

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA  
COORDENADORIA GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO, EXTENSÃO E PESQUISA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM GESTÃO E TECNOLOGIA EM  
SISTEMAS PRODUTIVOS

HUGO ALEXANDRE GARRIDO AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA RASTREABILIDADE  
METROLÓGICA DE TENSÃO DE RUPTURA DIELÉTRICA

São Paulo  
Maio/2026

HUGO ALEXANDRE GARRIDO AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA RASTREABILIDADE  
METROLÓGICA DE TENSÃO DE RUPTURA DIELÉTRICA

Dissertação apresentada como exigência para a Defesa no Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos do Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, sob a orientação do Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi.

Área de Concentração: Sistemas Produtivos

Linha de Pesquisa: Gestão na Inovação Tecnológica e Sustentabilidade

Projeto de Pesquisa: Padronização de sinais elétricos por equilíbrio eletrostático

ODS 7 – Energia Limpa e Acessível (A rastreabilidade metrológica assegura que medições de alta tensão sejam confiáveis), ODS 9 – Indústria, Inovação e Infraestrutura (contribuir para novos padrões metrológicos e infraestrutura de medição, fortalecendo a indústria elétrica nacional).

São Paulo

Maio/2026

FICHA ELABORADA PELA BIBLIOTECA NELSON ALVES VIANA  
FATEC-SP / CPS CRB8-8390

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A282d | <p>Aguiar, Hugo Alexandre Garrido</p> <p>Desenvolvimento de um sistema de medição para rastreabilidade metrológica de tensão de ruptura dielétrica / Hugo Alexandre Garrido Aguiar. – São Paulo: CPS, 2026.</p> <p>86 f. : il.</p> <p>Orientador (a): Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi</p> <p>Dissertação (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, 2026.</p> <p>1. Sistema de medição. 2. Indústria de energia. 3. Descarga eletrostática. 4. Lei de Paschen. 5. Alta tensão. I. Degasperi, Francisco Tadeu. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.</p> |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

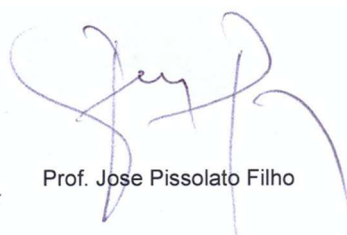
HUGO ALEXANDRE GARRIDO AGUIAR

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA  
RASTREABILIDADE METROLÓGICA DE TENSÃO DE RUPTURA  
DIELÉTRICA



---

Prof. Dr. Francisco Tadeu Degasperi  
Orientador – CEETEPS



---

Prof. Dr. José Pissolato Filho  
Examinador Externo – UNICAMP



---

Prof. Dr. Francisco del Moral Hernandez  
Examinador Interno – CEETEPS

São Paulo, 25 de junho de 2026

## RESUMO

AGUIAR, H. A. G. Desenvolvimento de um sistema de medição para rastreabilidade metrológica da tensão de ruptura dielétrica (Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

Esta dissertação caracteriza experimentalmente a tensão de ruptura dielétrica (VB) do argônio ultrapuro, sob condições controladas de pressão e de distância entre eletrodos, com o objetivo de estabelecê-la como grandeza passível de padronização metrológica e de validar a Lei de Paschen. O trabalho articula da seguinte forma: os fundamentos físicos das descargas em gases (campos elétricos, geometria de eletrodos, emissão eletrônica primária e secundária e o mecanismo de Townsend), as práticas metrológicas aplicadas ao vácuo e à alta tensão (com ênfase em rastreabilidade e avaliação de incertezas segundo o GUM) e a Design Science Research (DSR) como método de pesquisa tecnológica, que conduzem à construção e à avaliação de um artefato. Os experimentos, realizados em arranjo encapsulado com eletrodos semiesféricos de alumínio e rastreáveis às referências internacionais (IEC, ABNT, INMETRO, BIPM), tiveram a condição de 500 mbar selecionada para análise detalhada por sua estabilidade e aderência ao modelo teórico; a análise de incerteza apontou a distância entre eletrodos como principal fonte de variabilidade, com contribuições secundárias da pressão e da tensão. Os resultados mostraram concordância entre valores previstos e medidos, com erros relativos inferiores a 1% nos pontos críticos de 46,30 kV e 61,43 kV e correlação de Pearson superior a 0,99, confirmando a robustez do sistema de medição. Conclui-se que a integração entre fundamentos físicos, práticas metrológicas e método de pesquisa tecnológica fortalece a confiabilidade dos ensaios de alta tensão e fornece parâmetros validados (A e B) mais representativos para gases nobres encapsulados do que os valores generalistas da IEC 60052, em alinhamento com os ODS 7 e 9 e com a consolidação da infraestrutura metrológica nacional em alta tensão.

**Palavras-chave:** Sistema de medição. Indústria de energia. Descarga eletrostática. Lei de Paschen. Alta tensão.

## ABSTRACT

AGUIAR, H. A. G. Development of a measurement system for metrological traceability of dielectric breakdown voltage (Professional Master's in Management and Technology in Productive Systems) – Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, São Paulo, 2026.

This dissertation experimentally characterizes the dielectric breakdown voltage (VB) of ultra-pure argon, under controlled conditions of pressure and inter-electrode distance, aiming to establish it as a quantity amenable to metrological standardization and to validate Paschen's Law. The work integrates the following axes the physical fundamentals of gas discharges (electric fields, electrode geometry, primary and secondary electron emission, and the Townsend mechanism), the metrological practices applied to vacuum and high voltage (with emphasis on traceability and uncertainty evaluation according to the GUM), and Design Science Research (DSR) as a technological research method which lead to the construction and evaluation of an artifact. The experiments, carried out in an encapsulated arrangement with hemispherical aluminum electrodes and traceable to international references (IEC, ABNT, INMETRO, BIPM), had the 500 mbar condition selected for detailed analysis owing to its stability and adherence to the theoretical model; the uncertainty analysis identified the inter-electrode distance as the main source of variability, with secondary contributions from pressure and voltage. The results showed agreement between predicted and measured values, with relative errors below 1% at the critical points of 46.30 kV and 61.43 kV and a Pearson correlation above 0.99, confirming the robustness of the measurement system. It is concluded that the integration of physical fundamentals, metrological practices, and a technological research method strengthens the reliability of high-voltage testing and provides validated parameters (A and B) that are more representative for encapsulated noble gases than the general-purpose values of IEC 60052, in alignment with SDG 7 and SDG 9 and with the consolidation of the national high-voltage metrological infrastructure.

**Keywords:** Measurement system. Energy industry. Electrostatic discharge. Paschen's Law. High voltage.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Eletrodos planos, paralelos. ....                                         | 19 |
| Figura 2 – Eletrodos ponta-plano, paralelos.....                                     | 20 |
| Figura 3 – Eletrodos esféricos, paralelos.....                                       | 20 |
| Figura 4 – Eletrodos esférico-plano, paralelos .....                                 | 21 |
| Figura 5 – Raio ascendente.....                                                      | 22 |
| Figura 6 – Raio descendente.....                                                     | 23 |
| Figura 7 – Ilustração do mecanismo de sputtering.....                                | 25 |
| Figura 8 – Representação da avalanche eletrônica.....                                | 26 |
| Figura 9 – Curva de Paschen para descarga em ar .....                                | 29 |
| Figura 10 – Argônio ionizado.....                                                    | 33 |
| Figura 11 – Pirâmide hierárquica da metrologia .....                                 | 39 |
| Figura 12 – Grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades .....             | 40 |
| Figura 13 – Desenho técnico do sistema de medição por equilíbrio eletrostático ..... | 51 |
| Figura 14 – Representação do sistema de bombeamento .....                            | 55 |
| Figura 15 – Diagrama do sistema de bombeamento (P&ID) .....                          | 56 |
| Figura 16 – Circuito de aplicação de alta tensão e bancada experimental .....        | 57 |
| Figura 17 – Descarga eletrostática entre os eletrodos em diferentes distâncias.....  | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Resultados dos experimentos de VB em 500 mbar .....        | 62 |
| Tabela 2 – Análise de correlação de Pearson .....                     | 64 |
| Tabela 3 – Cálculos de incerteza de medição (ponto de 61,43 kV) ..... | 66 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 – Linearidade entre tensão experimental e erro percentual .....                           | 63 |
| Gráfico 2 – Regressão linear da tensão de ruptura em função da distância (500 mbar) .....           | 69 |
| Gráfico 3 – Concordância entre tensão experimental e prevista, com reta de identidade .....         | 70 |
| Gráfico 4 – Resíduos ( $V_{exp} - V_{prev}$ ) por distância, com erro relativo associado .....      | 71 |
| Gráfico 5 – Análise de concordância de Bland-Altman entre previsão e experimento .....              | 72 |
| Gráfico 6 – Diagrama de Pareto das fontes de incerteza de medição .....                             | 73 |
| Gráfico 7 – Comportamento das incertezas relativa e absoluta em função da tensão experimental ..... | 74 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|                 |                                                                                                       |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ABNT</b>     | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                              |
| <b>BIPM</b>     | Bureau International des Poids et Mesures (Escritório Internacional de Pesos e Medidas)               |
| <b>CGPM</b>     | Conférence Générale des Poids et Mesures (Conferência Geral de Pesos e Medidas)                       |
| <b>CIPM</b>     | Comité International des Poids et Mesures (Comitê Internacional de Pesos e Medidas)                   |
| <b>DSR</b>      | Design Science Research (Pesquisa em Ciência do Projeto)                                              |
| <b>ESD</b>      | Electrostatic Discharge (Descarga Eletrostática)                                                      |
| <b>GUM</b>      | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição) |
| <b>IEC</b>      | International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)                      |
| <b>ILAC</b>     | International Laboratory Accreditation Cooperation                                                    |
| <b>INM</b>      | Instituto Nacional de Metrologia                                                                      |
| <b>INMETRO</b>  | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia                                              |
| <b>INPI</b>     | Instituto Nacional da Propriedade Industrial                                                          |
| <b>ISO</b>      | International Organization for Standardization                                                        |
| <b>JCGM</b>     | Joint Committee for Guides in Metrology                                                               |
| <b>MRA</b>      | Mutual Recognition Arrangement (Acordo de Reconhecimento Mútuo)                                       |
| <b>ODS</b>      | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                                                              |
| <b>P&amp;ID</b> | Piping and Instrumentation Diagram (Diagrama de Tubulação e Instrumentação)                           |
| <b>PIB</b>      | Produto Interno Bruto                                                                                 |
| <b>RBC</b>      | Rede Brasileira de Calibração                                                                         |
| <b>SI</b>       | Sistema Internacional de Unidades                                                                     |
| <b>VIM</b>      | Vocabulário Internacional de Metrologia                                                               |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                            |                                                                     |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>VB</b>                  | Tensão de ruptura dielétrica (V ou kV)                              |
| <b>p</b>                   | Pressão absoluta do gás (Pa ou mbar)                                |
| <b>d</b>                   | Distância entre eletrodos (m ou mm)                                 |
| <b>E</b>                   | Intensidade do campo elétrico (V/m)                                 |
| <b><math>\alpha</math></b> | Primeiro coeficiente de ionização de Townsend ( $\text{m}^{-1}$ )   |
| <b><math>\gamma</math></b> | Segundo coeficiente de Townsend (coeficiente de emissão secundária) |
| <b>A, B</b>                | Constantes empíricas do gás na Lei de Paschen                       |
| <b>uc</b>                  | Incerteza padrão combinada                                          |
| <b>U</b>                   | Incerteza expandida                                                 |
| <b>k</b>                   | Fator de abrangência                                                |
| <b>veff</b>                | Graus de liberdade efetivos                                         |
| <b>ci</b>                  | Coeficiente de sensibilidade da i-ésima grandeza de entrada         |
| <b>r</b>                   | Coeficiente de correlação de Pearson                                |

