

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS HANDERSON SANTIAGO MARTINS

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA CAPACITÂNCIA  
E RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE EM CAPACITORES DE  
POTÊNCIA**

VIÇOSA  
2022

LUCAS HANDERSON SANTIAGO MARTINS

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA CAPACITÂNCIA  
E RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE EM CAPACITORES DE  
POTÊNCIA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II – e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Rodolpho Vilela Alves Neves  
Co-orientador: Horácio Luis Pradi

VIÇOSA  
2022

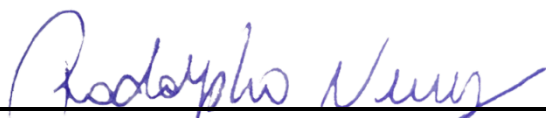
**LUCAS HANDERSON SANTIAGO MARTINS**

**PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA  
CAPACITÂNCIA E RESISTÊNCIA SÉRIE EQUIVALENTE EM  
CAPACITORES DE POTÊNCIA**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 – Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

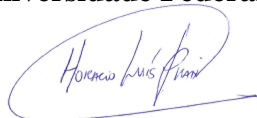
Aprovada em 14 de dezembro de 2022.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



---

**Prof. Dr. Rodolpho Vilela Alves Neves – Orientador**  
Universidade Federal de Viçosa



---

**Eng. Horácio Luis Pradi – Coorientador**  
Engenharia de Capacitores - WEG

---

**Me. Leonardo Luiz Vetore – Membro**  
Engenharia de Capacitores e Tomadas e Interruptores – WEG



---

**Prof. Dr. Victor Pellanda Dardengo – Membro**  
Universidade Federal de Viçosa

*“Quem dorme sonha, quem trabalha conquista. ”*

*(Rodinei, final da libertadores 2019)*

*Agradeço a Deus pelo privilégio!*

## *Agradecimentos*

Agradeço a Deus pelo privilégio, força e determinação concebidas ao longo da jornada que me trouxe até este momento.

A minha família que sempre prestou todo o suporte necessário para que este sonho se tornasse uma realidade. Em especial a minha mãe Nilza e a dona Isaura, minha querida avó. Enoque, Sarah, Thalita muito obrigado pelo suporte. Aos tios e primos que me auxiliaram no decorrer de todo o processo fica o meu sincero abraço e agradecimento.

Agradeço a universidade pela oportunidade, aos docentes por todo apoio incondicional que sempre se dispuseram a oferecer em vários momentos cruciais nesta jornada. Em especial ao meu orientador professor Rodolpho que ao longo da graduação sempre se dispôs a me ajudar e compartilhar seu conhecimento.

A Minas Gerais fica o meu carinho por este estado fantástico, de tanta cultura, comida e tradições sensacionais.

Aos meus colegas da universidade e os amigos que a vida me deu ao longo do caminho, em especial a nossa REPELT que foi um ponto de encontro de estudos e divertimento. Uliana, Luna, Robertinho, Luan, Fumelt, Leticia, Thulio, Hugão, Amandinha, Rafa e tantos outros amigos que recebi fica o meu carinho e que nossa amizade perdure por longos anos. Antes colegas de turma e agora colegas de profissão.

Por último, meu agradecimento a WEG, a toda estrutura, materiais, tempo, laboratórios que a empresa disponibilizou para que o projeto fosse executado. Um abraço para todos da seção de engenharia do Parque Fabril 1 em Jaraguá do Sul SC.

## *Resumo*

Os capacitores de potências são elementos amplamente utilizados em sistemas elétricos, possuindo dezenas de aplicações como filtros em linhas de transmissão de energia e corretores do fator de potência. O principal modelo de capacitor de potência no mercado brasileiro é o capacitor construído com filme de polipropileno metalizado. A construção deste elemento requer alto nível de tecnologia e amplo controle de qualidade. Dentro do processo de fabricação destes componentes é estabelecido uma variação máxima para a capacitância e a resistência série equivalente do elemento após ele ser submetido a uma variação brusca de tensão em um pequeno intervalo de tempo. Deste modo, dentro dos critérios de qualidade estabelecidos, realiza-se a medição da capacitância e resistência série equivalente antes e depois dos testes de descargas elétricas. A medição nesta etapa é crucial para a qualidade do produto, logo, o sistema de medição deve apresentar alto nível de confiabilidade. Este trabalho tem como foco analisar o sistema de medição por meio do indicador estatístico R&R (repetibilidade e reprodutibilidade). Levantar as principais influências do sistema de medição utilizado atualmente, apresentar uma proposta de sistema de medição e estabelecer a margem de erro que o sistema agrega para a medição. O sistema proposto será submetido a mesma análise de confiabilidade utilizando o índice R&R.

## *Abstract*

Power capacitors are electrical components widely used in electrical systems, having dozens of applications such as filters in transmission lines and power factor correctors. The main model of power capacitor in the Brazilian market is the capacitor built with metallized polypropylene film.

The construction of this element requires a high level of technology and extensive quality control. Within the manufacturing process of these components, a maximum variation for capacitance and equivalent series resistance of the element after it is subjected to a sudden voltage variation in a short time interval is verified. Thus, within the quality criteria achieved, the capacitance and equivalent series resistance are measured before and after the electrical discharge tests during the manufacturing process.

Measurement at this stage is critical for product quality, so the measurement system must have a high level of reliability. This work focuses on analyzing the measurement system through the statistical indicator R&R (repeatability and reproducibility). Raise the main influences on the current measurement system, present a proposal for a measurement system and establish the margin of error that the system adds during measurement. The proposed system will be submitted to the same reliability analysis using the R&R index.



# Sumário

1. Introdução.....	13
1.1 Objetivos.....	17
2. Referencial teórico.....	17
2.1 Capacitor de filme de polipropileno metalizado .....	17
2.2 Instrumentos e métodos de medição da ESR e da capacitância .....	19
2.3 Atual sistema de medição de capacitância e resistência série equivalente.....	22
3. Materiais e métodos.....	24
3.1 Funcionamento e calibração da ponte RLC.....	24
3.2 Análise da disposição dos cabos, pressão mecânica entre contato e capacitor, quantidade e tipo de contato .....	31
4. Avaliação do presente sistema de medição .....	32
4.1 Ponte RLC Eucol U2816A .....	33
4.2 Ponte RLC Eucol U2810D .....	34
4.3 Análise dos contatos – Sem a influência do sistema de amortecimento .....	36
4.4 Análise da quantidade de contato .....	37
4.5 Análise da disposição dos cabos.....	38
5. Proposta de um sistema de medição para a capacitância e a resistência série equivalente.....	39
6. Conclusão .....	46
7. Referências Bibliográficas.....	47

## *Lista de Figuras*

Figura 1.1: Modelos de representação do capacitor .....	13
Figura 1.2: Self-Healing. Fonte: (WEG, s.d.).....	15
Figura 2.1: Capacitor de filme metalizado. Fonte: (Nathan Valentine, 2019) .....	18
Figura 2.2: Modelo de capacitor metalizado. Fonte: (Gnonhoue, 2021).....	18
Figura 2.3: Representação do Índice R&R (CARLOS DE TOLEDO, 2014) .....	20
Figura 2.4: Exemplar de ponte RLC.....	22
Figura 2.5: Dispositivo pneumático utilizado para auxiliar na medição da ponte RLC.....	22
Figura 2.6: Contato utilizado pelo dispositivo pneumático em auxílio ao sistema de medição da ponte RLC .....	23
Figura 2.7: Diferença angular no pino durante a calibração da ponte RLC .....	24
Figura 3.1: Sistema de calibração da ponte RLC no plano imaginário .....	25
Figura 3.2: Ponteira padrão da ponte RLC .....	25
Figura 3.3: Ponteiras utilizadas na regeneração nº01 .....	26
Figura 3.4: Pino A .....	27
Figura 3.5: Placa de cobre .....	27
Figura 3.6: Fio de cobre.....	28
Figura 3.7: Média da ESR no estudo da calibração da ponte RLC .....	29
Figura 3.8: Média da ESR para o estudo de calibração.....	30
Figura 3.9: Distribuição normal da ESR média das amostras utilizadas no estudo de calibração da ponte RLC. ....	30
Figura 4.1: Índice R&R sem o sistema de amortecimento na medição.....	33
Figura 4.2: Índice R&R dos cenários para as pontes RLC .....	35
Figura 4.3: Índice R&R dos contatos .....	36
Figura 4.4: Índice R&R dos contatos por cenário 9/11 e10/12 .....	36
Figura 4.5: R&R U2810D dos cenários 1 ao 6.....	37
Figura 4.6: R&R U2810D dos cenários 11 ao 16.....	38
Figura 4.7: Comparativo do tipo de superfície no contato .....	38
Figura 5.1: Objeto utilizado para a calibração da ponte RLC da ponte RLC na regeneração nº02 .....	40
Figura 5.2: Objeto proposto para a calibração da ponte RLC .....	40
Figura 5.3: Cabo entrelaçado.....	41
Figura 5.4: Índice R&R do Sistema de Medição Proposto .....	41

Figura 5.5: Tendência de comportamento do dispositivo pneumático utilizado no sistema de medição .....	42
Figura 5.6: Médias da ESR mensuradas com o sistema de medição proposto.....	42
Figura 5.7: Índice R&R da medição de capacitância .....	43
Figura 5.8: Média da capacitância obtida com o sistema de medição proposto.....	43
Figura 5.9: Distribuição normal dos dados de ESR do sistema proposto .....	44
Figura 5.10: Distribuição normal dos dados de capacitância do sistema de medição proposto .....	44

## *Lista de Tabelas*

Tabela 2.1: Valores de d2, Fonte: (CARLOS DE TOLEDO, 2014).....	21
Tabela 3.1: Características técnicas do pino A.....	27
Tabela 3.2: Informações técnicas da placa utilizada .....	27
Tabela 3.3: Dados do fio de cobre .....	28
Tabela 4.1: Índices R&R com os equipamentos padrões .....	33
Tabela 4.2: Índice R&R da ponte U2816A no grupo 1 .....	34
Tabela 4.3: Índice R&R da ponte U2816A no grupo 2 .....	34
Tabela 4.4: Índices R&R dos cenários pertencentes ao grupo 3 para a ponte U2816A.....	34
Tabela 4.5: Índice R&R da ponte U2810D no grupo 1 .....	34
Tabela 4.6: Índice R&R da ponte U2810D no grupo 2 .....	35
Tabela 4.7: Índices R&R dos cenários pertencentes ao grupo 3 para a ponte U2810D.....	35
Tabela 5.1: Proposta de Sistema de Medição .....	39

## 1. Introdução

Dentre os principais componentes eletro/eletrônicos utilizados nos circuitos de eletrônica de potência destaca-se o capacitor, que é um elemento capaz de armazenar energia na forma de campo elétrico. Este componente é descrito como duas placas metálicas separadas por um material dielétrico isolante e possui a capacidade de armazenar energia entre as duas placas condutoras por meio de um campo elétrico. A razão entre a carga depositada em uma placa de um capacitor e a diferença do potencial entre as duas placas, medidas em farad e representado pela letra  $F$  é chamada de capacitância (ALEXANDRE & SADIKU, 2013), em homenagem ao físico britânico Michael Faraday, que contribuiu com o desenvolvimento nos estudos do eletromagnetismo.

Na Figura 1.1 são apresentados os modelos do capacitor ideal e real. O capacitor ideal é formado por duas placas condutoras em azul e separadas por uma distância  $d$ . Em verde tem-se a representação do dielétrico. No modelo ideal, quando as placas são submetidas a uma diferença de potencial há um acúmulo de cargas positivas em uma das placas, e cargas negativas na outra. Este acúmulo de cargas é devido a atuação do campo elétrico e ocorre até que a tensão no capacitor seja igual a tensão da fonte que o alimenta. Posteriormente, quando a tensão sobre o capacitor for retirada, ele irá descarregar toda a carga armazenada no circuito elétrico ao qual está inserido.

