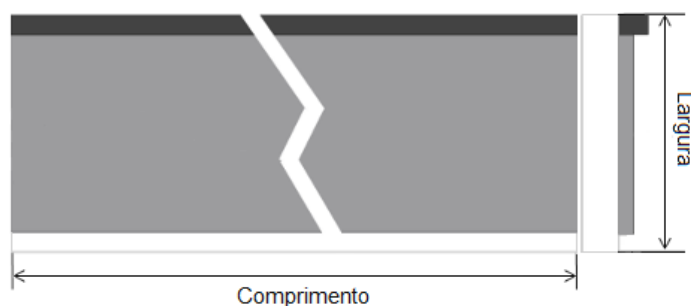
onde,  $R$  ( $\Omega/\square$ ) é a resistividade superficial em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ );  $x$  é o comprimento do lado do quadrado em metro (m); e  $e_m$  é a espessura da metalização do filme em metro (m).

A largura do filme metalizado é a dimensão que inicia na borda reforçada e finaliza na borda livre, sendo que é ao longo da largura que se desenvolve o perfil de metalização.

O comprimento do filme se prolonga no sentido ortogonal em relação à largura e não há variação no perfil de metalização neste sentido, apenas sendo replicado o perfil que ocorre no sentido da largura.

Na Figura 7 são representados a largura e o comprimento do filme metalizado.

Figura 7 – Representação da largura e do comprimento do filme metalizado.



Fonte: Adaptada de [18].

### 2.1.2 Elemento capacitivo

O capacitor de filme plástico metalizado, conforme mencionado anteriormente, é um modelo de capacitor de placas paralelas, formado por duas placas divididas por um dielétrico. O filme metalizado é composto pelo dielétrico (filme base) e por uma placa (camada metalizada), desta forma, faz-se necessária a junção de dois filmes metalizados para formar o elemento capacitivo.

Portanto, o elemento capacitivo é composto por um eixo plástico, que pode variar seu diâmetro conforme a aplicação, e em torno do qual são enrolados dois filmes metalizados em paralelo, sendo que a camada metalizada do segundo filme está em contato com o lado não metalizado do primeiro filme. Os filmes também estão posicionados de forma que as bordas reforçadas estejam em lados opostos, com isso, cada extremidade do elemento capacitivo representa um polo (placa) do capacitor. Adicionalmente, é realizada defasagem axial entre os filmes, com sobre-elevação do filme com a borda reforçada, para aprimorar o contato elétrico da camada metalizada com a conexão externa e para reforçar a isolamento elétrica entre filmes de polaridades diferentes [10].

As voltas iniciais e finais do filme metalizado, na ordem de 10 voltas, passam por um processo de desmetalização, onde o metal é retirado do filme base, com o objetivo de gerar isolamento entre placas do capacitor, na região das extremidades do comprimento do filme metalizado.

Após as voltas do filme metalizado, são aplicadas voltas do filme plástico de proteção, que é um filme sem metalização, com espessura superior ao filme metalizado, e possui o objetivo de compactar a estrutura do elemento capacitivo, proporcionando estabilidade mecânica.

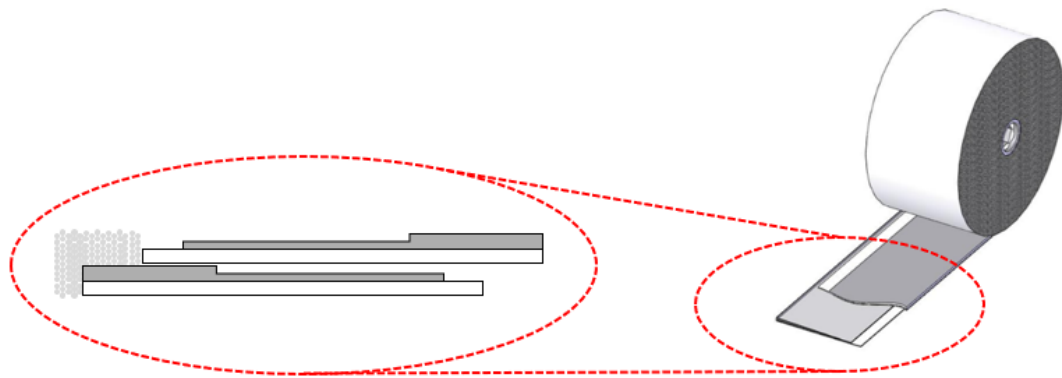
As voltas de desmetalização e de proteção não são consideradas nos cálculos do diâmetro do elemento capacitivo, pois não impactam eletricamente no circuito do capacitor.

Posteriormente à bobinagem dos filmes metalizados e de proteção, há a deposição de uma camada de zinco em ambas as extremidades do elemento capacitivo. Esta camada é composta por grãos de zinco, originados do derretimento do material por meio da energia gerada no arco elétrico, quando dois fios de polaridades opostas se encontram, e tem o objetivo de unificar todas as voltas do filme

metalizado de mesma polaridade e criar uma base para a conexão elétrica com os terminais do capacitor [10].

Na Figura 8 está demonstrada a estrutura do elemento capacitivo circular.

Figura 8 – Elemento capacitivo circular.



Fonte: Adaptada de [18].

Para a definição do comprimento de filme metalizado a ser bobinado para formar o elemento capacitivo, faz-se primeiramente necessária a avaliação do cálculo da capacitância. O capacitor é um componente elétrico com capacidade de armazenamento de energia elétrica por meio de acúmulo de cargas elétricas, quando aplicada uma diferença de potencial entre suas placas. A relação entre a carga elétrica e a diferença de potencial é a capacitância, conforme demonstrado na equação (3) [19].

$$C = \frac{Q}{V} \quad (3)$$

onde,  $C$  é a capacitância em farad (F);  $Q$  é a carga elétrica em coulomb (C); e  $V$  é a diferença de potencial entre as placas em volt (V).

Como a distância entre placas é muito menor que as dimensões das placas, pode-se considerar que as placas são infinitas e desta forma, que o campo elétrico em toda sua extensão é uniforme [18].

Utilizando a Lei de Gauss, que relaciona a carga elétrica dentro de uma superfície fechada (superfície gaussiana) com o fluxo elétrico que atravessa esta superfície, tem-se a equação (4). A permissividade elétrica do meio é composta pela

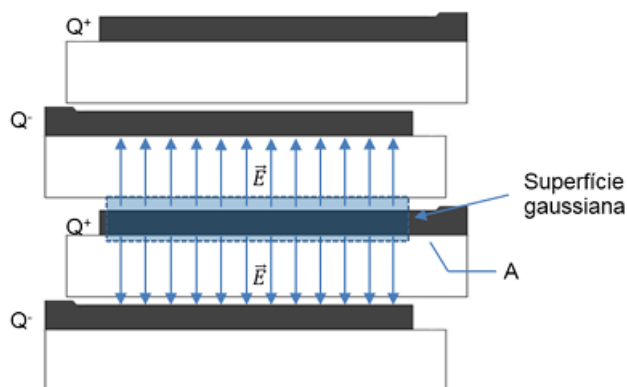
multiplicação entre a permissividade do vácuo e a permissividade relativa deste meio [18] [19].

$$Q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot E \cdot A \quad (4)$$

onde,  $\varepsilon_0$  é a permissividade do vácuo em farad por metro (F/m);  $\varepsilon_r$  é a permissividade relativa do dielétrico, que é adimensional;  $E$  é o campo elétrico em volt por metro (V/m) e  $A$  é a área da superfície gaussiana em metro quadrado (m<sup>2</sup>).

No entanto, no elemento capacitivo de filme plástico metalizado, as placas são posicionadas de forma empilhada, fazendo com que a placa com carga elétrica positiva possua uma placa com carga elétrica negativa acima e uma abaixo, conforme demonstrado na Figura 9 [18].

Figura 9 – Demonstração do posicionamento das placas no elemento capacitivo.



Fonte: Adaptada de [18].

Portanto, há campo elétrico nos dois lados de cada placa, fazendo com que a equação (4) possa ser reescrita, conforme equação (5) [18].

$$Q = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot 2 \cdot E \cdot A \quad (5)$$

A diferença de potencial entre as placas pode ser calculada conforme equação (6) [19].

$$V = - \int_{-}^{+} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{+}^{-} E \cdot dl = E \cdot d \quad (6)$$

onde,  $l$  é o comprimento percorrido pelo campo elétrico em metro (m); e  $d$  é a distância entre placas em metro (m).

Substituindo as equações (5) e (6) na equação (3), obtêm-se a equação (7) [18].

$$C = \frac{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{d} \quad (7)$$

A área da superfície gaussiana é a região onde há sobreposição entre as placas do capacitor, que no caso do capacitor de filme plástico metalizado, é calculada conforme equação (8) [18].

$$A = l_f \cdot [b_f - (2 \cdot BL + Def)] \quad (8)$$

onde,  $l_f$  é o comprimento do filme em metro (m);  $b_f$  é a largura do filme em metro (m);  $BL$  é a borda livre do filme em metro (m); e  $Def$  é a defasagem entre filmes em metro (m).

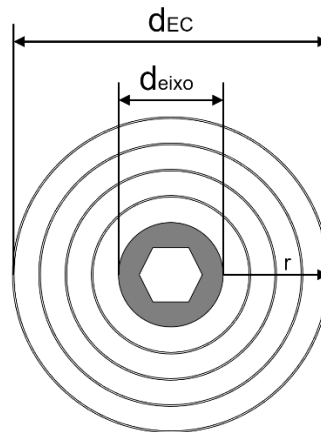
Substituindo a equação (8) na equação (7), considerando que a distância entre placas é equivalente à espessura do dielétrico e rearranjando os valores, é possível obter o cálculo do comprimento do filme metalizado, conforme equação (9) [18].

$$l_f = \frac{C \cdot e_f}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot (b_f - 2 \cdot BL - Def)} \quad (9)$$

onde,  $e_f$  é a espessura do filme base em metro (m).

Após o cálculo do comprimento do filme, consegue-se calcular o diâmetro externo do elemento capacitivo. Para início da análise, é importante lembrar que o elemento capacitivo é composto por diversas voltas, sendo que cada uma possui dois filmes metalizados. Na Figura 10 é representado o elemento capacitivo com suas voltas de filme metalizado.

Figura 10 – Representação das voltas de filme metalizado no elemento capacitivo.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Conforme Figura 10, o comprimento do filme em cada volta é de acordo com a equação (10).

$$l_v = 2 \cdot \pi \cdot r \quad (10)$$

onde,  $l_v$  é o comprimento do filme por volta em metro (m); e  $r$  é o raio da circunferência interna ao elemento capacitivo em metro (m).

A quantidade de voltas de filme é obtida com base no valor do raio  $r$  e na espessura do filme base, conforme equação (11).

$$n = \frac{r}{2 \cdot e_f} \quad (11)$$

onde,  $n$  é o número de voltas, que é adimensional.

Considerando o raio  $r$  tendendo a 0, deriva-se a equação (11), conforme mostrado na equação (12).

$$\partial n = \frac{\partial r}{2 \cdot e_f} \quad (12)$$

O comprimento total do filme metalizado é o somatório dos comprimentos de cada volta, que vão aumentando gradualmente a cada volta, sendo que o valor do raio

varia desde o raio do eixo até o raio externo do elemento capacitivo. Desta forma, obtêm-se a equação (13).

$$l_f = \int_{\frac{d_{eixo}}{2}}^{\frac{d_{EC}}{2}} 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \frac{\partial r}{2 \cdot e_f} \quad (13)$$

onde,  $d_{eixo}$  é o diâmetro do eixo em metro (m); e  $d_{EC}$  é o diâmetro externo do elemento capacitivo em metro (m).

Resolvendo a integral da equação (13) e isolando a variável do diâmetro externo do elemento capacitivo, obtêm-se a equação (14).

$$d_{EC} = \sqrt{\frac{8 \cdot l_f \cdot e_f}{\pi} + d_{eixo}^2} \quad (14)$$

Por meio da equação (15) é calculada a altura do elemento capacitivo.

$$h_{EC} = b_f + Def \quad (15)$$

onde,  $h_{EC}$  é a altura do elemento capacitivo em metro (m).

### 2.1.3 Capacitor montado

O elemento capacitivo representa a base do capacitor, visto que é composto pelo dielétrico e pelas placas. No entanto, para a aplicação dos produtos é necessária a adição dos complementos.

Os cabos, fitas e barramentos são responsáveis pela conexão elétrica entre o elemento capacitivo e a parte externa do capacitor. O *design* destas conexões deve possuir elevada área superficial, proporcional à frequência de operação, devido ao efeito pelicular.

O efeito pelicular é a propriedade da corrente alternada em circular pela superfície do condutor, em uma profundidade que é dependente da frequência, conforme demonstrado na equação (16). Este efeito faz com que a seção transversal útil do condutor seja reduzida com a elevação da frequência, aumentando a

resistência. O *design* ideal é o que faz com que a resistência em corrente alternada seja próxima à resistência em corrente contínua [9].

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{(\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r)}} \quad (16)$$

onde,  $\delta$  é a profundidade pelicular de circulação de corrente no condutor em metros (m);  $f$  é a frequência em hertz (H),  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo em henry por metro (H/m); e  $\mu_r$  é a permeabilidade magnética relativa do material, que é adimensional.

Os terminais são responsáveis pela alimentação elétrica do capacitor, desta forma, sua estrutura possui relação com o tipo de aplicação do produto, não esquecendo da análise referente ao efeito pelicular, mencionada anteriormente.

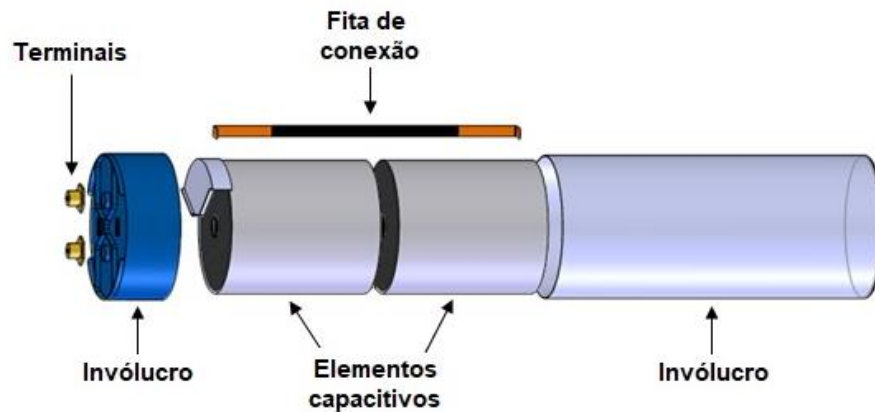
Os pontos de solda realizam o acoplamento entre elemento capacitivo, cabos, fitas, barramentos e terminais.

O invólucro realiza a proteção elétrica e mecânica do capacitor, podendo ser de material plástico ou metálico, sendo seu dimensional fortemente dependente do dimensional do elemento capacitivo. O invólucro também é significativo no processo de transferência térmica do capacitor.

O material de preenchimento, que normalmente é de poliuretano ou epóxi, tem o objetivo de aprimorar a isolamento elétrica entre elemento capacitivo e invólucro, auxiliar na transferência térmica e elevar a resistência do elemento capacitivo contra corrosão [10].

Na Figura 11, está representado um dos modelos de capacitor montado, com seus elementos capacitivos e demais componentes.

Figura 11 – Capacitor montado.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## 2.2 CONCLUSÃO

Há diversos tipos e modelos de capacitores, conforme sua forma construtiva e material do dielétrico, sendo que o modelo selecionado para o trabalho é o de placas paralelas com filme plástico metalizado.

A forma construtiva deste tipo de capacitor possui como principal característica o fato de dois filmes plásticos metalizados serem enrolados, de forma paralela, em torno de um eixo. Com base nesta estrutura, que é apresentada de forma detalhada, e no cálculo de capacitância, é realizado o equacionamento das características do elemento capacitivo, como comprimento do filme metalizado e diâmetro e altura do elemento capacitivo.

Adicionalmente, são mencionados todos os componentes que constituem o capacitor montado, com suas respectivas funções.

Conhecer os componentes que fazem parte do capacitor e calcular as características do elemento capacitivo são de extrema importância para a obtenção do equacionamento da RSE e da LSE do capacitor.

### 3 DESENVOLVIMENTO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO CAPACITOR

A metodologia de análise e de determinação do circuito equivalente de capacitores varia de forma significativa, conforme o *design* adotado para o produto, especialmente no que se refere à avaliação da indutância parasita, devido à geometria dos componentes e da interação entre eles. No contexto da eletrônica de potência, os capacitores utilizados em barramentos CC de conversores estáticos apresentam uma ampla diversidade de configurações construtivas. Portanto, para o desenvolvimento deste trabalho, foram consideradas as seguintes características construtivas, que são amplamente utilizadas em capacitores para barramento CC, compondo uma das principais configurações de capacitor de filme plástico para este tipo de aplicação:

- a) Perfil de metalização sem segmentação e sem capacitores seriados.
- b) Elemento capacitivo circular com dupla terminação, onde as placas são conectadas em lados opostos.
- c) Dois filmes metalizados com as mesmas características de largura, espessura do filme base e borda livre.
- d) Alimentação radial, onde os terminais são posicionados no mesmo lado.
- e) Conexão elétrica por meio de fitas.
- f) Terminal parafuso fêmea, com corpo cilíndrico e base sextavada.

Os elementos capacitivos, as conexões elétricas e os terminais são os componentes que constituem a avaliação do circuito equivalente do capacitor e esta é executada em duas partes, sendo primeiramente realizada a verificação das perdas, por meio da RSE, e, posteriormente, a verificação da indutância parasita, por meio da LSE.

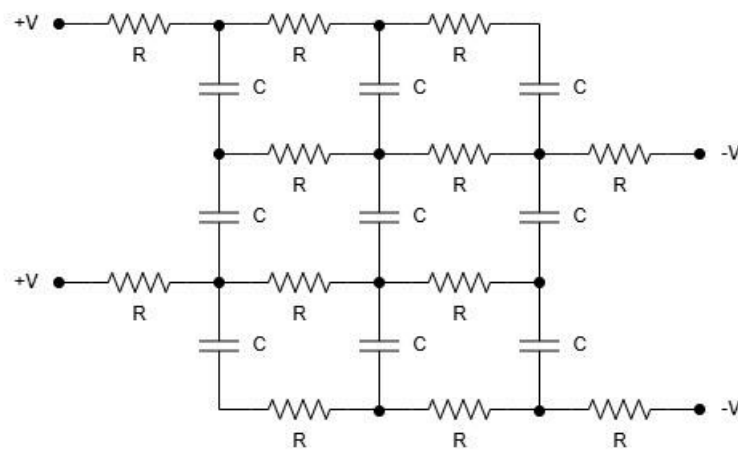
#### 3.1 RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

Com o objetivo de facilitar a compreensão, a avaliação é realizada dividindo o equacionamento em partes: resistência série do filme metalizado, perdas no dielétrico, resistência da camada metalizada do elemento capacitivo, resistência série equivalente do elemento capacitivo, resistência das conexões elétricas e dos terminais e resistência série equivalente do capacitor.

### 3.1.1 Resistência série do filme metalizado

Para o equacionamento da resistência série do filme metalizado é realizada a análise do circuito equivalente distribuído, utilizando apenas a resistência e a capacitância do circuito, onde pode-se representar as várias camadas que compõem o capacitor, conforme demonstrado na Figura 12. O símbolo  $+V$  representa uma das placas,  $-V$  a outra placa,  $R$  é a resistividade superficial da camada metalizada e  $C$  é a capacitância entre duas placas consecutivas, na área sob análise. Na horizontal do circuito, é representada a largura do filme e, na vertical, as voltas que fazem parte do capacitor, formando o raio do elemento capacitivo [10].

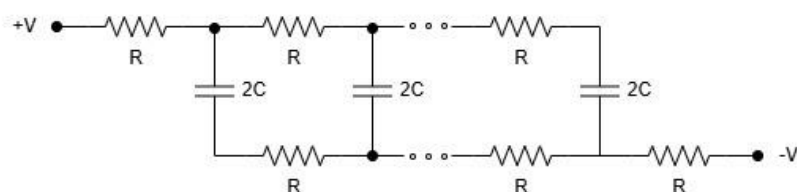
Figura 12 – Circuito equivalente distribuído considerando as diversas voltas do capacitor.



Fonte: Adaptada de [10].

Conforme demonstrado em [10], o circuito equivalente distribuído da Figura 12 pode ser simplificado, conforme apresentado na Figura 13. Ao verificar o circuito da Figura 13, percebe-se que a capacitância está multiplicada por 2 e esta análise já havia sido apresentada na equação (7).

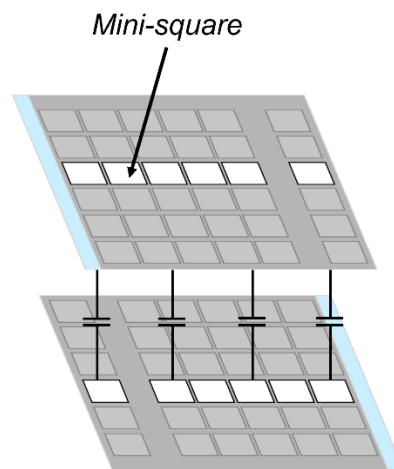
Figura 13 – Circuito equivalente distribuído simplificado.



Fonte: Adaptada de [10].

Com o objetivo de que o circuito equivalente distribuído represente de forma consistente o capacitor, faz-se necessário relacioná-lo com a estrutura física do capacitor. Na Figura 14, está demonstrada a divisão do filme metalizado em pequenas áreas quadradas, denominadas de *mini-squares*, e a partir da análise das características elétricas destes *mini-squares* é elaborado o circuito equivalente distribuído [10].

Figura 14 – Representação física do capacitor.