## SUMÁRIO

|                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| RESUMO .....                                                                          | 5  |
| ABSTRACT .....                                                                        | 6  |
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                | 7  |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                | 8  |
| LISTA DE GRÁFICOS.....                                                                | 8  |
| LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS .....                                                  | 9  |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                                                               | 10 |
| SUMÁRIO.....                                                                          | 11 |
| INTRODUÇÃO.....                                                                       | 15 |
| Problema de pesquisa .....                                                            | 15 |
| Objetivo geral .....                                                                  | 16 |
| Objetivos específicos.....                                                            | 16 |
| 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                                         | 18 |
| 1.1 Descargas Eletrostáticas e Ruptura Dielétrica.....                                | 18 |
| 1.2 Campos Elétricos e Geometria de Eletrodos .....                                   | 18 |
| 1.2.1 Configurações de eletrodos e distribuição do campo .....                        | 19 |
| 1.2.2 Concentração de linhas de campo, intensificação e ruptura.....                  | 21 |
| 1.2.3 Implicações para a Lei de Paschen e para o experimento .....                    | 21 |
| 1.3 Líderes Ascendentes e Descendentes .....                                          | 22 |
| 1.4 Ionização do Argônio e Pulverização Catódica.....                                 | 24 |
| 1.4.1 Mecanismo físico da pulverização catódica (sputtering) .....                    | 24 |
| 1.5 Emissão Eletrônica Primária, Secundária e o Mecanismo de Townsend.....            | 25 |
| 1.5.1 Emissão eletrônica primária .....                                               | 26 |
| 1.5.2 Avalanche eletrônica e o primeiro coeficiente de Townsend ( $\alpha$ ).....     | 26 |
| 1.5.3 Emissão secundária e o segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma$ ).....        | 27 |
| 1.5.4 Condição de autossustentação e ruptura dielétrica.....                          | 27 |
| 1.5.5 Da condição de Townsend à Lei de Paschen.....                                   | 27 |
| 1.6 A Lei de Paschen .....                                                            | 28 |
| 1.7 Fator de Utilização do Campo e Configurações Padronizadas de Eletrodos .....      | 29 |
| 1.8 Avalanche, Critério de <i>Streamer</i> e Limites da Aproximação de Townsend ..... | 30 |
| 1.9 Livre Caminho Médio e Seções de Choque de Ionização .....                         | 31 |
| 1.10 Função de Distribuição de Energia dos Elétrons.....                              | 31 |
| 1.11 Particularidades do Argônio como Meio de Descarga .....                          | 32 |
| 1.12 Plasma e Descargas nos Regimes de Corrente Contínua e Alternada.....             | 33 |
| 1.12.1 Descargas em regime de corrente contínua .....                                 | 34 |
| 1.12.2 Descargas em regime de corrente alternada .....                                | 34 |

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.12.3 Implicações para a comparação com a Lei de Paschen .....                               | 35 |
| 1.13 Influência do Vácuo e da Densidade de Partículas de Argônio no Arranjo Experimental..... | 35 |
| 1.13.1 O vácuo como condição para o ambiente gasoso controlado .....                          | 35 |
| 1.13.2 Pressão, densidade de partículas e comportamento da descarga .....                     | 36 |
| 1.14 Estado da Arte em Ruptura Dielétrica e Metrologia de Alta Tensão .....                   | 37 |
| 2 METROLOGIA.....                                                                             | 39 |
| 2.1 Conceitos Fundamentais de Metrologia .....                                                | 39 |
| 2.2 Grandezas e Unidades de Medida .....                                                      | 40 |
| 2.3 Sistema Internacional de Unidades e Realização Prática .....                              | 41 |
| 2.4 Calibração: Princípios, Certificados e Procedimentos .....                                | 41 |
| 2.4.1 Dados estatísticos em calibração .....                                                  | 41 |
| 2.4.2 Certificados e procedimentos em alta tensão .....                                       | 41 |
| 2.5 Incerteza de Medição e o GUM.....                                                         | 42 |
| 2.5.1 O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) .....                             | 42 |
| 2.5.2 Incerteza combinada e expandida.....                                                    | 43 |
| 2.6 Rastreabilidade Metrológica.....                                                          | 43 |
| 2.7 Padrões Metrológicos .....                                                                | 44 |
| 2.8 Conformidade Normativa em Metrologia de Alta Tensão .....                                 | 44 |
| 2.9 Compatibilidade Metrológica e Comparações Interlaboratoriais.....                         | 45 |
| 2.10 Avaliação de Incerteza dos Tipos A e B.....                                              | 45 |
| 2.11 Incerteza Combinada, Graus de Liberdade Efetivos e Fator de Abrangência.....             | 46 |
| 2.12 Erros Aleatórios e Sistemáticos, Repetibilidade e Reprodutibilidade.....                 | 47 |
| 2.13 Geração e Medição de Alta Tensão .....                                                   | 47 |
| 3 METODOLOGIA.....                                                                            | 49 |
| 3.1 Design Science Research.....                                                              | 49 |
| 3.2 Etapa 1 – Identificação do Problema .....                                                 | 50 |
| 3.3 Etapa 2 – Definição dos Objetivos da Solução.....                                         | 50 |
| 3.4 Etapa 3 – Construção do Artefato.....                                                     | 51 |
| 3.4.1 Memorial descritivo do artefato .....                                                   | 51 |
| 3.4.2 Processo de patenteamento .....                                                         | 53 |
| 3.4.3 Desafios da construção .....                                                            | 53 |
| 3.5 Etapa 4 – Demonstração .....                                                              | 54 |
| 3.5.0 Protocolo de Segurança Elétrica.....                                                    | 54 |
| 3.5.1 Preparação do sistema experimental.....                                                 | 54 |
| 3.5.2 Montagem do circuito.....                                                               | 56 |
| 3.5.3 Procedimento experimental .....                                                         | 57 |

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.5.4 Observação da descarga.....                                         | 58 |
| 3.5.5 Resultados iniciais da demonstração .....                           | 58 |
| 3.6 Etapa 5 – Avaliação.....                                              | 58 |
| 3.6.1 Comparação com a Lei de Paschen e análise de correlação.....        | 59 |
| 3.7 Etapa 6 – Comunicação dos Resultados .....                            | 59 |
| 3.8 Plano de Tratamento e Análise dos Dados .....                         | 59 |
| 3.9 Síntese da Aplicação do DSR.....                                      | 59 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                                            | 61 |
| 4.1 Seleção da Condição Experimental de Referência.....                   | 61 |
| 4.2 Comparação entre Valores Medidos e Previstos .....                    | 62 |
| 4.3 Validação Empírica da Lei de Paschen .....                            | 63 |
| 4.3.1 Origem e interpretação dos coeficientes A e B .....                 | 64 |
| 4.4 Tratamento das Incertezas .....                                       | 65 |
| 4.5 Análise de Resíduos e Qualidade do Ajuste.....                        | 66 |
| 4.6 Discussão Integrada dos Resultados.....                               | 67 |
| 4.7 Análises Gráficas Complementares e Métodos Quantitativos .....        | 68 |
| 4.7.1 Regressão linear da tensão de ruptura em função da distância.....   | 68 |
| 4.7.2 Concordância entre valores experimentais e previstos.....           | 69 |
| 4.7.3 Análise de resíduos.....                                            | 70 |
| 4.7.4 Concordância de métodos pela técnica de Bland-Altman.....           | 71 |
| 4.7.5 Hierarquização das fontes de incerteza por diagrama de Pareto ..... | 72 |
| 4.7.6 Comportamento da incerteza em função da tensão .....                | 73 |
| CONCLUSÃO.....                                                            | 75 |
| Alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável .....            | 76 |
| Contribuições da Pesquisa .....                                           | 76 |
| Limitações da Pesquisa.....                                               | 76 |
| Sugestões para Trabalhos Futuros .....                                    | 77 |
| REFERÊNCIAS .....                                                         | 78 |
| APÊNDICE A – MEMORIAL DESCRITIVO DOS CÁLCULOS.....                        | 82 |
| A.1 Aplicação da Lei de Paschen .....                                     | 82 |
| A.2 Coeficiente de Correlação de Pearson .....                            | 82 |
| A.3 Avaliação e Propagação das Incertezas (GUM) .....                     | 82 |
| APÊNDICE B – DEDUÇÕES MATEMÁTICAS COMPLEMENTARES .....                    | 84 |
| B.1 Dedução da Condição de Ruptura de Townsend .....                      | 84 |
| B.2 Obtenção da Forma Fechada da Lei de Paschen.....                      | 84 |
| B.3 Mínimo de Paschen.....                                                | 84 |
| B.4 Coeficientes de Sensibilidade do Orçamento de Incerteza .....         | 84 |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| APÊNDICE C – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS ..... | 86 |
|-------------------------------------------------|----|

## INTRODUÇÃO

A descarga elétrica em gases constitui um tema de relevância simultânea para a física fundamental e para a indústria da área elétrica, com implicações diretas em sistemas de alta tensão, dispositivos de ignição, sensores e processos industriais de plasma. Compreender as condições que conduzem à ruptura dielétrica de um meio gasoso é requisito para o projeto de tecnologias seguras e eficientes e, sobretudo, para a construção de referências de medição confiáveis nessa faixa de operação. Nesse contexto, a tensão de ruptura VB (breakdown voltage), o valor de tensão responsável por estabelecer o campo elétrico capaz de iniciar a descarga entre eletrodos apresenta-se como candidata natural a parâmetro de padronização metrológica.

A formulação clássica da Lei de Paschen estabelece que VB depende do produto entre a pressão do gás e a distância entre os eletrodos,  $p \cdot d$ . Embora enunciada no século XIX, a lei permanece referência em estudos contemporâneos, e o emprego de VB como grandeza padronizada mostra-se promissor justamente porque sua realização ocorre em ambiente controlado e reproduzível (PASCHEN, 1889; GYUK, 2019).

A presente pesquisa concentra-se na caracterização experimental da descarga elétrica em argônio ultrapuro encapsulado, com pressão e distância entre eletrodos conhecidas e controladas. O argônio foi adotado por suas propriedades físico-químicas favoráveis: gás nobre, quimicamente inerte e com baixa afinidade eletrônica, características que minimizam a captura de elétrons e tornam o processo de avalanche mais previsível. O uso de argônio de alta pureza reduz os efeitos de impurezas, de modo que os resultados reflitam de forma mais fiel a influência dos parâmetros controlados sobre VB.

### *Problema de pesquisa*

Do ponto de vista científico e tecnológico, a pesquisa justifica-se pela necessidade de consolidar a rastreabilidade metrológica em medições de alta tensão, em especial nas faixas superiores a 130 kV, nas quais a infraestrutura brasileira ainda apresenta lacunas (INMETRO, 2025). A caracterização experimental de VB em condições controladas contribui para o fortalecimento da metrologia elétrica nacional, abrindo uma janela que pode aproximar o País do patamar de tensão de referência de nações com tradição consolidada na área, como Alemanha, Finlândia e Suécia (BIPM, 2019). Formula-se, assim, a pergunta de pesquisa que orienta todo o trabalho:

Como padronizar medições de alta tensão por meio da ionização controlada de gases?

### *Objetivo geral*

Caracterizar experimentalmente a tensão de ruptura dielétrica (VB) em argônio ultrapuro encapsulado, com o intuito de promover sua padronização metrológica e a validar empiricamente a Lei de Paschen em condições controladas de pressão e geometria de eletrodos.

### *Objetivos específicos*

- Projetar e construir um artefato experimental capaz de controlar pressão, distância e geometria dos eletrodos;
- Realizar ensaios sistemáticos variando pressão e distância, registrando os valores de VB obtidos;
- Comparar os resultados experimentais com os valores previstos pela Lei de Paschen;
- Avaliar a reprodutibilidade e a confiabilidade das medições, com foco na rastreabilidade metrológica e na avaliação de incertezas segundo o GUM;
- Discutir as implicações dos resultados para aplicações industriais e para o fortalecimento da infraestrutura metrológica nacional em alta tensão.