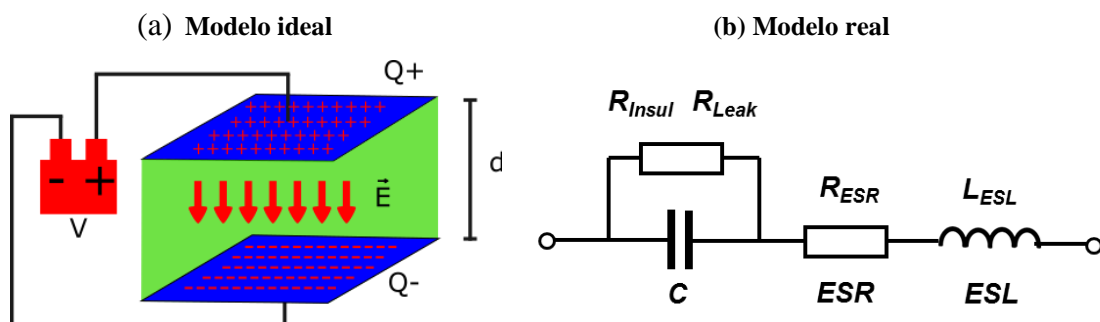


Figura 1.1: Modelos de representação do capacitor

No modelo ideal utilizado para descrever os capacitores temos a interpretação de um componente com potência puramente reativa, entretanto, na prática os capacitores não são elementos com potência puramente reativa e um dos fatores que cooperam para a dissipação de potência ativa é a resistência série equivalente. A figura 1.1(b) apresenta o modelo real para representar um capacitor. Neste caso tem-se a resistência paralela ( $R_{leakage}$ ) correlacionada as

correntes de fuga, resistência série equivalente ( $R_{ESR}$ ) e a indutância série equivalente ( $L_{ESL}$ ). Cada característica deve ser considerada a depender da aplicação do capacitor. A resistência ESR é foco de estudos que envolvem o aquecimento e as perdas por efeito joule no elemento, enquanto a indutância ESL é relevante para aplicações em altas frequências, principalmente em circuitos chaveados de inversores de alta frequência.

A resistência série equivalente (ESR) é predominantemente determinada pela resistividade do filme metalizado e as perdas no dielétrico (BROWN, GRAY, & HARVEY, 2006). Uma ESR baixa propicia mais eficiência durante a transferência de energia do capacitor para a carga e um menor aquecimento do capacitor. A ESR pode ser definida por dois fatores, sendo eles: as perdas do dielétrico e a resistência nos eletrodos (RABUFFI, 2002).

As definições da resistência série equivalente de BROWN, GRAY & HARVET (2006) e RABUFFI (2006) são análogas, em ambas a resistividade dos condutores e as perdas no dielétrico são parâmetros determinantes. Logo, pode-se afirmar que as propriedades físicas dos materiais utilizados na construção do elemento capacitivo contribuem para a definição da resistência série equivalente.

Os capacitores de polipropileno metalizado são construídos com base em um filme de polipropileno na qual uma face do elemento é metalizada. Posteriormente o filme é bobinado em camadas: face metalizada, face não metalizada, face metalizada. Deste modo, reproduz-se o modelo ideal.

Este modelo de capacitor é amplamente utilizado na correção do fator de potência em linhas de transmissão de energia. Mensura-se a quantidade de KVAR que o capacitor pode injetar na linha de transmissão a partir da tensão de aplicação na qual o capacitor foi projetado. Com base nessas informações é dimensionado um banco de capacitores de filme metalizado para melhorar o fator de potência.

Capacitores de filme metalizado são amplamente utilizados em sistemas de energia pulsada e aplicações de eletrônica de potência (Hua Li, 2015). Nos circuitos elétricos de potência este modelo de capacitor é implementado em duas partes:

Capacitores de potência CC que são empregados no barramento CC do circuito de conversão CC-CA e são responsáveis por manter contínuas a corrente e a tensão.

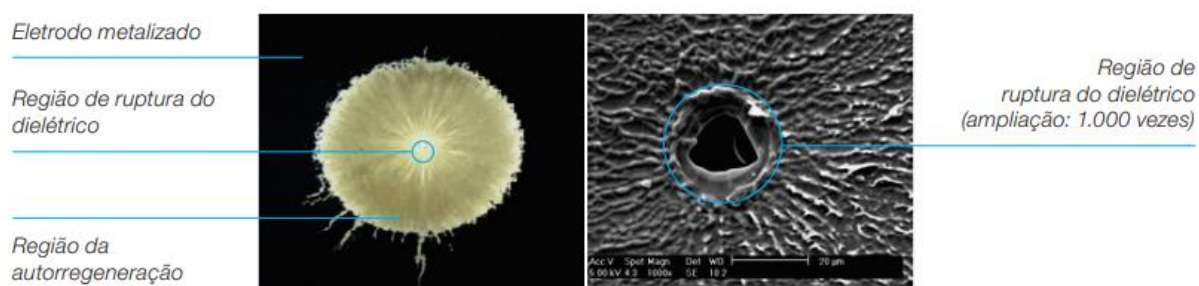
Capacitores CA utilizados como filtros para as harmônicas geradas por inversores.

A principal característica dos capacitores de polipropileno metalizado é a não interrupção de seu funcionamento quando ocorre um curto-circuito, no entanto, ele passa por um processo denominado *self-healing* (autorregeneração). Este fenômeno impulsionou a utilização deste modelo de capacitor, uma vez que, os capacitores empregados anteriormente nos circuitos de

potência eram eletrolíticos que tem por característica a interrupção do circuito após a ocorrência de um curto-circuito.

Ao ocorrer um processo de curto-circuito no dielétrico, a alta densidade de corrente próxima a falha irá imediatamente vaporizar a metalização. Com o curto-circuito isolado o capacitor continuará funcionando, mas com uma pequena perda de capacitância (Zhiwei Li, 2013).

A Figura 1.2 apresenta a superfície de um filme PPMA (polipropileno metalizado) após uma descarga elétrica. Nota-se que houve o processo de *self-healing*. O alumínio evaporou com a alta densidade da corrente que circulou no local, formando dióxido de alumínio e isolando o curto circuito, sendo necessário a substituição do componente.



Com o avanço do tempo, vários processos de *self-healing* ocorrem no capacitor, aumentando a quantidade de metal vaporizado e alterando as propriedades elétricas do elemento. Como resultado do envelhecimento do elemento capacitivo e dos processos de *self-healing* de capacitores feitos de polipropileno metalizado existe uma redução na capacitância e aumento na resistência série equivalente (M. H. El-Husseini, 2001).

Há vários motivos que podem desencadear um processo de *self-healing* no capacitor, dentre eles pode-se destacar sobretensão, sobrecorrente, sobre temperatura, harmônicas, perdas das propriedades dielétricas do polipropileno com o tempo, bolhas de ar internas que auxiliam na geração de descargas parciais, que ocorrem devido ao alto campo elétrico de aproximadamente 50 kV por mm.

Estima-se que ao longo da vida útil de um capacitor de polipropileno metalizado ocorra cerca de 5% de perda da capacitância devido aos processos de *self-healing*, sendo que, a vida útil é dimensionada a partir de fatores construtivos e da tensão de aplicação, podendo ser de 3.000 até 300.000 horas, desde que, não haja a presença de harmônicas.

Durante o processo construtivo de metalização do elemento capacitivo, são realizados testes de tensão aplicada com corrente controlada para verificar se existiu curto-circuito.

Para verificar a qualidade do contato metalizado com os eletrodos, um ensaio de carga e descarga é realizado. Neste ensaio, aplica-se uma corrente 50 vezes maior que a corrente nominal do elemento para verificar se a camada metalizada está com o contato elétrico adequado. Atualmente é adotado um critério para aprovação do elemento após os testes onde haja uma variação de até 0.25% de capacitância e 20% de ESR.

Para verificar se o produto apresentou uma variação dentro do critério estabelecido é realizada a medição da capacitância e resistência série equivalente utilizando uma ponte RLC em duas etapas: quando o elemento é posto na máquina de carga e descarga e após a realização dos testes de carga e descarga. Caso a medição seja superior aos limites supracitados, o elemento é segregado.

Pode-se definir ponte RLC como um equipamento capaz de mensurar grandezas de elementos elétricos como: resistência, capacitância, indutância e impedância. Para a medição dessas grandezas utiliza-se a metodologia estatística de Análise do Sistema de Medição (MSA - *Measurement System Analysis*) que foi desenvolvida para aumentar o nível de confiabilidade das leituras realizadas pelos instrumentos de medição. Comumente esta metodologia é interligada ao controle de qualidade, uma vez que, é requisito obrigatório para aprovação de peças conforme a norma ISO 9001.

O termo de sistema de medição refere-se aos instrumentos, medidores, padrões, operações, métodos, acessórios, softwares, colaboradores e condições ambientais utilizadas para quantificar uma unidade de medida (Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Junho de 2010).

Entre as ferramentas estatísticas utilizadas no MSA utiliza-se os conceitos de precisão, repetibilidade, reprodutibilidade, sensibilidade, consistência e uniformidade para mensurar a variação da largura das medidas.

Repetibilidade é o estudo da variação das medidas obtidas com um instrumento de medição quando utilizado várias vezes por um avaliador medindo a mesma característica da peça. Reprodutibilidade é o estudo da variação nas médias das medições feitas por diferentes avaliadores utilizando o mesmo instrumento de medição para mensurar a mesma característica. (Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, Junho de 2010).

No sistema de controle do produto são empregados os conceitos da metodologia MSA visando a confiabilidade das medidas.



## 1.1 Objetivos

Este trabalho visa propor um sistema de medição de capacitância e resistência série equivalente em capacitores de potência para ser implementado no processo fabril denominado “regeneração nº01” na fábrica de capacitores do Parque Fabril 1 da WEG seguindo a metodologia MSA e aplicando os conceitos de repetibilidade e reprodutibilidade.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Analisar o sistema de medição atual (MSA) de capacitância e ESR na regeneração nº01.
- Identificar as variáveis envolvidas no MSA de capacitância e ESR.
- Avaliar os instrumentos de medição de capacitância e ESR em capacitores de potência.
- Propor um método de medição de capacitância e resistência série equivalente.
- Avaliar o teste proposto e comparar com o atual.

## 2. Referencial teórico

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos empregados na construção de um capacitor de polipropileno metalizado como: circuito equivalente do capacitor de potência e resistência série equivalente. Os instrumentos de medição das grandezas físicas do capacitor e a avaliação do presente sistema de medição.

### 2.1 Capacitor de filme de polipropileno metalizado

Capacitores são componentes elétricos passivos que armazenam carga em eletrodos separados por um dielétrico. No caso de capacitores de filmes, estes eletrodos são finas camadas metálicas isoladas por um polímero. É feita uma conexão terminal em cada extremidade e posteriormente o elemento é embalado em um invólucro. (Nathan Valentine, 2019) . Tal conceito é representado na figura 2.1.

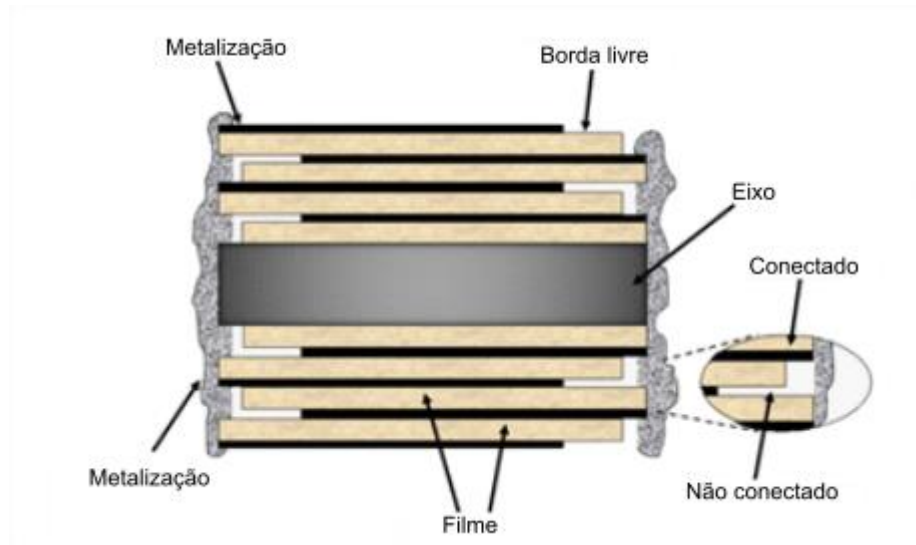


Figura 2.1: Capacitor de filme metalizado. Fonte: (Nathan Valentine, 2019)

Nota-se que o filme possui uma das faces metalizada e uma borda livre para evitar o curto-circuito. Nas laterais tem-se a metalização do elemento que conecta as faces metalizadas. Assim, o elemento capacitivo torna-se próximo aos conceitos teóricos de duas placas condutoras separadas por um dielétrico.