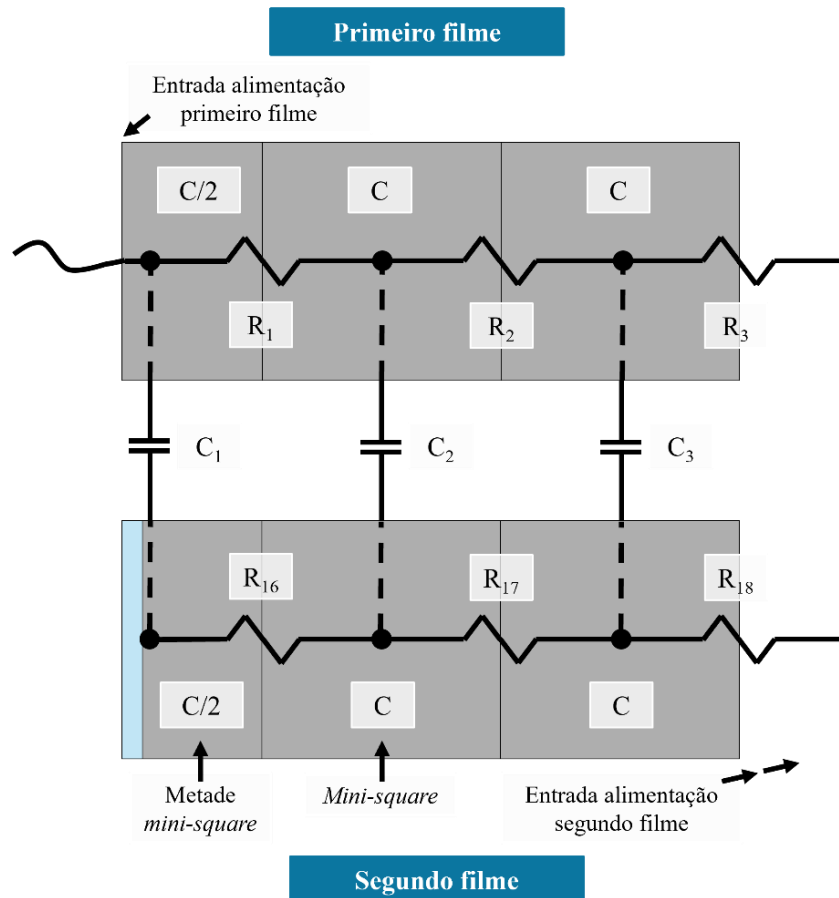


Fonte: Adaptada de [10].

Para o desenvolvimento do circuito equivalente é utilizado o modelo de circuito com resistor central, onde os capacitores são posicionados nas extremidades e os resistores nas regiões centrais dos subcircuitos. Este é o modelo indicado em [10], pois permite avaliar a tensão aplicada diretamente no dielétrico, nas extremidades do filme metalizado.

No circuito com resistor central a distância linear dos resistores é igual, fazendo com que sejam equivalentes, no entanto, para que fisicamente isto seja possível, o início e o final do filme metalizado são compostos por metade do *mini-square*, fazendo com que o primeiro e o último capacitor do circuito possuam metade da capacitância dos demais capacitores, conforme está demonstrado na Figura 15 [10].

Figura 15 – Circuito com resistor central.

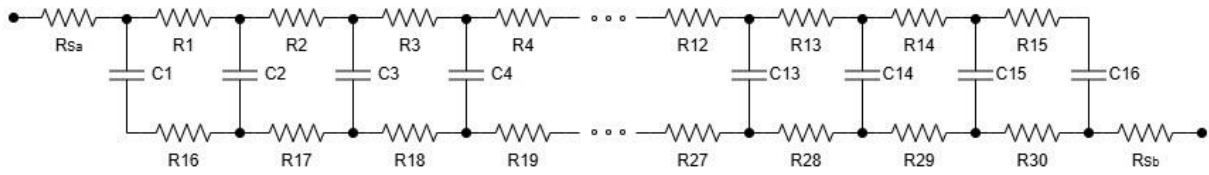


Fonte: Adaptada de [10].

A precisão do circuito equivalente distribuído, que está representando uma estrutura física contínua, é elevada conforme aumenta-se o número de *mini-squares* que o compõe [10]. Foi definida a divisão do circuito em quinze *mini-squares*, visto que esta quantidade apresentou bons resultados nas análises realizadas em [10].

Na Figura 16, é demonstrado o circuito equivalente distribuído considerando os quinze *mini-squares*, sendo que  $R_1$  a  $R_{15}$  equivalem à resistividade superficial do perfil de metalização do primeiro filme,  $R_{16}$  a  $R_{30}$  equivalem à resistividade superficial do perfil de metalização do segundo filme,  $C_1$  a  $C_{16}$  equivalem à capacitância na área formada pelo *mini-square*, mas destacando que  $C_1$  e  $C_{16}$  possuem metade da capacitância dos demais capacitores do circuito. Os componentes  $R_1$  a  $R_{30}$  e  $C_1$  a  $C_{16}$  estão representando a região em que há sobreposição entre os dois filmes e para representar a resistividade superficial da região das extremidades dos filmes, onde não há sobreposição, foram adicionados os componentes  $R_{Sa}$  e  $R_{Sb}$ .

Figura 16 – Circuito equivalente distribuído para quinze *mini-squares*.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O dimensional de cada *mini-square* e o valor de cada componente do circuito é dependente das características projetadas do elemento capacitivo e do filme plástico metalizado, como largura, borda livre e perfil de resistividade do filme metalizado, e defasagem e capacitância do elemento capacitivo [10].

O dimensional do *mini-square* é calculado com base na região em que há sobreposição dos filmes, conforme descrito na equação (17).

$$MS = \frac{b_f - (2 \cdot BL + Def)}{15} \quad (17)$$

onde,  $MS$  é o dimensional do *mini-square* em metro (m).

O circuito equivalente distribuído representa o capacitor no sentido da largura do filme metalizado e visando replicá-lo ao longo do comprimento do filme, faz-se necessário o cálculo da quantidade de *mini-squares* pelo comprimento, conforme equação (18) [10].

$$n_{MS} = \frac{l_f}{MS} \quad (18)$$

onde,  $n_{MS}$  é a quantidade de *mini-squares* no comprimento do filme, que é adimensional.

Os valores das resistências de  $R1$  a  $R15$  e  $R16$  a  $R30$  são dependentes do perfil de metalização projetado dos filmes, desta forma, é preciso definir a posição de cada resistor em relação à largura dos filmes, iniciando da borda reforçada, conforme apresentado nas equações (19) a (21), para o primeiro filme.

$$PR1 = Def + BL + \frac{MS}{2} \quad (19)$$

$$PR2 = PR1 + MS \quad (20)$$

$$PR3 = PR2 + MS \quad (21)$$

onde,  $PR1$  é a posição de  $R1$  no filme em metro (m);  $PR2$  é a posição de  $R2$  no filme em metro (m); e  $PR3$  é a posição de  $R3$  no filme em metro (m).

O cálculo da posição dos resistores  $R4$  a  $R15$  é de forma sucessiva, conforme equações (20) e (21).

A posição dos resistores  $R16$  a  $R30$  do segundo filme é equivalente, porém levando em consideração que o  $R30$  está na borda reforçada, conforme ocorre com o  $R1$  do primeiro filme. Portanto, a posição do resistor  $R30$  é igual à posição do  $R1$ , a posição do  $R29$  é igual à posição do  $R2$ , e assim por diante.

Os valores das resistências dos resistores  $RS_a$  e  $RS_b$  são definidos por meio da relação entre as regiões compreendidas nas extremidades dos filmes, onde não há sobreposição, e o dimensional do *mini-square*, considerando a resistividade superficial desta região igual à resistividade projetada da borda reforçada. Desta forma, os cálculos estão descritos nas equações (22) e (23).

$$RS_a = \frac{Def + BL}{MS} \cdot R_{BRa} \quad (22)$$

$$RS_b = \frac{Def + BL}{MS} \cdot R_{BRb} \quad (23)$$

onde,  $RS_a$  é a resistência na extremidade do primeiro filme em ohm ( $\Omega$ );  $R_{BRa}$  é a resistividade superficial da borda reforçada do primeiro filme em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ );  $RS_b$  é a resistência na extremidade do segundo filme em ohm ( $\Omega$ ); e  $R_{BRb}$  é a resistividade superficial da borda reforçada do segundo filme em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ).

Os valores das capacitâncias dos capacitores  $C2$  a  $C15$  são as capacitâncias de cada *mini-square*, as quais são dependentes da sua área em relação à área total das placas do elemento capacitivo. Os valores das capacitâncias dos capacitores  $C1$  e  $C16$  são metade da capacitância do *mini-square*, conforme mencionado

anteriormente. O cálculo da capacitância do *mini-square* é realizado conforme equação (24) [10].

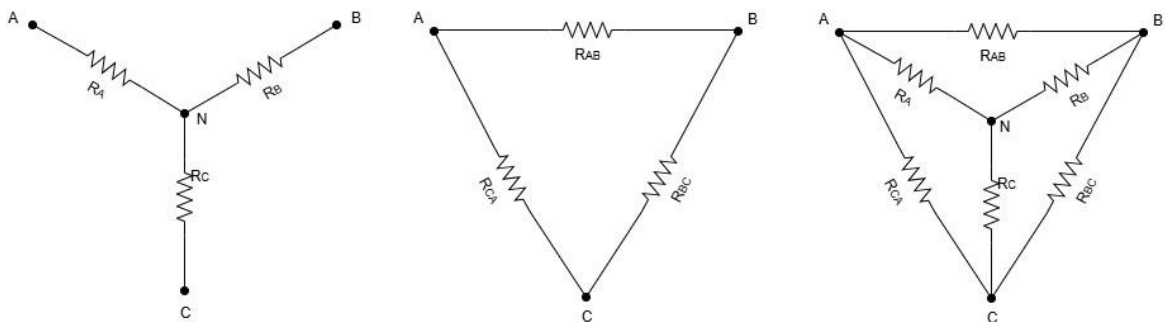
$$C_{MS} = \frac{C_{proj}}{15 \cdot n_{MS}} \quad (24)$$

onde,  $C_{MS}$  é a capacitância do *mini-square* em farad (F); e  $C_{proj}$  é a capacitância total projetada do elemento capacitivo em farad (F).

Com o objetivo de calcular a impedância total do circuito equivalente distribuído é necessário primeiramente calcular a reatância capacitiva dos capacitores e, posteriormente, realizar a transformação de partes do circuito da configuração triângulo para a configuração estrela.

A transformação do circuito de triângulo para estrela é realizada com base na representação apresentada na Figura 17 e nas equações (25), (26) e (27). O detalhamento da obtenção das equações se encontra em [20]. A explicação está demonstrando a relação entre resistências, mas é aplicável da mesma forma para impedâncias.

Figura 17 – Representação transformação triângulo-estrela.



Fonte: Adaptada de [20].

$$R_A = \frac{R_{AB} \cdot R_{CA}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \quad (25)$$

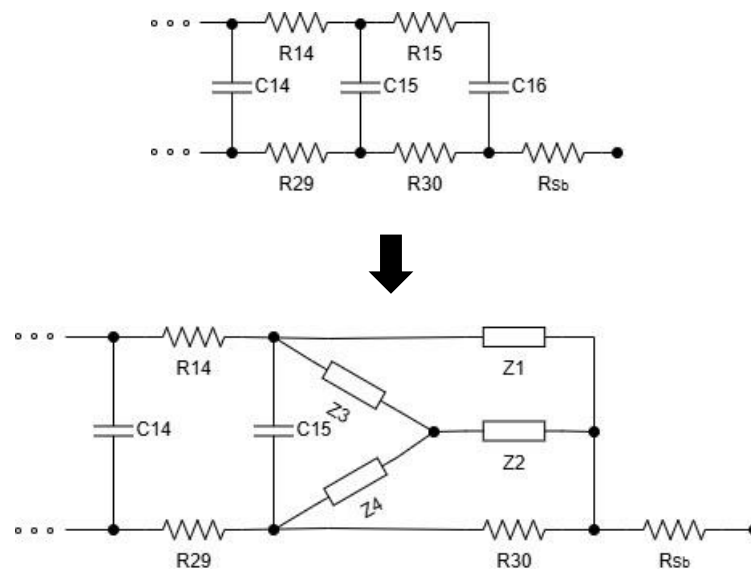
$$R_B = \frac{R_{BC} \cdot R_{AB}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \quad (26)$$

$$R_C = \frac{R_{CA} \cdot R_{BC}}{R_{AB} + R_{BC} + R_{CA}} \quad (27)$$

onde,  $R_A$  é a resistência entre o ponto A e o neutro em ohm ( $\Omega$ );  $R_B$  é a resistência entre o ponto B e o neutro em ohm ( $\Omega$ );  $R_C$  é a resistência entre o ponto C e o neutro em ohm ( $\Omega$ );  $R_{AB}$  é a resistência entre os pontos A e B em ohm ( $\Omega$ );  $R_{CA}$  é a resistência entre os pontos C e A em ohm ( $\Omega$ ); e  $R_{BC}$  é a resistência entre os pontos B e C em ohm ( $\Omega$ ).

A aplicação da transformação triângulo-estrela é realizada no circuito equivalente distribuído, conforme demonstrado na Figura 18, onde  $Z_1$  representa a impedância série entre  $R_{15}$  e  $C_{16}$  e as impedâncias  $Z_2$ ,  $Z_3$  e  $Z_4$  (circuito estrela) são calculadas com base nas impedâncias dos componentes  $Z_1$ ,  $R_{30}$  e  $C_{15}$  (circuito triângulo). As transformações são realizadas até o momento em que o circuito equivalente distribuído se torna uma impedância equivalente.

Figura 18 – Transformação triângulo-estrela aplicada ao circuito equivalente distribuído.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Por meio da impedância equivalente do circuito, é possível obter a capacitância equivalente e a resistência equivalente do circuito equivalente distribuído avaliado. A capacitância total do elemento capacitivo e a resistência série total da metalização do filme plástico metalizado podem ser calculadas, ponderando a existência dos diversos

circuitos em paralelo ao longo do comprimento dos filmes, conforme apresentado nas equações (28) e (29) [10].

$$C_{EC} = C_{eq} \cdot n_{MS} \quad (28)$$

$$RS_{filme} = \frac{R_{eq}}{n_{MS}} \quad (29)$$

onde,  $C_{EC}$  é a capacitância total do elemento capacitivo em farad (F);  $C_{eq}$  é a capacitância equivalente do circuito equivalente distribuído em farad (F);  $RS_{filme}$  é a resistência série total da metalização do filme plástico metalizado em ohm ( $\Omega$ ); e  $R_{eq}$  é a resistência equivalente do circuito equivalente distribuído em ohm ( $\Omega$ ).

### 3.1.2 Perdas no dielétrico

Para o equacionamento das perdas no dielétrico é necessário entender o fator de dissipação do capacitor (DF), que é a relação entre a potência ativa e a potência reativa, ou simplificando, a relação entre a RSE e a reatância capacitiva do capacitor, conforme demonstrado na equação (30) [16].

$$DF = \frac{RSE}{X_c} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot RSE \quad (30)$$

onde,  $DF$  é o fator de dissipação, que é adimensional;  $RSE$  é a resistência série equivalente em ohm ( $\Omega$ ); e  $X_c$  é a reatância capacitiva em ohm ( $\Omega$ ).

A RSE é composta pelas perdas no dielétrico e pelas perdas nos condutores, como terminais, conexões, metalização do elemento capacitivo e metalização do filme plástico (placas). As perdas no dielétrico podem ser representadas por uma resistência, que deve ser inversamente proporcional à frequência, visto que em baixas frequências estas perdas são predominantes em relação às dos condutores, podendo substituir a  $RSE$  no cálculo do fator de dissipação, e mantendo este constante em baixas frequências [16] [10].

Reescrevendo a equação (30) para baixas frequências, obtém-se a equação (31) [10].

$$DF_f = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \frac{R_D}{f} = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot R_D \quad (31)$$

onde,  $DF_f$  é o fator de dissipação do dielétrico em baixas frequências, que é adimensional; e  $R_D$  é a componente resistiva das perdas no dielétrico em ohm ( $\Omega$ ).

Com base no valor do fator de dissipação em baixa frequência do dielétrico, é possível calcular o valor da componente resistiva das perdas no dielétrico ( $R_D$ ), conforme equação (32) [10].

$$R_D = \frac{DF_f}{2 \cdot \pi \cdot C_{proj}} \quad (32)$$

As equações (31) e (32) são aplicáveis em situações em que o dielétrico possui o fator de dissipação constante em baixas frequências, como é o caso do filme de polipropileno [10].

Por meio da obtenção do valor de  $R_D$  é possível calcular as perdas no dielétrico, que são inversamente proporcionais à frequência, conforme mencionado anteriormente, e estão representadas na equação (33) [10].

$$Rp_{EC} = \frac{R_D}{f} \quad (33)$$

onde,  $Rp_{EC}$  é a resistência que representa as perdas no dielétrico em ohm ( $\Omega$ ).

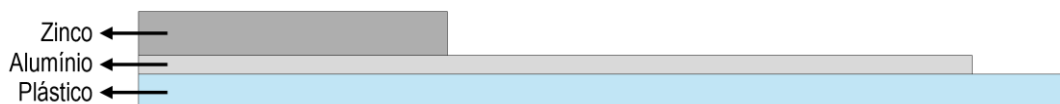
### 3.1.3 Resistência da camada metalizada do elemento capacitivo

A camada metalizada do elemento capacitivo é composta por grãos de zinco e é responsável por unir as diversas voltas do filme metalizado. A resistência desta camada é dependente da área de contato com a metalização do filme plástico, sendo que o pior caso é quando os grãos de zinco apenas têm contato com a metalização do filme em sua espessura [18]. Porém, devido à defasagem entre os filmes, há a penetração de grãos entre os mesmos, aumentando a área de contato com a metalização do filme. Como a profundidade da penetração dos grãos na região da

defasagem não é homogênea, é considerada a penetração em metade desta região para questões de cálculo.

Para o equacionamento da resistência da camada metalizada do elemento capacitivo, primeiramente é necessário calcular a espessura da borda reforçada da camada metalizada do filme, para obtenção da área de contato com os grãos de zinco. Para o cálculo da espessura da borda reforçada são avaliadas duas formas de metalização do filme, que são as mais comuns. Na primeira forma de metalização, a borda reforçada é composta por alumínio e zinco e a área ativa é composta apenas por alumínio, conforme o perfil de metalização com borda estendida, mostrado na Figura 19. Na segunda forma de metalização, toda a extensão da metalização é composta por alumínio e zinco, conforme os perfis de metalização padrão e em rampa, apresentados na Figura 20 e na Figura 21.

Figura 19 – Perfil de metalização com borda estendida.



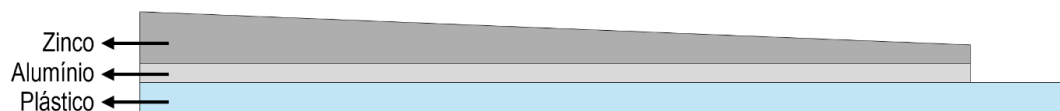
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 20 – Perfil de metalização padrão.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Figura 21 – Perfil de metalização em rampa.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Primeiramente são apresentados os cálculos do perfil de metalização com borda estendida, para posteriormente serem mostrados os cálculos dos perfis de metalização padrão e em rampa.

Conforme demonstrado na equação (2), a resistividade superficial da metalização do filme é a razão entre a resistividade do material e sua espessura. Para o perfil de metalização com borda estendida, onde a área ativa é apenas composta por alumínio, a espessura da camada de alumínio é calculada por meio da equação (34).

$$e_{Al\_step} = \frac{\rho_{Al}}{R_{Al\_step}} = \frac{\rho_{Al}}{R_{AT\_step}} \quad (34)$$

onde,  $e_{Al\_step}$  é a espessura da camada de alumínio para o perfil de metalização com borda estendida em metro (m);  $\rho_{Al}$  é a resistividade do alumínio em ohm-metro ( $\Omega \cdot m$ );  $R_{Al\_step}$  é a resistividade superficial da camada de alumínio para o perfil de metalização com borda estendida em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ); e  $R_{AT\_step}$  é a resistividade superficial da área ativa para o perfil de metalização com borda estendida em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ).

A borda reforçada do perfil de metalização com borda estendida é composta por uma camada base de alumínio, coberta por uma camada de zinco. Portanto, a resistividade superficial da borda reforçada equivale à resistividade superficial da camada de alumínio em paralelo com a resistividade superficial da camada de zinco, conforme demonstrado na equação (35) [18].

$$R_{BR\_step} = \frac{R_{Al\_step} \cdot R_{Zn\_step}}{R_{Al\_step} + R_{Zn\_step}} \quad (35)$$

onde,  $R_{BR\_step}$  é a resistividade superficial da borda reforçada para o perfil de metalização com borda estendida em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ); e  $R_{Zn\_step}$  é a resistividade superficial da camada de zinco para o perfil de metalização com borda estendida em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ).

Rearranjando os valores e isolando a variável  $R_{Zn\_step}$ , obtêm-se a equação (36).

$$R_{Zn\_step} = \frac{R_{BR\_step} \cdot R_{Al\_step}}{(R_{Al\_step} - R_{BR\_step})} = \frac{R_{BR\_step} \cdot R_{AT\_step}}{(R_{AT\_step} - R_{BR\_step})} \quad (36)$$

A mesma relação que ocorre para o cálculo da espessura da camada de alumínio na equação (34), ocorre para o cálculo da espessura da camada de zinco do perfil de metalização com borda estendida, conforme demonstrado na equação (37) [18].

$$e_{Zn\_step} = \frac{\rho_{Zn}}{R_{Zn\_step}} \quad (37)$$

onde,  $e_{Zn\_step}$  é a espessura da camada de zinco para o perfil de metalização com borda estendida em metro (m); e  $\rho_{Zn}$  é a resistividade do zinco em ohm-metro ( $\Omega \cdot m$ ).

Substituindo a equação (36) em (37), obtém-se a equação (38).

$$e_{Zn\_step} = \frac{\rho_{Zn}}{\frac{R_{BR\_step} \cdot R_{AT\_step}}{(R_{AT\_step} - R_{BR\_step})}} = \frac{\rho_{Zn}}{R_{BR\_step} \cdot R_{AT\_step}} \cdot (R_{AT\_step} - R_{BR\_step}) \quad (38)$$

A espessura da borda reforçada do perfil de metalização com borda estendida é o somatório entre a espessura da camada de alumínio e da camada de zinco, conforme equação (39) [18].

$$e_{BR\_step} = e_{Al\_step} + e_{Zn\_step} \quad (39)$$

onde,  $e_{BR\_step}$  é a espessura da borda reforçada para o perfil de metalização com borda estendida em metro (m).

Com o objetivo de calcular a espessura da borda reforçada dos perfis de metalização padrão e em rampa, como não há uma região composta por apenas um material, faz-se necessário utilizar o percentual, em massa, do alumínio em relação ao zinco, que é uma característica de projeto [18]. Visando relacionar a massa dos materiais em relação ao seu volume, utiliza-se a expressão da densidade dos materiais definida por Arquimedes, conforme equação (40).

$$d_m = \frac{m_m}{V_m} \quad (40)$$

onde,  $d_m$  é a densidade do material em quilograma por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $m_m$  é a massa do material em quilograma (kg); e  $V_m$  é o volume do material em metro cúbico ( $\text{m}^3$ ).