Os objetivos específicos guardam relação direta e sequencial com o objetivo geral e com o problema de pesquisa: a construção do artefato (primeiro objetivo) é a condição material para a obtenção dos dados; os ensaios sistemáticos (segundo) produzem o conjunto experimental; a comparação com a Lei de Paschen (terceiro) e a avaliação de incertezas (quarto) sustentam a validação metrológica que responde à pergunta de pesquisa; e a discussão das implicações (quinto) projeta os resultados sobre o problema prático da rastreabilidade acima de 130 kV. Essa cadeia de meios e fins estrutura também a sequência dos capítulos.

A motivação prática vincula-se à demanda da indústria de energia por medições rastreáveis e confiáveis em tensões elevadas. A ausência de padrões robustos nessa faixa compromete a disseminação da rastreabilidade em sistemas elétricos de grande porte. Quanto ao percurso metodológico, adota-se a Design Science Research (DSR) como metodologia de pesquisa.

A estrutura do trabalho organiza-se em quatro partes. A primeira parte desenvolve a fundamentação teórica das descargas em gases através da intensidade de campos elétricos, geometria de eletrodos, líderes, ionização do argônio e o mecanismo de Townsend que sustenta a Lei de Paschen. A segunda parte trata da metrologia aplicada ao vácuo e à alta tensão, com ênfase em rastreabilidade, padrões e avaliação de incertezas. A terceira parte descreve a metodologia, detalhando a DSR e o memorial do artefato. A quarta parte apresenta e discute os

resultados. Encerram o trabalho a conclusão, as referências e os apêndices, incluindo o memorial descritivo dos cálculos.

# 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo reúne os fundamentos físicos necessários à interpretação do comportamento físico de ruptura dielétrica em argônio. A exposição parte das descargas eletrostáticas e dos campos elétricos, avança para a influência da geometria dos eletrodos sobre a distribuição do campo, discute a formação de líderes, a ionização do argônio e o fenômeno de *sputtering* e culmina no tratamento dos coeficientes de Townsend e da condição de autossustentação, base teórica direta da Lei de Paschen empregada na análise dos resultados.

## 1.1 Descargas Eletrostáticas e Ruptura Dielétrica

As descargas eletrostáticas resultam do acúmulo de cargas em superfícies condutoras ou isolantes que, ao estabelecerem um campo elétrico crítico, provocam a ruptura dielétrica do meio e a consequente transferência de carga. A ruptura ocorre quando o campo aplicado excede a rigidez dielétrica do gás, iniciando o processo de avalanche eletrônica (RAIZER, 1997). Em escala atmosférica, o relâmpago é a manifestação mais intensa do fenômeno, originada pela separação de cargas em nuvens de tempestade (UMAN, 2001; KÜCHLER, 2018).

No arranjo desta pesquisa, a descarga foi observada como ruptura dielétrica do argônio ultrapuro quando o campo elétrico entre eletrodos semiesféricos atingiu valores críticos dependentes da pressão e da distância entre eletrodos. O processo segue uma sequência bem definida: sob tensão crescente, elétrons livres presentes no gás são acelerados pelo campo; ao adquirirem energia suficiente, ionizam átomos neutros por impacto, liberando novos elétrons que, por sua vez, são acelerados e ionizam outros átomos. Quando essa multiplicação se torna autossustentada, instala-se a descarga, acompanhada de emissão de luz e de corrente de curta duração (RAIZER, 1997; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

Caso a fonte mantenha energia suficiente após a ruptura inicial, a faísca pode evoluir para um arco voltaico, plasma condutor sustentado pela ionização contínua do meio, capaz de atingir temperaturas superiores a 5000 K (KÜCHLER, 2018). Nos testes experimentais, observou-se a formação de arcos transitórios após a ruptura, evidenciando a transição entre faísca momentânea e arco sustentado. A previsibilidade desse comportamento, em meio inerte e geometria fixa, é precisamente o que viabiliza o uso de VB como grandeza rastreável (BAZELYAN; RAIZER, 2000).

## 1.2 Campos Elétricos e Geometria de Eletrodos

O campo elétrico é a grandeza vetorial que descreve a força exercida sobre uma carga em cada ponto do espaço. A representação por linhas de força, introduzida por Faraday e

formalizada por Maxwell (1873), permite compreender o campo não como mera abstração matemática, mas como ente físico que governa a aceleração das partículas carregadas e, portanto, o início da ionização. Em um arranjo de eletrodos, a relação integral expressa pela Lei de Gauss vincula o fluxo do campo através de uma superfície fechada à carga nela contida, fornecendo a base para o cálculo do campo médio entre as placas.

Para a configuração plano-plano, assumida a uniformidade e a simetria, o campo médio entre eletrodos reduz-se a:

$$E = V / d$$

em que  $V$  é a diferença de potencial aplicada e  $d$ , a distância entre os eletrodos. A ruptura inicia-se quando  $E$  atinge o valor crítico característico do gás (sua rigidez dielétrica). É justamente a distribuição espacial de  $E$  e, por consequência, o local e a intensidade da ionização que depende fortemente da geometria dos eletrodos, razão pela qual esta seção a examina detalhadamente.

### *1.2.1 Configurações de eletrodos e distribuição do campo*

A geometria dos eletrodos determina se o campo entre eles é uniforme ou não uniforme, com consequências diretas sobre a tensão de ruptura e sobre a validade da aproximação de Townsend. Quatro configurações são canônicas na engenharia de alta tensão:

**Plano-plano.** Dois eletrodos planos e paralelos, Figura 1, suficientemente extensos em relação ao espaçamento, produzem um campo essencialmente uniforme na região central, com  $E \approx V/d$ . É a configuração de referência para a Lei de Paschen, pois a hipótese de campo uniforme é a base de sua derivação. As bordas dos eletrodos, contudo, introduzem reforço local de campo (efeito de borda).

Figura 1 – Eletrodos planos, paralelos.



Fonte: Autor (2025).

**Ponta-plano.** Um eletrodo pontiagudo diante de um plano, Figura 2, gera campo fortemente não uniforme, com intensa concentração de linhas de força na extremidade da ponta. O reforço local pode superar em muito o campo médio, antecipando a ionização naquela região

mesmo sob tensões aplicadas relativamente baixas. Essa configuração favorece descargas parciais (corona) e a formação de líderes, sendo modelo para o estudo de para-raios e de pré-ionização atmosférica (MEEK; CRAGGS, 1978; BATISTA, 2019).

Figura 2 – Eletrodos ponta-plano, paralelos.



Fonte: Autor (2025).

**Esfera-esfera.** Dois eletrodos esféricos idênticos, Figura 3, com espaçamento menor frente ao diâmetro, aproximam-se de campo uniforme e apresentam alta reprodutibilidade da tensão de ruptura. Por isso, os espinterômetros de esferas (*sphere gaps*) são adotados como padrão de medição de alta tensão pela norma IEC 60052, que tabela a tensão de ruptura em função do diâmetro das esferas e do espaçamento em ar, sob condições atmosféricas de referência (IEC, 2002).

Figura 3 – Eletrodos esféricos, paralelos.



Fonte: Autor (2025).

**Esfera-plano.** Configuração intermediária entre as anteriores, Figura 4: a face esférica concentra o campo mais do que um plano, porém menos do que uma ponta, resultando em campo moderadamente não uniforme. É útil quando se deseja controlar a região de início da descarga sem o caráter extremo da geometria ponta-plano.

Figura 4 – Eletrodos esférico-plano, paralelos.



Fonte: Autor (2025).

### *1.2.2 Concentração de linhas de campo, intensificação e ruptura*

A concentração de linhas de força em regiões de pequeno raio de curvatura, pontas, arestas e protuberâncias, produz intensificação local do campo elétrico. Quanto menor o raio de curvatura, maior o fator de intensificação e mais baixo o limiar de tensão para o início da ionização naquele ponto. Esse princípio explica por que descargas parciais e líderes nucleiam preferencialmente em saliências e por que o acabamento superficial e a ausência de rebarbas nos eletrodos são determinantes para a repetibilidade dos ensaios (MEEK; CRAGGS, 1978; KÜCHLER, 2018).

A relação entre intensificação de campo e ruptura é direta: em campos não uniformes, a ruptura pode iniciar-se localmente (corona) sem que o canal atravesse integralmente o espaçamento, e a tensão de ruptura global passa a depender da geometria, e não apenas do produto  $p \cdot d$ . Em campos uniformes, ao contrário, a ionização distribui-se de modo homogêneo e a ruptura ocorre de forma abrupta quando a condição de autossustentação é satisfeita em todo o volume, situação em que a Lei de Paschen descreve VB com boa fidelidade.

### *1.2.3 Implicações para a Lei de Paschen e para o experimento*

A Lei de Paschen pressupõe campo aproximadamente uniforme e regime dominado pelo mecanismo de Townsend. Em geometrias não uniformes, a aproximação perde validade: o reforço local antecipa a ionização e introduz dependência geométrica que a formulação clássica não captura. Por essa razão, eletrodos de campo uniforme são preferíveis quando o objetivo é validar a Lei de Paschen e empregá-la como referência metrológica.

Coerentemente, o artefato desta pesquisa adota eletrodos semiesféricos de alumínio, cuja face arredondada e de raio relativamente grande aproxima o campo da condição uniforme, reduzindo a concentração de linhas de força em relação a geometrias pontiagudas e atenuando efeitos de borda. Essa escolha minimiza a imprecisão geométrica da ruptura, preserva a hipótese de uniformidade subjacente à Lei de Paschen e, com isso, favorece a comparabilidade entre

valores previstos e medidos e a rastreabilidade dos resultados (BAZELYAN; ALEKSANDROV, 2008; KÜCHLER, 2018).

### 1.3 Líderes Ascendentes e Descendentes

Os líderes são canais de plasma parcialmente ionizado, condutores e quentes, que se propagam a partir de regiões de intenso campo elétrico e antecedem a formação do canal principal da descarga. Constituem o estágio em que a descarga deixa de ser localizada (corona/*streamer*) e passa a estender-se direcionalmente pelo meio, abrindo caminho de baixa impedância para a corrente subsequente (GALLIMBERTI, 1979; RAKOV; UMAN, 2003).

Quanto ao mecanismo de formação, o líder nucleia-se onde o campo local supera o limiar de ionização, tipicamente em saliências, pontas ou no topo de estruturas elevadas. A ionização sustentada aquece o canal, eleva sua condutividade e desloca a frente de campo intenso para a extremidade do líder, que assim se propaga. A propagação ocorre em passos sucessivos (*stepped leader*), nos quais segmentos ionizados avançam intermitentemente em direção ao eletrodo ou à estrutura de polaridade oposta.

No estudo das descargas atmosféricas, distinguem-se dois sentidos de propagação. O líder descendente parte da nuvem em direção ao solo, ramificando-se à medida que avança; o líder ascendente origina-se em estruturas aterradas, torres, edifícios e para-raios, Figura 5, quando a aproximação do líder descendente intensifica o campo em suas extremidades, e propaga-se para cima ao encontro daquele, Figura 6.

Figura 5 – Raio ascendente.



Fonte: INPE (2015)

Figura 6 – Raio descendente.



Fonte: Warner (2012).

O encontro entre líderes ascendente e descendente estabelece o canal contínuo pelo qual flui a corrente de retorno (RAKOV; UMAN, 2003). Rakov e Uman (2003) registram que campos em nuvens de tempestade podem exceder 3 MV/m, suficientes para iniciar ambos os tipos de líder.

A relação com o campo elétrico é, portanto, dupla: o líder só se inicia onde o campo local ultrapassa o limiar de ionização e só se propaga enquanto a frente mantém campo suficiente à sua frente. Daí a importância da geometria dos condutores, que governa a intensificação local discutida na Seção 1.2.