A Figura 2.2 apresenta o conceito construtivo do capacitor de filme metalizado, nota-se que o filme é enrolado em um eixo e as bases metalizadas formam os terminais do capacitor.

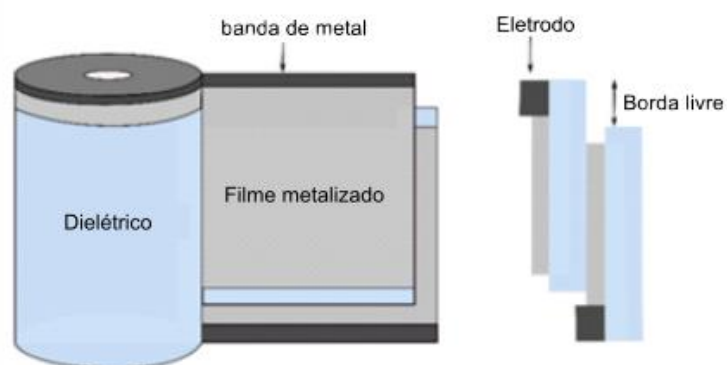


Figura 2.2: Modelo de capacitor metalizado. Fonte: (Gnonhoue, 2021)

A Figura 1.1 (b) apresenta o modelo equivalente de um capacitor. Tal modelo representa uma gama de capacitores, dentre eles os capacitores eletrolíticos e os capacitores de polipropileno metalizado. Ambos capacitores são utilizados em circuitos de potência, entretanto, os capacitores de filme de polipropileno metalizado vêm ganhando espaço devido

as suas propriedades físicas. Em especial para aplicações envolvendo correção do fator de potência e sistemas de geração de energia, como a energia fotovoltaica.

O trabalho de B. Karanayil (2014) aborda uma comparação entre a utilização do capacitor eletrolítico e o capacitor de polipropileno metalizado (MPP). Os resultados apontam uma eficácia superior do MPP, principalmente no quesito perda de energia devido ao efeito joule. Isto decorre devido à baixa resistência do capacitor de polipropileno.

Um capacitor real não pode ser representado apenas por sua capacitância, pois existem parâmetros parasitas que devem ser considerados (Hua Li, 2015).

O parâmetro denominado ESR, ou resistência série equivalente, está diretamente associado às perdas por efeito joule no capacitor e diminuição da quantidade de impulsos que ele suporta. A resistência série equivalente engloba as resistências dos eletrodos, das fitas, soldas, metalização e contatos realizados do capacitor. A resistência nesses componentes pode elevar a corrente necessária para o seu funcionamento, gerar aquecimento, mau funcionamento e diminuição da vida útil.

As definições de resistência série equivalente propostas por BROWN (2006) e RABUFFI, M. (2001) evidenciam a relação entre a ESR, os fatores construtivos e de aplicação dos capacitores. Por esses motivos a modelagem matemática da ESR é complexa, apesar disso, vários estudos são conduzidos a fim de se determinar uma equação genérica que possa descrevê-la.

Hua, Li (2015) apresenta uma proposta matemática para descrever a ESR. Na abordagem proposta temos uma ESR como função decrescente da frequência e correlacionada a metalização do elemento capacitivo. Entretanto, devido à complexidade dessa modelagem o principal método utilizado para determinar a ESR é a medição direta no elemento com uma ponte RLC.

## **2.2 Instrumentos e métodos de medição da ESR e da capacitância**

O valor da resistência série equivalente é determinado em geral a partir da medição utilizando uma ponte RLC ou um analisador de impedância em determinada frequência (Hua Li, 2015). Por conseguinte, a ESR é adotada como parâmetro de qualidade dos capacitores, quanto menor a ESR maior é a transferência de potência entre capacitor e carga. Logo, a medição dessa grandeza é determinante para o processo de produção de capacitores e para isto

o sistema de medição deve ter sua eficácia comprovada por meios matemáticos e práticos, propiciando confiabilidade no sistema de medição e nos produtos.

Para analisar os resultados dos experimentos definiu-se a utilização do índice de repetitividade e reprodutibilidade, também chamado de índice R&R. O estudo da repetitividade e reprodutibilidade é uma ferramenta usada na análise da capacidade e estabilidade de Sistemas de Medição (CARLOS DE TOLEDO, 2014). O índice possui sua lógica fundamentada em quantificar a elasticidade do intervalo das medições em relação à média.

A repetitividade mede a variabilidade inerente ao instrumento de medição e indica a capacidade de este fornecer resultados idênticos em medições repetidas e nas mesmas condições. A reprodutibilidade quantifica a capacidade de apresentar os mesmos resultados quando ocorrem mudanças nas condições de medição (CARLOS DE TOLEDO, 2014).

A Figura 2.3 expõe o método adotado a partir da análise da distribuição normal dos dados.

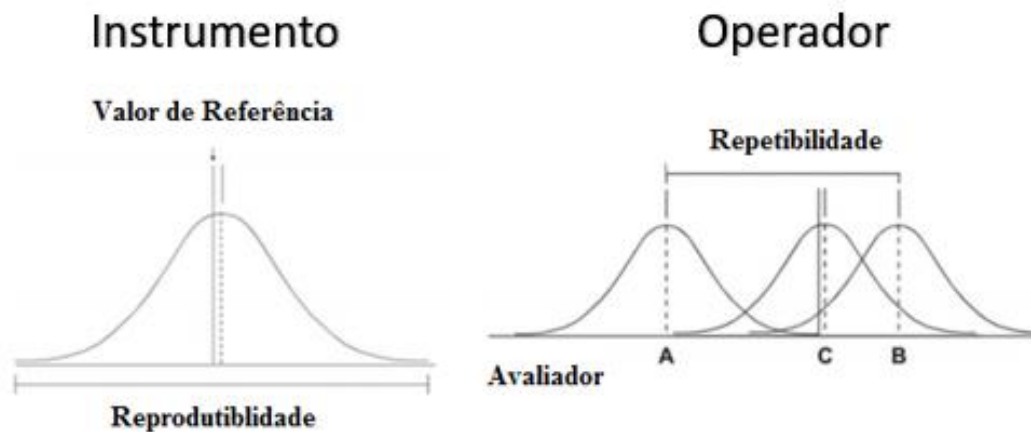


Figura 2.3: Representação do Índice R&R (CARLOS DE TOLEDO, 2014)

Posto isto, com a análise fundamentada no índice R&R pode-se mensurar a variabilidade do sistema de medição. Caso haja alta variabilidade tem-se pouca confiabilidade nos dados obtidos com o sistema de medição adotado. Sendo assim, as análises dos resultados do experimento são baseadas a partir dos seguintes critérios:

- $R\&R > 0.30$ : Reprovado.

Pouca confiabilidade do processo e dos equipamentos utilizados.

- $0.10 < R\&R < 0.30$ : Aceitável.

O processo e o equipamento possuem capacidade de mensurar a grandeza em questão, todavia, melhorias devem ser propostas.

- $R\&R < 0.10$ : Ótimo.

Processo e equipamento em perfeitas condições, alta confiabilidade.

As equações para o cálculo do índice R&R são apresentadas a seguir:

O cálculo da repetitividade é dado por:

$$VE = \sigma_{rep} = \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (1).$$

O parâmetro  $R$  representa a elasticidade do intervalo das medições, ou seja, a diferença entre a maior e menor medição e  $d_2$  é um coeficiente definido a partir da quantidade de repetições e números de amostras.

A Tabela 2.1 apresenta os valores de  $d_2$  segundo a quantidade de operadores e repetições das medições. Utilizando como exemplo uma amostra capacitiva e 9 repetições da medição, pela Tabela temos  $d_2 = 3.08$ .

**Tabela 2.1: Valores de  $d_2$ , Fonte: (CARLOS DE TOLEDO, 2014)**

		Número de repetições (m)								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
Número de amostras (g)	1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83	2,96	3,08	3,18
	2	1,28	1,81	2,15	2,40	2,60	2,77	2,91	3,02	3,13
	3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75	2,89	3,01	3,11
	4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74	2,88	3,00	3,10
	5	1,19	1,74	2,10	2,36	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10
	6	1,18	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73	2,87	2,99	3,10
	7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72	2,87	2,99	3,10
	8	1,17	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72	2,87	2,98	3,09
	9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09
	10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09
	11	1,16	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72	2,86	2,98	3,09
	12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72	2,85	2,98	3,09

A reprodutibilidade é quantificada por:

$$VA = \sigma_{repro} = \sqrt{\left(\frac{\bar{X}_{DIFF}}{d_2^*}\right)^2 - \frac{(VE)^2}{n \cdot r}} \quad (2)$$

O parâmetro  $n$  representa o número de peças,  $r$  a quantidade de medições e  $X_{diff}$  quantifica a diferença entre as médias obtidas pelos operadores.

Por fim o índice R&R é definido por:

$$R\&R = 6 \cdot \hat{\sigma}_{med} = 6 \cdot \sqrt{\sigma_{rep}^2 + \sigma_{repro}^2} \quad (3)$$

### 2.3 Atual sistema de medição de capacitância e resistência série equivalente

Este tópico contém uma descrição do atual sistema de medição utilizado na regeneração nº01. Será apresentado o sistema pneumático responsável por realizar o contato com o elemento capacitivo no processo de medição da capacitância e resistência serie equivalente, contatos e calibração da ponte RLC.

Na figura 2.4 é apresentado uma ponte RLC, dispositivo utilizado para realizar as medições de capacitância e resistensia série equivalente nos elementos capacitivos.



Figura 2.4: Exemplar de ponte RLC

Como referido previamente, este trabalho é focado no processo fabril denominado regeneração nº01. Neste processo é realizada a medição da capacitância e ESR assim que o elemento capacitivo é inserido na máquina. Após a medição, realiza-se testes de carga e descargas elétricas e posteriormente é tomada uma nova medida. A variação entre essas medições é crucial para a qualidade do produto. Logo, são considerados aprovados itens com no máximo 0,25% de variação de capacitância e 20% de variação de ESR. A medição é realizada utilizando um conjunto composto por duas pontes RLC e um dispositivo pneumático. O dispositivo pneumático é apresentado na Figura 2.5.

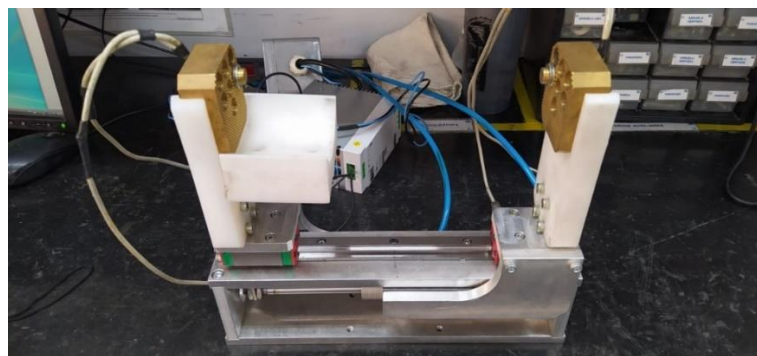


Figura 2.5: Dispositivo pneumático utilizado para auxiliar na medição da ponte RLC

Os cabos utilizados são dispostos de forma livre, ou seja, sem nenhum padrão de entrelaçamento entre a ponte RLC e o dispositivo pneumático. O fato de o cabo estar livre tem influência e impacta na incerteza da medida.

A conexão entre o elemento e o dispositivo pneumático é realizado pelo contato apresentado na Figura 2.6.