Realizando o percentual, em massa, do alumínio em relação ao zinco, obtêm-se as equações (41) e (42) [18].

$$d_{Al} \cdot V_{Al\_std} = P_{Al\_Zn} \cdot d_{Zn} \cdot V_{Zn\_std} \quad (41)$$

$$d_{Al} \cdot e_{Al\_std} \cdot S_{Al\_std} = P_{Al\_Zn} \cdot d_{Zn} \cdot e_{Zn\_std} \cdot S_{Zn\_std} \quad (42)$$

onde,  $d_{Al}$  é a densidade do alumínio em quilograma por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V_{Al\_std}$  é o volume da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro cúbico ( $\text{m}^3$ );  $P_{Al\_Zn}$  é a relação, em massa, entre o alumínio e o zinco em percentual (%);  $d_{Zn}$  é a densidade do zinco em quilograma por metro cúbico ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $V_{Zn\_std}$  é o volume da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro cúbico ( $\text{m}^3$ );  $e_{Al\_std}$  é a espessura da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro (m);  $S_{Al\_std}$  é a área da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro quadrado ( $\text{m}^2$ );  $e_{Zn\_std}$  é a espessura da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro (m); e  $S_{Zn\_std}$  é a área da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro quadrado ( $\text{m}^2$ ).

Como as camadas de alumínio e zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa preenchem a mesma área do filme plástico metalizado, os valores  $S_{Al\_std}$  e  $S_{Zn\_std}$  são iguais, desta forma, podem ser anulados. Isolando a espessura da camada de alumínio, obtêm-se a equação (43) [18].

$$e_{Al\_std} = \frac{P_{Al\_Zn} \cdot d_{Zn} \cdot e_{Zn\_std}}{d_{Al}} \quad (43)$$

De forma equivalente ao demonstrado nas equações (34) e (37), as espessuras das camadas de alumínio e de zinco dos perfis de metalização padrão e em rampa podem ser calculadas pela relação entre resistividade do material e resistividade superficial da camada. Isolando a resistividade superficial da camada nos cálculos são geradas as equações (44) e (45) [18].

$$R_{Al\_std} = \frac{\rho_{Al}}{e_{Al\_std}} \quad (44)$$

$$R_{Zn\_std} = \frac{\rho_{Zn}}{e_{Zn\_std}} \quad (45)$$

onde,  $R_{Al\_std}$  é a resistividade superficial da camada de alumínio para os perfis de metalização padrão e em rampa em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ); e  $R_{Zn\_std}$  é a resistividade superficial da camada de zinco para os perfis de metalização padrão e em rampa em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ).

Conforme ocorre com o perfil de metalização com borda estendida, a borda reforçada dos perfis de metalização padrão e em rampa é composta por uma camada base de alumínio, coberta por uma camada de zinco. Portanto, o cálculo da resistividade superficial da borda reforçada é equivalente à equação (35), conforme apresentado na equação (46) [18].

$$R_{BR\_std} = \frac{R_{Al\_std} \cdot R_{Zn\_std}}{R_{Al\_std} + R_{Zn\_std}} \quad (46)$$

onde,  $R_{BR\_std}$  é a resistividade superficial da borda reforçada para os perfis de metalização padrão e em rampa em ohm por quadrado ( $\Omega/\square$ ).

Substituindo as equações (44) e (45) na equação (46) e organizando as variáveis, obtêm-se a equação (47) [18].

$$R_{BR\_std} = \frac{\frac{\rho_{Al}}{e_{Al\_std}} \cdot \frac{\rho_{Zn}}{e_{Zn\_std}}}{\frac{\rho_{Al}}{e_{Al\_std}} + \frac{\rho_{Zn}}{e_{Zn\_std}}} = \frac{\rho_{Al} \cdot \rho_{Zn}}{e_{Zn\_std} \cdot \rho_{Al} + e_{Al\_std} \cdot \rho_{Zn}} \quad (47)$$

Substituindo a equação (43) em (47) é desenvolvida a equação (48) [18].

$$R_{BR\_std} = \frac{\rho_{Al} \cdot \rho_{Zn}}{e_{Zn\_std} \cdot \rho_{Al} + \left( \frac{P_{Al\_Zn} \cdot d_{Zn} \cdot e_{Zn\_std}}{d_{Al}} \right) \cdot \rho_{Zn}} \quad (48)$$

Rearranjando os termos e isolando a espessura da camada de zinco, obtém-se a equação (49) [18].

$$e_{Zn\_std} = \frac{\rho_{Al} \cdot \rho_{Zn}}{R_{BR\_std} \cdot \left( \frac{d_{Al} \cdot \rho_{Al} + P_{Al\_Zn} \cdot d_{Zn} \cdot \rho_{Zn}}{d_{Al}} \right)} \quad (49)$$

A espessura da borda reforçada nos perfis de metalização padrão e em rampa, assim como acontece com o perfil de metalização com borda estendida, é o somatório entre a espessura da camada de alumínio e da camada de zinco, conforme equação (50) [18].

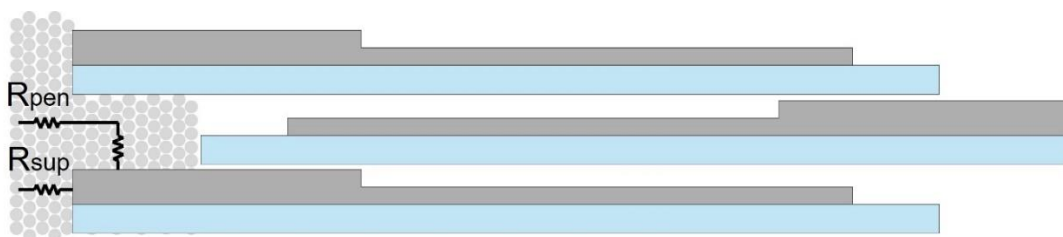
$$e_{BR\_std} = e_{Al\_std} + e_{Zn\_std} \quad (50)$$

onde,  $e_{BR\_std}$  é a espessura da borda reforçada para os perfis de metalização padrão e em rampa em metro (m).

Após a realização do cálculo da espessura da borda reforçada dos perfis de metalização com borda estendida, padrão e em rampa, é possível calcular a resistência da metalização do elemento capacitivo. Utilizando de base a referência [18], que realiza o cálculo da resistência considerando apenas a região de contato entre os grãos de zinco da metalização do elemento capacitivo com a extremidade da borda reforçada da metalização do filme, em sua espessura, é elaborado o cálculo adicionando a região de contato gerada pela penetração dos grãos de zinco na região da defasagem entre filmes.

Na Figura 22, é apresentada a região de metalização do elemento capacitivo, com a definição das resistências consideradas.

Figura 22 – Região de metalização do elemento capacitivo.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O cálculo das resistências é originado da Segunda Lei de Ohm, conforme apresentado na equação (1).

Primeiramente é realizado o cálculo da resistência superficial, formada pelo contato entre os grãos de zinco e a espessura da borda reforçada da metalização do filme, conforme demonstrado na equação (51) [18].

$$R_{sup} = \frac{\rho_{Zn} \cdot e_{met}}{l_f \cdot e_{BR}} \quad (51)$$

onde,  $R_{sup}$  é a resistência superficial da camada de metalização do elemento capacitivo em ohm ( $\Omega$ );  $e_{met}$  é a espessura da metalização do elemento capacitivo em metro (m); e  $e_{BR}$  é a espessura da borda reforçada em metro (m).

Posteriormente, é calculada a resistência formada pela penetração dos grãos de zinco na região da defasagem entre filmes, sendo que se está considerando apenas a penetração em metade da região da defasagem, conforme mencionado anteriormente. O cálculo está apresentado na equação (52).

$$R_{pen} = \frac{\rho_{Zn} \cdot e_{met}}{l_f \cdot e_f} + \frac{\rho_{Zn} \cdot e_f}{l_f \cdot \frac{Def}{2}} = \frac{\rho_{Zn}}{l_f} \cdot \left( \frac{e_{met}}{e_f} + \frac{2 \cdot e_f}{Def} \right) \quad (52)$$

onde,  $R_{pen}$  é a resistência da penetração dos grãos de zinco na região da defasagem entre filmes em ohm ( $\Omega$ ).

A resistência total da metalização do elemento capacitivo é o paralelo entre a resistência superficial  $R_{sup}$  e a resistência de penetração  $R_{pen}$ , conforme demonstrado na equação (53).

$$R_{met} = \frac{R_{sup} \cdot R_{pen}}{R_{sup} + R_{pen}} \quad (53)$$

onde,  $R_{met}$  é a resistência total da metalização do elemento capacitivo em ohm ( $\Omega$ ).

### 3.1.4 Resistência série equivalente do elemento capacitivo

A resistência série do elemento capacitivo é formada pelo somatório entre a resistência série total da metalização do filme plástico metalizado e a resistência total da metalização do elemento capacitivo, conforme demonstrado na equação (54) [18].

$$R_{SEC} = R_{S_{filme}} + R_{met} \quad (54)$$

onde,  $R_{SEC}$  é a resistência série do elemento capacitivo em ohm ( $\Omega$ ).

Adicionando a resistência série do elemento capacitivo à resistência que representa as perdas no dielétrico, é obtida a resistência série equivalente do elemento capacitivo, conforme apresentado na equação (55) [10].

$$RSE_{EC} = R_{SEC} + Rp_{EC} \quad (55)$$

onde,  $RSE_{EC}$  é a resistência série equivalente do elemento capacitivo em ohm ( $\Omega$ ).

### 3.1.5 Resistência das conexões elétricas e dos terminais

As conexões elétricas, que são responsáveis pelo acoplamento entre o elemento capacitivo e a parte externa do capacitor, são compostas por fitas planas. Os terminais, que realizam a alimentação elétrica do capacitor, são compostos por parafuso fêmea, com corpo cilíndrico e base sextavada.

O cálculo das resistências das fitas de conexão e dos terminais é realizado com base na Segunda Lei de Ohm, conforme equação (1).

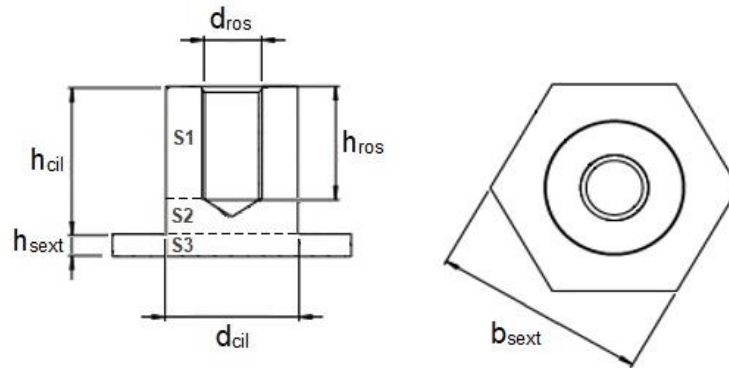
Para as fitas de conexão, a resistência é calculada conforme equação (56).

$$R_{ft} = \frac{\rho \cdot l_{ft}}{b_{ft} \cdot e_{ft}} \quad (56)$$

onde,  $R_{ft}$  é a resistência da fita em ohm ( $\Omega$ );  $l_{ft}$  é o comprimento da fita em metro (m);  $b_{ft}$  é a largura da fita em metro (m); e  $e_{ft}$  é a espessura da fita em metro (m).

Para os terminais, primeiramente é realizada a divisão do terminal em blocos, para facilitar o cálculo, conforme demonstrado na Figura 23.

Figura 23 – Divisão do terminal sextavado.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O bloco  $S1$  é composto pela região cilíndrica que compreende a rosca do parafuso ao centro, o bloco  $S2$  é composto pela região cilíndrica sem a rosca do parafuso ao centro e o bloco  $S3$  é composto pela região sextavada.

Define-se que a área do círculo é segundo equação (57) e que a área do hexágono é conforme equação (58).

$$S_{cir} = \pi \cdot r_{cir}^2 \quad (57)$$

$$S_{hex} = \frac{\sqrt{3} \cdot b_{hex}^2}{2} \quad (58)$$

onde,  $S_{cir}$  é a área do círculo em metro quadrado ( $m^2$ );  $r_{cir}$  é o raio do círculo em metro (m);  $S_{hex}$  é a área do hexágono em metro quadrado ( $m^2$ ); e  $b_{hex}$  é a largura do hexágono em metro (m).

A resistência do bloco  $S1$  é calculada conforme apresentado na equação (59).

$$R_{S1} = \frac{\rho \cdot h_{ros}}{(\pi \cdot r_{cil}^2 - \pi \cdot r_{ros}^2)} = \frac{\rho \cdot h_{ros}}{\left[ \pi \cdot \left(\frac{d_{cil}}{2}\right)^2 - \pi \cdot \left(\frac{d_{ros}}{2}\right)^2 \right]} = \frac{4 \cdot \rho \cdot h_{ros}}{\pi \cdot (d_{cil}^2 - d_{ros}^2)} \quad (59)$$

onde,  $R_{S1}$  é a resistência do bloco  $S1$  em ohm ( $\Omega$ );  $h_{ros}$  é a altura da região da rosca em metro (m);  $r_{cil}$  é o raio da região cilíndrica em metro (m);  $r_{ros}$  é o raio da região da

rosca em metro (m);  $d_{cil}$  é o diâmetro da região cilíndrica em metro (m); e  $d_{ros}$  é o diâmetro da região da rosca em metro (m).

A resistência do bloco  $S2$  é calculada conforme apresentado na equação (60).

$$R_{S2} = \frac{\rho \cdot (h_{cil} - h_{ros})}{\pi \cdot r_{cil}^2} = \frac{\rho \cdot (h_{cil} - h_{ros})}{\pi \cdot \left(\frac{d_{cil}}{2}\right)^2} = \frac{4 \cdot \rho \cdot (h_{cil} - h_{ros})}{\pi \cdot d_{cil}^2} \quad (60)$$

onde,  $R_{S2}$  é a resistência do bloco  $S2$  em ohm ( $\Omega$ ); e  $h_{cil}$  é a altura da região cilíndrica em metro (m).

A resistência do bloco  $S3$  é calculada conforme apresentado na equação (61).

$$R_{S3} = \frac{\rho \cdot h_{sext}}{\frac{\sqrt{3} \cdot b_{sext}^2}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{\rho \cdot h_{sext}}{b_{sext}^2} \quad (61)$$

onde,  $R_{S3}$  é a resistência do bloco  $S3$  em ohm ( $\Omega$ );  $h_{sext}$  é a altura da região sextavada em metro (m); e  $b_{sext}$  é a largura da região sextavada em metro (m).

A resistência total do terminal parafuso fêmea, com corpo cilíndrico e base sextavada, é o somatório das resistências dos blocos  $S1$ ,  $S2$  e  $S3$ , conforme demonstrado na equação (62).

$$R_{tm} = R_{S1} + R_{S2} + R_{S3} \quad (62)$$

$$R_{tm} = 2 \cdot \rho \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_{ros}}{\pi \cdot (d_{cil}^2 - d_{ros}^2)} + \frac{2 \cdot (h_{cil} - h_{ros})}{\pi \cdot d_{cil}^2} + \frac{h_{sext}}{\sqrt{3} \cdot b_{sext}^2} \right]$$

onde,  $R_{tm}$  é a resistência total do terminal em ohm ( $\Omega$ ).

### 3.1.6 Resistência série equivalente do capacitor

Após o cálculo da resistência série equivalente dos elementos capacitivos  $RSE_{EC}$  e das resistências das fitas de conexão  $R_{ft}$  e dos terminais  $R_{tm}$ , é possível calcular a RSE do capacitor, sendo que o circuito equivalente para a realização do cálculo é dependente da quantidade de elementos capacitivos e da forma de conexão entre

elementos capacitivos, fitas de conexão e terminais, que são dados de projeto, e são apresentados no Capítulo 4.

No cálculo da RSE do capacitor não está sendo considerado o efeito pelicular, pois as medições são realizadas na frequência de 1 kHz, que torna a profundidade pelicular de circulação de corrente no condutor  $\delta$ , conforme demonstrado na equação (16), muito superior, na ordem de no mínimo 3 vezes, às espessuras utilizadas na metalização do filme plástico, na metalização do elemento capacitivo e nas fitas de conexão. O impacto seria significativo nos terminais, porém a representatividade da resistência dos terminais é baixa perante a RSE do capacitor, podendo, desta forma, ser desconsiderado. Esta consideração é válida utilizando de base o modelo de capacitor que está sendo avaliado neste trabalho, caso seja estudado outro *design* de produto, o efeito pelicular deve ser reavaliado.

## 3.2 INDUTÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

A indutância parasita do capacitor pode ser avaliada de duas formas, a primeira considerando-a como um componente unificado, em série com a RSE e a capacitância do circuito, e a segunda aplicando-a de forma distribuída, no circuito equivalente distribuído. Como o capacitor em análise neste projeto possui alimentação radial e conexão por meio de fitas, estas apresentam indutância significativa em relação à indutância do elemento capacitivo, desta forma, o modelo o qual a indutância é avaliada como um componente unificado é adequada [10] [11].

Conforme realizado com a avaliação da RSE do capacitor, a análise da LSE é realizada dividindo o equacionamento em partes: indutância do elemento capacitivo, indutância das conexões elétricas e dos terminais, indutâncias mútuas e indutância série equivalente do capacitor.

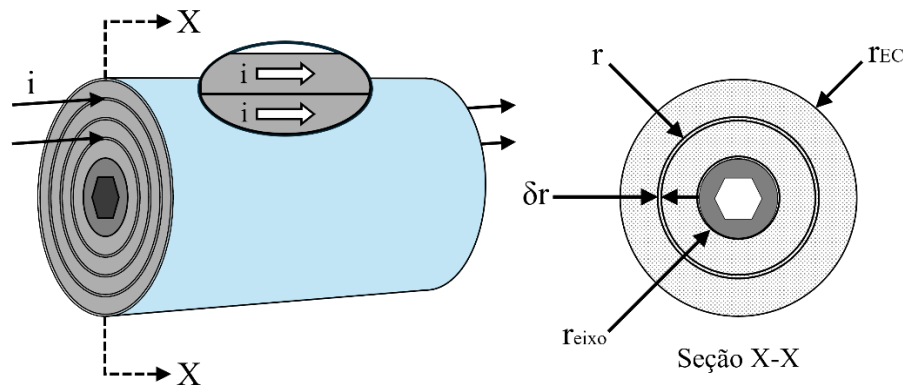
### 3.2.1 Indutância do elemento capacitivo

A corrente circula pelo elemento capacitivo de duas formas, no sentido radial, por meio da metalização do elemento capacitivo, e no sentido longitudinal, por meio da metalização do filme. Considerando a distribuição homogênea da corrente no sentido radial, não há geração de campo magnético e, conseqüentemente de indutância, na metalização do elemento capacitivo [21].

Neste trabalho está se considerando o elemento capacitivo circular com dupla terminação, onde as placas são conectadas em lados opostos, desta forma, as correntes em ambas as placas possuem o mesmo sentido, conforme demonstrado na Figura 24. A circulação da corrente no sentido longitudinal, na metalização do filme plástico, promove o surgimento de campo magnético e este gera a indutância parasita [10] [21].

Na Figura 24, observando o corte transversal na seção X-X, está representado o raio do eixo ( $r_{eixo}$ ), o raio externo do elemento capacitivo ( $r_{EC}$ ), o raio da circunferência interna ao elemento capacitivo ( $r$ ) e sua derivada ( $\delta r$ ). Estas grandezas são fundamentais na definição da região onde há circulação de corrente, e conseqüentemente, campo magnético, possibilitando o equacionamento da indutância parasita.

Figura 24 – Representação da circulação de corrente no elemento capacitivo.



Fonte: Adaptada de [10].

A Lei de Ampère permite calcular a intensidade do campo magnético, o qual é gerado por uma corrente elétrica, conforme demonstrado na equação (63).

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l}_H = I \quad (63)$$

onde,  $H$  é o campo magnético em ampère por metro (A/m);  $l_H$  é o comprimento da circunferência gerada pelo vetor campo magnético em metro (m); e  $I$  é a corrente elétrica em ampère (A).

Aplicando a equação (63) ao elemento capacitivo, obtêm-se a fórmula do campo magnético gerado pela corrente que circula nas voltas do filme metalizado, conforme demonstrado na equação (64) [10]. Considerando-se que a corrente elétrica é distribuída de forma homogênea na área da metalização do elemento capacitivo, a corrente total é multiplicada pela relação entre a área da região sob análise e a área total.

$$H_{EC} = \frac{I_{EC}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( \frac{\pi \cdot r^2 - \pi \cdot r_{eixo}^2}{\pi \cdot r_{EC}^2 - \pi \cdot r_{eixo}^2} \right) = \frac{I_{EC}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( \frac{r^2 - r_{eixo}^2}{r_{EC}^2 - r_{eixo}^2} \right) \quad (64)$$

onde,  $H_{EC}$  é o campo magnético do elemento capacitivo em ampère por metro (A/m);  $I_{EC}$  é a corrente elétrica que circula no elemento capacitivo em ampère (A);  $r_{eixo}$  é o raio do eixo em metro (m); e  $r_{EC}$  é o raio externo do elemento capacitivo em metro (m).

A energia eletromagnética armazenada em determinado volume é expressa pela equação (65) [21].

$$W = \frac{1}{2} \cdot \int_V H \cdot dB \quad (65)$$

onde,  $W$  é a energia eletromagnética em joule (J); e  $B$  é a indução magnética em tesla (T).

Portanto, a energia eletromagnética armazenada na faixa anular de largura  $\delta r$  é calculada conforme equação (66) [10]. A equação (66) representa a energia eletromagnética para uma faixa anular, com altura unitária, do elemento capacitivo.

$$\delta W_{EC} = 0,5 \cdot \mu \cdot H_{EC}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta r \quad (66)$$

onde,  $W_{EC}$  é a energia eletromagnética do elemento capacitivo em joule por metro (J/m); e  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio em henry por metro (H/m).