Em conceitos de alta tensão, a compreensão dos líderes orienta o projeto de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas: o formato e a posição dos para-raios são dimensionados para favorecer a emissão de líderes ascendentes em pontos seguros, interceptando o líder descendente antes que ele atinja regiões vulneráveis (BATISTA, 2019; BAZELYAN; ALEKSANDROV, 2008). Embora o presente experimento opere em argônio encapsulado e em campo uniforme, condição em que líderes plenamente desenvolvidos não são o regime dominante, os mesmos princípios físicos de nucleação e propagação esclarecem por que a geometria e o acabamento dos eletrodos influenciam o início da descarga e a dispersão dos valores medidos.

## 1.4 Ionização do Argônio e Pulverização Catódica

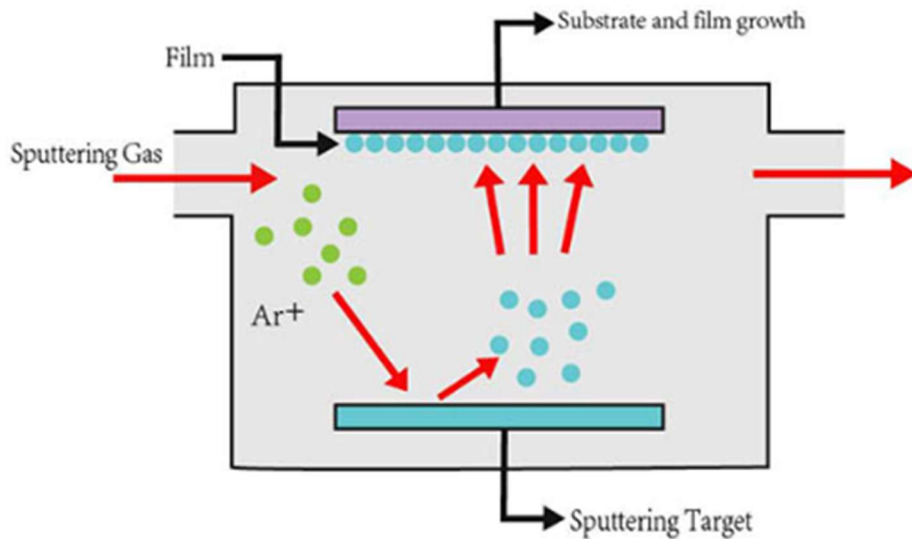
O argônio é amplamente empregado em estudos de descarga por sua estabilidade química e por propriedades bem caracterizadas (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005). Sua ionização ocorre quando elétrons acelerados pelo campo colidem com átomos neutros e removem elétrons, formando íons positivos ( $\text{Ar}^+$ ) e desencadeando a formação de plasma condutor (KARNOPP, 2020). A baixa afinidade eletrônica do argônio reduz a probabilidade de captura de elétrons, tornando o processo de avalanche mais previsível, uma característica decisiva para a confiabilidade metrológica, pois favorece a reprodutibilidade dos resultados (RAIZER, 1997).

Em regime de baixa pressão, o livre caminho médio dos elétrons aumenta, o que altera a eficiência de ionização e o valor da tensão de ruptura; em pressões mais elevadas, as colisões tornam-se mais frequentes e o comportamento aproxima-se do previsto pela Lei de Paschen. Esse efeito foi observado nos ensaios, nos quais a variação de 100 a 900 mbar modificou significativamente VB (CHAPMAN, 1980).

### 1.4.1 Mecanismo físico da pulverização catódica (*sputtering*)

A pulverização catódica, ou *sputtering*, é o processo de ejeção de átomos de uma superfície sólida (o alvo, geralmente o cátodo) provocada pelo bombardeio de íons energéticos, Figura 7. Em descargas em argônio, os íons  $\text{Ar}^+$  formados no plasma são acelerados pelo campo em direção ao cátodo e, ao colidirem com a superfície, transferem momento aos átomos da rede. Quando a energia transferida supera a energia de ligação superficial, átomos do alvo são ejetados para a fase gasosa (CHAPMAN, 1980; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

Figura 7 – Ilustração do mecanismo de *sputtering*.



Fonte: <https://www.samaterials.pt/content/what-is-sputtering.html> (2026).

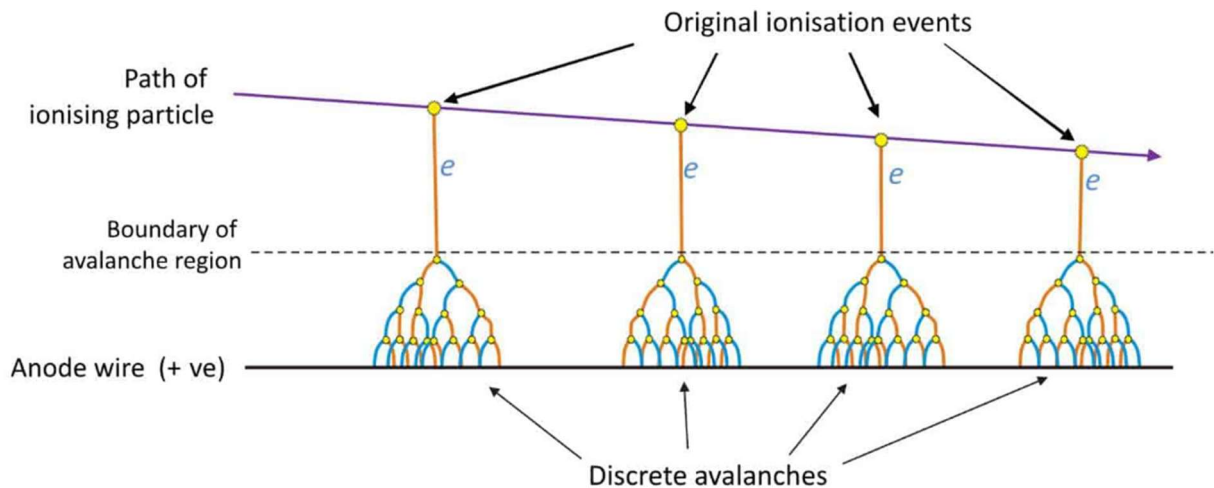
O mecanismo é essencialmente de transferência de momento, e não de evaporação térmica: a colisão do íon incidente desencadeia uma cascata de colisões na camada superficial do sólido, e a ejeção ocorre quando essa cascata reverte momento em direção à superfície com energia suficiente. A taxa de ejeção é quantificada pelo rendimento do número de átomos ejetados por íon incidente, que depende da massa e da energia do íon, do material do alvo e do ângulo de incidência. O argônio é o gás escolhido por aliar inércia química, massa atômica adequada à transferência eficiente de momento e capacidade de sustentar descargas estáveis (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

Industrialmente, o *sputtering* é base de processos de deposição de filmes finos metálicos e de revestimentos funcionais, com aplicação em semicondutores, óptica e nanotecnologia (CHEN, 2016). Sua relevância para o presente estudo é dupla. Primeiro, ilustra que o plasma de argônio interage com os eletrodos: o bombardeio iônico pode, ao longo de muitos ensaios, modificar gradualmente o acabamento superficial do cátodo e, portanto, o coeficiente de emissão secundária  $\gamma$  e a geometria do campo, fator a considerar na repetibilidade. Segundo, evidencia que a emissão de partículas e elétrons na superfície catódica, central ao mecanismo de Townsend tratado a seguir, é a mesma física que sustenta a pulverização catódica, conferindo unidade aos fenômenos de superfície nas descargas em argônio.

### 1.5 Emissão Eletrônica Primária, Secundária e o Mecanismo de Townsend

O mecanismo de Townsend descreve a transição de um gás isolante para um plasma condutor por multiplicação eletrônica, Figura 8, e constitui o fundamento físico direto da Lei de Paschen. Seu tratamento detalhado é, por isso, um dos eixos centrais desta fundamentação.

Figura 8 – Representação da avalanche eletrônica.



Fonte: [https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Proportional\\_counter-Townsend-avalanche.jpg](https://www.radiation-dosimetry.org/wp-content/uploads/2019/12/Proportional_counter-Townsend-avalanche.jpg) (2026).

#### 1.5.1 Emissão eletrônica primária

A descarga requer a presença de elétrons iniciais, ditos primários, no volume gasoso. Essas cargas provêm de fontes independentes do próprio campo de descarga: ionização do gás por radiação de fundo (raios cósmicos e radioatividade natural), fotoionização por radiação ultravioleta e, em campos muito intensos junto a superfícies metálicas, emissão de campo. Em laboratório, a presença de ao menos um elétron primário no espaçamento é condição necessária para que a avalanche tenha início; sua disponibilidade afeta o tempo de atraso estatístico da ruptura, mas não o valor de VB propriamente dito, governado pela condição de autossustentação (RAIZER, 1997).

#### 1.5.2 Avalanche eletrônica e o primeiro coeficiente de Townsend ( $\alpha$ )

Um elétron primário acelerado pelo campo adquire energia entre colisões; ao exceder a energia de ionização do gás, ioniza um átomo neutro por impacto, gerando um segundo elétron. Ambos são acelerados e ionizam novos átomos, em progressão geométrica que constitui a avalanche eletrônica. O primeiro coeficiente de ionização de Townsend,  $\alpha$ , quantifica esse processo: representa o número médio de ionizações produzidas por um elétron por unidade de

comprimento na direção do campo. Sobre um percurso  $d$ , um único elétron origina, em média,  $e^{ad}$  elétrons na frente da avalanche.

A dependência de  $\alpha$  com o campo e a pressão é descrita pela seguinte forma:

$$\alpha = A \cdot p \cdot \exp(-B \cdot p / E)$$

em que  $A$  e  $B$  são constantes empíricas do gás,  $p$  a pressão e  $E = V/d$  o campo no espaçamento plano-plano.  $A$  relaciona-se à frequência de colisões ionizantes e  $B$ , à energia necessária para ionizar, de modo que ambas codificam a eficiência de ionização do gás para um dado campo (RAIZER, 1997; HEYLEN, 2006).

### 1.5.3 Emissão secundária e o segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma$ )

A avalanche, por si só, não sustenta a descarga: extinta a passagem dos elétrons, o processo cessaria. A autossustentação depende de processos secundários no cátodo, agrupados no segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma_{se}$ ), definido como o número médio de elétrons secundários liberados no cátodo por íon positivo, ou fóton, que a ele retorna.

Por depender da superfície catódica,  $\gamma$  é sensível ao material, ao acabamento e ao estado de limpeza do eletrodo, o que reforça a importância do controle superficial discutido nas Seções 1.2 e 1.4. Para o argônio sobre eletrodos metálicos,  $\gamma$  situa-se tipicamente na faixa de  $10^{-2}$  a  $10^{-1}$ ; nesta pesquisa adotou-se  $\gamma_{se} = 0,05$ , valor compatível com a literatura (RAIZER, 1997; LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

### 1.5.4 Condição de autossustentação e ruptura dielétrica

A descarga torna-se autossustentada quando cada avalanche é capaz de regenerar, por processos secundários, ao menos um elétron que inicie a avalanche seguinte. Uma avalanche iniciada por um elétron produz  $e^{ad} - 1$  íons positivos; destes, uma fração  $\gamma$  libera novos elétrons no cátodo. A condição de ignição de Townsend escreve-se, portanto:

$$\gamma (e^{ad} - 1) \geq 1$$

Quando a igualdade é satisfeita, a multiplicação eletrônica perpetua-se sem o concurso de fontes externas: ocorre a ruptura dielétrica, e o gás transita para o estado condutor. Abaixo desse limiar, a corrente é apenas amplificada de forma transitória e decai; acima dele, a descarga cresce até ser limitada pelo circuito externo (RAIZER, 1997; HEYLEN, 2006).

### 1.5.5 Da condição de Townsend à Lei de Paschen

A Lei de Paschen resulta de impor a condição de ignição com a igualdade,  $\gamma(e^{ad}-1) = 1$ , e de substituir a expressão empírica de  $\alpha$ . Dessa substituição emerge a dependência de VB

exclusivamente com o produto  $p \cdot d$ , deduzida em detalhe na Seção 1.6. Fica assim explícito o encadeamento físico: emissão primária fornece o elétron inicial; o coeficiente  $\alpha$  governa a multiplicação na avalanche; o coeficiente  $\gamma$  governa a regeneração no cátodo; e a igualdade entre ambos define a tensão de ruptura. É esse arcabouço que confere significado físico aos parâmetros  $A$ ,  $B$  e  $\gamma$  empregados na análise dos resultados.