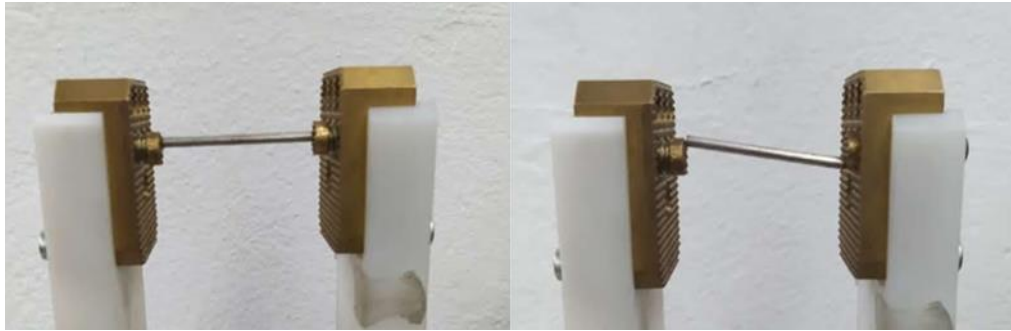
**Figura 2.6:** Contato utilizado pelo dispositivo pneumático em auxílio ao sistema de medição da ponte RLC

O dispositivo pneumático prende o elemento capacitivo com um contato em cada face da bobina e a medição é realizada. Nos modelos padrões das ponteiras RLC os cabos possuem um *design* de entrelaçamento, enquanto que no processo de medição realizado na regeneração nº01 eles estão livres. Tal característica associa-se às interferências eletromagnéticas no sinal quando há danos na malha de isolamento eletromagnética do cabo coaxial. O entrelaçamento, ou par trançado, se apresenta com uma menor suscetibilidade às interferências quando comparado a uma disposição aleatória dos cabos. Além disto, com os cabos trançados há menos impedância parasita.

O contato atual possui um sistema de amortecimento que visa amenizar o impacto do dispositivo pneumático no elemento capacitivo, todavia, o amortecimento influencia na pressão entre o elemento e o dispositivo pneumático. Esse fenômeno agrega incerteza ao sistema de medição.

O processo atual de calibração da ponte RLC é realizado com a utilização de um pino inserido entre os contatos do dispositivo pneumático. Este método possui um potencial de gerar incertezas no processo, uma vez que o ângulo entre pino e contato pode sofrer variações. Essas variações angulares alteram a impedância visualizada pela ponte RLC ocasionando em um deslocamento das médias obtidas e conseqüentemente influenciando nos resultados.

A situação relatada é demonstrada na Figura 2.7 onde pode-se notar a diferença angular do pino.



**Figura 2.7: Diferença angular no pino durante a calibração da ponte RLC**

### **3. Materiais e métodos**

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na análise do sistema de medição da resistência série equivalente e da capacitância de capacitores de potência. Será discutido o funcionamento e a calibração da ponte RLC.

#### **3.1 Funcionamento e calibração da ponte RLC**

A ponte RLC é composta por 4 terminais, sendo que entre dois terminais tem-se uma diferença de potencial e os outros dois possuem a passagem de corrente elétrica. Uma vez conectado ao objeto que será mensurado, a ponte RLC irá aplicar uma tensão de  $1 \sin(2\pi f t + \phi)$  (mV) e uma corrente de até 300 mA. A frequência  $f$ , deve ser escolhida dependendo das características físicas do componente que está sendo submetido a medição e de qual grandeza será mensurada: capacitância, indutância ou resistência. Deste modo, é possível definir com maior precisão a intensidade da grandeza que está sendo medida.

Visando a qualidade do produto é necessário dimensionar os elementos construtivos do capacitor de modo a obter a menor ESR possível. Assim, para que seja realizado o controle de qualidade sobre essa característica faz-se necessário uma medição confiável, de precisão e exatidão conforme a metodologia de MSA proposta por Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation (2010).

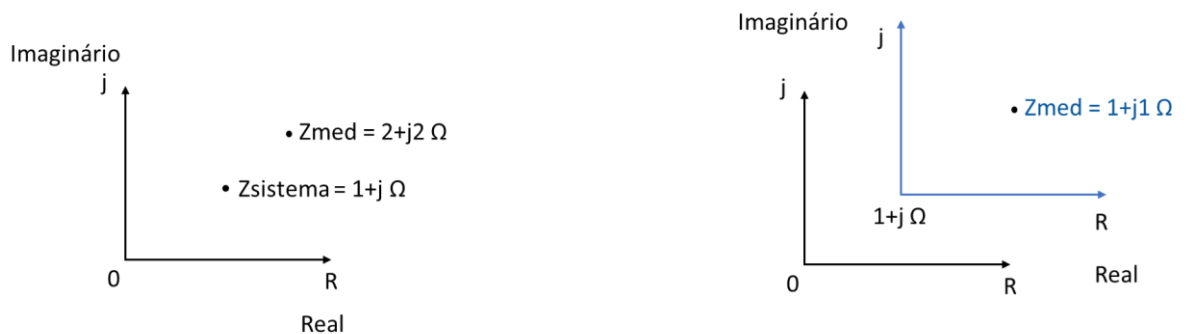
Posto isso, a ESR é definida como um fator de qualidade dos capacitores, sendo estabelecida como critério de aprovação. Contudo, devido a elevada sensibilidade requerida para medir essas grandezas os equipamentos utilizados podem sofrer influências externas durante o processo de



medição. A exemplo dessas influências destaca-se a resistência utilizada durante a calibração da ponte RLC e a pressão exercida pelas ponteiros sobre o elemento .

Define-se a calibração da ponte RLC como o procedimento para estabelecer a impedância vista pelo instrumento de medição. Supondo que seja tomada uma medição de maneira avulsa e obtenha-se a impedância  $Z = 2 + j2 \Omega$  como é demonstrado na Figura 3.1. A medição representa a impedância do objeto medido mais a impedância dos utensílios utilizados, como cabos e conectores.

Ao realizar o processo de calibração da ponte RLC a impedância dos cabos e contatos é “removida”, ou seja, o eixo é deslocado para o ponto da impedância dos utensílios, de modo que, quando a medição for realizada, somente os parâmetros do componente em análise serão mensurados.



**Figura 3.1: Sistema de calibração da ponte RLC no plano imaginário**

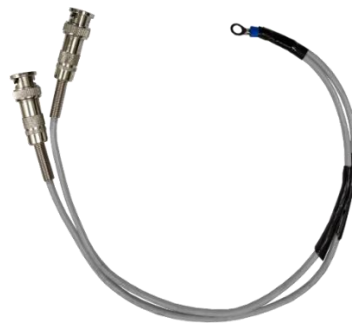
Em teoria, após a execução da calibração, a ponte RLC deveria visualizar somente a impedância do elemento em análise. Esta afirmativa procede quando se utiliza os cabos e as ponteiros padrões das pontes RLC, mas durante o processo de fabricação não é possível utilizá-las devido ao seu design. Na Figura 3.2 é exposto um exemplar das ponteiros/cabos padrões.



**Figura 3.2: Ponteira padrão da ponte RLC**

Nota-se a que a ponteira/cabo padrão possui um sistema de isolamento que percorre o corpo dos cabos, tendo abertura somente próximo aos conectores BNC e ponteira. Além disso, é utilizado um cabeamento coaxial para a transmissão do sinal com o objetivo de inibir interferências eletromagnéticas externas.

O modelo de ponteira/cabos utilizados na regeneração nº01 se assemelham aos da imagem apresentada na Figura 3.3. Também são utilizados cabos coaxiais semelhantes aos padrões, entretanto, não há uma proteção externa. Desta forma, caso haja qualquer dano no cabo é possível que a malha de isolamento eletromagnética interna sofra danos e perca a sua propriedade de isolamento, comprometendo o sistema de medição.



**Figura 3.3: Ponteiras utilizadas na regeneração nº01**

O processo de calibração da ponte RLC é realizado em duas etapas:

1. As ponteiras da ponte RLC são separadas e aplica-se uma diferença de potencial entre as ponteiras com o circuito aberto.
2. Após o processo de circuito aberto, as ponteiras devem ser colocadas em curto circuito e a ponte RLC irá aplicar uma corrente entre os terminais.

Visando mensurar a relação entre a impedância do objeto utilizado durante a calibração da ponte RLC e a qualidade dos dados medidos realizou-se um ensaio comparativo com 3 modelos diferentes de objetos, sendo eles:

- Pino A:

O pino é semelhante ao modelo utilizado no processo fabril da regeneração nº01 e possui uma resistência próxima a utilizada para as calibrações das pontes RLC do laboratório de capacitores. O pino é apresentado na Figura 3.4.



**Figura 3.4: Pino A**

As características do pino são apresentadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1: Características técnicas do pino A**

Dados técnicos	
Diâmetro	3.45 mm
Comprimento	50.60 mm
Metal	Cobre
Resistência	90 $\mu\Omega$

- Placa de cobre:

Utilizou-se a placa de cobre apresentada na Figura 3.5 para o ensaio comparativo da calibração da ponte RLC. As informações técnicas da placa são exibidas na Tabela 3.2.



**Figura 3.5: Placa de cobre**

**Tabela 3.2: Informações técnicas da placa utilizada**

Dados técnicos	
Largura	46.80 mm
Comprimento	24.55 mm
Profundidade	0.42 mm
Metal	Cobre
Resistência	150 $\mu\Omega$

- Fio de cobre:

O fio de cobre apresentado na Figura 3.6 também foi utilizado como objeto para o ensaio comparativo da calibração da ponte RLC. As informações técnicas são apresentadas na Tabela 3.3.



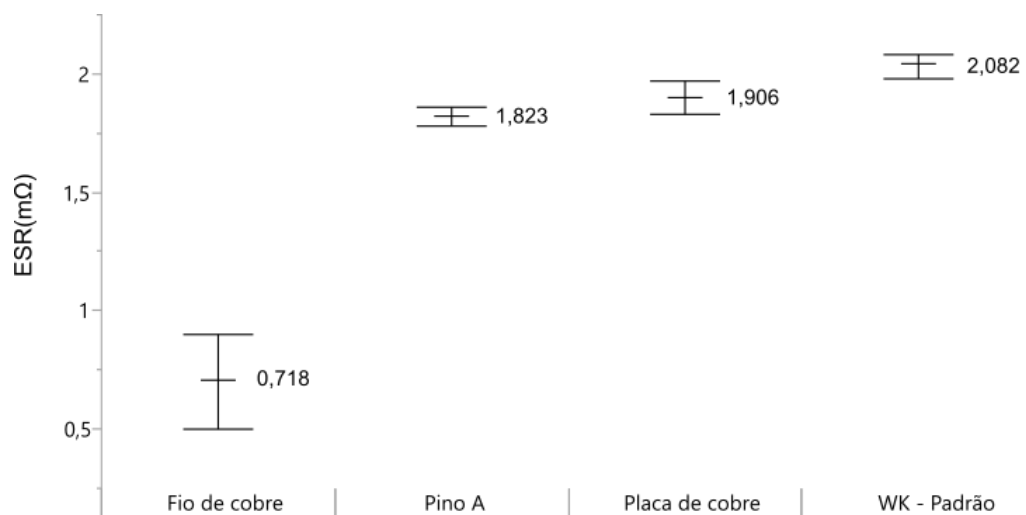
**Figura 3.6: Fio de cobre**

Tabela 3.3: Dados do fio de cobre

Dados técnicos	
<b>Diâmetro</b>	1.47 mm
<b>Comprimento</b>	52.77 mm
<b>Metal</b>	Cobre
<b>Resistência</b>	530 $\mu\Omega$

Além dos objetos descritos, utilizou-se um conjunto com 10 elementos capacitivos da linha PECWE (*Power Electronic Capacitor WEG Electrical-Vehicle*), tomando 3 medições da ESR para cada amostra. A influência da resistência do elemento utilizado na calibração da ponte RLC é analisada de acordo com a média da resistência e a elasticidade do intervalo das medições visualizadas pela ponte RLC com o dispositivo pneumático em comparação com a leitura da resistência utilizando os cabos e as ponteiros padrões da ponte Wayne Kerr.

A Figura 3.7 traz a média da ESR encontrada com cada objeto.