Substituindo a equação (64) na equação (66) é definida a equação (67).

$$\delta W_{EC} = 0,5 \cdot \mu \cdot \left[ \frac{I_{EC}}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \left( \frac{r^2 - r_{eixo}^2}{r_{EC}^2 - r_{eixo}^2} \right) \right]^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \delta r \quad (67)$$

Reorganizando a equação (67) é obtida a equação (68).

$$\delta W_{EC} = \frac{0,5 \cdot \mu \cdot I_{EC}^2}{2 \cdot \pi \cdot (r_{EC}^2 - r_{eixo}^2)^2} \cdot \left( r^3 - 2 \cdot r \cdot r_{eixo}^2 + \frac{r_{eixo}^4}{r} \right) \cdot \delta r \quad (68)$$

Integrando a equação (68) entre  $r_{eixo}$  e  $r_{EC}$  é definida a equação (69).

$$W_{EC} = \frac{0,5 \cdot \mu \cdot I_{EC}^2}{2 \cdot \pi \cdot (r_{EC}^2 - r_{eixo}^2)^2} \cdot \left[ \frac{r_{EC}^4 - r_{eixo}^4}{4} - r_{eixo}^2 \cdot (r_{EC}^2 - r_{eixo}^2) + r_{eixo}^4 \cdot \ln \left| \frac{r_{EC}}{r_{eixo}} \right| \right] \quad (69)$$

Reorganizando a equação (69) é obtida a equação (70).

$$W_{EC} = \frac{0,5 \cdot \mu \cdot I_{EC}^2}{2 \cdot \pi \cdot (r_{EC}^2 - r_{eixo}^2)^2} \cdot \left[ \frac{r_{EC}^4 + 3 \cdot r_{eixo}^4 - 4 \cdot r_{eixo}^2 \cdot r_{EC}^2}{4} + r_{eixo}^4 \cdot \ln \left| \frac{r_{EC}}{r_{eixo}} \right| \right] \quad (70)$$

A energia eletromagnética armazenada também pode ser expressa por meio da indutância parasita, conforme demonstrado na equação (71) [21].

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (71)$$

onde,  $L$  é a indutância em henry (H).

Aplicando a equação (71) ao elemento capacitivo e multiplicando pela sua altura, visto que a energia eletromagnética calculada do elemento capacitivo é por unidade de altura, obtêm-se a equação (72) [10].

$$L_{EC} = \frac{W_{EC}}{0,5 \cdot I_{EC}^2} \cdot h_{EC} \quad (72)$$

onde,  $L_{EC}$  é a indutância parasita do elemento capacitivo em henry (H).

Substituindo a equação (70) na equação (72), obtêm-se a equação da indutância parasita do elemento capacitivo, conforme equação (73).

$$L_{EC} = \frac{\mu}{2 \cdot \pi \cdot (r_{EC}^2 - r_{eixo}^2)^2} \cdot \left[ \frac{r_{EC}^4 + 3 \cdot r_{eixo}^4 - 4 \cdot r_{eixo}^2 \cdot r_{EC}^2}{4} + r_{eixo}^4 \cdot \ln \left| \frac{r_{EC}}{r_{eixo}} \right| \right] \cdot h_{EC} \quad (73)$$

### 3.2.2 Indutância das conexões elétricas e dos terminais

As conexões elétricas consideradas para este trabalho são fitas planas, desta forma, o cálculo da autoindutância da fita se assemelha ao cálculo da autoindutância do barramento, que utiliza de base as equações de Maxwell, conforme apresentado em [22]. A corrente, ao atravessar um condutor, gera um fluxo magnético interno e externo, portanto, a autoindutância é composta pelo somatório da indutância interna e externa do condutor, conforme demonstrado nas equações (74), (75) e (76) [22].

$$L_{int} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{8 \cdot \pi} \cdot l_{ft} \quad (74)$$

$$L_{ext} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{e_{ft} \cdot l_{ft}}{\pi \cdot (e_{ft} + b_{ft})} \quad (75)$$

$$L_{ft} = L_{int} + L_{ext} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft}}{e_{ft} + b_{ft}} \right) \quad (76)$$

onde,  $L_{int}$  é a indutância interna do condutor em henry (H);  $L_{ext}$  é a indutância externa do condutor em henry (H); e  $L_{ft}$  é a autoindutância da fita em henry (H).

Os terminais do capacitor, devido ao *design* com corpo cilíndrico e base sextavada, não possuem indutância significativa, desta forma, seu efeito pode ser negligenciado.

### 3.2.3 Indutâncias mútuas

A indutância é composta pela energia de interação entre circuitos elétricos, sendo denominada de autoindutância quando é dependente da energia do próprio circuito, conforme avaliado anteriormente, e denominada de indutância mútua quando há a interação entre circuitos diferentes [23].

Para a realização dos cálculos da indutância parasita do capacitor, serão consideradas as indutâncias mútuas entre as fitas de conexão sobrepostas ou próximas e as indutâncias mútuas entre fitas de conexão e elementos capacitivos.

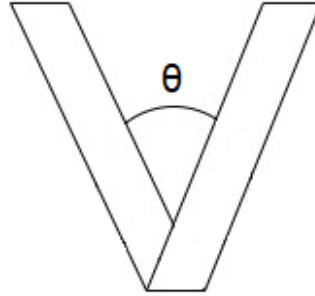
O cálculo da indutância mútua entre fitas de conexão sobrepostas, semelhante ao que ocorre na autoindutância, é equivalente ao cálculo da indutância mútua entre barramentos, conforme demonstrado em [22]. Portanto, o cálculo da indutância mútua entre fitas de conexão sobrepostas é apresentado na equação (77).

$$M_{ft\_sob} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft\_sob} \cdot e_{ft}}{\pi \cdot \sqrt{4 \cdot (d_{ft} + e_{ft})^2 + k \cdot b_{ft}^2}} \quad (77)$$

onde,  $M_{ft\_sob}$  é a indutância mútua entre fitas sobrepostas em henry (H);  $l_{ft\_sob}$  é o comprimento sobreposto da fita em metro (m);  $d_{ft}$  é a distância entre fitas em metro (m); e  $k$  é o coeficiente de correção, que depende da interação entre fitas e é adimensional.

O cálculo da indutância mútua entre fitas de conexão próximas é dependente da posição das fitas no espaço [23]. Desta forma, para este trabalho é avaliada a indutância mútua entre duas fitas de conexão posicionadas em “V”, com ângulo  $\theta$  entre elas, conforme demonstrado na Figura 25.

Figura 25 – Fitas de conexão posicionadas em “V”.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

A Fórmula de Neumann calcula a indutância mútua de dois circuitos fechados, com circulação de corrente, posicionados de forma aleatória no espaço, conforme demonstrado na equação (78) [23].

$$M_{ab} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot \oint \oint \frac{d\vec{r}_a \cdot d\vec{r}_b}{r_{ab}} \quad (78)$$

onde,  $M_{ab}$  é a indutância mútua entre dois pontos no espaço em henry (H);  $r_a$  é a posição do primeiro ponto em metro (m);  $r_b$  é a posição do segundo ponto em metro (m); e  $r_{ab}$  é a distância entre dois pontos no espaço em metro (m).

Adaptando a equação (78) às fitas de conexão posicionadas em “V”, obtêm-se a equação (79).

$$M_{ft_v} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{dl_{fta} \cdot dl_{ftb}}{|\vec{r}_a - \vec{r}_b|} \quad (79)$$

onde,  $M_{ft_v}$  é a indutância mútua entre as fitas de conexão posicionadas em “V” em henry (H);  $l_{fta}$  é o comprimento da primeira fita em metro (m); e  $l_{ftb}$  é o comprimento da segunda fita em metro (m).

Considerando que as duas fitas da combinação em “V” possuem o mesmo comprimento e que  $r_a$  e  $r_b$  representam o ponto médio de cada uma das fitas de conexão, obtêm-se a equação (80).

$$M_{ft_v} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{l_{ft}^2 \cdot \cos \theta}{2 \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \frac{l_{ft}}{2}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{l_{ft} \cdot \cos \theta}{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (80)$$

onde,  $\theta$  é o ângulo formado entre as fitas em grau ( $^\circ$ ).

O cálculo da indutância mútua entre elemento capacitivo e fita de conexão é realizado por meio da Lei de Faraday, onde a indutância mútua é a constante de proporcionalidade entre o fluxo magnético gerado pelo primeiro condutor, que atravessa o segundo condutor, conforme apresentado na equação (81).

$$M_{21} = \frac{\Phi B_2}{I_1} \quad (81)$$

onde,  $M_{21}$  é a indutância mútua entre o primeiro e o segundo condutor em henry (H);  $\Phi B_2$  é o fluxo magnético que atravessa o segundo condutor em weber (Wb); e  $I_1$  é a corrente que circula no primeiro condutor, a qual gera o fluxo magnético, em ampère (A).

Portanto, para calcular a indutância mútua entre elemento capacitivo e fita de conexão, primeiramente é necessário o cálculo do fluxo magnético.

O fluxo magnético é o produto entre o vetor indução magnética e o vetor área, conforme demonstrado na equação (82) [24].

$$\Phi B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \varphi \quad (82)$$

onde,  $\Phi B$  é o fluxo magnético em weber (Wb);  $S$  é a área de interesse em metro quadrado ( $m^2$ ); e  $\varphi$  é o ângulo formado entre os vetores da indução magnética e da área de interesse em grau ( $^\circ$ ).

Derivando a equação (82), obtêm-se a equação (83) [24].

$$\delta \Phi B = B \cdot \delta S \cdot \cos \varphi \quad (83)$$

Conforme a Lei de Biot-Savart, é definida a equação (84).

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_B}{2 \cdot \pi \cdot a} \quad (84)$$

onde,  $I_B$  é a corrente que origina a indução magnética em ampère (A); e  $a$  é a distância entre a origem da indução magnética e o ponto sob análise em metro (m).

Substituindo a equação (84) na equação (83), obtêm-se a equação (85) [24].

$$\delta\Phi_B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_B}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \delta S \cdot \cos \varphi = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_B}{2 \cdot \pi \cdot a} \cdot \cos \varphi \cdot l_M \cdot \delta a \quad (85)$$

onde,  $l_M$  é o comprimento da área de interesse em metro (m).

Integrando a equação (85) entre as distâncias  $a_i$  e  $a_f$ , obtêm-se a equação (86) [24].

$$\Phi_B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot I_B}{2 \cdot \pi} \cdot \cos \varphi \cdot l_M \cdot \ln \left| \frac{a_f}{a_i} \right| \quad (86)$$

onde,  $a_f$  é a maior distância da origem da indução magnética, na região sob análise, em metro (m); e  $a_i$  é a menor distância da origem da indução magnética, na região sob análise, em metro (m).

Por meio do cálculo do fluxo magnético é possível calcular as indutâncias mútuas entre o elemento capacitivo e a fita de conexão.

Para o cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, é realizada a substituição da equação (86) na equação (81), levando em consideração que a corrente que origina o fluxo magnético é a corrente que circula pelo elemento capacitivo, e que a área de interesse é a região em que se localiza a fita de conexão. Neste caso, o ponto de origem para definição da região de interesse é o centro do elemento capacitivo. Desta forma, é obtida a equação (87).

$$M_{ft_{EC}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi \cdot l_M}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft_{f}}}{a_{ft_{i}}} \right| \quad (87)$$

onde,  $M_{ft_{EC}}$  é a indutância mútua na fita de conexão originada pelo elemento capacitivo em henry (H);  $a_{ft_{f}}$  é a maior distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão, em metro (m); e  $a_{ft_{i}}$  é a

menor distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão, em metro (m).

O cálculo da indutância mútua no elemento capacitivo, originada pela fita de conexão, é semelhante ao cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, ou seja, é realizada a substituição da equação (86) na equação (81), porém neste caso leva-se em consideração que a corrente que origina o fluxo magnético é a corrente que circula pela fita de conexão, e que a área de interesse é a região em que se localiza o elemento capacitivo. O ponto de origem para definição da região de interesse é o centro da fita de conexão.

No caso da indutância mútua no elemento capacitivo, como a área atravessada pelo fluxo magnético originado pela fita de conexão não é maciça, sendo formada por camadas de filme plástico metalizado, é definido um fator de  $3 \cdot 10^{-3}$  no cálculo, que representa a relação entre a área metalizada (condutora) e a área plástica (dielétrica). Para a definição do fator de  $3 \cdot 10^{-3}$  é considerada a espessura da camada metalizada do filme de aproximadamente 18 nm e do filme plástico de aproximadamente 6  $\mu\text{m}$ . Desta forma, é obtida a equação (88).

$$M_{EC_{ft}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi \cdot l_M}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC_f}}{a_{EC_i}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (88)$$

onde,  $M_{EC_{ft}}$  é a indutância mútua no elemento capacitivo originada pela fita de conexão em henry (H);  $a_{EC_f}$  é a maior distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo, em metro (m); e  $a_{EC_i}$  é a menor distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo, em metro (m).

### 3.2.4 Indutância série equivalente do capacitor

Após o equacionamento das autoindutâncias e das indutâncias mútuas, são calculadas as indutâncias equivalentes dos elementos capacitivos e das fitas de conexão, para posteriormente ser possível calcular a LSE do capacitor. O circuito equivalente para a realização do cálculo é dependente da estrutura do capacitor, que engloba a quantidade de elementos capacitivos e a forma de conexão e

posicionamento entre os elementos capacitivos e as fitas de conexão. Estes são dados de projeto e são apresentados no Capítulo 4.

O impacto da indutância mútua na indutância equivalente é dependente do sentido das correntes entre os condutores avaliados, ou seja, caso os dois condutores sob análise possuam a corrente circulando no mesmo sentido, a indutância mútua é somada à autoindutância, no entanto, caso os dois condutores sob análise possuam a corrente circulando em sentidos opostos, a indutância mútua é subtraída da autoindutância [22].

### 3.3 CONCLUSÃO

A RSE do capacitor é composta pela resistência dos condutores e pelas perdas no dielétrico. Desta forma, o equacionamento é realizado em etapas: a resistência série do filme metalizado, que é calculada por meio do circuito equivalente distribuído, onde a metalização do filme é dividida em *mini-squares*; a resistência da camada metalizada do elemento capacitivo, que é composta pela resistência superficial e pela resistência de penetração dos grãos de zinco; as perdas no dielétrico, que é dependente da frequência; a resistência série equivalente do elemento capacitivo, que é o somatório de todas as resistências mencionadas anteriormente; e a resistência das conexões elétricas e dos terminais, que é diretamente dependente do *design* destes.

A LSE do capacitor é composta pelas autoindutâncias dos componentes e pelas indutâncias mútuas entre eles, sendo o equacionamento realizado nas seguintes etapas: a indutância do elemento capacitivo, que é dependente do diâmetro e da altura do elemento capacitivo; a indutância das conexões elétricas, que varia conforme a existência ou não de sobreposição; e as indutâncias mútuas, que podem ser entre fitas de conexão e entre fitas e elementos capacitivos.

Com os equacionamentos da RSE e da LSE desenvolvidos, é possível aplicá-los no projeto do capacitor, permitindo a elaboração do circuito equivalente do capacitor.

## 4 PROJETO DE CAPACITOR

Com o objetivo de explicar a fase de projeto do capacitor, é apresentada a metodologia de projeto, com os dados de entrada e a consequente definição das características elétricas e mecânicas, e em seguida, a elaboração do projeto, com o cálculo do circuito equivalente.

### 4.1 METODOLOGIA DE PROJETO

Na fase inicial do projeto do capacitor, são recebidos os dados de entrada, compostos por nível de capacitância, tensão e corrente nominais, dimensional e tipo de aplicação. Na aplicação de barramento CC de conversores estáticos, os níveis de RSE e LSE são requisitos, e são consequência do *design* de produto selecionado. Por isso, a importância da realização do cálculo destes componentes na fase de projeto, permitindo que sejam realizadas as melhores escolhas.

Primeiramente, é definida a espessura do filme base e a borda livre do filme metalizado, de acordo com o nível de tensão nominal. Posteriormente, com a informação da capacitância nominal e do dimensional desejado, é feita a seleção da largura do filme metalizado e da quantidade de elementos capacitivos. O nível de corrente nominal influencia na definição da espessura da metalização e no diâmetro do eixo do elemento capacitivo, na espessura e na largura das fitas de conexão e no dimensional dos terminais. A defasagem entre filmes metalizados é determinada com base na estrutura do elemento capacitivo e a altura deste é responsável pelo comprimento das fitas de conexão. O posicionamento das fitas de conexão é definido, levando em consideração o processo de montagem do capacitor. As dimensões dos terminais, além de serem condicionadas pela corrente nominal, são dependentes das características da alimentação elétrica na aplicação.

Por meio da análise preliminar, são definidas as seguintes características:

- a) Quantidade de elementos capacitivos.
- b) Capacitância do capacitor.
- c) Espessura do filme metalizado.
- d) Largura do filme metalizado.
- e) Borda livre do filme metalizado.
- f) Defasagem entre filmes metalizados.

- g) Espessura da metalização do elemento capacitivo.
- h) Diâmetro do eixo do elemento capacitivo.
- i) Comprimento das fitas de conexão.
- j) Espessura das fitas de conexão.
- l) Largura das fitas de conexão.
- m) Ângulo formado entre fitas próximas.
- n) Altura da região da rosca dos terminais.
- o) Altura da região cilíndrica dos terminais.
- p) Diâmetro da região da rosca dos terminais.
- q) Diâmetro da região cilíndrica dos terminais.
- r) Altura da região sextavada dos terminais.
- s) Largura da região sextavada dos terminais.

De posse destas informações, é possível projetar a estrutura detalhada do capacitor e calcular o circuito equivalente. A análise dos dados obtidos permite adaptações no *design* do produto, com o objetivo de aprimorar características técnicas específicas do capacitor, sendo este um dos objetivos deste trabalho.

Como este trabalho tem o propósito de calcular o circuito equivalente de capacitores de filme plástico para aplicação em barramento CC de conversores estáticos, é padronizada a utilização de filme metalizado com perfil de metalização com borda estendida e resistividade de  $3 \Omega/\square$  (borda reforçada) a  $55 \Omega/\square$  (área ativa).

Na Tabela 1, são apresentadas as propriedades elétricas e magnéticas dos principais materiais utilizados nos projetos dos capacitores [16] [25] [26] [27].

Tabela 1 – Propriedades elétricas e magnéticas.

Propriedade	Simbologia	Valor
Permissividade do vácuo	$\epsilon_0$	$8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
Permissividade relativa do polipropileno	$\epsilon_{r\_PP}$	2,2
Fator de dissipação do polipropileno	$DF_{PP}$	$2 \times 10^{-4}$
Permeabilidade magnética do vácuo	$\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$
Resistividade do alumínio	$\rho_{Al}$	$2,5 \times 10^{-8} \Omega.m$
Resistividade do zinco	$\rho_{Zn}$	$5,9 \times 10^{-8} \Omega.m$
Resistividade do cobre	$\rho_{Cu}$	$1,7 \times 10^{-8} \Omega.m$
Resistividade do latão (C36000)	$\rho_{latão}$	$6,6 \times 10^{-8} \Omega.m$

Fonte: Elaborada pela autora (2025), com base em [16] [25] [26] [27].

## 4.2 ELABORAÇÃO DO PROJETO E CÁLCULO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Como o foco principal deste trabalho é o cálculo dos parâmetros do circuito equivalente, são selecionados seis modelos diferentes de capacitores, que já possuem as características elétricas e mecânicas definidas, para a elaboração do projeto da estrutura detalhada e o equacionamento do circuito equivalente. Estas características foram fornecidas pelos fabricantes dos filmes metalizados e dos capacitores e, por questões de sigilo, não são mencionados os fabricantes dos modelos selecionados.

Dentre os modelos selecionados, é apresentado o passo a passo do projeto e do equacionamento de dois deles, com um e dois elementos capacitivos. Para os demais modelos o processo é equivalente, desta forma, apenas são apresentados os resultados.

As características elétricas e mecânicas dos seis modelos de capacitores selecionados se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Características elétricas e mecânicas dos modelos selecionados.

<b>Características elétricas e mecânicas</b>	<b>Modelo 1</b>	<b>Modelo 2</b>	<b>Modelo 3</b>	<b>Modelo 4</b>	<b>Modelo 5</b>	<b>Modelo 6</b>
Quantidade de elementos capacitivos	1	2	2	2	2	2
Capacitância do capacitor ( $\mu\text{F}$ )	294,6	297,4	491,2	601,4	1609,8	2111,4
Espessura do filme metalizado ( $\mu\text{m}$ )	4,0	5,5	4,0	4,0	4,5	4,5
Largura do filme metalizado (mm)	62,5	62,5	62,5	62,5	75,0	110,0
Borda livre do filme metalizado (mm)	4,0	2,5	4,0	2,5	2,5	4,0
Defasagem entre filmes metalizados (mm)	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5
Espessura da metalização do elemento capacitivo (mm)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8
Diâmetro do eixo do elemento capacitivo (mm)	20	9	9	9	20	20

<b>Características elétricas e mecânicas</b>		<b>Modelo 1</b>	<b>Modelo 2</b>	<b>Modelo 3</b>	<b>Modelo 4</b>	<b>Modelo 5</b>	<b>Modelo 6</b>
Comprimento das fitas de conexão (mm)	Fita 1	105,0	115,0	127,0	115,0	162,0	184,0
	Fita 2	60,0	60,0	60,0	60,0	35,5	35,5
	Fita 3	105,0	115,0	127,0	115,0	162,0	184,0
	Fita 4	-	170,0	170,0	170,0	210,0 204,0	278,0 272,0
Espessura das fitas de conexão (mm)	Fita 1	0,5	0,5	0,5	0,5	2x0,3	2x0,6
	Fita 2	0,5	0,5	0,5	0,5	2x0,5	2x0,5
	Fita 3	0,5	0,5	0,5	0,5	2x0,3	2x0,6
	Fita 4	-	0,5	0,5	0,5	2x0,3	2x0,3
Largura das fitas de conexão (mm)	Fita 1	8,5	8,5	8,5	8,5	20,0	10,0
	Fita 2	8,5	8,5	8,5	8,5	20,0	20,0
	Fita 3	8,5	8,5	8,5	8,5	20,0	10,0
	Fita 4	-	8,5	8,5	8,5	20,0	20,0
Ângulo formado entre fitas próximas (°)		30	30	30	30	30	30
Altura da região da rosca dos terminais (mm)	Terminal 1	10,0	10,0	12,0	10,0	10,0	10,0
	Terminal 2	12,1	10,0	12,0	12,1	12,1	12,1
Altura da região cilíndrica dos terminais (mm)	Terminal 1	13,0	13,0	16,0	13,0	12,0	12,0
	Terminal 2	18,0	13,0	16,0	18,0	17,0	17,0
Diâmetro da região da rosca dos terminais (mm)	Terminal 1	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
	Terminal 2	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Diâmetro da região cilíndrica dos terminais (mm)	Terminal 1	12,4	12,4	12,4	12,4	14,2	14,2
	Terminal 2	12,4	12,4	12,4	12,4	14,2	14,2

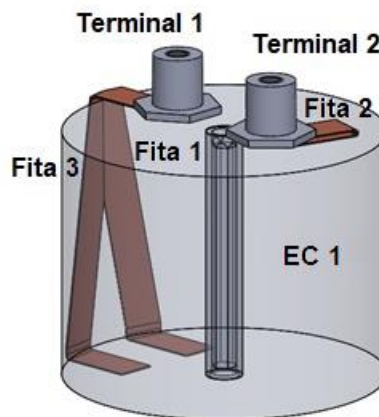
Características elétricas e mecânicas		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
Altura da região sextavada dos terminais (mm)	Terminal 1	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	Terminal 2	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Largura da região sextavada dos terminais (mm)	Terminal 1	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0
	Terminal 2	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0	19,0

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 4.2.1 Cálculo dos parâmetros para o capacitor com um elemento capacitivo

O modelo 1 possui um elemento capacitivo e sua estrutura construtiva está apresentada na Figura 26. O terminal 1 está conectado nas fitas 1 e 3, que estão conectadas na parte inferior do elemento capacitivo. O terminal 2 está conectado na fita 2, que está conectada na parte superior do elemento capacitivo.