### 1.6 A Lei de Paschen

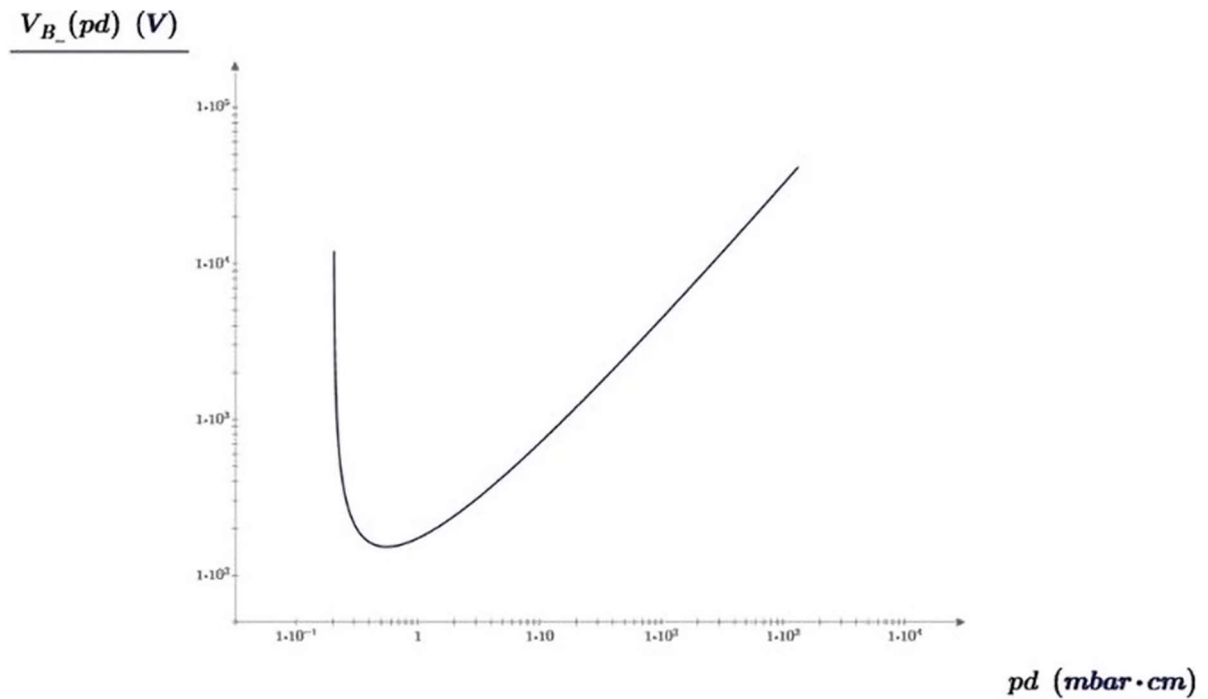
A Lei de Paschen descreve a tensão de ruptura como função do produto  $p \cdot d$ , admitindo campo aproximadamente uniforme e regime de Townsend (RAIZER, 1997; KÜCHLER, 2018). Partindo da condição de ignição na igualdade,  $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ , obtém-se  $e^{\alpha d} = 1 + 1/\gamma$ . Tomando o logaritmo natural,  $\alpha d = \ln(1 + 1/\gamma)$ .

Substituindo  $\alpha = A \cdot p \cdot \exp(-B \cdot p \cdot d / V)$  e isolando  $V$ , chega-se à forma usual da Lei de Paschen para a tensão de ruptura:

$$VB = B \cdot p \cdot d / \{ \ln(A \cdot p \cdot d) - \ln[ \ln(1 + 1/\gamma se) ] \}$$

Os termos têm interpretação física direta:  $p \cdot d$  mede a quantidade de matéria e o comprimento de aceleração disponíveis no espaçamento;  $A$  e  $B$  parametrizam a probabilidade de ionização por impacto no gás específico; e  $\gamma se$  incorpora os processos de emissão secundária na superfície catódica. A curva de  $VB$  em função de  $p \cdot d$ , Figura 9, apresenta um mínimo característico, o mínimo de Paschen: abaixo dele, em baixa pressão e pequena distância, predominam emissão de campo e efeitos de vácuo; acima dele, efeitos de carga espacial e o mecanismo de *streamer* tornam a aproximação de Townsend inadequada, delimitando a faixa de validade da equação (RAIZER, 1997; KÜCHLER, 2018; HEYLEN, 2006).

Figura 9 – Curva de Paschen para descarga em ar.



Fonte: <https://www.tecnotion.com/faq/paschens-law/> (2026).

No contexto desta pesquisa, a Lei de Paschen é empregada como referência para padronizar  $V_B$  em argônio ultrapuro encapsulado, permitindo comparar valores previstos e medidos e sustentar a rastreabilidade metrológica dos resultados (INMETRO, 2025; BIPM, 2019).

### 1.7 Fator de Utilização do Campo e Configurações Padronizadas de Eletrodos

A análise das geometrias de eletrodos pode ser sistematizada por um parâmetro adimensional que sintetiza o grau de uniformidade do campo: o fator de utilização do campo, ou fator de Schwaiger, definido como a razão entre o campo elétrico médio no espaçamento e o campo máximo na superfície do eletrodo mais solicitado. Para um arranjo de placas paralelas idealmente infinitas, esse fator vale a unidade, indicando campo perfeitamente uniforme; para configurações com curvatura acentuada, como ponta-plano, o fator aproxima-se de zero, evidenciando forte intensificação local. As geometrias intermediárias, como esfera-esfera e esfera-plano, situam-se entre esses extremos, com fatores que dependem da razão entre o raio dos eletrodos e a distância de separação.

Esse parâmetro tem consequência prática direta: quanto menor o fator de utilização, mais o campo se concentra em regiões restritas, antecipando a ionização local e reduzindo a

tensão de ruptura aparente para um mesmo espaçamento. Em arranjos esféricos, enquanto a distância permanece pequena em relação ao raio, o campo entre as calotas mantém-se quase uniforme e o fator de utilização permanece elevado; à medida que a separação cresce, a curvatura passa a dominar e o campo perde uniformidade. Por essa razão, os centelhadores esféricos (*sphere gaps*) são adotados pela norma IEC 60052 como dispositivos padronizados de medição de alta tensão: dentro da faixa em que o campo é aproximadamente homogêneo, a relação entre tensão de ruptura e distância é estável e reproduzível.

Os eletrodos semiesféricos de alumínio empregados neste trabalho exploram precisamente essa propriedade. Ao manter o espaçamento dentro do intervalo em que o fator de utilização permanece elevado, o arranjo aproxima-se da condição de campo quase uniforme pressuposta pela Lei de Paschen, minimizando a intensificação localizada que comprometeria a comparabilidade entre valores medidos e previstos. Essa escolha geométrica é, portanto, coerente tanto com a fundamentação física quanto com a prática normativa consolidada em metrologia de alta tensão.

### 1.8 Avalanche, Critério de *Streamer* e Limites da Aproximação de Townsend

A descrição da ruptura pela teoria de Townsend pressupõe que o número de elétrons gerados por avalanche permaneça moderado e que a multiplicação seja sustentada predominantemente pela emissão secundária no cátodo. Quando o produto pressão-distância cresce, a avalanche pode atingir um nível crítica de cargas, tipicamente da ordem de  $10^8$  elétrons, segundo o critério de Raether e Meek, no qual o campo elétrico próprio da carga espacial torna-se comparável ao campo aplicado. A partir desse limiar, a descarga deixa de evoluir pelo mecanismo difuso de avalanches sucessivas e passa a propagar-se por canais ionizados filamentosos, os chamados *streamers*.

Essa transição delimita a faixa de validade da aproximação de Townsend: em baixos valores de pressão-distância, predomina o regime de Townsend, no qual a Lei de Paschen descreve adequadamente a tensão de ruptura; em valores elevados, sobretudo em grandes espaçamentos e à pressão atmosférica, o mecanismo de *streamer* torna-se dominante e a previsão de Paschen perde precisão. A formação de *streamers* conecta-se diretamente à física dos líderes discutida na Seção 1.3, uma vez que a ocorrência de *streamers* em um canal térmico condutor constitui o estágio inicial de formação do líder.

No regime experimental pesquisado, utilizando argônio ultrapuro encapsulado, pressões abaixo de valores atmosféricos e espaçamentos de milímetros a poucos centímetros, o sistema opera na região em que a teoria de Townsend permanece válida. Essa constatação é fundamental

para a interpretação dos resultados: confirma que a Lei de Paschen é o modelo apropriado para o regime ensaiado e justifica a concordância elevada observada entre valores medidos e previstos, discutida no Capítulo 4. A explicitação desses limites também previne extrapolações indevidas do modelo para condições nas quais o mecanismo físico dominante seria distinto.

### 1.9 Livre Caminho Médio e Seções de Choque de Ionização

A probabilidade de que um elétron acelerado pelo campo elétrico provoque ionização ao colidir com um átomo neutro depende de duas grandezas microscópicas fundamentais: o livre caminho médio e a seção de choque de ionização. O livre caminho médio  $\lambda$  representa a distância média percorrida por uma partícula entre duas colisões sucessivas e relaciona-se à densidade numérica de partículas  $n$  e à seção de choque total  $\sigma$  pela expressão  $\lambda = 1/(n \cdot \sigma)$ . Como a densidade é proporcional à pressão, segundo a lei dos gases ideais  $n = p/(k_B \cdot T)$ , o livre caminho médio é inversamente proporcional à pressão: em pressões mais elevadas, as colisões tornam-se mais frequentes e  $\lambda$  diminui.

Essa dependência explica fisicamente a forma da Lei de Paschen. Em baixas pressões, o livre caminho médio é grande e os elétrons adquirem energia suficiente entre colisões, porém o número de colisões ionizantes ao longo do espaçamento é reduzido; em pressões elevadas, há muitas colisões, mas o curto livre caminho médio limita o ganho de energia entre elas, de modo que muitas colisões são apenas elásticas ou de excitação, sem ionizar. Existe, portanto, uma condição ótima refletida no produto pressão-distância em que a combinação entre energia adquirida e número de colisões maximiza a eficiência de ionização e minimiza a tensão de ruptura.

A seção de choque de ionização  $\sigma_i$  quantifica a área efetiva de interação que conduz à remoção de um elétron do átomo. Ela é nula abaixo do potencial de ionização do gás, 15,76 eV para o argônio, cresce rapidamente acima desse limiar, atinge um máximo para energias da ordem de dezenas a uma centena de elétron-volts e decresce suavemente em energias muito altas. O primeiro coeficiente de Townsend, introduzido na Seção 1.5, é a manifestação macroscópica integrada dessas seções de choque sobre a distribuição de energia dos elétrons; sua forma funcional  $\alpha = A \cdot p \cdot \exp(-B \cdot p/E)$  sintetiza, em dois parâmetros empíricos, a física das colisões ionizantes no gás específico.

### 1.10 Função de Distribuição de Energia dos Elétrons

Em um gás sob campo elétrico, os elétrons não possuem uma energia única, mas uma distribuição de energias resultante do equilíbrio dinâmico entre o ganho de energia no campo e

a perda por colisões. Essa função de distribuição de energia dos elétrons determina a fração de partículas capazes de ultrapassar o limiar de ionização e, portanto, a taxa efetiva de produção de novos pares elétron-íon. A descrição rigorosa do fenômeno parte da equação de transporte de Boltzmann, cuja solução fornece a distribuição em função do campo elétrico reduzido, a razão entre o campo e a densidade do gás, frequentemente expressa em townsendts.