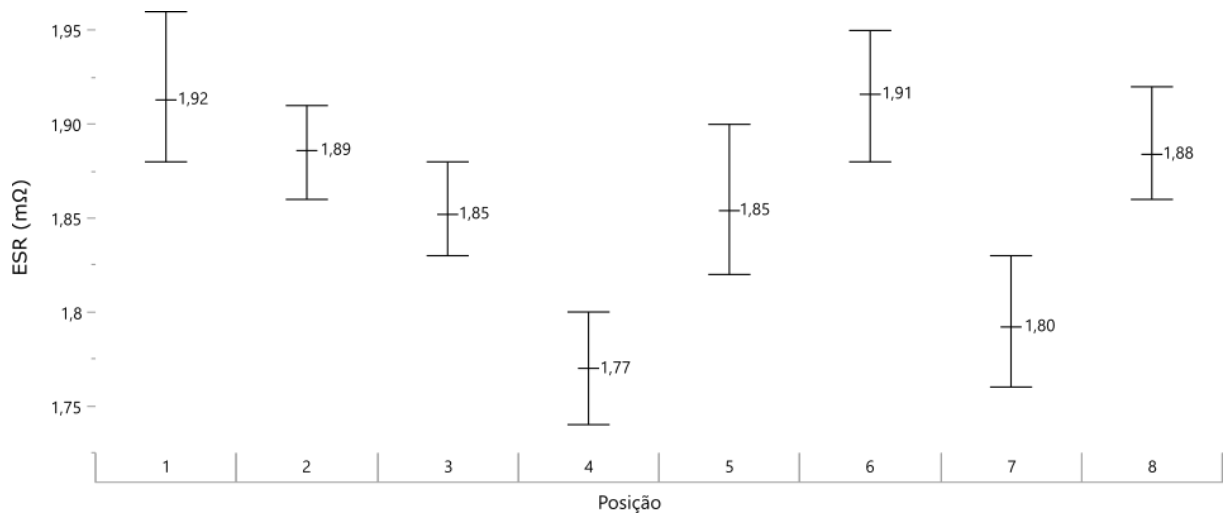


**Figura 3.7: Média da ESR no estudo da calibração da ponte RLC**

O fio de cobre apresenta o maior deslocamento da média em relação aos valores padrões da Wayne Kerr, além de ter a maior variabilidade. A placa de cobre possui a média mais próxima do padrão, entretanto, o pino A apresentou baixa variabilidade nas medições e um deslocamento passível de ser contornado em relação à média padrão das medições.

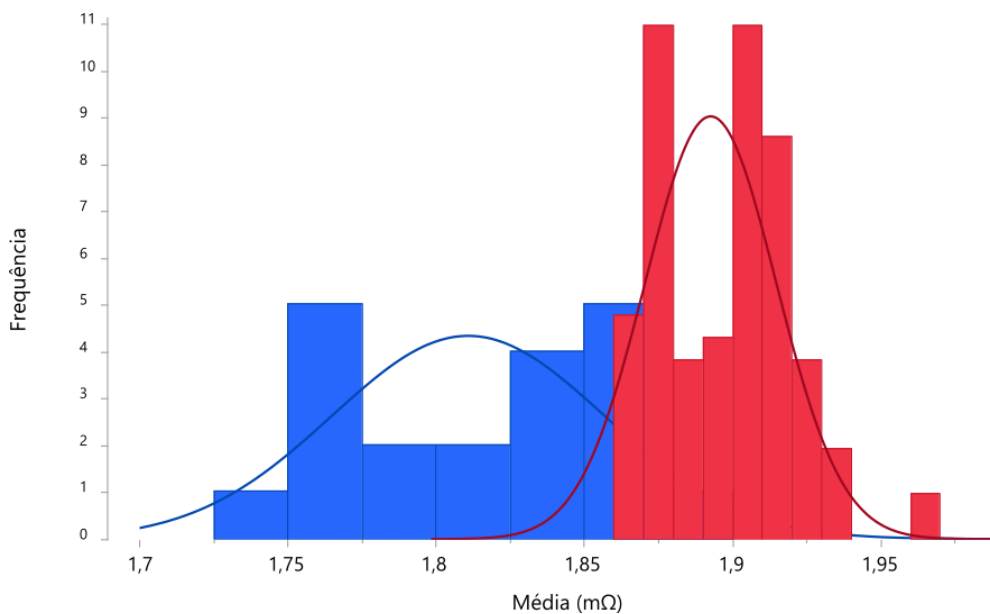
Com base nesses dados determinou-se que o pino A será utilizado como objeto para o procedimento de calibração da ponte RLC a ser implementado nos ensaios envolvendo os cenários em estudo.

Depois de definir o pino A como objeto auxiliar na calibração da ponte RLC realizou-se um ensaio visando analisar o impacto que a disposição angular do objeto apresentado na Figura 2.6 gera no sistema de medição. Para tal, tomaram-se 10 medições de ESR de um elemento capacitivo posto sobre as mesmas condições físicas, materiais e variando a posição angular do pino durante a calibração da ponte RLC. O procedimento foi repetido 8 vezes. As médias das resistências são exibidas na Figura 3.8.



**Figura 3.8: Média da ESR para o estudo de calibração**

Analisando a Figura 3.8 pode-se inferir que o método atual propicia uma variação entre as médias da ESR, uma vez que, dependendo da posição do pino a impedância vista pela ponte RLC pode aumentar ou diminuir. A Figura 3.9 apresenta a distribuição normal dos dados obtidos com o pino na horizontal, representado na cor vermelha e em azul os dados do pino posto com uma diferença angular.



**Figura 3.9: Distribuição normal da ESR média das amostras utilizadas no estudo de calibração da ponte RLC.**

A Figura 3.9 evidencia que a calibração da ponte RLC realizada com o pino na horizontal possui mais precisão nas medições, por outro lado, quando há uma diferença angular a curva de distribuição é achatada e deslocada, ou seja, há uma perda da exatidão e precisão.

### 3.2 Análise da disposição dos cabos, pressão mecânica entre contato e capacitor, quantidade e tipo de contato

Foram elaborados experimentos visando abordar as variáveis envolvidas no sistema de medição como: disposição dos cabos, contato, pressão etc. Deste modo, os seguintes grupos e cenários foram criados:

**Grupo 1:** Do cenário 1 ao 6 é utilizado um contato com superfície rugosa, sistema de amortecimento, os cabos e a quantidade de contatos são variados.

Cenário	Disposição dos cabos	Quantidade de contato	Amortecimento
1	Livres	1	Sim
2	Entrelaçados	1	Sim
3	Livres	2	Sim
4	Entrelaçados	2	Sim
5	Livres	3	Sim
6	Entrelaçados	3	Sim

**Grupo 2:** Os cenários 7, 8, 9 e 10 abordam o uso de um contato com superfície lisa, o sistema de amortecimento e os cabos são variados.

Cenário	Disposição dos cabos	Quantidade de contato	Amortecimento
7	Livres	1	Sim
8	Entrelaçados	1	Sim
9	Livres	1	Não
10	Entrelaçados	1	Não

**Grupo 3:** Do cenário 11 ao 16 é utilizado um contato com superfície rugosa, sem sistema de amortecimento, os cabos e a quantidade de contatos são variados.

Cenário	Disposição dos cabos	Quantidade de contato	Amortecimento
11	Livres	1	Não
12	Entrelaçados	1	Não

13	Livres	2	Não
14	Entrelaçados	2	Não
15	Livres	3	Não
16	Entrelaçados	3	Não

Os experimentos foram conduzidos no laboratório de capacitores sendo realizado seguindo o método descrito a seguir:

1. Realizar a calibração da ponte RLC em circuito aberto.
2. Realizar a calibração da ponte RLC em circuito fechado.
3. Tomar 10 medições da ESR sobre uma amostra capacitiva em cada um dos cenários apresentados.
4. Realizar a troca de cenário. A cada troca a calibração da ponte RLC é refeita.

Utilizaram-se 3 modelos de ponte RLC para auxiliar os experimentos, sendo eles:

WAYNE KERR – nº de série 1291565

EUCOL U2816A – nº de série 109-D15-176

EUCOL U2810D – nº de série 105-H16-626

Majoritariamente a ponte mais utilizada no processo de medição da fábrica é o modelo U2810D, portanto utilizaram-se três exemplares denominados:

**EUCOL U2810D - N°01:** Ponte reserva da regeneração, EQ 57156, N° de série: 105-H16-626.

**EUCOL U2810D - N°02:** Ponte ativa na regeneração, EQ 62187, N° de série: 105-F19-825.

**EUCOL U2810D - N°03:** Ponte ativa na regeneração, EQ 62186, N° de série: 105-F19-82.

## 4. Avaliação do presente sistema de medição

Este capítulo apresenta os resultados obtidos utilizando o índice de repetibilidade e reprodutibilidade dos 16 cenários descritos previamente. Além disso, identifica as variáveis com maior impacto no sistema de medição.

A Tabela 4.1 apresenta o índice de repetibilidade e reprodutibilidade das medições da ESR com a ponte Wayne Kerr, ponte Eucol U2816A e Eucol U2810D utilizando os cabos e ponteiras padrões de cada ponte. Observou-se que mesmo utilizando as ponteiras padrões, a ponte RLC Eucol U2816A apresenta um elevado índice R&R.



Analisando as características da ponte U2816A pelo manual do equipamento e guia do usuário, observa-se que a ponte possui um fundo de escala para medições que estejam na ordem de  $\Omega$ ,  $k\Omega$  e  $M\Omega$ . Por outro lado, a escala de variações dos capacitores de potência se concentra em  $\mu\Omega$  e  $m\Omega$ , ou seja, o equipamento não possui resolução suficiente para medições nessas faixas. Essa divergência do fundo de escala é refletida sobre o índice R&R da ponte que naturalmente é mais elevado do que os demais por possuir maior incerteza.

Tabela 4.1: Índices R&R com os equipamentos padrões

	Wayne Kerr	U2816A	U2810D
R&R	0,171	0,218	0,154

A Figura 4.1 apresenta as médias da ESR para as duas pontes RLC em análise. A ESR média esteve próxima em todos os cenários cooperando para uma exatidão semelhante entre as duas pontes. Entretanto, nota-se que há uma alta variabilidade dos dados, principalmente na ponte Eucol U2816A.

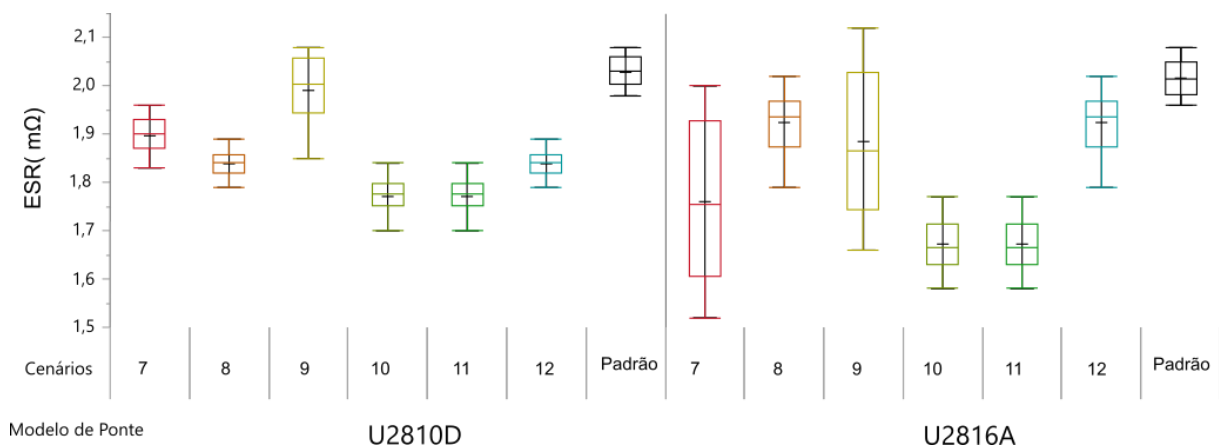


Figura 4.1: Índice R&R sem o sistema de amortecimento na medição

#### 4.1 Ponte RLC Eucol U2816A

Este tópico irá abordar os resultados alcançados com o modelo de ponte RLC da Eucol U2816A dentro de todos os 16 cenários abordados. Logo, serão apresentados os índices obtidos segundo cada grupo especificado.