Figura 26 – Estrutura construtiva capacitor com um elemento capacitivo.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Nos equacionamentos foram adicionados índices para identificar a fita de conexão, o terminal, o elemento capacitivo e o modelo de capacitor sob análise.

Inicialmente são realizados os cálculos para o projeto do elemento capacitivo e, como este capacitor possui apenas um elemento capacitivo, a capacitância deste é igual ao do capacitor. Com base na equação (9), o comprimento do filme metalizado é calculado, conforme equação (89). O filme base utilizado é o polipropileno.

$$l_{f-1} = \frac{C_1 \cdot e_{f-1}}{2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot (b_{f-1} - 2 \cdot BL_1 - Def_1)} \quad (89)$$

$$l_{f-1} = \frac{294,6 \cdot 10^{-6} \cdot 4,0 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,2 \cdot (62,5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-3} - 0,9 \cdot 10^{-3})} = 564 \text{ m}$$

O diâmetro externo do elemento capacitivo é calculado de acordo com a equação (14), conforme demonstrado na equação (90).

$$d_{EC-1} = \sqrt{\frac{8 \cdot l_{f-1} \cdot e_{f-1}}{\pi} + d_{eixo-1}^2} \quad (90)$$

$$d_{EC-1} = \sqrt{\frac{8 \cdot 564 \cdot 4,0 \cdot 10^{-6}}{\pi} + (20 \cdot 10^{-3})^2} = 78,6 \text{ mm}$$

A altura do elemento capacitivo é calculada com base na equação (15), conforme apresentado na equação (91).

$$h_{EC-1} = b_{f-1} + Def_1 \quad (91)$$

$$h_{EC-1} = 62,5 \cdot 10^{-3} + 0,9 \cdot 10^{-3} = 63,4 \text{ mm}$$

Após o detalhamento do elemento capacitivo, é possível iniciar o equacionamento da RSE do elemento capacitivo.

O dimensional do *mini-square* é calculado de acordo com a equação (17), conforme detalhado na equação (92).

$$MS_1 = \frac{b_{f-1} - (2 \cdot BL_1 + Def_1)}{15} \quad (92)$$

$$MS_1 = \frac{62,5 \cdot 10^{-3} - (2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-3} + 0,9 \cdot 10^{-3})}{15} = 3,573 \text{ mm}$$

A quantidade de *mini-squares* ao longo do comprimento do filme metalizado é calculada com base na equação (18), conforme demonstrado na equação (93).

$$n_{MS_1} = \frac{l_{f_1}}{MS_1} \quad (93)$$

$$n_{MS_1} = \frac{564}{3,573 \cdot 10^{-3}} = 157,8 \cdot 10^3$$

O posicionamento dos resistores do circuito equivalente distribuído no decorrer da largura do filme metalizado é calculado de acordo com as equações (19) a (21), conforme apresentado nas equações (94) a (96).

$$PR1_1 = Def_1 + BL_1 + \frac{MS_1}{2} \quad (94)$$

$$PR1_1 = 0,9 \cdot 10^{-3} + 4,0 \cdot 10^{-3} + \frac{3,573 \cdot 10^{-3}}{2} = 6,7 \text{ mm}$$

$$PR2_1 = PR1_1 + MS_1 \quad (95)$$

$$PR2_1 = 6,7 \cdot 10^{-3} + 3,573 \cdot 10^{-3} = 10 \text{ mm}$$

$$PR3_1 = PR2_1 + MS_1 \quad (96)$$

$$PR3_1 = 10 \cdot 10^{-3} + 3,573 \cdot 10^{-3} = 14 \text{ mm}$$

O cálculo das posições de  $R4$  a  $R15$  ocorre de forma sucessiva, gerando o seguinte posicionamento:  $PR4_1$  igual a 17 mm,  $PR5_1$  igual a 21 mm,  $PR6_1$  igual a 25 mm,  $PR7_1$  igual a 28 mm,  $PR8_1$  igual a 32 mm,  $PR9_1$  igual a 35 mm,  $PR10_1$  igual a 39 mm,  $PR11_1$  igual a 42 mm,  $PR12_1$  igual a 46 mm,  $PR13_1$  igual a 50 mm,  $PR14_1$  igual a 53 mm e  $PR15_1$  igual a 57 mm.

Com a informação do posicionamento dos resistores, é possível definir o valor da resistência de cada resistor, conforme apresentado no APÊNDICE A.

Os valores das resistências dos resistores  $RS_a$  e  $RS_b$  são definidos por meio das equações (22) e (23), conforme detalhado nas equações (97) e (98).

$$RS_{a_1} = \frac{Def_1 + BL_1}{MS_1} \cdot R_{BRa_1} \quad (97)$$

$$RS_{a_1} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} + 4,0 \cdot 10^{-3}}{3,573 \cdot 10^{-3}} \cdot 3 = 4,1 \Omega$$

$$R_{S_{b_1}} = \frac{Def_1 + BL_1}{MS_1} \cdot R_{BRb_1} \quad (98)$$

$$R_{S_{b_1}} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3} + 4,0 \cdot 10^{-3}}{3,573 \cdot 10^{-3}} \cdot 3 = 4,1 \Omega$$

Para a definição das capacitâncias do circuito equivalente distribuído, primeiramente é preciso calcular a capacitância do *mini-square*, de acordo com a equação (24), conforme demonstrado na equação (99). Neste caso, a capacitância projetada do elemento capacitivo é a mesma do capacitor, visto que este possui apenas um elemento capacitivo.

$$C_{MS_1} = \frac{C_{proj_1}}{15 \cdot n_{MS_1}} \quad (99)$$

$$C_{MS_1} = \frac{294,6 \cdot 10^{-6}}{15 \cdot 157,8 \cdot 10^3} = 124,4 \text{ pF}$$

Os valores dos capacitores  $C_2$  a  $C_{15}$  são as capacitâncias do *mini-square*, conforme calculado na equação (99), e os valores dos capacitores  $C_1$  e  $C_{16}$  são metade da capacitância do *mini-square*.

Portanto, os valores dos componentes do circuito equivalente distribuído do capacitor modelo 1 estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores dos componentes do circuito equivalente distribuído do capacitor modelo 1.

Componente do circuito	Valor
$C_{1_1}$ e $C_{16_1}$	62,2 pF
$C_{2_1}$ a $C_{15_1}$	124,4 pF
$R_{S_{a_1}}$	4,1 $\Omega$
$R_{S_{b_1}}$	4,1 $\Omega$
$R_{1_1}$ e $R_{30_1}$	3,0 $\Omega$
$R_{2_1}$ e $R_{29_1}$	3,0 $\Omega$
$R_{3_1}$ e $R_{28_1}$	3,0 $\Omega$
$R_{4_1}$ e $R_{27_1}$	3,0 $\Omega$
$R_{5_1}$ e $R_{26_1}$	16,9 $\Omega$

Componente do circuito	Valor
$R_{61}$ e $R_{251}$	30,8 $\Omega$
$R_{71}$ e $R_{241}$	41,2 $\Omega$
$R_{81}$ e $R_{231}$	55,0 $\Omega$
$R_{91}$ e $R_{221}$	55,0 $\Omega$
$R_{101}$ e $R_{211}$	55,0 $\Omega$
$R_{111}$ e $R_{201}$	55,0 $\Omega$
$R_{121}$ e $R_{191}$	55,0 $\Omega$
$R_{131}$ e $R_{181}$	55,0 $\Omega$
$R_{141}$ e $R_{171}$	55,0 $\Omega$
$R_{151}$ e $R_{161}$	55,0 $\Omega$

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Com os valores dos componentes do circuito equivalente distribuído definidos, por meio do cálculo da reatância capacitiva dos capacitores e da realização das transformações necessárias, é calculada a impedância total do circuito e desta forma, a capacitância equivalente ( $C_{eq}$ ) e a resistência equivalente ( $R_{eq}$ ) do circuito equivalente distribuído, sendo  $C_{eq\_1}$  igual a 1,866 nF e  $R_{eq\_1}$  igual a 177,229  $\Omega$ .

A capacitância total do elemento capacitivo e a resistência série total da metalização do filme plástico metalizado são calculadas de acordo com as equações (28) e (29), conforme detalhado nas equações (100) e (101).

$$C_{EC\_1} = C_{eq\_1} \cdot n_{MS\_1} \quad (100)$$

$$C_{EC\_1} = 1,866 \cdot 10^{-9} \cdot 157,8 \cdot 10^3 = 294,6 \mu F$$

$$R_{S_{filme\_1}} = \frac{R_{eq\_1}}{n_{MS\_1}} \quad (101)$$

$$R_{S_{filme\_1}} = \frac{177,229}{157,8 \cdot 10^3} = 1,123 m\Omega$$

Com o objetivo de calcular as perdas no dielétrico, primeiramente é calculada a componente resistiva, com base na equação (32), conforme apresentado na equação (102). Posteriormente, é calculada a resistência que representa as perdas no dielétrico, seguindo a equação (33), conforme demonstrado na equação (103). É

considerada a frequência de 1 kHz, pois é a frequência normalmente utilizada para a realização das medições da RSE.

$$R_{D_1} = \frac{DF_{f_1}}{2 \cdot \pi \cdot C_{proj_1}} \quad (102)$$

$$R_{D_1} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot \pi \cdot 294,6 \cdot 10^{-6}} = 0,108 \text{ 1/F}$$

$$Rp_{EC_1} = \frac{R_{D_1}}{f} \quad (103)$$

$$Rp_{EC_1} = \frac{0,108}{1 \cdot 10^3} = 108 \mu\Omega$$

Para o cálculo da resistência da metalização do elemento capacitivo, faz-se necessário o cálculo da espessura da borda reforçada da metalização do filme. Como o perfil de metalização do capacitor em questão é o com borda estendida, as espessuras da camada de alumínio, da camada de zinco e da borda reforçada são calculadas de acordo com as equações (34), (38) e (39), respectivamente, conforme apresentado nas equações (104), (105) e (106).

$$e_{Al\_step_1} = \frac{\rho_{Al}}{R_{AT\_step_1}} \quad (104)$$

$$e_{Al\_step_1} = \frac{2,5 \cdot 10^{-8}}{55,0} = 0,454 \text{ nm}$$

$$e_{Zn\_step_1} = \frac{\rho_{Zn}}{R_{BR\_step_1} \cdot R_{AT\_step_1}} \cdot (R_{AT\_step_1} - R_{BR\_step_1}) \quad (105)$$

$$e_{Zn\_step_1} = \frac{5,9 \cdot 10^{-8}}{3,0 \cdot 55,0} \cdot (55,0 - 3,0) = 18,59 \text{ nm}$$

$$e_{BR\_step_1} = e_{Al\_step_1} + e_{Zn\_step_1} \quad (106)$$

$$e_{BR\_step_1} = 0,454 \cdot 10^{-9} + 18,59 \cdot 10^{-9} = 19,05 \text{ nm}$$

Na sequência, calcula-se a resistência superficial da metalização do elemento capacitivo, a resistência formada pela penetração dos grãos de zinco na região da

defasagem entre filmes e por consequência, a resistência total da metalização do elemento capacitivo, com base nas equações (51), (52) e (53), respectivamente, conforme detalhado nas equações (107), (108) e (109).

$$R_{sup\_1} = \frac{\rho_{Zn} \cdot e_{met\_1}}{l_{f\_1} \cdot e_{BR\_step\_1}} \quad (107)$$

$$R_{sup\_1} = \frac{5,9 \cdot 10^{-8} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{564 \cdot 19,05 \cdot 10^{-9}} = 3,30 \mu\Omega$$

$$R_{pen\_1} = \frac{\rho_{Zn}}{l_{f\_1}} \cdot \left( \frac{e_{met\_1}}{e_{f\_1}} + \frac{2 \cdot e_{f\_1}}{Def_1} \right) \quad (108)$$

$$R_{pen\_1} = \frac{5,9 \cdot 10^{-8}}{564} \cdot \left( \frac{0,6 \cdot 10^{-3}}{4,0 \cdot 10^{-6}} + \frac{2 \cdot 4,0 \cdot 10^{-6}}{0,9 \cdot 10^{-3}} \right) = 15,69 n\Omega$$

$$R_{met\_1} = \frac{R_{sup\_1} \cdot R_{pen\_1}}{R_{sup\_1} + R_{pen\_1}} \quad (109)$$

$$R_{met\_1} = \frac{3,30 \cdot 10^{-6} \cdot 15,69 \cdot 10^{-9}}{3,30 \cdot 10^{-6} + 15,69 \cdot 10^{-9}} = 15,62 n\Omega$$

Com todas as componentes resistivas do elemento capacitivo calculadas, é possível calcular a resistência série e a resistência série equivalente do elemento capacitivo do capacitor modelo 1, de acordo com as equações (54) e (55), respectivamente, conforme demonstrado nas equações (110) e (111).

$$R_{SEC\_1} = R_{Sfilme\_1} + R_{met\_1} \quad (110)$$

$$R_{SEC\_1} = 1,123 \cdot 10^{-3} + 15,62 \cdot 10^{-9} = 1,123 m\Omega$$

Como é possível verificar, neste caso a resistência da metalização do elemento capacitivo não é significativa.

$$R_{SEE\_1} = R_{SEC\_1} + R_{pEC\_1} \quad (111)$$

$$R_{SEE\_1} = 1,123 \cdot 10^{-3} + 108 \cdot 10^{-6} = 1,231 m\Omega$$

O cálculo das resistências das fitas de conexão é realizado com base na equação (56), sendo realizado de forma individual para cada fita, e considerando-se que o material utilizado nas fitas de conexão é o cobre. As resistências das fitas de conexão 1, 2 e 3 são calculadas conforme equações (112), (113) e (114), respectivamente.

$$R_{ft1_1} = \frac{\rho \cdot l_{ft1_1}}{b_{ft1_1} \cdot e_{ft1_1}} \quad (112)$$

$$R_{ft1_1} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 105,0 \cdot 10^{-3}}{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,42 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft2_1} = \frac{\rho \cdot l_{ft2_1}}{b_{ft2_1} \cdot e_{ft2_1}} \quad (113)$$

$$R_{ft2_1} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 60,0 \cdot 10^{-3}}{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,24 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft3_1} = \frac{\rho \cdot l_{ft3_1}}{b_{ft3_1} \cdot e_{ft3_1}} \quad (114)$$

$$R_{ft3_1} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 105,0 \cdot 10^{-3}}{8,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,42 \text{ m}\Omega$$

O cálculo das resistências dos terminais é executado de acordo com a equação (62), sendo realizado de forma individual para cada terminal, e levando em conta que o material utilizado para os terminais é o latão. As resistências dos terminais 1 e 2 são calculadas conforme apresentado nas equações (115) e (116), respectivamente.

$$R_{tm1_1} = 2 \cdot \rho \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_{ros1_1}}{\pi \cdot (d_{cil1_1}^2 - d_{ros1_1}^2)} + \frac{2 \cdot (h_{cil1_1} - h_{ros1_1})}{\pi \cdot d_{cil1_1}^2} + \frac{h_{sext1_1}}{\sqrt{3} \cdot b_{sext1_1}^2} \right] \quad (115)$$

$$R_{tm1_1} = 2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-8}$$

$$\cdot \left[ \frac{2 \cdot 10,0 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot [(12,4 \cdot 10^{-3})^2 - (6,0 \cdot 10^{-3})^2]} + \frac{2 \cdot (13,0 \cdot 10^{-3} - 10,0 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot (12,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot (19,0 \cdot 10^{-3})^2} \right]$$

$$R_{tm1_1} = 9,20 \text{ }\mu\Omega$$

$$R_{tm2_1} = 2 \cdot \rho \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_{ros2_1}}{\pi \cdot (d_{cil2_1}^2 - d_{ros2_1}^2)} + \frac{2 \cdot (h_{cil2_1} - h_{ros2_1})}{\pi \cdot d_{cil2_1}^2} + \frac{h_{sext2_1}}{\sqrt{3} \cdot b_{sext2_1}^2} \right] \quad (116)$$

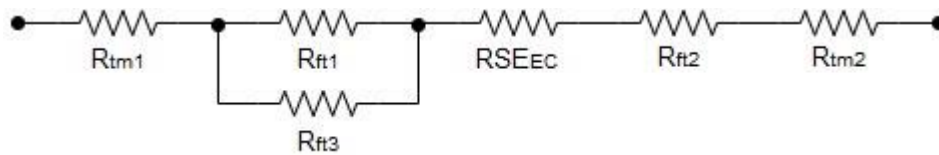
$$R_{tm2_1} = 2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-8}$$

$$\cdot \left[ \frac{2 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot [(12,4 \cdot 10^{-3})^2 - (6,0 \cdot 10^{-3})^2]} + \frac{2 \cdot (18,0 \cdot 10^{-3} - 12,1 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot (12,4 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot (19,0 \cdot 10^{-3})^2} \right]$$

$$R_{tm2_1} = 12,28 \mu\Omega$$

O circuito equivalente resistivo do capacitor modelo 1 é conforme mostrado na Figura 27, que representa o circuito equivalente resistivo dos modelos de capacitor com um elemento capacitivo.

Figura 27 – Circuito equivalente resistivo do capacitor com um elemento capacitivo.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Realizando o cálculo das resistências paralelas e em série, obtêm-se a resistência série equivalente do capacitor modelo 1 ( $RSE_{cap_1}$ ), conforme apresentado na equação (117).

$$RSE_{cap_1} = 1,70 m\Omega \quad (117)$$

Finalizado o cálculo da RSE do capacitor modelo 1, é iniciado o cálculo da LSE. O cálculo da indutância é composto pela parte da autoindutância e pela parte da indutância mútua, de acordo com a forma de ligação entre fitas de conexão e elemento capacitivo. O equacionamento é realizado de forma individual, para posterior união dos fatores.

A autoindutância do elemento capacitivo é calculada com base na equação (73), conforme detalhado na equação (118). Como o meio envolvido no elemento capacitivo é composto de filme base de polipropileno, é considerada a permeabilidade magnética do vácuo.

$$L_{EC_1} = \frac{\mu}{2 \cdot \pi \cdot (r_{EC_1}^2 - r_{eixo_1}^2)^2} \cdot \left[ \frac{r_{EC_1}^4 + 3 \cdot r_{eixo_1}^4 - 4 \cdot r_{eixo_1}^2 \cdot r_{EC_1}^2}{4} + r_{eixo_1}^4 \cdot \ln \left| \frac{r_{EC_1}}{r_{eixo_1}} \right| \right] \cdot h_{EC_1} \quad (118)$$

$$L_{EC_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi \cdot [(39,3 \cdot 10^{-3})^2 - (10 \cdot 10^{-3})^2]^2} \cdot \left[ \frac{(39,3 \cdot 10^{-3})^4 + 3 \cdot (10 \cdot 10^{-3})^4 - 4 \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot (39,3 \cdot 10^{-3})^2}{4} + (10 \cdot 10^{-3})^4 \cdot \ln \left| \frac{39,3 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 10^{-3}} \right| \right] \cdot 63,4 \cdot 10^{-3}$$

$$L_{EC_1} = 2,81 \text{ nH}$$

As fitas de conexão 1 e 3 não possuem sobreposição, desta forma, a indutância individual pode ser calculada apenas pela autoindutância, de acordo com a equação (76). A indutância é calculada separadamente para as fitas de conexão 1 e 3, conforme demonstrado nas equações (119) e (120), respectivamente. Como o meio envolvido nas fitas de conexão e nos elementos capacitivos é composto por material isolante, é considerada a permeabilidade magnética relativa unitária para todos os casos.

$$L_{ft1_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft1_1}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft1_1}}{e_{ft1_1} + b_{ft1_1}} \right) \quad (119)$$

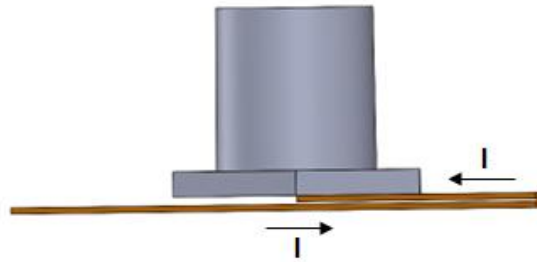
$$L_{ft1_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 105,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 9,92 \text{ nH}$$

$$L_{ft3_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft3_1}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft3_1}}{e_{ft3_1} + b_{ft3_1}} \right) \quad (120)$$

$$L_{ft3_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 105,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 9,92 \text{ nH}$$

A fita de conexão 2 possui sobreposição parcial, conforme mostrado na Figura 28, desta forma, a indutância individual é composta pela autoindutância e pela indutância mútua. A região sem sobreposição possui comprimento de 22,0 mm e a região com sobreposição possui comprimento de 19,0 mm em cada parte, totalizando o comprimento de 60,0 mm.