Em regimes de campo moderado, a distribuição afasta-se da forma de equilíbrio térmico e aproxima-se da distribuição que prevê menor população de elétrons de alta energia. Essa diferença é relevante porque a ionização é governada justamente pela cauda de alta energia da distribuição: pequenas variações no campo reduzido deslocam significativamente a fração de elétrons acima do limiar de ionização, alterando de forma não linear a taxa de ionização. A dependência exponencial do primeiro coeficiente de Townsend com o inverso do campo reflete diretamente essa sensibilidade da cauda energética.

Para a interpretação dos resultados desta pesquisa, esse arcabouço esclarece por que a tensão de ruptura é tão sensível às condições de campo e por que o controle preciso da distância e da pressão, que determinam o campo reduzido, é decisivo para a reprodutibilidade. A escolha do argônio ultrapuro também se justifica nesse contexto: a ausência de gases eletronegativos, que capturariam elétrons da cauda energética e suprimiriam a ionização, preserva a integridade da distribuição e a previsibilidade da descarga.

### **1.11 Particularidades do Argônio como Meio de Descarga**

O argônio reúne propriedades que o tornam particularmente adequado a estudos metrológicos de ruptura dielétrica. Como gás nobre, possui camada eletrônica completa, é quimicamente inerte e não forma íons negativos estáveis, o que elimina os processos de captura eletrônica que, em gases eletronegativos como o ar, rico em oxigênio, complicam a cinética da descarga. Essa inércia confere previsibilidade ao processo de ionização e reprodutibilidade às medições, requisitos essenciais para a construção de uma referência metrológica.

Outra particularidade relevante é o efeito Townsend, observado em gases nobres pesados como o argônio: para elétrons de baixa energia, da ordem de 1 eV, a seção de choque de espalhamento elástico apresenta um mínimo pronunciado, tornando o gás quase transparente a esses elétrons, capaz de emitir fótons de cor lilás quando ionizado por campos de alta tensão, Figura 10.

Figura 10 – Argônio ionizado.



Fonte: <https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81rgon#/media/Ficheiro:Argon-glow.jpg> (2026).

O comportamento de natureza quântica, influencia o transporte eletrônico em campos baixos e contribui para a eficiência da multiplicação eletrônica em determinadas faixas de campo reduzido. Embora o regime de ruptura pesquisado opere com elétrons de energia mais elevada, o efeito ilustra a riqueza da física subjacente e reforça a necessidade de parâmetros A e B específicos do argônio.

Por fim, o encapsulamento do argônio garante pureza e estabilidade da composição ao longo dos ensaios, isolando o sistema de variações de umidade, temperatura e contaminação atmosférica. Essa condição controlada é o que permite atribuir as variações observadas na tensão de ruptura exclusivamente às grandezas de interesse, distância e pressão, sustentando a baixa incerteza alcançada e a validade da comparação com o modelo teórico.

### 1.12 Plasma e Descargas nos Regimes de Corrente Contínua e Alternada

A natureza temporal da tensão aplicada, contínua ou alternada, condiciona de forma decisiva os mecanismos de formação do plasma e a própria interpretação da tensão de ruptura. A distinção é especialmente relevante nesta pesquisa, pois a Lei de Paschen (PASCHEN, 1889) foi originalmente formulada para descargas em corrente contínua (DC), enquanto os ensaios foram conduzidos em corrente alternada (AC) na frequência da rede, 60 Hz. Compreender as semelhanças e diferenças entre esses regimes é, portanto, condição para justificar a comparação entre os valores medidos e os previstos pelo modelo.

### 1.12.1 Descargas em regime de corrente contínua

Em regime DC, o campo elétrico entre os eletrodos é constante em módulo e direção. A polaridade é fixa: um eletrodo atua permanentemente como cátodo e o outro como ânodo. Essa estabilidade favorece o estabelecimento de regimes estacionários bem definidos (RAIZER, 1997), a descarga escura de Townsend, a descarga luminescente (*glow*) e o arco, conforme a corrente cresce. Os processos catódicos, sobretudo a emissão secundária (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005) quantificada pelo coeficiente  $\gamma$ , ocorrem de modo contínuo e estável sobre a mesma superfície, e a carga espacial acumula-se em uma direção fixa. Como consequência, a erosão por pulverização catódica concentra-se no cátodo (CHAPMAN, 1980), e o comportamento da descarga é integralmente descrito pela teoria de Townsend no limiar da ruptura (MEEK; CRAGGS, 1978).

### 1.12.2 Descargas em regime de corrente alternada

Em regime AC, a tensão varia em função senoidal, invertendo magnitude e polaridade a cada semiciclo. Cada eletrodo alterna ciclicamente entre os papéis de cátodo e ânodo, de modo que os processos de emissão secundária e a erosão por *sputtering* distribuem-se entre ambos (KIND; FESER, 2001). A questão central é a relação entre o período da excitação e os tempos característicos da descarga. Na frequência de 60 Hz, o período é de aproximadamente 16,7 milissegundos, várias ordens de grandeza superior aos tempos de trânsito eletrônico e de formação da avalanche, que se situam na faixa de nanossegundos a microssegundos. Por essa razão, o regime de 60 Hz é considerado de baixa frequência: cada semiciclo evolui de forma quase estática (KÜCHLER, 2018), comportando-se, a cada instante, como uma descarga DC submetida ao valor instantâneo da tensão.

Essa aproximação quase estática tem uma consequência direta: a ruptura ocorre no instante em que o valor instantâneo da tensão atinge o nível crítico, o que se dá na crista (pico) de cada semiciclo senoidal (KIND; FESER, 2001; KÜCHLER, 2018). O campo elétrico máximo e, portanto, a condição mais favorável à disrupção coincide com o valor de pico da onda. Assim, a grandeza fisicamente determinante da ruptura em AC de baixa frequência é a tensão de pico, e não o valor eficaz (RMS). Para uma onda senoidal, essas grandezas relacionam-se por  $\hat{V} = \sqrt{2} \cdot V_{\text{RMS}}$ , em que  $\hat{V}$  designa o valor de pico.

Há ainda efeitos secundários próprios do regime alternado. A ionização residual e as espécies metaestáveis remanescentes de um semiciclo podem influenciar o semiciclo seguinte (MEEK; CRAGGS, 1978; RAIZER, 1997), reduzindo o tempo estatístico de retardo e, em certos casos, a tensão de ruptura subsequente. Em frequências muito mais elevadas, na faixa de

radiofrequência, os íons mais pesados deixam de acompanhar as inversões do campo enquanto os elétrons oscilam, dando origem a regimes de plasma substancialmente distintos (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005; CHEN, 2016). Tais regimes, contudo, situam-se muito além dos 60 Hz empregados nesta pesquisa e não afetam a aproximação quase estática aqui adotada.

### *1.12.3 Implicações para a comparação com a Lei de Paschen*

A baixa frequência da rede é precisamente o que legitima a aplicação da Lei de Paschen um modelo DC aos ensaios em AC. Como cada semiciclo se comporta quase estaticamente, o valor de pico da tensão alternada mapeia-se diretamente sobre a tensão de ruptura prevista pelo modelo estático (KÜCHLER, 2018; KIND; FESER, 2001). Em consequência, todos os valores de tensão reportados neste trabalho correspondem a valores de pico ( $kV_p$ ): as medições foram realizadas em corrente alternada a 60 Hz, em valor eficaz, e convertidas ao valor de pico pela multiplicação por  $\sqrt{2}$ , sob o entendimento de que a tensão de ruptura equivale ao pico da tensão eficaz. Essa convenção é coerente com a prática consagrada em metrologia de alta tensão, na qual as tabelas normalizadas de tensão disruptiva como as da IEC 60052 para centelhadores esféricos também são expressas em valores de pico (IEC 60052, 2002; GYUK, 2019).

## **1.13 Influência do Vácuo e da Densidade de Partículas de Argônio no Arranjo Experimental**

O comportamento controlado do arranjo experimental depende, de modo determinante, da tecnologia do vácuo, que estabelece e mantém o ambiente gasoso no qual a descarga se desenvolve. A pressão e, de forma equivalente, a densidade de partículas de argônio são as grandezas que governam a ionização e a ruptura dielétrica; seu controle preciso é o que confere reprodutibilidade às medições. A modelagem rigorosa de sistemas de vácuo, objeto de extensa pesquisa na literatura especializada, fornece o instrumental conceitual para compreender como o ambiente rarefeito é constituído, mantido e caracterizado no interior de um sistema

### *1.13.1 O vácuo como condição para o ambiente gasoso controlado*

A obtenção de um meio de argônio puro e bem definido pressupõe a prévia evacuação da câmara. Antes da admissão do gás de trabalho, o sistema é bombeado para remover o ar atmosférico e os vapores residuais, sobretudo vapor de água adsorvido nas paredes internas, que de outro modo contaminariam o argônio e alterariam os coeficientes de ionização. A presença de gases residuais, especialmente espécies eletronegativas, deslocaria o

comportamento da descarga e comprometeria a comparabilidade com o modelo teórico, razão pela qual a qualidade do vácuo é condição necessária à integridade do experimento.

Na tecnologia do vácuo, a pressão final atingível e a estabilidade do ambiente gasoso resultam do equilíbrio entre a velocidade de bombeamento e as fontes de gases e vapores presentes no sistema, vazamentos reais, vazamentos virtuais e dessorção das superfícies (DEGASPERI, 2016, 2018). A identificação e a quantificação dessas fontes são essenciais para dimensionar o sistema de bombeamento e prever o campo de pressão na câmara, problema central da modelagem de sistemas de vácuo. A evolução temporal da pressão durante o bombeamento é descrita pela equação fundamental do processo de bombeamento, que relaciona a variação da pressão à velocidade efetiva de bombeamento e à carga gasosa total (DEGASPERI, 2016).

É essa capacidade de atingir e manter pressões bem definidas empregadas nos ensaios que assegura a estabilidade do meio e a pureza do argônio. O resultado é diretamente verificável no tratamento das incertezas: a contribuição da impureza do gás mostrou-se desprezível, evidência de que o controle do vácuo cumpriu seu papel de garantir um ambiente gasoso íntegro e reprodutível.

### *1.13.2 Pressão, densidade de partículas e comportamento da descarga*

A ligação entre a tecnologia do vácuo e a física da ruptura estabelece-se pela densidade numérica de partículas. Pela equação dos gases ideais, a densidade de partículas de argônio relaciona-se à pressão e à temperatura por  $n = p/(k_B \cdot T)$ , em que  $k_B$  é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura absoluta. Assim, ao fixar a pressão por meio do sistema de vácuo, fixa-se também o número de partículas de argônio por unidade de volume disponíveis para os processos de ionização.

A densidade de partículas determina diretamente o livre caminho médio dos elétrons,  $\lambda = k_B \cdot T/(\sqrt{2} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot p)$ , e, por consequência, a frequência de colisões ionizantes. Quanto maior a densidade, isto é, quanto maior a pressão, menor o livre caminho médio e mais frequentes as colisões, embora com menor energia adquirida entre elas; quanto menor a densidade, maior o livre caminho médio. Esse balanço microscópico é precisamente a origem física da dependência da tensão de ruptura com o produto pressão-distância expressa pela Lei de Paschen (Seções 1.6 e 1.9). Controlar o vácuo é, portanto, controlar a densidade de partículas e, em última análise, a própria tensão de ruptura.

A densidade de partículas governa ainda o regime de escoamento do gás, caracterizado pelo número de Knudsen, a razão entre o livre caminho médio e uma dimensão característica

do sistema. Esse parâmetro distingue os regimes viscoso, intermediário e molecular, cuja modelagem é fundamental para o projeto e a análise de sistemas de vácuo (DEGASPERI, 2002, 2006). A compreensão desses regimes assegura que o ambiente gasoso no sistema seja descrito corretamente e que a relação entre pressão, densidade e comportamento da descarga seja interpretada com rigor.