O índice R&R da ponte U2816A segundo cada cenário do grupo 1 conforme descrito no tópico 3.2 é exposto na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Índice R&amp;R da ponte U2816A no grupo 1

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
R&R	0,580	0,546	0,518	0,510	0,419	0,400

A Tabela 4.3 exibe os dados do grupo 2 dos cenários para a ponte U2816A.

Tabela 4.3: Índice R&amp;R da ponte U2816A no grupo 2

	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
R&R	0,910	0,805	0,298	0,290

O índice R&R da ponte U2816A para o grupo 3 de cenário é apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Índices R&amp;R dos cenários pertencentes ao grupo 3 para a ponte U2816A

	Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
R&R	0,321	0,326	0,321	0,324	0,419	0,360

É possível notar que em todos os cenários o índice R&R permaneceu acima do critério estabelecido de 0.30 ou próximo deste limiar, portanto, os dados obtidos a partir de medições utilizando a ponte RLC U2816A não possuem confiabilidade.

## 4.2 Ponte RLC Eucl U2810D

Este tópico apresenta os índices de repetibilidade e reprodutibilidade encontrados com a análise dos cenários descritos previamente utilizando a ponte RLC Eucl U2810D.

A Tabela 4.5 exibe o índice R&R da ponte U2810D para os cenários do grupo 1 conforme descrito no tópico 3.2.

Tabela 4.5: Índice R&amp;R da ponte U2810D no grupo 1

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
R&R	0,506	0,554	0,548	0,540	0,409	0,429

Os resultados do grupo 1 caracterizam a influência da pressão (sistema de amortecimento) no sistema de medição. Os cenários 7 e 8 possuem o amortecimento no contato, em contrapartida, os cenários 9 e 10 não possuem amortecimento. A Tabela 4.6 exibe os dados do grupo 2.

Tabela 4.6: Índice R&R da ponte U2810D no grupo 2

	Cenário 7	Cenário 8	Cenário 9	Cenário 10
R&R	0,725	0,701	0,268	0,210

Os índices do grupo 3 para a ponte U2810D são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Índices R&R dos cenários pertencentes ao grupo 3 para a ponte U2810D

Cenário 11	Cenário 12	Cenário 13	Cenário 14	Cenário 15	Cenário 16
0,207	0,142	0,377	0,460	1,046	0,572

Analisando os resultados apresentados pela ponte U2810D observa-se que o sistema de amortecimento exerce influência negativa no sistema de medição, além disso, os cenários onde os cabos foram entrelaçados obtiveram índices menores.

A Figura 4.2 apresenta o resultado de todos os cenários abordados para os dois modelos de pontes RLC. A ponte U2816A obteve índices mais elevados que a ponte U2810D.

Dentre os cenários levantados, destacam-se os cenários 10,11 e 12 que obtiveram um índice R&R bom ou no limiar entre bom e aceitável, ou seja, são cenários passíveis de se trabalhar e desenvolver métodos de medição.

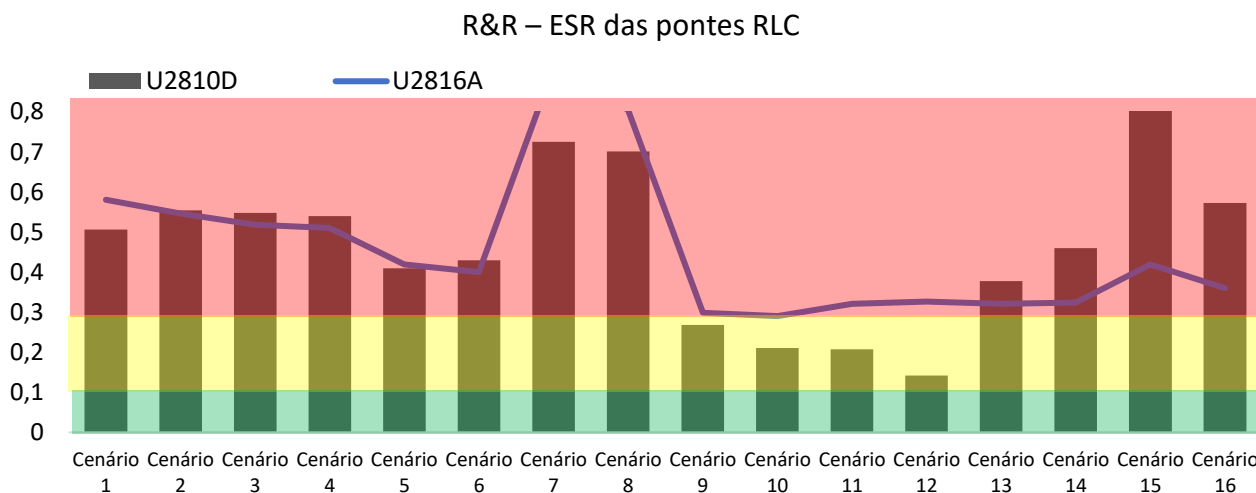


Figura 4.2: Índice R&R dos cenários para as pontes RLC

Após o levantamento dos índices, o estudo direcionou-se em analisar as influências de cada variável no sistema, ou seja, mensurar o impacto que cada variável individualmente exerce sobre o sistema e quais combinações apresentam melhor desempenho.

### 4.3 Análise dos contatos – Sem a influência do sistema de amortecimento

Neste tópico é analisada a influência do tipo de contato/conector que é posto entre o dispositivo pneumático e o elemento capacitivo para a realização da medição de capacitância e resistência série equivalente. Considerando apenas os cenários onde não houve a influência do sistema de amortecimento no sistema pneumático.

A Figura 4.3 apresenta a comparação do desempenho dos contatos com superfície lisa e rugosa em contraste com o padrão da ponte U2810D. Nesta análise consideraram-se os cenários que apresentaram os melhores índices R&R (cenários 10 e 12).

O índice R&R atingido com o contato de superfície rugosa está abaixo do encontrado com as ponteiros padrões da ponte U2810D. Logo, pode-se inferir o contato rugoso apresenta performance similar ou superior as ponteiros padrões.

O contato liso apresenta um índice 36% maior do que o padrão do equipamento. Logo, gera mais incerteza nos sistemas de medição.

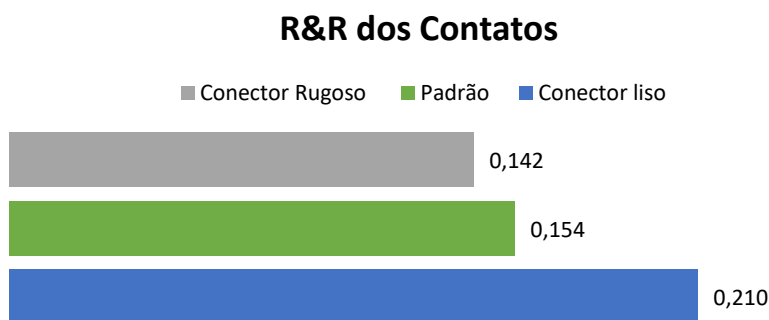


Figura 4.3: Índice R&R dos contatos

A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre os contatos de superfície lisa e rugosa com a ponte RLC U2810D.

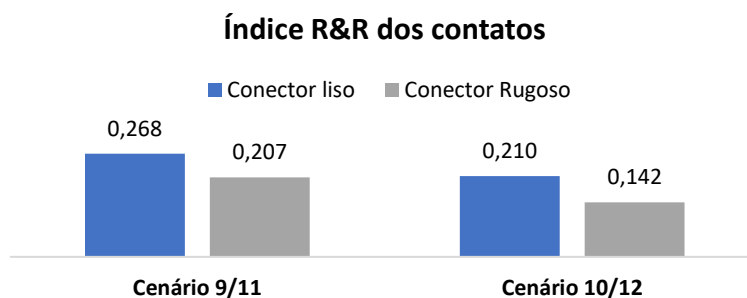


Figura 4.4: Índice R&R dos contatos por cenário 9/11 e 10/12

Em todos os cenários o contato com a superfície rugosa obteve um melhor desempenho. Havendo uma diferença de aproximadamente 30% entre os cenários 9 e 11 e 45% entre os cenários 10 e 12.

#### 4.4 Análise da quantidade de contato

Este tópico apresenta os resultados obtidos a partir da análise da quantidade de contatos/conectores entre o dispositivo pneumático e o elemento capacitivo durante a medição da capacitância e resistência série equivalente.

A quantidade de contatos foi variada entre os cenários com o objetivo de mensurar se o aumento da área de contato com a bobina, influencia positivamente nos resultados. As Figuras 4.5 e 4.6 trazem todos os índices R&R encontrados para a ponte U2810D.

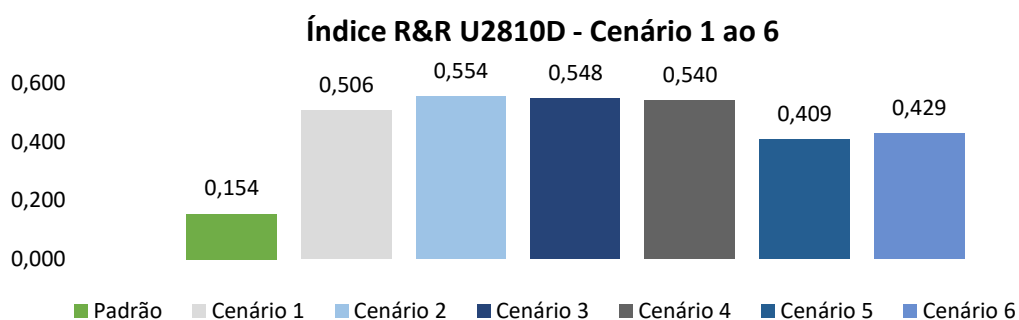
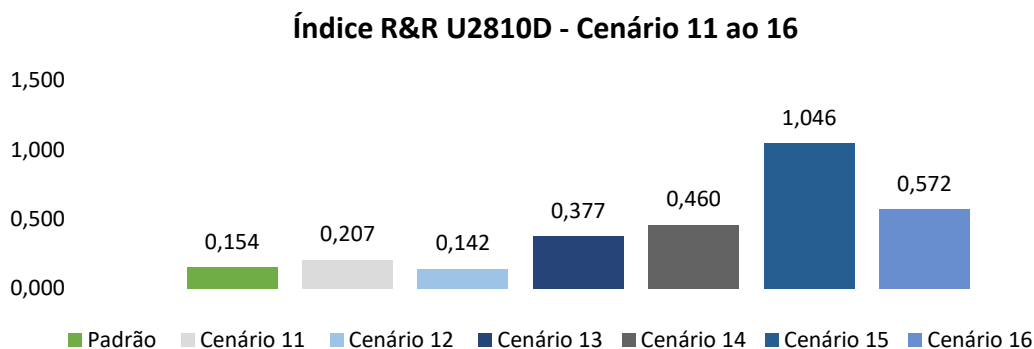


Figura 4.5: R&R U2810D dos cenários 1 ao 6

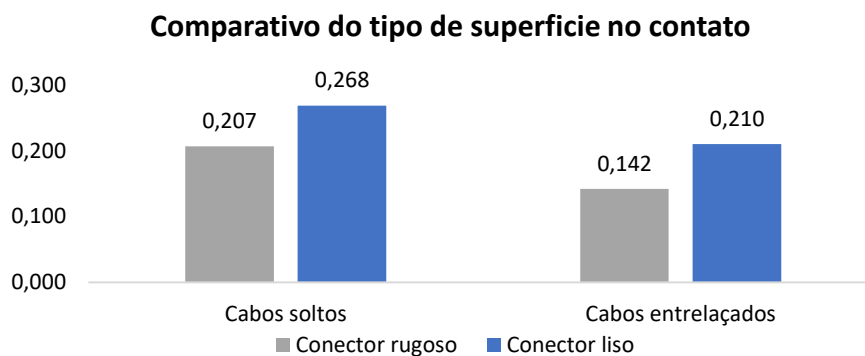
A Figura 4.5 evidencia uma medição uniforme independentemente da quantidade de contatos e disposição física dos cabos. Este fenômeno ocorre porque o sistema de amortecimento exerce mais influência no processo de medição do que as demais variáveis. Logo, não há como mensurar o impacto da quantidade de contatos a partir desta Figura, todavia, fortalece o indicativo de que o sistema de amortecimento gera muita incerteza nas medições.