Figura 28 – Fita de conexão 2 do capacitor modelo 1.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Primeiramente é calculada a autoindutância da fita de conexão 2, com base na equação (76), conforme detalhado na equação (121).

$$L_{ft2\_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft2\_1}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft2\_1}}{e_{ft2\_1} + b_{ft2\_1}} \right) \quad (121)$$

$$L_{ft2\_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 60,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} + 8,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 5,67 \text{ nH}$$

Após, é calculada a indutância mútua entre fitas de conexão sobrepostas da fita 2, de acordo com a equação (77), conforme apresentado na equação (122). Como as fitas sobrepostas estão alinhadas e muito próximas, o coeficiente de correção  $k$  é considerado unitário e é definida a distância entre fitas como sendo a própria espessura da fita de conexão.

$$M_{ft2\_sob\_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft2\_sob\_1} \cdot e_{ft2\_1}}{\pi \cdot \sqrt{4 \cdot (d_{ft2\_1} + e_{ft2\_1})^2 + k \cdot b_{ft2\_1}^2}} \quad (122)$$

$$M_{ft2\_sob\_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 19,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot \sqrt{4 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3} + 0,5 \cdot 10^{-3})^2 + 1 \cdot (8,5 \cdot 10^{-3})^2}} = 0,44 \text{ nH}$$

As fitas de conexão 1 e 3 estão próximas e posicionadas em “V”, assim, é possível calcular a indutância mútua entre elas com base na equação (80), conforme demonstrado na equação (123).

$$M_{ft13_V_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft13_1} \cdot \cos \theta_{13_1}}{4 \cdot \pi \cdot \sin\left(\frac{\theta_{13_1}}{2}\right)} \quad (123)$$

$$M_{ft13_V_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 105,0 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30}{4 \cdot \pi \cdot \sin\left(\frac{30}{2}\right)} = 35,13 \text{ nH}$$

Há também a indutância mútua entre as fitas de conexão 1 e 3 e o elemento capacitivo.

O cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, é realizado de acordo com a equação (87).

É definida a distância entre fitas e elementos capacitivos como sendo a própria espessura das fitas de conexão, desta forma, a menor distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão ( $a_{r_i}$ ), é o raio do elemento capacitivo somado à distância entre elemento capacitivo e fita de conexão, e a maior distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão ( $a_{r_f}$ ), é o raio do elemento capacitivo somado à distância entre elemento capacitivo e fita de conexão e à espessura da fita.

O  $\varphi$  é o ângulo formado entre a fita e o eixo do elemento capacitivo, que no caso das fitas 1 e 3, é igual à metade do ângulo entre elas.

O comprimento da área de interesse é a altura do elemento capacitivo, pois é a região onde há sobreposição entre fita de conexão e elemento capacitivo.

A indutância mútua na fita 1 originada pelo elemento capacitivo é conforme apresentado na equação (124).

$$M_{ft1_{EC}1_1} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{11_1} \cdot l_{M11_1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft11_f_1}}{a_{ft11_i_1}} \right| \quad (124)$$

$$M_{ft1_{EC}1_1} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 63,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{40,3 \cdot 10^{-3}}{39,8 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,15 \text{ nH}$$

A indutância mútua na fita 3 originada pelo elemento capacitivo é calculada conforme apresentado na equação (125).

$$M_{ft3_{EC1_1}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{31_1} \cdot l_{M31_1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft31_f_1}}{a_{ft31_i_1}} \right| \quad (125)$$

$$M_{ft3_{EC1_1}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 63,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{40,3 \cdot 10^{-3}}{39,8 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,15 \text{ nH}$$

O cálculo da indutância mútua no elemento capacitivo, originada pela fita de conexão, é realizado de acordo com a equação (88).

As definições são as mesmas mencionadas para o cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, no entanto, nesta etapa é verificada a distância em relação ao centro da fita de conexão. Portanto, a menor distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo ( $a_{EC_i}$ ), é metade da espessura da fita de conexão somada à distância entre elemento capacitivo e fita, e a maior distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo ( $a_{EC_f}$ ), é metade da espessura da fita de conexão, somada à distância entre elemento capacitivo e fita e ao diâmetro do elemento capacitivo.

A indutância mútua no elemento capacitivo originada pela fita de conexão 1 é conforme detalhado na equação (126).

$$M_{EC1_{ft1_1}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{11_1} \cdot l_{M11_1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC11_f_1}}{a_{EC11_i_1}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (126)$$

$$M_{EC1_{ft1_1}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 63,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{79,4 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC1_{ft1_1}} = 0,17 \text{ nH}$$

A indutância mútua no elemento capacitivo originada pela fita de conexão 3 é conforme detalhado na equação (127).

$$M_{EC1_{ft3_1}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{13_1} \cdot l_{M13_1}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC13_{f_1}}}{a_{EC13_{i_1}}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (127)$$

$$M_{EC1_{ft3_1}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 63,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{79,4 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC1_{ft3_1}} = 0,17 \text{ nH}$$

A fita de conexão 2 não possui relação significativa de mutualidade com o elemento capacitivo, desta forma, o cálculo da indutância mútua é desconsiderado.

Finalizados os cálculos das autoindutâncias e das indutâncias mútuas, é realizado o cálculo da indutância equivalente de cada componente, conforme demonstrado nas equações (128) a (131).

$$L_{ft1_{eq_1}} = L_{ft1_1} + M_{ft13_{V_1}} - M_{ft1_{EC1_1}} \quad (128)$$

$$L_{ft1_{eq_1}} = 9,92 \cdot 10^{-9} + 35,13 \cdot 10^{-9} - 0,15 \cdot 10^{-9} = 44,90 \text{ nH}$$

$$L_{ft2_{eq_1}} = L_{ft2_1} - 2 \cdot M_{ft2_{sob_1}} \quad (129)$$

$$L_{ft2_{eq_1}} = 5,67 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 0,44 \cdot 10^{-9} = 4,80 \text{ nH}$$

$$L_{ft3_{eq_1}} = L_{ft3_1} + M_{ft13_{V_1}} - M_{ft3_{EC1_1}} \quad (130)$$

$$L_{ft3_{eq_1}} = 9,92 \cdot 10^{-9} + 35,13 \cdot 10^{-9} - 0,15 \cdot 10^{-9} = 44,90 \text{ nH}$$

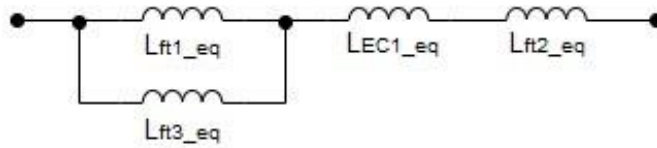
$$L_{EC1_{eq_1}} = L_{EC_1} - M_{EC1_{ft1_1}} - M_{EC1_{ft3_1}} \quad (131)$$

$$L_{EC1_{eq_1}} = 2,81 \cdot 10^{-9} - 0,17 \cdot 10^{-9} - 0,17 \cdot 10^{-9} = 2,47 \text{ nH}$$

onde,  $L_{ft_{eq}}$  é a indutância equivalente da fita de conexão, considerando a autoindutância e a indutância mútua, em henry (H); e  $L_{EC_{eq}}$  é a indutância equivalente do elemento capacitivo, considerando a autoindutância e a indutância mútua, em henry (H).

O circuito equivalente indutivo do capacitor modelo 1 é conforme apresentado na Figura 29, que representa o circuito equivalente indutivo dos modelos de capacitor com um elemento capacitivo.

Figura 29 – Circuito equivalente indutivo do capacitor com um elemento capacitivo.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

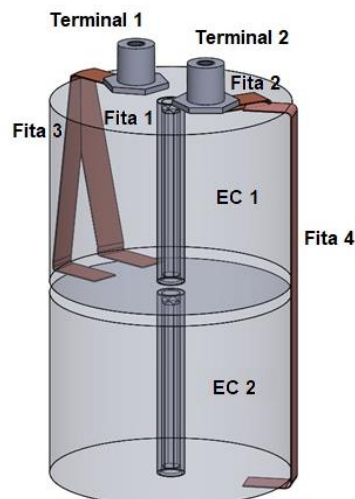
Realizando o cálculo das indutâncias paralelas e em série, obtêm-se a indutância série equivalente do capacitor modelo 1 ( $LSE_{cap,1}$ ), conforme demonstrado na equação (132).

$$LSE_{cap,1} = 29,72 \text{ nH} \quad (132)$$

#### 4.2.2 Cálculo dos parâmetros para o capacitor com dois elementos capacitivos

O modelo 6 de capacitor possui dois elementos capacitivos conectados em paralelo e sua estrutura construtiva está apresentada na Figura 30. O terminal 1 está conectado nas fitas 1 e 3, sendo que a fita 1 está conectada na parte inferior do elemento capacitivo 1 e a fita 3 está conectada na parte superior do elemento capacitivo 2. O terminal 2 está conectado na fita 2, que está conectada na parte superior do elemento capacitivo 1. A fita 4 faz a conexão entre a parte inferior do elemento capacitivo 2 e a parte superior do elemento capacitivo 1.

Figura 30 – Estrutura construtiva capacitor com dois elementos capacitivos.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Nos equacionamentos foram adicionados índices para identificar a fita de conexão, o terminal, o elemento capacitivo e o modelo de capacitor sob análise.

O equacionamento para o projeto e para a RSE do elemento capacitivo é semelhante ao do capacitor modelo 1, desta forma, não será apresentado o detalhamento. É importante atentar-se que como este capacitor possui dois elementos capacitivos em paralelo, a capacitância destes é metade da capacitância total do capacitor, e as resistências a serem consideradas no circuito equivalente distribuído são apresentadas no APÊNDICE A. É definido que os dois elementos capacitivos são idênticos.

A RSE de cada um dos dois elementos capacitivos do capacitor modelo 6 é demonstrada na equação (133).

$$RSE_{EC\_6} = 0,857 \text{ m}\Omega \quad (133)$$

O cálculo das resistências das fitas de conexão é realizado com base na equação (56), sendo realizado de forma individual para cada fita, e considerando-se que o material utilizado nas fitas de conexão é o cobre. No capacitor modelo 6, todas as fitas de conexão são compostas por duas fitas em paralelo, portanto, primeiramente é calculada a resistência de cada parte, para posteriormente calcular a resistência paralela total de cada fita.

As resistências da fita de conexão 1 são calculadas conforme equações (134) a (136), da fita 2 conforme equações (137) a (139), da fita 3 conforme equações (140) a (142) e da fita 4 conforme equações (143) a (145).

$$R_{ft1.1.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft1.1.6}}{b_{ft1.1.6} \cdot e_{ft1.1.6}} \quad (134)$$

$$R_{ft1.1.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{10,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 0,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft1.2.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft1.2.6}}{b_{ft1.2.6} \cdot e_{ft1.2.6}} \quad (135)$$

$$R_{ft1.2.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{10,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 0,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft1.6} = 0,26 \text{ m}\Omega \quad (136)$$

$$R_{ft2.1.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft2.1.6}}{b_{ft2.1.6} \cdot e_{ft2.1.6}} \quad (137)$$

$$R_{ft2.1.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 35,5 \cdot 10^{-3}}{20,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,06 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft2.2.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft2.2.6}}{b_{ft2.2.6} \cdot e_{ft2.2.6}} \quad (138)$$

$$R_{ft2.2.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 35,5 \cdot 10^{-3}}{20,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,06 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft2.6} = 0,03 \text{ m}\Omega \quad (139)$$

$$R_{ft3.1.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft3.1.6}}{b_{ft3.1.6} \cdot e_{ft3.1.6}} \quad (140)$$

$$R_{ft3.1.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{10,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 0,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft3.2.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft3.2.6}}{b_{ft3.2.6} \cdot e_{ft3.2.6}} \quad (141)$$

$$R_{ft3.2.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{10,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,6 \cdot 10^{-6}} = 0,52 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft3.6} = 0,26 \text{ m}\Omega \quad (142)$$

$$R_{ft4.1.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft4.1.6}}{b_{ft4.1.6} \cdot e_{ft4.1.6}} \quad (143)$$

$$R_{ft4.1.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 278,0 \cdot 10^{-3}}{20,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}} = 0,79 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft4.2.6} = \frac{\rho \cdot l_{ft4.2.6}}{b_{ft4.2.6} \cdot e_{ft4.2.6}} \quad (144)$$

$$R_{ft4.2.6} = \frac{1,7 \cdot 10^{-8} \cdot 272,0 \cdot 10^{-3}}{20,0 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}} = 0,77 \text{ m}\Omega$$

$$R_{ft4\_6} = 0,39 \text{ m}\Omega \quad (145)$$

O cálculo das resistências dos terminais é executado de acordo com a equação (62), sendo realizado de forma individual para cada terminal, e levando em conta que o material utilizado para os terminais é o latão. As resistências dos terminais 1 e 2 do capacitor modelo 6 são calculadas conforme apresentado nas equações (146) e (147), respectivamente.

$$R_{tm1\_6} = 2 \cdot \rho \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_{ros1\_6}}{\pi \cdot (d_{cil1\_6}^2 - d_{ros1\_6}^2)} + \frac{2 \cdot (h_{cil1\_6} - h_{ros1\_6})}{\pi \cdot d_{cil1\_6}^2} + \frac{h_{sext1\_6}}{\sqrt{3} \cdot b_{sext1\_6}^2} \right] \quad (146)$$

$$R_{tm1\_6} = 2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{2 \cdot 10,0 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot [(14,2 \cdot 10^{-3})^2 - (6,0 \cdot 10^{-3})^2]} + \frac{2 \cdot (12,0 \cdot 10^{-3} - 10,0 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot (14,2 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot (19,0 \cdot 10^{-3})^2} \right]$$

$$R_{tm1\_6} = 6,33 \text{ }\mu\Omega$$

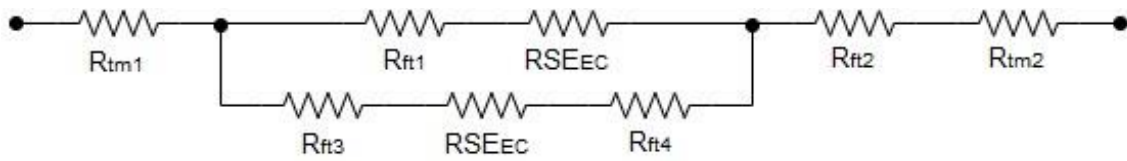
$$R_{tm2\_6} = 2 \cdot \rho \cdot \left[ \frac{2 \cdot h_{ros2\_6}}{\pi \cdot (d_{cil2\_6}^2 - d_{ros2\_6}^2)} + \frac{2 \cdot (h_{cil2\_6} - h_{ros2\_6})}{\pi \cdot d_{cil2\_6}^2} + \frac{h_{sext2\_6}}{\sqrt{3} \cdot b_{sext2\_6}^2} \right] \quad (147)$$

$$R_{tm2\_6} = 2 \cdot 6,6 \cdot 10^{-8} \cdot \left[ \frac{2 \cdot 12,1 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot [(14,2 \cdot 10^{-3})^2 - (6,0 \cdot 10^{-3})^2]} + \frac{2 \cdot (17,0 \cdot 10^{-3} - 12,1 \cdot 10^{-3})}{\pi \cdot (14,2 \cdot 10^{-3})^2} + \frac{2,0 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot (19,0 \cdot 10^{-3})^2} \right]$$

$$R_{tm2\_6} = 8,60 \text{ }\mu\Omega$$

O circuito equivalente resistivo do capacitor modelo 6 é conforme mostrado na Figura 31, que representa o circuito equivalente resistivo dos modelos de capacitor com dois elementos capacitivos.

Figura 31 – Circuito equivalente resistivo do capacitor com dois elementos capacitivos.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Realizando o cálculo das resistências paralelas e em série, obtêm-se a resistência série equivalente do capacitor modelo 6 ( $RSE_{cap_6}$ ), conforme apresentado na equação (148).

$$RSE_{cap_6} = 0,69 \text{ m}\Omega \quad (148)$$

Finalizado o cálculo da RSE do capacitor modelo 6, é iniciado o cálculo da LSE. Conforme mencionado anteriormente, o cálculo da indutância é composto pela parte da autoindutância e pela parte da indutância mútua, de acordo com a forma de ligação entre fitas de conexão e elementos capacitivos. O equacionamento é realizado de forma individual, para posterior união dos fatores.

O equacionamento para a autoindutância do elemento capacitivo é semelhante ao do capacitor modelo 1, portanto, não é apresentado o detalhamento. Conforme ocorre no cálculo da RSE, é definido que os dois elementos capacitivos são idênticos.

A autoindutância de cada um dos dois elementos capacitivos do capacitor modelo 6 é demonstrada na equação (149).

$$L_{EC_6} = 5,24 \text{ nH} \quad (149)$$

As fitas de conexão 1, 3 e 4 não possuem sobreposição, desta forma, a indutância individual pode ser calculada apenas pela autoindutância, de acordo com a equação (76). As três fitas são compostas por duas em paralelo, porém como as mesmas estão em contato, sem isolante, por toda sua extensão, para o cálculo da autoindutância, é considerada a existência de apenas uma fita com a espessura equivalente à soma das espessuras das fitas individuais. No caso da fita 4, que é composta por duas fitas com comprimentos diferentes, é considerado o maior

comprimento para a realização do cálculo. A indutância é calculada separadamente para as fitas de conexão 1, 3 e 4, conforme demonstrado nas equações (150), (151) e (152), respectivamente. Como o meio envolvido nas fitas de conexão e nos elementos capacitivos é composto por material isolante, é definida a permeabilidade magnética relativa unitária para todos os casos.

$$L_{ft1\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft1\_6}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft1\_6}}{e_{ft1\_6} + b_{ft1\_6}} \right) \quad (150)$$

$$L_{ft1\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-3} + 10,0 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$L_{ft1\_6} = 24,97 \text{ nH}$$

$$L_{ft3\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft3\_6}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft3\_6}}{e_{ft3\_6} + b_{ft3\_6}} \right) \quad (151)$$

$$L_{ft3\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 184,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-3} + 10,0 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$L_{ft3\_6} = 24,97 \text{ nH}$$

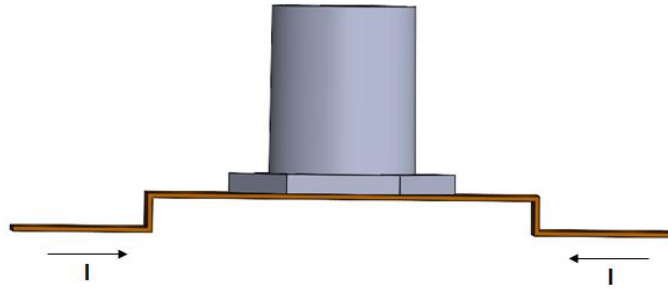
$$L_{ft4\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft4\_6}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft4\_6}}{e_{ft4\_6} + b_{ft4\_6}} \right) \quad (152)$$

$$L_{ft4\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 278,0 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{0,6 \cdot 10^{-3} + 20,0 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$L_{ft4\_6} = 20,38 \text{ nH}$$

A fita de conexão 2 é composta por duas partes, que estão conectadas em paralelo, sem sobreposição, conforme mostrado na Figura 32.

Figura 32 – Fita de conexão 2 do capacitor modelo 6.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Inicialmente é calculada a autoindutância de cada parte da fita de conexão 2, com base na equação (76), para posteriormente calcular a autoindutância paralela total, conforme detalhado nas equações (153), (154) e (155).

$$L_{ft2.1.6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft2.1.6}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft2.1.6}}{e_{ft2.1.6} + b_{ft2.1.6}} \right) \quad (153)$$

$$L_{ft2.1.6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 35,5 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} + 20,0 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$L_{ft2.1.6} = 2,47 \text{ nH}$$

$$L_{ft2.2.6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot l_{ft2.2.6}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot e_{ft2.2.6}}{e_{ft2.2.6} + b_{ft2.2.6}} \right) \quad (154)$$

$$L_{ft2.2.6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot 35,5 \cdot 10^{-3}}{\pi} \cdot \left( \frac{1}{8} + \frac{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 10^{-3} + 20,0 \cdot 10^{-3}} \right)$$

$$L_{ft2.2.6} = 2,47 \text{ nH}$$

$$L_{ft2.6} = 1,23 \text{ nH} \quad (155)$$

As fitas de conexão 1 e 3 estão próximas e posicionadas em “V”, assim, é possível calcular a indutância mútua com base na equação (80), conforme demonstrado na equação (156).

$$M_{ft13_V_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{l_{ft13_6} \cdot \cos \theta_{13_6}}{\sin\left(\frac{\theta_{13_6}}{2}\right)} \quad (156)$$

$$M_{ft13_V_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{184,0 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 30}{\sin\left(\frac{30}{2}\right)} = 61,57 \text{ nH}$$

Há também a indutância mútua entre as fitas de conexão 1 e 3 e o elemento capacitivo 1 e a fita de conexão 4 e os elementos capacitivos 1 e 2.

O cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, é realizado de acordo com a equação (87).

É definida a distância entre fitas e elementos capacitivos como sendo a própria espessura das fitas de conexão, desta forma, a menor distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão ( $a_{ft_i}$ ), é o raio do elemento capacitivo somado à distância entre elemento capacitivo e fita de conexão, e a maior distância em relação ao centro do elemento capacitivo, na região compreendida pela fita de conexão ( $a_{ft_f}$ ), é o raio do elemento capacitivo somado à distância entre elemento capacitivo e fita de conexão e à espessura da fita.

O  $\varphi$  é o ângulo formado entre a fita e o eixo do elemento capacitivo, que no caso das fitas 1 e 3 é igual à metade do ângulo entre as mesmas, e da fita 4 é zerado.

O comprimento da área de interesse é a altura do elemento capacitivo, pois é a região onde há sobreposição entre fita de conexão e elemento capacitivo.

A indutância mútua na fita 1 originada pelo elemento capacitivo 1 é conforme apresentado na equação (157).

$$M_{ft1_{EC1_6}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{11_6} \cdot l_{M11_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft11_f_6}}{a_{ft11_i_6}} \right| \quad (157)$$

$$M_{ft1_{EC1_6}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{62,0 \cdot 10^{-3}}{60,8 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,42 \text{ nH}$$

A indutância mútua na fita 3 originada pelo elemento capacitivo 1 é conforme apresentado na equação (158).

$$M_{ft3_{EC1_6}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{31_6} \cdot l_{M31_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft31_f_6}}{a_{ft31_i_6}} \right| \quad (158)$$

$$M_{ft3_{EC1_6}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{62,0 \cdot 10^{-3}}{60,8 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,42 \text{ nH}$$

A indutância mútua na fita 4 originada pelo elemento capacitivo 1 é conforme apresentado na equação (159).

$$M_{ft4_{EC1_6}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{41_6} \cdot l_{M41_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft41_f_6}}{a_{ft41_i_6}} \right| \quad (159)$$

$$M_{ft4_{EC1_6}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 0 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{60,8 \cdot 10^{-3}}{60,2 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,22 \text{ nH}$$

A indutância mútua na fita 4 originada pelo elemento capacitivo 2 é conforme apresentado na equação (160).

$$M_{ft4_{EC2_6}} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{42_6} \cdot l_{M42_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{ft42_f_6}}{a_{ft42_i_6}} \right| \quad (160)$$

$$M_{ft4_{EC2_6}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 0 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{60,8 \cdot 10^{-3}}{60,2 \cdot 10^{-3}} \right| = 0,22 \text{ nH}$$

O cálculo da indutância mútua no elemento capacitivo, originada pela fita de conexão, é realizado de acordo com a equação (88).