Em síntese, a tecnologia do vácuo não constitui mero suporte operacional, mas fundamento físico do arranjo experimental: é ela que estabelece, de forma controlada e rastreável, a densidade de partículas de argônio que condiciona a ionização e a ruptura dielétrica. O domínio dessa tecnologia consolidado na modelagem detalhada de sistemas de vácuo (DEGASPERI, 2006) é o que permite transformar a câmara de descarga em um instrumento metrológico confiável, articulando o sistema de vácuo descrito no memorial do artefato (Seção 3.4.1) com os resultados de exatidão e baixa incerteza obtidos.

### **1.14 Estado da Arte em Ruptura Dielétrica e Metrologia de Alta Tensão**

O estudo da ruptura dielétrica em gases acumula mais de um século de desenvolvimento, desde os trabalhos seminais que estabeleceram suas leis fundamentais até as pesquisas contemporâneas voltadas a aplicações metrológicas e industriais. A revisão dos trabalhos correlatos permite situar a presente pesquisa nesse panorama e evidenciar a lacuna que ela se propõe a preencher: a caracterização rastreável da tensão de ruptura em gases nobres encapsulados.

Os fundamentos do campo remontam a Townsend (1915), que formulou a teoria da ionização por colisão e introduziu os coeficientes que levam seu nome, e a Paschen (1889), cuja lei empírica relaciona a tensão de ruptura ao produto pressão-distância. Esses marcos foram sistematizados e aprofundados por Meek e Craggs (1978) e por Raizer (1997), referências consolidadas que descrevem tanto o regime de Townsend quanto a transição para o mecanismo de *streamer*. Loeb (1965) detalhou os mecanismos físicos das descargas corona, e Gallimberti (1979) analisou a formação da centelha longa, estabelecendo a ponte entre descargas de pequena escala e os líderes de grande extensão.

No domínio da engenharia de alta tensão, Kind e Feser (2001) e Küchler (2018) consolidaram os princípios de geração, medição e ensaio, enfatizando que a linearidade e a repetibilidade dos sistemas de medição são requisitos essenciais para a validação de padrões de alta tensão. Esses autores reforçam a necessidade de conformidade às normas internacionais notadamente a série IEC 60060 e a IEC 60052 para assegurar comparabilidade dos resultados, princípio diretamente incorporado na concepção do artefato desta pesquisa.

No campo da física de plasmas e descargas, Lieberman e Lichtenberg (2005), fonte das constantes A e B adotadas neste trabalho, fornecem o tratamento de referência para descargas e processamento por plasma, enquanto Chapman (1980) e Chen (2016) aprofundam os processos de pulverização catódica e os fundamentos de plasmas controlados. Gyuk (2019) pesquisou especificamente a tensão de ruptura de Paschen em ar e gases puros, demonstrando a aplicabilidade do modelo a meios controlados e a importância da pureza do gás para a previsibilidade dos resultados, premissa que esta pesquisa estende ao argônio ultrapuro encapsulado.

No contexto nacional, Batista (2019) estudou a eficiência de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas, evidenciando a relevância prática do tema para a infraestrutura elétrica brasileira. A literatura metodológica em Design Science Research de Simon (1996), Hevner et al. (2004), Peffers et al. (2007) e Lacerda et al. (2013), entre outros, fornece o arcabouço que legitima a construção de artefatos como produção de conhecimento científico. Da confluência dessas vertentes emerge o posicionamento da presente pesquisa: aplicar um método de pesquisa construtiva a um problema de metrologia de alta tensão, caracterizando experimentalmente a tensão de ruptura de um gás nobre encapsulado com rastreabilidade e incerteza compatíveis com requisitos de referência.

A análise do estado da arte revela que, embora a Lei de Paschen e os mecanismos de ruptura estejam amplamente consolidados na literatura, há escassez de estudos que articulem essa fundamentação com um tratamento metrológico rigoroso, avaliação de incerteza segundo o GUM, rastreabilidade ao SI e conformidade normativa, aplicado especificamente a gases nobres encapsulados. É precisamente nessa interseção que o presente trabalho pretende contribuir, oferecendo parâmetros validados e um sistema documentado que pode servir de referência para desenvolvimentos futuros.

## 2 METROLOGIA

A confiabilidade dos valores de tensão de ruptura obtidos neste trabalho depende tanto da física da descarga quanto da metrologia que sustenta as medições. Este capítulo apresenta os conceitos metrológicos que asseguram rastreabilidade, comparabilidade e expressão adequada das incertezas, articulando-os com o experimento realizado.

### 2.1 Conceitos Fundamentais de Metrologia

Conforme o Vocabulário Internacional de Metrologia, a metrologia é a ciência da medição e suas aplicações, abrangendo os aspectos teóricos e práticos das medições, independentemente do campo de aplicação ou do grau de incerteza (INMETRO, 2012). Toda medição produz uma estimativa do mensurando acompanhada de uma declaração de incerteza, que expressa a dúvida associada ao resultado. No experimento, o mensurando é a tensão de ruptura dielétrica do argônio sob condições definidas de pressão, distância entre eletrodos e pureza do gás.

A metrologia organiza-se em três ramos. A metrologia científica desenvolve e mantém os padrões primários e realiza as unidades do Sistema Internacional, sustentando os padrões de tensão e corrente usados na calibração de sistemas de alta tensão. A metrologia industrial aplica esses princípios aos processos produtivos e experimentais, por meio de calibração periódica, controle de condições ambientais e gestão da qualidade. A metrologia legal regula e fiscaliza o uso das medições em transações, saúde, segurança e meio ambiente. No Brasil, o INMETRO executa as políticas nacionais de metrologia, mantém os padrões nacionais e dissemina a rastreabilidade, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 – Pirâmide hierárquica da metrologia.



Fonte: Adaptado de INMETRO (2019).

O peso estratégico da metrologia é evidenciado por seu impacto econômico: estima-se que parcela expressiva do Produto Interno Bruto de países desenvolvidos esteja associada a atividades dependentes de medição confiável, o que se reflete em investimentos em infraestrutura metrológica e em acordos internacionais de reconhecimento mútuo (INMETRO, 2007). No experimento, a integração desses conceitos visa garantir que as medições de VB em argônio sejam confiáveis, rastreáveis e comparáveis internacionalmente.

## 2.2 Grandezas e Unidades de Medida

Grandeza é o atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado (INMETRO, 2012). No experimento, as grandezas relevantes são a tensão elétrica entre eletrodos no instante da ruptura, a pressão absoluta do argônio na câmara, a distância entre eletrodos, a temperatura do gás e do ambiente e a pureza do gás. As grandezas de base do Sistema Internacional e suas relações estão sintetizadas na Figura 12.

Figura 12 – Grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades.



Fonte: Adaptado de INMETRO (2019).

As grandezas físicas classificam-se em fundamentais e derivadas. As sete grandezas de base do SI são comprimento (metro), massa (quilograma), tempo (segundo), corrente elétrica (ampere), temperatura termodinâmica (kelvin), quantidade de substância (mol) e intensidade luminosa (candela). As derivadas definem-se a partir das fundamentais, por exemplo, a tensão elétrica (volt,  $V = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$ ) e a pressão (pascal,  $\text{Pa} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ). A tensão de ruptura é expressa em volts ou, em alta tensão, em quilovolts, e a pressão em pascal, embora a leitura experimental tenha sido registrada em mbar e convertida ao SI quando necessário.

## 2.3 Sistema Internacional de Unidades e Realização Prática

O SI é o sistema de unidades adotado mundialmente como padrão para as medições científicas, tecnológicas, industriais e comerciais, mantido pelo BIPM e referenciado nas normas IEC 60060 e ABNT NBR ISO/IEC 17025. A revisão de 2018 redefiniu as unidades de base a partir de constantes fundamentais da natureza, o metro pela velocidade da luz, o segundo pela transição hiper fina do cézio-133, o quilograma pela constante de Planck, o ampere pela carga elementar e o kelvin pela constante de Boltzmann, eliminando a dependência de artefatos físicos e permitindo a realização das unidades em qualquer laboratório dotado da tecnologia adequada.

A realização prática materializa essas definições por meio de padrões. O volt é realizado por padrões quânticos baseados no efeito Josephson, que geram tensões altamente estáveis e reprodutíveis; o ohm, pelo efeito Hall quântico; e o segundo, por relógios atômicos de cézio. No laboratório de alta tensão, a disseminação ocorre por uma hierarquia de padrões primários, secundários e de trabalho, tema retomado na Seção 2.7.

## 2.4 Calibração: Princípios, Certificados e Procedimentos

Calibração é a operação que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores e as incertezas fornecidos por padrões e as indicações correspondentes do instrumento, utilizando essa informação para corrigir resultados (INMETRO, 2012). A calibração dos sistemas de medição de alta tensão, divisores resistivos e capacitivos, sondas e osciloscópios é essencial para a exatidão e a rastreabilidade de VB. O procedimento envolve a comparação das indicações do instrumento com um padrão de referência em múltiplos pontos da faixa e a documentação dos resultados em certificado.

### 2.4.1 Dados estatísticos em calibração

A avaliação da qualidade das medições apoia-se em parâmetros estatísticos: a média aritmética como melhor estimativa do mensurando; o desvio padrão como medida de dispersão; a repetitividade como concordância entre medições sucessivas sob condições idênticas; o erro como diferença entre a indicação e o valor de referência; e a histerese, relevante para instrumentos sujeitos a efeitos de memória. No experimento, a repetitividade das medições de VB sob condições idênticas de pressão e distância fornece a estimativa de incerteza do Tipo A, enquanto calibração dos instrumentos, resolução e condições ambientais são tratadas como Tipo B.

### 2.4.2 Certificados e procedimentos em alta tensão

O certificado de calibração atesta a conformidade do instrumento com os padrões de referência e detalha resultados, incertezas e rastreabilidade. A conformidade com a ABNT NBR ISO/IEC 17025 é requisito para a aceitação internacional dos certificados, sobretudo em laboratórios acreditados pela Rede Brasileira de Calibração. Em alta tensão, a calibração pode seguir a ABNT NBR IEC 60060-2: selecionam-se padrões de referência com incerteza inferior à do instrumento, aplicam-se tensões conhecidas em toda a faixa de operação, registram-se as indicações, calculam-se desvios e incertezas e documenta-se o resultado. No experimento, os divisores de alta tensão foram calibrados em laboratório acreditado, e a incerteza da calibração foi incorporada ao orçamento de incerteza das medições.

## **2.5 Incerteza de Medição e o GUM**

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações disponíveis. Sua avaliação rigorosa é condição para a confiabilidade dos resultados de VB. As componentes classificam-se em incerteza do Tipo A, avaliada estatisticamente a partir de séries de medições repetidas, e incerteza do Tipo B, avaliada por julgamento científico com base em certificados, especificações, resolução de instrumentos e condições ambientais.

### *2.5.1 O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM)*

O GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) é o documento de referência internacional para a avaliação e a expressão da incerteza de medição. Publicado pelo Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 100:2008) e adotado no Brasil pelo INMETRO, é endossado pelo BIPM, pela IEC, pela ISO e pela ILAC, entre outros organismos. Sua adoção neste trabalho justifica-se por quatro razões convergentes.

- Reconhecimento internacional: por ser o referencial aceito mundialmente, o emprego do GUM assegura que a incerteza declarada seja interpretada e aceita de modo uniforme por laboratórios e organismos de acreditação, condição para a comparabilidade dos resultados.
- Adequação metrológica: o GUM fornece um procedimento sistemático e auditável identificação do mensurando, modelagem das grandezas de entrada, avaliação das componentes Tipo A e Tipo B, cálculo da incerteza combinada, determinação do fator de abrangência e expressão do resultado, compatível com a natureza multivariável de VB.

- Relação com a rastreabilidade: o GUM articula-se diretamente com a cadeia de rastreabilidade, pois cada elo de calibração contribui com uma parcela de incerteza que o método permite combinar de forma coerente até a referência do SI.
- Robustez e generalidade: o método aplica-se a modelos lineares e não lineares por meio da lei de propagação de incertezas e de coeficientes de sensibilidade, abrangendo a equação de Paschen empregada na análise.