Já a Figura 4.6 apresenta as informações dos cenários onde o sistema de amortecimento foi removido, neste caso, pode-se observar que há uma tendência de melhoria com os cabos entrelaçados (cenários 12,14,16). Entretanto, não há um indicativo de que aumentando a quantidade de conectores o índice melhora. Os cenários 11 e 12 contêm apenas um contato entre o elemento capacitivo e o dispositivo pneumático, enquanto que, no cenário 15 e 16 há 3 contatos.



**Figura 4.6: R&R U2810D dos cenários 11 ao 16**

A Figura 4.7 traz um comparativo onde a disposição dos cabos e a superfície do contato foram alteradas, nota-se que contato rugoso obteve os melhores índices.



**Figura 4.7: Comparativo do tipo de superfície no contato**

## 4.5 Análise da disposição dos cabos

Este tópico aborda a influência que a disposição dos cabos exerce no sistema de medição, sendo eles postos de maneira entrelaçada ou livres.

A Figura 4.7 também torna explícito que os cabos entrelaçados cooperam para o aumento da qualidade das medições. Independentemente do tipo de superfície utilizada os resultados com os cabos entrelaçados são superiores. Esta característica está diretamente associada às interferências eletromagnéticas exercidas sobre o sinal. O cabo coaxial possui como característica a capacidade de reduzir os efeitos da interferência eletromagnética do sinal que é transmitido, entretanto, para que esta propriedade seja preservada é necessário que o cabo esteja em boas condições e a malha protetora preservada.

Dentro de um ambiente fabril, com muita ação e movimentação acontecendo simultaneamente é comum que haja danos no cabeamento, logo, os resultados apontam que o

cabo utilizado já não possuía a capacidade de reduzir as interferências eletromagnéticas do sinal de maneira satisfatória.

A principal hipótese para os índices observados é de que a calibração da ponte RLC realizada com o cabo em par trançado é menos suscetível a interferências eletromagnéticas quando comparado ao cabo livre.

## 5. Proposta de um sistema de medição para a capacitância e a resistência série equivalente

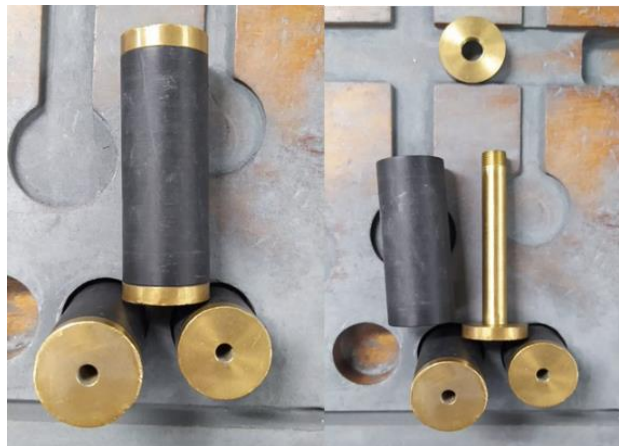
Neste capítulo é desenvolvido uma proposta para o sistema de medição de capacitância e resistência serie equivalente fundamentando-se nos resultados obtidos na avaliação dos cenários avaliados no capítulo 4. É realizada uma análise com o índice R&R sobre o sistema proposto.

Com base nos resultados obtidos a utilização da ponte U1610A no sistema de medição foi descartada. Dentre os cenários abordados destacou-se o cenário 12. Deste modo, a seguinte proposta para o sistema de medição foi elaborada:

Tabela 5.1: Proposta de Sistema de Medição

Nº de contatos	Disposição dos cabos	Tamanho do cabo	Quantidade de voltas no cabo	Sistema de amortecimento	Ponte RLC	Calibração da ponte RLC
1/3	Entrelaçados	45 Centímetros	6 voltas	Ausente	U2810D	Pino A

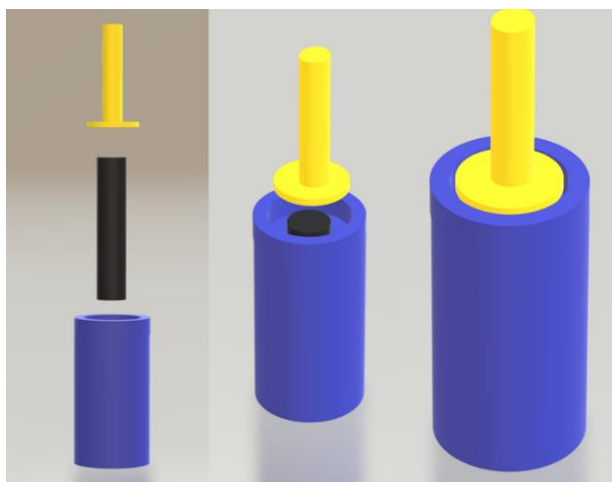
Para amenizar o impacto que a calibração da ponte RLC causa no sistema de medição, propõe-se a criação de um dispositivo a ser utilizado no processo de calibração das pontes RLC da regeneração nº01 seguindo a mesma ideologia do objeto que é utilizado na calibração da ponte RLC da regeneração nº02. A Figura 5.1 apresenta o objeto utilizado para a calibração da ponte RLC da regeneração nº02.



**Figura 5.1: Objeto utilizado para a calibração da ponte RLC da ponte RLC na regeneração n°02**

Seguindo este padrão, propõe-se um objeto que encaixe perfeitamente no contato do dispositivo pneumático, impedindo que ocorram alterações angulares no pino.

A área em preto refere-se ao pino A e em azul tem-se a área de um material isolante. Na Figura 5.2 temos a representação do contato (amarelo), pino A (preto) e material isolante (azul). O intuito do objeto é manter a estabilidade entre o contato e o pino metálico independente de quantas calibrações da ponte RLC sejam realizadas.



**Figura 5.2: Objeto proposto para a calibração da ponte RLC**

Para a proposta, os cabos devem estar entrelaçados. A Figura 5.3 apresenta a disposição do entrelaçamento utilizado.





Figura 5.3: Cabo entrelaçado

A proposta foi implementada com a utilização de 3 pontes RLC do modelo U2810 conforme descrito no tópico 3.2. Avaliou-se o uso de um contato de superfície lisa, rugosa e 3 contatos de superfície rugosa.

O índice R&R para a resistência série equivalente obtido neste ensaio é apresentado na Figura 5.4.

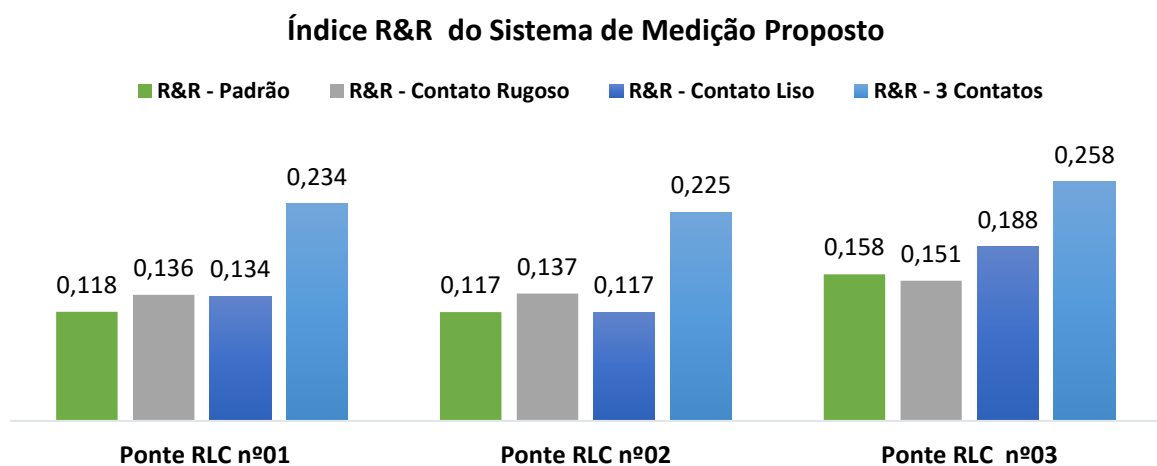
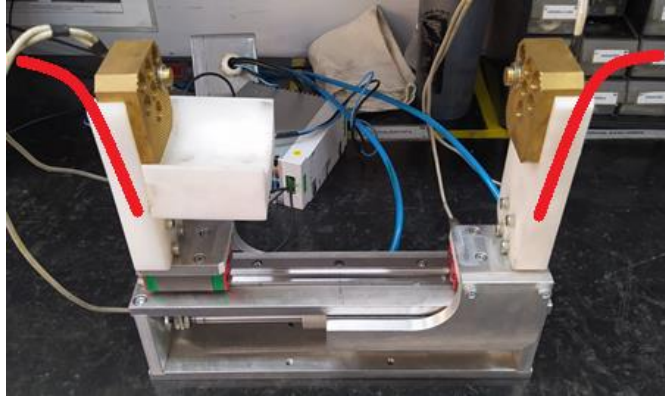


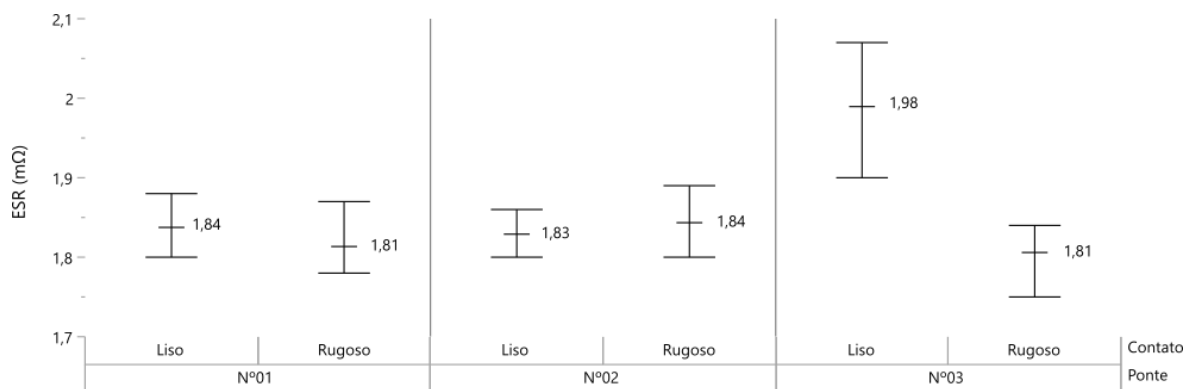
Figura 5.4: Índice R&R do Sistema de Medição Proposto

Analisando a Figura 5.4 descartou-se a utilização de 3 contatos para as medições. Em teoria, quanto maior a área de contato entre a bobina e o ponto de medição melhor será a medição. Contudo, ao utilizar 3 contatos o dispositivo pneumático tende a aumentar a distância entre as hastes devido a tensão exercida pelo sistema pneumático. A Figura 5.5 exibe a tendência de comportamento do dispositivo com o uso de 3 contatos.