As definições são as mesmas mencionadas para o cálculo da indutância mútua na fita de conexão, originada pelo elemento capacitivo, no entanto, nesta etapa é verificada a distância em relação ao centro da fita de conexão. Portanto, a menor distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo ( $a_{EC_i}$ ), é metade da espessura da fita de conexão somada à distância entre elemento capacitivo e fita, e a maior distância em relação ao centro da fita de conexão, na região compreendida pelo elemento capacitivo ( $a_{EC_f}$ ), é metade da espessura da fita de conexão, somada à distância entre elemento capacitivo e fita e ao diâmetro do elemento capacitivo.

A indutância mútua no elemento capacitivo 1 originada pela fita de conexão 1 é conforme detalhado na equação (161).

$$M_{EC1\_ft1\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{11\_6} \cdot l_{M11\_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC11\_f\_6}}{a_{EC11\_i\_6}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (161)$$

$$M_{EC1\_ft1\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{120,9 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC1\_ft1\_6} = 0,27 \text{ nH}$$

A indutância mútua no elemento capacitivo 1 originada pela fita de conexão 3 é conforme detalhado na equação (162).

$$M_{EC1\_ft3\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{13\_6} \cdot l_{M13\_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC13\_f\_6}}{a_{EC13\_i\_6}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (162)$$

$$M_{EC1\_ft3\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 15 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{120,9 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC1\_ft3\_6} = 0,27 \text{ nH}$$

A indutância mútua no elemento capacitivo 1 originada pela fita de conexão 4 é conforme detalhado na equação (163).

$$M_{EC1\_ft4\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{14\_6} \cdot l_{M14\_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC14\_f\_6}}{a_{EC14\_i\_6}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (163)$$

$$M_{EC1\_ft4\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 0 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{120,0 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC1\_ft4\_6} = 0,32 \text{ nH}$$

A indutância mútua no elemento capacitivo 2 originada pela fita de conexão 4 é conforme detalhado na equação (164).

$$M_{EC2\_ft4\_6} = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot \cos \varphi_{24\_6} \cdot l_{M24\_6}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{a_{EC24\_f\_6}}{a_{EC24\_i\_6}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3} \quad (164)$$

$$M_{EC2\_ft4\_6} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1 \cdot \cos 0 \cdot 110,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \left| \frac{120,0 \cdot 10^{-3}}{0,9 \cdot 10^{-3}} \right| \cdot 3 \cdot 10^{-3}$$

$$M_{EC2\_ft4\_6} = 0,32 \text{ nH}$$

A fita de conexão 2 não possui relação significativa de mutualidade com os elementos capacitivos, desta forma, o cálculo da indutância mútua é desconsiderado.

Finalizados os cálculos das autoindutâncias e das indutâncias mútuas, é realizado o cálculo da indutância equivalente de cada componente, conforme demonstrado nas equações (165) a (170).

$$L_{ft1\_eq\_6} = L_{ft1\_6} + M_{ft13\_V\_6} - M_{ft1\_EC1\_6} \quad (165)$$

$$L_{ft1\_eq\_6} = 24,97 \cdot 10^{-9} + 61,57 \cdot 10^{-9} - 0,42 \cdot 10^{-9} = 86,12 \text{ nH}$$

$$L_{ft2\_eq\_6} = L_{ft2\_6} \quad (166)$$

$$L_{ft2\_eq\_6} = 1,23 \text{ nH}$$

$$L_{ft3\_eq\_6} = L_{ft3\_6} + M_{ft13\_V\_6} - M_{ft3\_EC1\_6} \quad (167)$$

$$L_{ft3\_eq\_6} = 24,97 \cdot 10^{-9} + 61,57 \cdot 10^{-9} - 0,42 \cdot 10^{-9} = 86,12 \text{ nH}$$

$$L_{ft4\_eq\_6} = L_{ft4\_6} + M_{ft4\_EC1\_6} - M_{ft4\_EC2\_6} \quad (168)$$

$$L_{ft4\_eq\_6} = 20,38 \cdot 10^{-9} + 0,22 \cdot 10^{-9} - 0,22 \cdot 10^{-9} = 20,38 \text{ nH}$$

$$L_{EC1\_eq\_6} = L_{EC\_6} - M_{EC1\_ft1\_6} - M_{EC1\_ft3\_6} + M_{EC1\_ft4\_6} \quad (169)$$

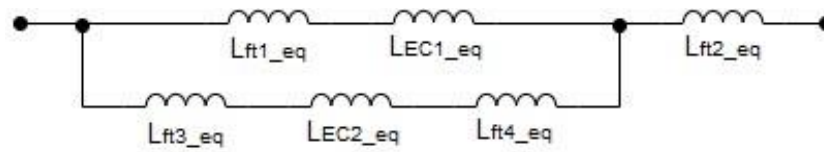
$$L_{EC1\_eq\_6} = 5,24 \cdot 10^{-9} - 0,27 \cdot 10^{-9} - 0,27 \cdot 10^{-9} + 0,32 \cdot 10^{-9} = 5,02 \text{ nH}$$

$$L_{EC2\_eq\_6} = L_{EC\_6} - M_{EC2\_ft4\_6} \quad (170)$$

$$L_{EC2\_eq\_6} = 5,24 \cdot 10^{-9} - 0,32 \cdot 10^{-9} = 4,91 \text{ nH}$$

O circuito equivalente indutivo do capacitor modelo 6 é conforme apresentado na Figura 33, que representa o circuito equivalente indutivo dos modelos de capacitor com dois elementos capacitivos.

Figura 33 – Circuito equivalente indutivo do capacitor com dois elementos capacitivos.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Realizando o cálculo das indutâncias paralelas e em série, obtêm-se a indutância série equivalente do capacitor modelo 6 ( $LSE_{cap,6}$ ), conforme demonstrado na equação (171).

$$LSE_{cap,6} = 51,37 \text{ nH} \quad (171)$$

#### 4.2.3 Resultado geral

O cálculo do circuito equivalente dos demais capacitores selecionados pode ser realizado utilizando de base o detalhamento apresentado para os modelos 1 e 6, com um ou dois elementos capacitivos, respectivamente. Os valores dos resistores do circuito equivalente distribuído estão apresentados no APÊNDICE A.

Os resultados da RSE e da LSE calculadas dos capacitores selecionados se encontram na Tabela 4.

Tabela 4 – Resistência série equivalente e indutância série equivalente calculadas dos capacitores selecionados.

Modelo	$RSE_{cap}$ (mΩ)	$LSE_{cap}$ (nH)
1	1,70	29,72
2	1,60	34,32
3	1,40	36,93
4	1,27	34,32
5	0,65	39,36
6	0,69	51,37

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

### 4.3 CONCLUSÃO

Com base nas equações teóricas do circuito equivalente do capacitor e na metodologia de projeto, é elaborada a avaliação das características do projeto e de sua influência nos resultados da RSE e da LSE, conforme apresentado na Tabela 5. Define-se que, uma seta representa baixa influência, duas setas representam influência média e três setas representam elevada influência.

A avaliação está considerando a capacitância, a tensão nominal, a seção transversal das fitas de conexão e as matérias-primas constantes, visando obter uma comparação real, reduzindo a interferência de outros fatores, além de estar baseada na estrutura construtiva definida no início do Capítulo 3.

Importante salientar que algumas características construtivas são dependentes entre si, desta forma, a alteração de uma delas impacta no resultado da outra, como por exemplo: a elevação do diâmetro do eixo ocasiona o aumento do diâmetro externo do elemento capacitivo; o aumento da largura do filme metalizado reduz o diâmetro externo do elemento capacitivo e aumenta o comprimento das fitas de conexão; a maior quantidade de elementos capacitivos reduz a capacitância por elemento, reduzindo o diâmetro externo, e aumenta o comprimento das fitas de conexão; a redução da espessura da fita de conexão faz com que seja necessário aumentar a largura da fita.

Este trabalho tem o objetivo de equacionar e avaliar o circuito equivalente do capacitor, portanto, nesta análise é realizada apenas a verificação das características elétricas, sem mensurar o peso, o volume, o grau de complexidade e o custo dos capacitores. Importante mencionar que melhores escolhas no sentido elétrico do produto podem penalizar demais características, e cada caso deve ser avaliado individualmente.

Tabela 5 – Avaliação das características do projeto.

Características do projeto	Valores	RSE	LSE
Quantidade de elementos capacitivos	↑	↑	↑↑
Largura do filme metalizado (mm)	↑	↑↑↑	↑↑↑
Diâmetro do eixo do elemento capacitivo (mm)	↑	—	↓
Comprimento das fitas de conexão (mm)	↑	↑	↑↑↑
Espessura das fitas de conexão (mm)	↓	—	↓↓↓
Largura das fitas de conexão (mm)	↑		
Estrutura da fita de conexão 2	Única com sobreposição	↑	↑↑
	Paralela	↓	↓↓

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Analisando a Tabela 5, é possível concluir que o aumento da quantidade de elementos capacitivos, da largura do filme metalizado e do comprimento das fitas de conexão é prejudicial às características elétricas do capacitor, visto que eleva os níveis de RSE e LSE. A alteração do diâmetro do eixo do elemento capacitivo e da espessura e largura das fitas de conexão, desde que mantida a seção transversal, não impacta nos níveis de RSE. No entanto, o aumento do diâmetro do eixo e da largura das fitas de conexão traz ganhos ao capacitor, visto que reduz a LSE. A estrutura da fita de conexão 2 com conexão paralela apresenta melhores resultados, ou seja, menor RSE e LSE, quando comparada com a estrutura única com sobreposição. Entretanto, alterações em algumas características do projeto geram mais ou menos impactos nos níveis de RSE e LSE.

De posse destas informações, é possível adequar a estrutura construtiva do capacitor, para atendimento das características demandadas pela aplicação, na fase de projeto, sem a necessidade de fabricação de protótipos. É fundamental reforçar que estão sendo apenas avaliadas as características elétricas do capacitor, portanto há a necessidade de verificar a viabilidade construtiva e financeira no momento de realização das escolhas.

Com os componentes do circuito equivalente dos capacitores selecionados calculados, é possível realizar a comparação com os resultados práticos.

## 5 RESULTADOS PRÁTICOS

Com o objetivo de avaliar e homologar a metodologia de cálculo, foram realizadas medições de RSE e LSE dos modelos de capacitores selecionados, para posterior comparação dos resultados.

Foi realizada a medição de duas peças de cada modelo, com exceção do modelo 3, no qual foi medida apenas uma peça, por questões de disponibilidade. Cada uma das peças foi medida por três vezes e os resultados apresentados são a média aritmética destas 3 medidas.

### 5.1 MEDIÇÃO RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

A medição da RSE dos capacitores foi realizada utilizando uma ponte RLC da marca Wayne Kerr, modelo 4300, na tensão de 1 V e na frequência de 1 kHz. Na Figura 34, é mostrada a forma de medição da RSE e um dos capacitores ensaiados.

A medição foi executada em 1 kHz, pois esta frequência é normalmente utilizada por fabricantes de capacitores nas folhas de dados e fornece melhor precisão dos resultados, levando em consideração que elevadas frequências introduzem ruído ao sistema de medição.

Figura 34 – Medição da resistência série equivalente.

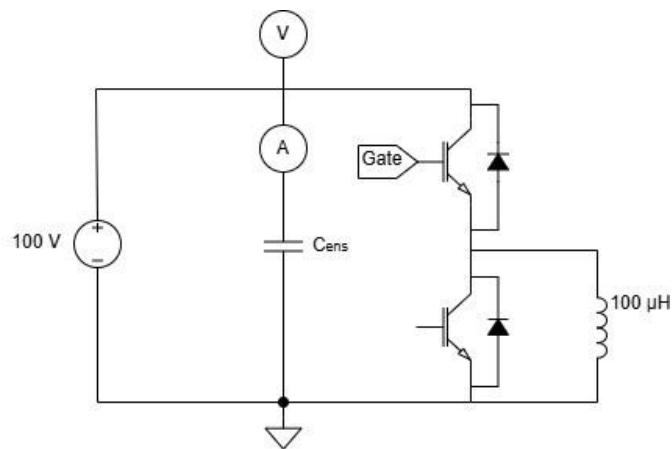


Fonte: Elaborada pela autora (2025).

## 5.2 MEDIÇÃO INDUTÂNCIA SÉRIE EQUIVALENTE

A medição da LSE dos capacitores foi realizada por meio do ensaio de duplo pulso, conforme circuito apresentado na Figura 35. A definição do circuito de ensaio foi realizada com base em [28], porém com adaptações nos níveis da tensão aplicada e da indutância, e nos pontos de medição da corrente e da tensão, visto que o objetivo do trabalho é medir a indutância parasita apenas do capacitor.

Figura 35 – Circuito do ensaio de duplo pulso.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O ensaio consiste em aplicar tensão contínua de 100 V, por meio da fonte de tensão, carregando o capacitor sob ensaio. Em seguida, são aplicados dois pulsos no semicondutor superior do módulo, enquanto o semicondutor inferior permanece no estado aberto. O primeiro pulso possui tempo de 50  $\mu\text{s}$  e o segundo pulso tempo de 15  $\mu\text{s}$ , com intervalo de 10  $\mu\text{s}$  entre os pulsos. No primeiro pulso, o indutor armazena energia, sendo conectado em roda livre com o diodo do semicondutor inferior, quando o semicondutor superior é aberto. No segundo pulso, volta a circular corrente no circuito, iniciando em um nível elevado, devido à energia armazenada no indutor, gerando uma variação abrupta de corrente em um tempo muito curto no capacitor sob ensaio, que está fornecendo energia ao indutor. Por causa da indutância parasita, esta variação de corrente ocasiona uma queda de tensão nos terminais do capacitor [28].

A Lei de Faraday explica este fenômeno e está demonstrada na equação (172).

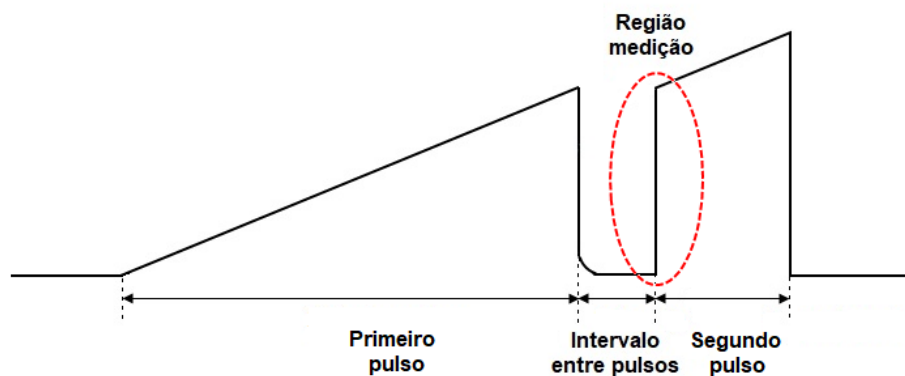
$$V_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (172)$$

$$L = \frac{V_L}{\frac{di}{dt}}$$

onde,  $V_L$  é a tensão no indutor em volt (V);  $i$  é a corrente elétrica em ampère (A); e  $t$  é o tempo em segundo (s).

A forma de onda da corrente no capacitor em ensaio, mostrando os dois pulsos, o intervalo entre os mesmos, e destacando a região onde é realizada a medição, é apresentada na Figura 36.

Figura 36 – Forma de onda da corrente no capacitor durante o ensaio.



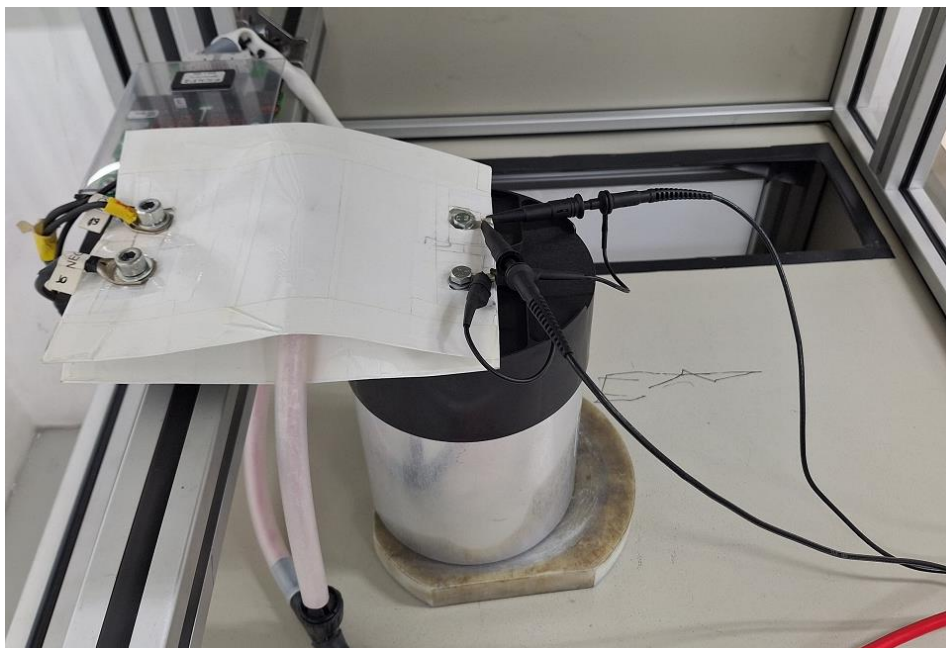
Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Portanto, com as medições da variação da corrente no tempo e da variação da tensão no capacitor, é possível calcular a LSE.

As medições foram realizadas utilizando o osciloscópio da marca Tektronix, modelo MSO 2024B, com as ponteiras de tensão e a bobina de Rogowski, sendo que a medição da corrente no capacitor foi realizada com acoplamento em corrente contínua e a tensão no capacitor com acoplamento em corrente alternada, pois o objetivo é apenas medir a variação da tensão, com a variação brusca na corrente.

Na Figura 37, é mostrada a forma de medição da LSE, com um dos capacitores em ensaio. São utilizados dois barramentos planos sobrepostos para conectar o capacitor ao circuito de ensaio, com o objetivo de reduzir a indutância do circuito.

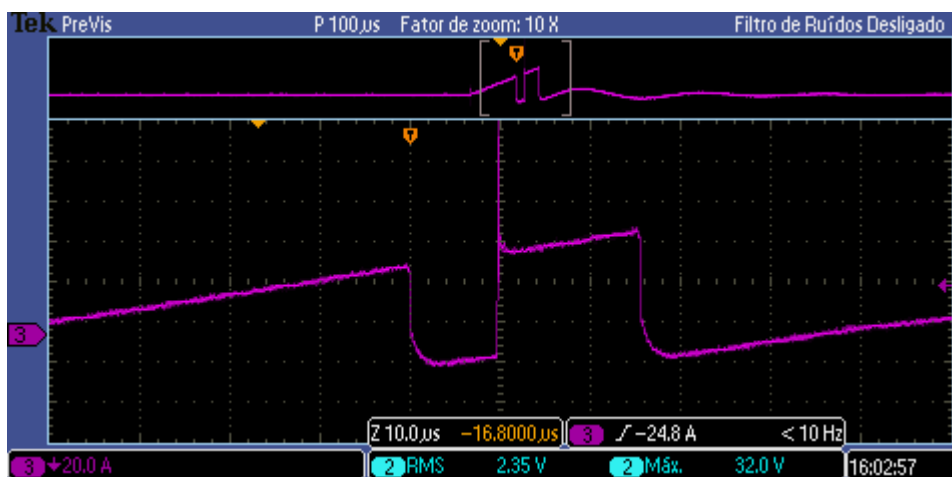
Figura 37 – Medição da indutância série equivalente.



Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Na Figura 38, é mostrada a forma de onda medida da corrente no capacitor, durante a realização do duplo pulso no semicondutor. A escala de medição é de 20 A por divisão.

Figura 38 – Medição da corrente no capacitor durante o duplo pulso.

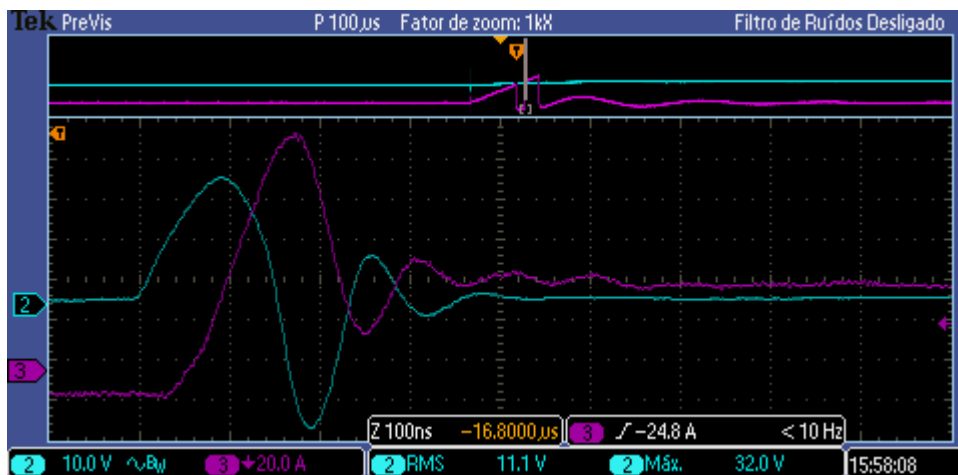


Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Na Figura 39, é mostrada a ampliação da região de condução do segundo pulso, em que a forma de onda roxa é a corrente no capacitor, que viabiliza realizar a medição da variação de corrente pelo tempo, e a forma de onda azul é a tensão no

capacitor, que permite medir a variação de tensão. Na imagem a variação da tensão no capacitor está positiva, pois o sinal do canal de medição está invertido. As escalas de medição são de 20 A por divisão para a corrente e de 10 V por divisão para a tensão.

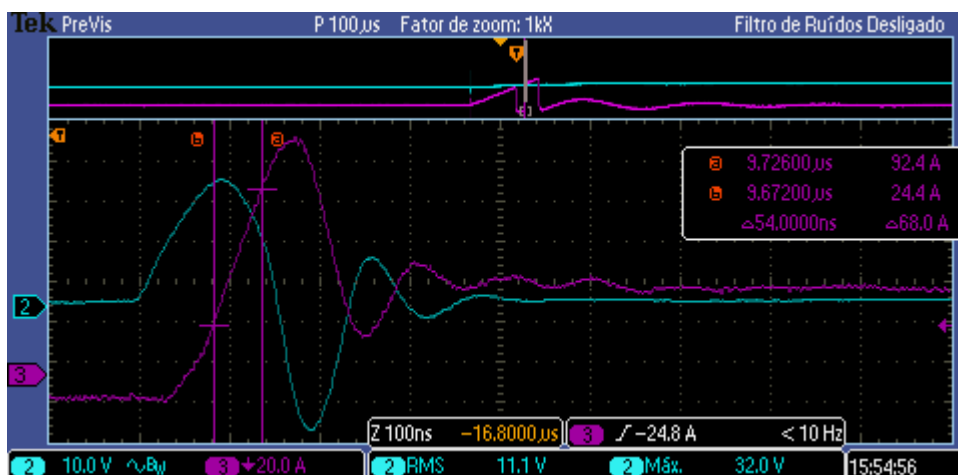
Figura 39 – Região de condução do segundo pulso, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Na Figura 40, é demonstrada a medição da variação da corrente em relação à variação do tempo no capacitor. Neste caso a variação da corrente é de 68,0 A e a variação do tempo é de 54,0 ns.

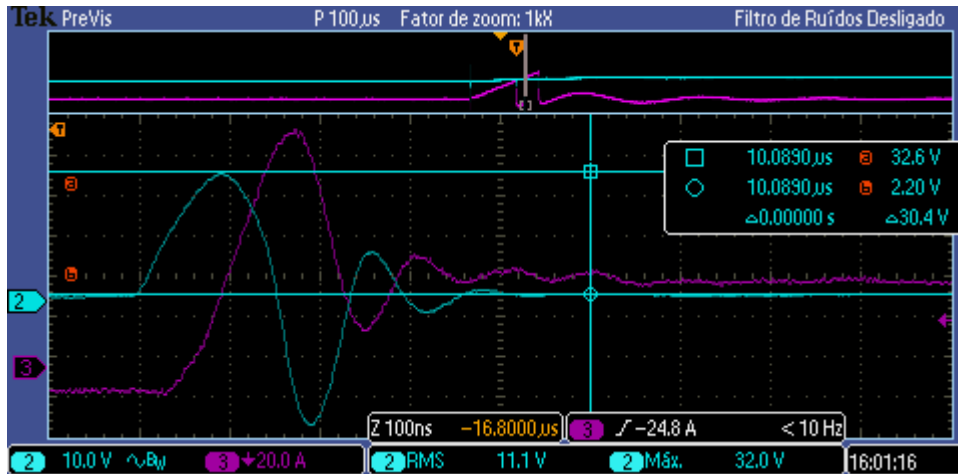
Figura 40 – Medição da variação da corrente no tempo, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Na Figura 41, é demonstrada a medição da variação da tensão no capacitor. Neste caso a variação da tensão é de 30,4 V.

Figura 41 – Medição da variação da tensão, em que a forma de onda roxa é a corrente e a forma de onda azul é a tensão no capacitor.



Fonte: Elaborada pela autora (2026).

Após a realização das medições e utilizando de base a equação (172), é possível calcular a indutância parasita do capacitor, conforme apresentado na equação (173).

$$L = \frac{V_L}{\frac{di}{dt}} \quad (173)$$

$$L = \frac{30,4}{\frac{68,0}{54,0 \cdot 10^{-9}}} = 24,14 \text{ nH}$$

### 5.3 VALORES MEDIDOS

Os valores medidos da RSE e da LSE dos capacitores selecionados se encontram na Tabela 6.

Tabela 6 – Resistência série equivalente e indutância série equivalente obtidos pelas medições dos capacitores selecionados.

<b>Modelo</b>	<b><math>RSE_{cap}</math> (m<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>LSE_{cap}</math> (nH)</b>
1	1,82	30,59
2	1,66	29,48
3	1,47	35,62
4	1,51	29,79
5	0,74	31,74
6	0,73	43,46

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

#### 5.4 COMPARATIVO ENTRE VALORES CALCULADOS E MEDIDOS

Na Tabela 7, está apresentado o comparativo entre os valores calculados e os valores medidos de RSE e LSE dos capacitores selecionados, incluindo os erros percentuais entre estes valores.

Tabela 7 – Comparativo entre valores calculados e medidos de resistência série equivalente e indutância série equivalente dos capacitores selecionados.

<b>Modelo</b>	<b>Calculado</b>		<b>Medido</b>		<b><math>\Delta</math> (calc/med)</b>	
	<b><math>RSE_{cap}</math> (m<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>LSE_{cap}</math> (nH)</b>	<b><math>RSE_{cap}</math> (m<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>LSE_{cap}</math> (nH)</b>	<b><math>RSE_{cap}</math> (%)</b>	<b><math>LSE_{cap}</math> (%)</b>
1	1,70	29,72	1,82	30,59	-6,4%	-2,9%
2	1,60	34,32	1,66	29,48	-3,7%	16,4%
3	1,40	36,93	1,47	35,62	-4,7%	3,7%
4	1,27	34,32	1,51	29,79	-15,9%	15,2%
5	0,65	39,36	0,74	31,74	-11,1%	24,0%
6	0,69	51,37	0,73	43,46	-5,9%	18,2%

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Na resistência série equivalente ( $RSE_{cap}$ ), os valores calculados são inferiores aos valores medidos, pois há fatores, como ponto de solda, e possíveis variações na espessura do filme, que não foram considerados no cálculo.

Na indutância série equivalente ( $LSE_{cap}$ ), há maior oscilação da variação entre valores medidos e calculados, pois neste caso há a influência de autoindutâncias e indutâncias mútuas que não foram consideradas, como a autoindutância dos terminais e a indutância mútua da fita de conexão 2 com os demais componentes.

## 5.5 CONCLUSÃO

Os resultados práticos foram obtidos por meio da medição da RSE, utilizando ponte RLC, e da LSE, utilizando ensaio de duplo pulso, dos capacitores selecionados. Com os resultados das medições, é possível realizar a comparação com os valores calculados.

As variações entre valores medidos e calculados encontradas são admissíveis, levando em consideração a variabilidade normal das matérias-primas e dos processos de fabricação, além do erro envolvido nos processos de medição. Destaca-se que para a RSE, avaliando-se as três medições realizadas em um mesmo capacitor, as variações entre os máximos e os mínimos valores medidos apresentaram níveis de até 4,5% e, para a LSE nesta mesma condição, obtiveram-se níveis de até 11,9%. Desta forma, verifica-se que a diferença entre os valores medidos e calculados, descontando a imprecisão inerente das medições, é de até 12% para a RSE e até 15% para a LSE, valores estes considerados satisfatórios em função da complexidade dos cálculos e das aproximações envolvidas.

## 6 CONCLUSÃO

O capacitor de filme plástico metalizado aplicado em barramento CC de conversores estáticos possui diversas características construtivas que impactam nos valores da RSE e da LSE, sendo que algumas características são dependentes da aplicação, como espessura do filme metalizado e seção transversal das fitas de conexão, e outras possuem certo grau de liberdade, como quantidade de elementos capacitivos, largura e perfil de metalização do filme metalizado, diâmetro do eixo e comprimento e *design* das fitas de conexão.

A forma de equacionamento do circuito equivalente do capacitor também é muito influenciada pelas características construtivas, não havendo um padrão único para todos os modelos. Por isso a necessidade de limitação da estrutura a ser considerada para o desenvolvimento do trabalho.

A realização de equacionamento, que permite calcular os componentes do circuito equivalente do capacitor, com base nas características construtivas, possibilita realizar as melhores escolhas, para atendimento dos requisitos de entrada, na fase de projeto, sem a necessidade de fabricação de protótipos, além de mensurar a influência de cada característica no resultado final. É possível concluir que o aumento da quantidade de elementos capacitivos, da largura do filme metalizado e do comprimento das fitas de conexão é prejudicial às características elétricas do capacitor, visto que eleva os níveis de RSE e LSE. Enquanto o aumento do diâmetro do eixo e da largura das fitas de conexão traz ganhos ao capacitor, visto que reduz a LSE. Adicionalmente, a estrutura da fita de conexão 2 também impacta nos resultados, sendo que a conexão paralela apresenta melhores resultados, ou seja, menor RSE e LSE, quando comparada com a estrutura única com sobreposição. Entretanto, alterações em algumas características do projeto geram mais ou menos impactos nos níveis de RSE e LSE.

Neste trabalho, estão sendo apenas avaliadas as características elétricas do capacitor, portanto há a necessidade de verificar a viabilidade construtiva e financeira no momento de realização das escolhas.

Com a aplicação do equacionamento às características construtivas de diferentes modelos de capacitores, obtêm-se a variabilidade entre os componentes do circuito equivalente de cada modelo e a comprovação dos resultados é realizada por meio da medição de amostras. O comparativo entre os valores calculados e medidos

eletricamente mostra que o cálculo é eficaz, visto que as variações são admissíveis, levando em consideração a variabilidade normal das matérias-primas, dos processos de fabricação e dos processos de medição. Os valores da LSE apresentaram maior oscilação em relação aos valores da RSE, pois são impactados pela autoindutância e pela indutância mútua, que variam conforme posicionamento entre partes avaliadas.

Como trabalho futuro, com base neste apresentado, está prevista a elaboração de planilha de cálculo, na qual a partir do preenchimento dos dados de entrada de projeto, serão calculados os valores de RSE e LSE do capacitor, possibilitando maior agilidade e assertividade nas tomadas de decisão, com relação aos aspectos construtivos.

## REFERÊNCIAS

- [1] PETRY, C.A. **Introdução à eletrônica de potência**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Florianópolis. 30 f. Disponível em: [https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia\\_CEFET/Conversores\\_Estaticos/Pos\\_2010/Apresentacao\\_Aula\\_01\\_A.pdf](https://www.professorpetry.com.br/Ensino/Repositorio/Docencia_CEFET/Conversores_Estaticos/Pos_2010/Apresentacao_Aula_01_A.pdf). Acesso em: 22 fev. 2026.
- [2] *U.S. Department of Energy: Energy Efficiency & Renewable Energy. Wide bandgap semiconductors: Pursuing the promise*, abr. 2013, 2 f. Disponível em: [https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/rd/pdfs/wide\\_bandgap\\_semiconductors\\_factsheet.pdf](https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/rd/pdfs/wide_bandgap_semiconductors_factsheet.pdf). Acesso em: 30 jun. 2023.
- [3] XIE, Y.; ZHU, H.; LI, B.; WEI, J.; WANG, K.; YANG, X.; WANG, L. *Optimization of laminated busbar for three-level NPC topology using SiC module. IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Asia, p. 302-307, 2020. DOI 10.1109/IPEMC-ECCEAsia48364.2020.9367788.
- [4] CHIU, P. **Overview of SiC market and the supply chain evolution**. *Yole Intelligence*, 10 nov. 2023. Disponível em: [https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/202311-apscrm\\_overview-of-sic-market-and-the-supply-chain\\_pch\\_external.pdf](https://medias.yolegroup.com/uploads/2023/12/202311-apscrm_overview-of-sic-market-and-the-supply-chain_pch_external.pdf). Acesso em: 21 dez. 2025.
- [5] BRUBAKER, M.A.; HOSKING, T. A.; SAWYER, E.D. *Characterization of equivalent series inductance for DC link capacitors and bus structures. SBE, Inc.*, Vermont, 6 f. Disponível em: <https://advanced-conversion.com/wp-content/uploads/2020/03/Characterization-Equivalent-Series-Inductance-DC-Link-Capacitors-Bus-Structures-PCIM-2012-A8-paper.pdf>. Acesso em: 01 jun. 2025.
- [6] BENSON, M.; YI, L.; LEE, K.; MOON, J.; LEE, W. *DC-Link capacitor board design for low parasitic inductance. IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Atlanta, mar. 2025. DOI 10.1109/APEC48143.2025.10977110.
- [7] GALDEANO, M.; BARRIOS, E.L.; ELIZONDO, D.; SANCHIS, P. *Turn-off overvoltage in SiC power electronic converters. 50th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Chicago, nov. 2024. DOI 10.1109/IECON55916.2024.10905735.
- [8] PRYMAK, J.; CLELLAND, I.; MACOMBER, L. *Capacitor technology for high density and high temperature power systems used in EV, HEV and PHEV automotive applications. APEC*, 30 f., 2012. Disponível em: [https://www.pσμα.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-packaging/presentations/2012-apec-234-capacitor-technologies-high-density-and-high-temperature-power-systems-used-ev-hev-and\\_0.pdf](https://www.pσμα.com/sites/default/files/uploads/tech-forums-packaging/presentations/2012-apec-234-capacitor-technologies-high-density-and-high-temperature-power-systems-used-ev-hev-and_0.pdf). Acesso em: 30 jun. 2023.
- [9] BOND, J.A. *Dry film capacitors for high-frequency power Electronics. Bodo's Power Systems: Electronics in Motion and Conversion*, p. 28-33, mar. 2017.

- [10] BROWN, R.W. **Electrical and thermal modelling of low power metallised polypropylene capacitors**. Tese de doutorado pela RMIT University, 238 f., fev. 2007.
- [11] SULLIVAN, C.R.; KERN, A.M. *Capacitors with fast current switching require distributed models*. **IEEE**, Dartmouth College, Hanover, p. 1497-1503, 2001. DOI 10.1109/PESC.2001.954331.
- [12] MAKDESSI, M.; SARI, A.; VENET, P. *Improved model of metalized film capacitors*. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol. 21, n. 2, p. 582-593, abr. 2014. DOI 10.1109/TDEI.2013.004158.
- [13] VIZUETE, P.G.; FICO, F.; PRIETO, A.F.; FREIRE, M.J.; MENDEZ, J.B. *Calculation of parasitic self- and mutual-inductances of thin-film capacitors for power line filters*. **IEEE**, abr. 2018. DOI 10.1109/TPEL.2018.2824658.
- [14] SULLIVAN, C.R.; SUN, Y.; KERN, A.M. *Improved distributed model for capacitors in high-performance packages*. **IEEE**, p. 969-976, 2002. DOI 10.1109/IAS.2002.1042675.
- [15] HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K.S. Capacitância. In: HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K.S. **Física 3**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. p.125-147.
- [16] *General technical information. Film capacitors*. Vishay, n. 26033, 8 f., mar. 2022. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/26033/gentechinfofilm.pdf>. Acesso em: 18 ago. 2024.
- [17] **Calculate sheet resistance using the four-probe method**. Ossila. Disponível em: <https://www.ossila.com/pages/sheet-resistance-theory>. Acesso em: 23 fev. 2025.
- [18] MATTAR, J. **Estudo relacionando os parâmetros de tgδ e ESR em capacitores de potência**. 42 f., 2016.
- [19] **Capacitância**: Capítulo 4. Universidade de São Paulo, São Paulo, 8 f. Disponível em: [https://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292\\_2012/Cap4.pdf](https://fma.if.usp.br/~mlima/teaching/4320292_2012/Cap4.pdf). Acesso em: 06 mar. 2025.
- [20] BONI, D. **Transformação estrela-triângulo**. Professor Elétrico. Disponível em: <https://professoreletrico.com/cursos/circuitos/transformacao-estrela-triangulo>. Acesso em: 10 set. 2025.
- [21] ROPA, P.; GLAIZE, C. *Decrease of inductance and electromagnetic interference in power electronics capacitors*. **Power Electronics and Variable-Speed Drives**, França, n. 399, p. 169-174, out. 1994. DOI 10.1049/cp:19940959.
- [22] ZHU, Y.F.; ZHENG, Z; GE, Q.X. *The impact of layer number on stray inductance of DC-link busbar in power converters*. **The Open Electrical & Electronic Engineering Journal**, vol. 7, p. 98-102, 2013. Disponível em: <https://benthamopenarchives.com/contents/pdf/TOEEJ/TOEEJ-7-98.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

[23] BUENO, M.; ASSIS, A.K.T. **Cálculo de indutância e de força em circuitos elétricos**. 2. ed. Montreal: Apeiron Montreal, 2015.

[24] VASCONCELOS, J.A. **Transmissão e distribuição de energia**: Indutância de linhas de transmissão. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 14 f. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18795/material/Indut%C3%A2ncia%20em%20LTs%20I.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2025.

[25] **Propriedades físicas das ligas de latão**. Metalnisa Metais. Disponível em: <https://www.metalnisa.com.br/propriedades-fisicas-latao.php>. Acesso em: 08 set. 2025.

[26] NEWNHAM, R.E. **Properties of materials: Anisotropy, symmetry, structure**. 1. ed. Estados Unidos: *Oxford University Press*, 2005.

[27] SILVA, C.A. **Ciência e tecnologia dos materiais elétricos**: Aula 1. Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 24 f. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/17345/material/Aula1.pdf>. Acesso em: 08 set. 2025.

[28] BRUBAKER, M.; HAGE, D.E.; HOSKING, T.; SAWYER, E.; FRANKE, W.T. *Integrated DC link capacitor/bus enables a 20% increase in inverter efficiency*. **PCIM**, 6 f., 2014.

## APÊNDICE A – PERFIL DE METALIZAÇÃO

Os valores das resistências do circuito equivalente distribuído, conforme os perfis de metalização dos filmes utilizados nos modelos avaliados no trabalho, estão apresentados nas Tabelas 8 a 11.

Tabela 8 – Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 62,5 mm e borda livre 2,5 mm.

<b>Resistências</b>	<b>Valor</b>
<i>R1 e R30</i>	3,0 $\Omega$
<i>R2 e R29</i>	3,0 $\Omega$
<i>R3 e R28</i>	3,0 $\Omega$
<i>R4 e R27</i>	3,0 $\Omega$
<i>R5 e R26</i>	13,4 $\Omega$
<i>R6 e R25</i>	27,3 $\Omega$
<i>R7 e R24</i>	41,2 $\Omega$
<i>R8 e R23</i>	55,0 $\Omega$
<i>R9 e R22</i>	55,0 $\Omega$
<i>R10 e R21</i>	55,0 $\Omega$
<i>R11 e R20</i>	55,0 $\Omega$
<i>R12 e R19</i>	55,0 $\Omega$
<i>R13 e R18</i>	55,0 $\Omega$
<i>R14 e R17</i>	55,0 $\Omega$
<i>R15 e R16</i>	55,0 $\Omega$

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 9 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 62,5 mm e borda livre 4,0 mm.

<b>Resistências</b>	<b>Valor</b>
<i>R1 e R30</i>	3,0 $\Omega$
<i>R2 e R29</i>	3,0 $\Omega$
<i>R3 e R28</i>	3,0 $\Omega$
<i>R4 e R27</i>	3,0 $\Omega$
<i>R5 e R26</i>	16,9 $\Omega$
<i>R6 e R25</i>	30,8 $\Omega$
<i>R7 e R24</i>	41,2 $\Omega$
<i>R8 e R23</i>	55,0 $\Omega$
<i>R9 e R22</i>	55,0 $\Omega$
<i>R10 e R21</i>	55,0 $\Omega$
<i>R11 e R20</i>	55,0 $\Omega$
<i>R12 e R19</i>	55,0 $\Omega$
<i>R13 e R18</i>	55,0 $\Omega$
<i>R14 e R17</i>	55,0 $\Omega$
<i>R15 e R16</i>	55,0 $\Omega$

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 10 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 75,0 mm e borda livre 2,5 mm.

<b>Resistências</b>	<b>Valor</b>
<i>R1 e R30</i>	3,0 $\Omega$
<i>R2 e R29</i>	3,0 $\Omega$
<i>R3 e R28</i>	3,0 $\Omega$
<i>R4 e R27</i>	16,0 $\Omega$
<i>R5 e R26</i>	37,6 $\Omega$
<i>R6 e R25</i>	55,0 $\Omega$
<i>R7 e R24</i>	55,0 $\Omega$
<i>R8 e R23</i>	55,0 $\Omega$
<i>R9 e R22</i>	55,0 $\Omega$
<i>R10 e R21</i>	55,0 $\Omega$
<i>R11 e R20</i>	55,0 $\Omega$
<i>R12 e R19</i>	55,0 $\Omega$
<i>R13 e R18</i>	55,0 $\Omega$
<i>R14 e R17</i>	55,0 $\Omega$
<i>R15 e R16</i>	55,0 $\Omega$

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Tabela 11 - Resistências do circuito equivalente distribuído para filme metalizado com largura 110,0 mm e borda livre 4,0 mm.

<b>Resistências</b>	<b>Valor</b>
<i>R1 e R30</i>	3,0 $\Omega$
<i>R2 e R29</i>	3,0 $\Omega$
<i>R3 e R28</i>	3,0 $\Omega$
<i>R4 e R27</i>	3,0 $\Omega$
<i>R5 e R26</i>	3,0 $\Omega$
<i>R6 e R25</i>	19,4 $\Omega$
<i>R7 e R24</i>	35,9 $\Omega$
<i>R8 e R23</i>	55,0 $\Omega$
<i>R9 e R22</i>	55,0 $\Omega$
<i>R10 e R21</i>	55,0 $\Omega$
<i>R11 e R20</i>	55,0 $\Omega$
<i>R12 e R19</i>	55,0 $\Omega$
<i>R13 e R18</i>	55,0 $\Omega$
<i>R14 e R17</i>	55,0 $\Omega$
<i>R15 e R16</i>	55,0 $\Omega$

Fonte: Elaborada pela autora (2025).



JOINVILLE  
CENTRO DE CIÊNCIAS  
TECNOLÓGICAS

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC  
BIBLIOTECA UNIVERSITÁRIA  
REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL

CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT

### **ATESTADO DE VERSÃO FINAL**

Eu, Alessandro Luiz Batschauer, professor(a) do curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica, declaro que esta é a versão final aprovada pela comissão julgadora da dissertação/tese intitulada: **“Cálculo do circuito equivalente de capacitor de filme plástico para aplicação em barramento CC de conversores estáticos”** de autoria do(a) acadêmico Alessandra Caroline Fragoso.

Joinville, 11 de março de 2026.

Assinatura digital do(a) orientador(a):

---

Alessandro Luiz Batschauer