**Figura 5.5: Tendência de comportamento do dispositivo pneumático utilizado no sistema de medição**

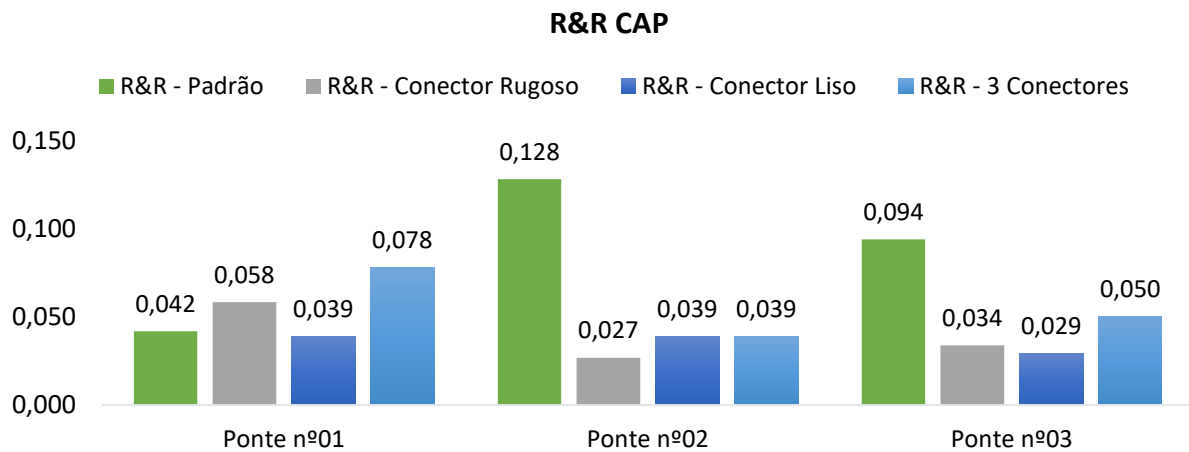
As médias da ESR de acordo com as pontes RLC do modelo U2810D do ensaio da proposta são apresentadas na Figura 5.6.



**Figura 5.6: Médias da ESR mensuradas com o sistema de medição proposto**

O pino com a superfície rugosa apresentou menor variabilidade nas três pontes RLC do modelo U2810D analisadas.

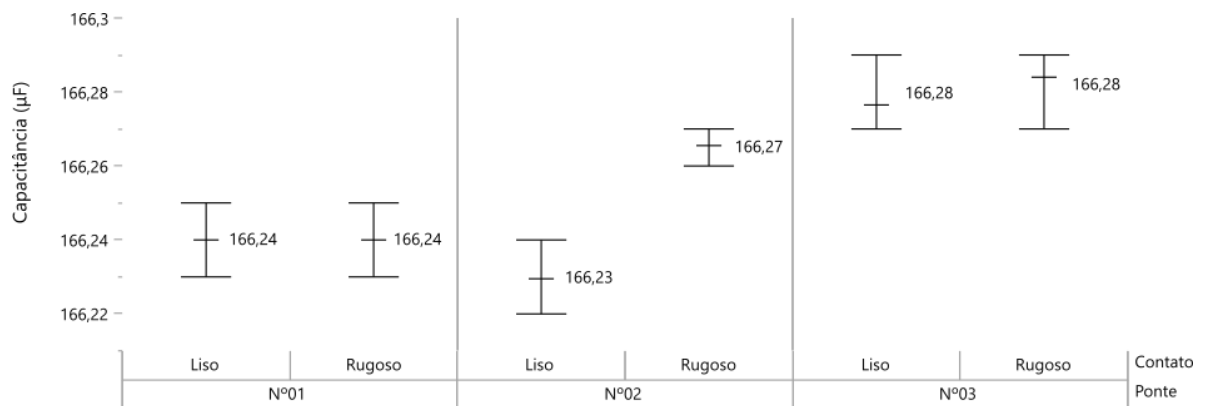
O índice R&R também foi tomado para a capacitância da amostra analisada, seguindo os mesmos critérios adotados para ESR. Logo, a Figura 5.7 apresenta o índice com as pontes padrão da ponte RLC e os índices alcançados segundo a proposta estabelecida.



**Figura 5.7: Índice R&R da medição de capacitância**

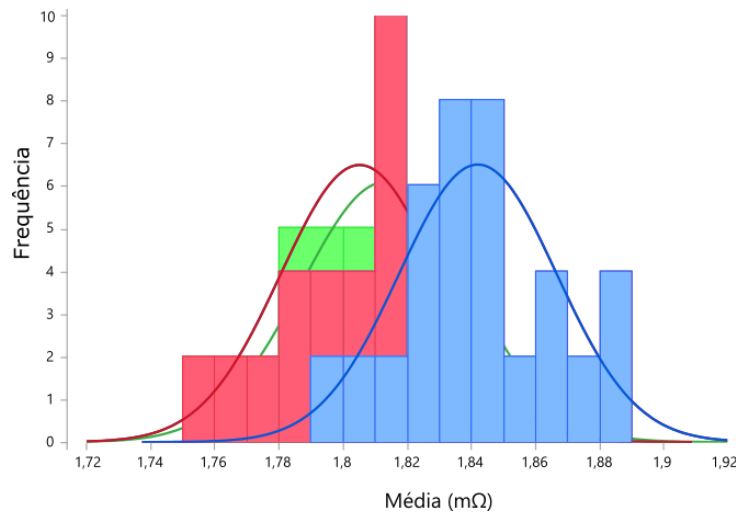
Note que a maior parte dos índices obtidos com a proposta elaborada estão abaixo dos índices padrões dos equipamentos.

A média da capacitância da amostra em cada ponte RLC do modelo U2810D é apresentada no Figura 5.8, nota-se que a variabilidade com o pino rugoso é menor.



**Figura 5.8: Média da capacitância obtida com o sistema de medição proposto**

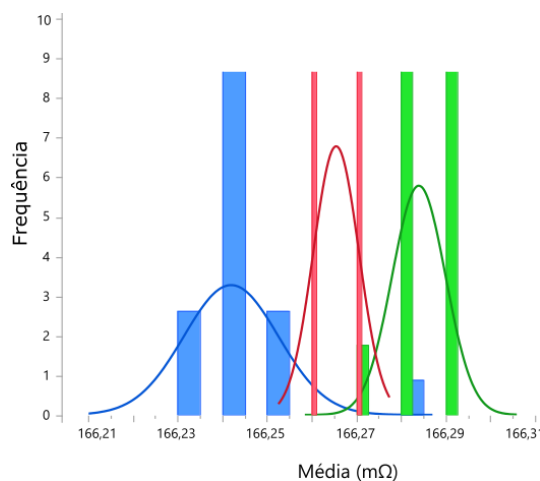
A Figura 5.9 apresenta as curvas de distribuição normal dos dados obtidos para cada ponte RLC. Em verde a ponte nº01, vermelho a ponte RLC nº02 e azul a ponte RLC nº03.



**Figura 5.9: Distribuição normal dos dados de ESR do sistema proposto**

Observa-se que as curvas apresentaram um comportamento similar, sendo que a diferença ocorre devido a fatores construtivos da ponte e/ou da calibração dos equipamentos. Tomando o intervalo 1,72 mΩ até 1,92 mΩ e uma média de 1,82 mΩ obtendo uma variação máxima de 5% para o erro devido ao sistema de medição.

A distribuição normal dos dados das medições de capacitância é apresentada na Figura 5.20. Note que houve pouca variabilidade no intervalo das medições.



**Figura 5.10: Distribuição normal dos dados de capacitância do sistema de medição proposto**

A partir dos dados apresentados na Figura 5.10 tem-se uma média de 166,26  $\mu\text{F}$  e um intervalo de 166,21  $\mu\text{F}$  até 166,31  $\mu\text{F}$  para a capacitância. Obteve-se uma variação máxima de 0,06% para o erro devido ao sistema de medição.

Atualmente o sistema de aprovação de elementos capacitivos é determinado por dois métodos.

1- Quando a variação da capacitância após o teste de descarga elétrica é superior a 0,25% a bobina é reprovada.

2- Quando a variação da ESR após o teste de descarga elétrica é superior a 20% a bobina é reprovada.

Tomando a proposta elaborada pelo estudo como base para o sistema de medição é possível definir um erro percentual de 0,06% para a capacitância devido ao próprio sistema de medição tendo um R&R caracterizado como bom ou ótimo.

A equação 3 apresenta a composição do critério de aprovação.

$$\textit{Critério de aprovação} = \textit{Limite Engenharia} + \textit{Erro do sistema de medição} \quad (3)$$

Na equação 4 tem-se a composição dos valores estabelecidos pelo controle de qualidade e o estipulado para o sistema de medição de capacitância proposto.

$$\textit{Critério de aprovação CAP} = \Delta 0.25\% \textit{ CAP} + \Delta 0.06\% \textit{ CAP} \quad (4)$$

Na equação 5 é apresentado o critério em relação a resistência série equivalente.

$$\textit{Critério de aprovação ESR} = \Delta 20\% \textit{ ESR} + \Delta 5\% \textit{ ESR} \quad (5)$$

## 6. Conclusão

Os resultados apontam para variações no sistema de medição devido a causas aleatórias, ou seja, pequenas causas que somadas geram impacto na qualidade dos dados obtidos. Exemplos:

A área da bobina que entra em contato com o sistema de medição;

O ponto da bobina que está em contato com o sistema de medição seja mais próximo do eixo ou mais longe;

A variação da pressão do sistema de amortecimento, sendo possível visualizar a influência desta variável individualmente.

O índice R&R da proposta é semelhante ao índice obtido com as ponteiras padrões do equipamento. Desta forma, a confiabilidade, exatidão e precisão das medidas obtidas com a ponte RLC U2810D se assemelha as medidas obtidas utilizando os equipamentos padrões da mesma.

A análise do sistema de medição utilizando o índice de repetibilidade e reprodutibilidade expos algumas vulnerabilidades do sistema atual. Além disso, o estudo identificou as variáveis do sistema de medição de maior impacto e propôs um sistema para amenizar o impacto destas variáveis. O sistema proposto foi validado utilizando o mesmo critério estatístico e sugeriu novos critérios para a aprovação dos elementos capacitivos nos testes de carga e descarga.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a implementação do sistema proposto com uma quantidade maior de amostras. Para a análise dos resultados propõe-se ainda a utilização da metodologia Six Sigma, fazendo uso de algumas ferramentas como Cp e Cpk.

## 7. Referências Bibliográficas

- ALEXANDRE, C. K., & SADIKU, M. N. (2013). *Fundamentos de Circuitos Elétricos 5.ed.* Porto Alegre: AMGH.
- B. Karanayil, V. G. (Oct. 2014). Performance Evaluation of Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters Using Electrolytic or Polypropylene Film Capacitors. *in IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1297-1306.
- BROWN, R. W., GRAY, D., & HARVEY, A. (2006). A Classical Capacitor Equivalent Circuit with Dependent Values. *TENCON 2006 - 2006 IEEE Region 10 Conference*.
- CARLOS DE TOLEDO, J. (2014). *Sistemas de medição e metrologia*. InterSaberes. Fonte: gepeq: <http://www.gepeq.dep.ufscar.br/wp-content/arquivos/MSA%20-%20Apostila%20-%2018112013.pdf>
- Chrysler Group LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation. (Junho de 2010). *MEASUREMENT SYSTEMS ANALYSIS*. AIAG.
- COSTA, EPPRECHT, & CARPINETTI. (2010). *Controle estatístico de qualidade*. Atlas 2ed.
- Gnonhoue, O. G.-S. (2021). Review of Technologies and Materials Used in High-Voltage Film Capacitors. *Polymers*, 13(5):766.
- Hua Li, X. H. (2015). Modeling of ESR in metallized film capacitors and its implication on pulse handling capability. *Microelectronics Reliability*, pg 1046-1053.
- M. H. El-Husseini, P. V. (2001). Effect of the geometry on the aging of metalized polypropylene film capacitors. *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230)*, 2061-2066 vol. 4.
- MESQUITA, F. J. (s.d.). *Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade de sistemas de Medição*. Fonte: slideplayer: <https://slideplayer.com.br/slide/10968215/>
- Nathan Valentine, M. H. (2019). Metallized film capacitors used for EMI filtering: A reliability review., *Microelectronics Reliability, Volume 92*, Pages 123-135.
- NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., & BRUNS, R. E. (2010). *Como fazer experimentos: Pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Porto Alegre: Bookman.
- Picci, M. R. (Oct. 2002). Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors. *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 30, no. 5, 1939-1942.
- RABUFFI, M. P. (2002). *Status quo and future prospects for metallized polypropylene energy storage capacitors*. *IEEE Transactions on Plasma Science*, v.30, n5, p1939-1942.
- WEG. (s.d.). *Capacitores para correção do fator de potência*. Fonte: static.weg.net: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hda/ha0/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-pt.pdf>
- Zhiwei Li, H. L. (2013). Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors. *Microelectronics Reliability*, 1962-1967.