Por reunir reconhecimento, adequação, vínculo com a rastreabilidade e robustez, o GUM é o instrumento apropriado para conferir validade metrológica aos valores de VB obtidos, e é nele que se baseia o tratamento de incertezas apresentado no Capítulo 4.

### 2.5.2 Incerteza combinada e expandida

A incerteza padrão combinada é obtida pela combinação quadrática das incertezas padrão individuais, ponderadas pelos coeficientes de sensibilidade:

$$uc^2(y) = \sum (\partial f / \partial x_i)^2 \cdot u^2(x_i)$$

A incerteza expandida resulta da multiplicação da incerteza combinada pelo fator de abrangência  $k$ :

$$U = k \cdot uc(y)$$

Para um nível de confiança de aproximadamente 95%, adota-se em geral  $k = 2$ . Os graus de liberdade efetivos, necessários à escolha de  $k$ , são estimados pela fórmula de Welch–Satterthwaite, que combina os graus de liberdade das diferentes fontes. As etapas recomendadas pelo GUM identificação do mensurando e das grandezas de entrada, avaliação das componentes Tipo A e Tipo B, cálculo da incerteza combinada, determinação dos graus de liberdade efetivos e de  $k$ , e cálculo da incerteza expandida foram seguidas integralmente, conforme detalhado no Apêndice A.

## 2.6 Rastreabilidade Metrológica

A rastreabilidade metrológica é a propriedade de um resultado de medição relacionado a uma referência, em geral, uma unidade do SI por meio de uma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada qual contribuindo para a incerteza (INMETRO, 2012). O propósito do experimento é propor a rastreabilidade de VB a partir das descargas observadas sob os parâmetros da Lei de Paschen. A estrutura hierárquica compõe-se de padrões internacionais mantidos pelo BIPM, nacionais que são mantidos pelos institutos nacionais, como o INMETRO, de referência, utilizados por laboratórios acreditados e de trabalho, usados

diretamente por usuários na indústria. No laboratório de alta tensão do CTM – Centro Tecnológico de Metrologia, a rastreabilidade da tensão até 130 kV é garantida pela calibração dos divisores em laboratórios acreditados pela RBC, com padrões rastreados ao INMETRO e, por extensão, ao BIPM.

A aceitação internacional dos certificados é sustentada por acordos de reconhecimento mútuo: o CIPM MRA, que reconhece os certificados emitidos pelos institutos nacionais, e o ILAC MRA, que reconhece os emitidos por laboratórios acreditados. A participação em comparações interlaboratoriais consolida essa equivalência.

## **2.7 Padrões Metrológicos**

Os padrões metrológicos são as referências que garantem a exatidão e a confiabilidade das medições, classificados segundo sua posição na cadeia de rastreabilidade. O padrão primário realiza diretamente uma unidade a partir de constantes fundamentais, sem referência a outro padrão da mesma grandeza, por exemplo: o padrão de tensão baseado no efeito Josephson. O padrão secundário é calibrado por comparação com o primário, e o padrão de trabalho, de uso rotineiro, é calibrado em relação a padrões de referência ou secundários. Entre os padrões quânticos destacam-se o efeito Josephson para o volt, o efeito Hall quântico para o ohm e os relógios atômicos para o segundo.

A integração desses conceitos com os objetivos do trabalho, a padronização de VB em argônio sob diferentes pressões e distâncias visa assegurar que os resultados sejam comparáveis, reproduzíveis e reconhecidos. A adoção rigorosa de procedimentos de calibração, avaliação de incertezas, rastreabilidade e conformidade normativa é o que confere a essa proposta o estatuto de referência metrológica.

## **2.8 Conformidade Normativa em Metrologia de Alta Tensão**

A confiabilidade de um sistema de medição de alta tensão depende não apenas de sua concepção física, mas de sua conformidade a um arcabouço normativo internacionalmente reconhecido. A série IEC 60060 estabelece as técnicas de ensaio de alta tensão: a Parte 1 define os procedimentos gerais e as condições de ensaio, enquanto a Parte 2, adotada como referência neste trabalho, especifica os requisitos dos sistemas de medição, incluindo critérios de linearidade, repetibilidade, resposta dinâmica e avaliação de incerteza. O atendimento a esses critérios é o que permite qualificar um sistema como apto a fornecer medições rastreáveis e comparáveis.

Complementarmente, a norma IEC 60052 define o emprego de centelhadores esféricos como meio de medição de tensão por descarga disruptiva, tabelando tensões de ruptura em função do diâmetro das esferas, da distância e das condições atmosféricas de referência. Essa norma estabelece, para medições em ar atmosférico, uma incerteza típica da ordem de 3% a um nível de confiança de 95%, um patamar que serve de termo de comparação para os resultados obtidos neste trabalho. A ABNT NBR ISO/IEC 17025, por sua vez, fixa os requisitos gerais de competência de laboratórios de ensaio e calibração, condicionando o reconhecimento dos certificados emitidos à demonstração de competência técnica, rastreabilidade e avaliação adequada de incertezas.

A observância simultânea desses instrumentos normativos confere ao sistema desenvolvido um duplo atributo: rigor metrológico, ao alinhar-se a critérios consagrados de exatidão e repetibilidade, e relevância prática, ao produzir resultados aceitáveis para fins de comparação industrial e laboratorial. A conformidade normativa é, portanto, condição necessária para que os parâmetros caracterizados nesta pesquisa possam aspirar ao estatuto de referência metrológica.

## **2.9 Compatibilidade Metrológica e Comparações Interlaboratoriais**

As comparações interlaboratoriais e as comparações-chave coordenadas pelos institutos nacionais de metrologia constituem o mecanismo prático pelo qual a compatibilidade é verificada em escala internacional. Por meio delas, laboratórios medem um mesmo artefato ou grandeza e confrontam seus resultados, sustentando os acordos de reconhecimento mútuo que validam os certificados de calibração. Esse processo é o que confere significado operacional à rastreabilidade: não basta declarar uma cadeia de comparações; é preciso demonstrar, por evidência experimental, que os resultados são equivalentes dentro das incertezas declaradas.

Para a presente pesquisa, esse conceito é especialmente pertinente. Ao caracterizar a tensão de ruptura do argônio encapsulado com incerteza expandida inferior a 1% e ao confrontá-la com o patamar normativo da IEC 60052, o trabalho fornece elementos quantitativos que poderiam, em desenvolvimento futuro, subsidiar comparações interlaboratoriais voltadas à validação de um padrão nacional de alta tensão baseado em gases nobres.

## **2.10 Avaliação de Incerteza dos Tipos A e B**

O GUM classifica os métodos de avaliação das incertezas em dois tipos, conforme a natureza dos dados que os fundamentam. A avaliação do Tipo A baseia-se na análise estatística de séries de observações repetidas: a partir de um conjunto de medições independentes da

mesma grandeza, estima-se o valor por sua média aritmética e a dispersão pelo desvio padrão experimental. A incerteza padrão associada à média é o desvio padrão experimental da média, obtido pela divisão do desvio padrão das observações pela raiz quadrada do número de medições; quanto maior o número de repetições, menor essa contribuição.

A avaliação do Tipo B, por sua vez, apoia-se em todas as demais informações disponíveis que não decorrem de repetição direta: especificações de fabricantes, certificados de calibração, dados de manuais, experiência prévia e conhecimento do comportamento dos instrumentos. Nesses casos, atribui-se à grandeza uma distribuição de probabilidade compatível com a informação disponível e dela deriva-se a incerteza padrão. As distribuições mais empregadas são a retangular, adequada quando se conhece apenas um intervalo de variação sem preferência por valores internos; a triangular, quando há maior probabilidade dos valores centrais; e a normal, quando a informação provém de uma incerteza expandida previamente declarada.

A conversão de cada distribuição em incerteza padrão emprega um divisor característico: a dimensão do intervalo é dividida por  $\sqrt{3}$  ( $\approx 1,73$ ) no caso retangular, por  $\sqrt{6}$  ( $\approx 2,45$ ) no triangular, e a incerteza expandida é dividida pelo fator de abrangência informado no caso normal. Nos cálculos de incerteza desta pesquisa, as contribuições de resolução dos instrumentos foram tratadas como distribuições retangulares ou triangulares, enquanto as parcelas de leitura associadas a certificados foram tratadas como normais, procedimento que se reflete diretamente nos divisores adotados na Tabela 3.

## 2.11 Incerteza Combinada, Graus de Liberdade Efetivos e Fator de Abrangência

Definidas as incertezas individuais, a incerteza padrão combinada resulta da lei de propagação de incertezas, que para grandezas de entrada não correlacionadas assume a forma  $u_c^2(y) = \sum [\partial f / \partial x_i]^2 \cdot u^2(x_i)$ , em que  $f$  é a função que relaciona o mensurando às grandezas de entrada e as derivadas parciais são os coeficientes de sensibilidade. Cada coeficiente representa quanto o resultado varia em resposta a uma pequena variação da respectiva grandeza de entrada, ponderando sua contribuição na incerteza total.

A escolha do fator de abrangência que converte a incerteza combinada em incerteza expandida exige conhecer os graus de liberdade efetivos da estimativa, que medem a confiabilidade da própria avaliação de incerteza. Esses graus de liberdade são calculados pela fórmula de Welch-Satterthwaite, que combina os graus de liberdade individuais ponderados pelas respectivas contribuições. Quando os graus de liberdade efetivos são elevados, situação em que as componentes do Tipo B dominam com distribuições bem caracterizadas, a

distribuição do resultado aproxima-se da normal e o fator de abrangência tende ao valor 2, correspondente a aproximadamente 95% de probabilidade de abrangência.

### **2.12 Erros Aleatórios e Sistemáticos, Repetibilidade e Reprodutibilidade**

A correta interpretação da incerteza exige distinguir os erros que afetam uma medição. Os erros aleatórios manifestam-se como dispersão de resultados em medições repetidas sob as mesmas condições e são tratados pela avaliação do Tipo A; reduzem-se aumentando o número de observações, mas não podem ser eliminados. Os erros sistemáticos, ao contrário, deslocam consistentemente os resultados em uma mesma direção e devem ser identificados e corrigidos sempre que possível, restando, após a correção, uma incerteza associada à própria correção, tratada pelo Tipo B.

Dois conceitos complementares qualificam a dispersão de um sistema de medição. A repetibilidade descreve a concordância entre resultados de medições sucessivas do mesmo mensurando sob condições idênticas de operador, instrumento e curto intervalo de tempo. A reprodutibilidade descreve a concordância sob condições modificadas diferentes operadores, instrumentos ou laboratórios. A demonstração de repetibilidade é requisito direto para a confiabilidade dos dados experimentais, ao passo que a reprodutibilidade fundamenta a comparabilidade internacional e a participação em comparações interlaboratoriais. No artefato desenvolvido, o controle das grandezas de influência e a padronização do procedimento operacional visam assegurar a repetibilidade, condição verificada pela elevada correlação observada entre os pontos experimentais e o modelo teórico.

### **2.13 Geração e Medição de Alta Tensão**

A metrologia de alta tensão organiza-se em torno de dois eixos técnicos: a geração controlada de tensões elevadas e sua medição com exatidão conhecida. A geração pode produzir tensão contínua, alternada ou de impulso, conforme a finalidade do ensaio. A tensão alternada, obtida por transformadores elevadores, é a mais empregada em ensaios de rigidez dielétrica e foi a base do sistema desenvolvido nesta pesquisa, no qual a alimentação em 220 V é elevada por transformador de alta tensão até os níveis necessários à ruptura. A tensão contínua, gerada por circuitos retificadores e multiplicadores, e a tensão de impulso, produzida por geradores de Marx para simular surtos atmosféricos e de manobra, completam o repertório de fontes empregadas em laboratórios de alta tensão.

A medição de altas tensões impõe desafios específicos, pois os instrumentos convencionais não suportam diretamente os níveis envolvidos. Entre os métodos consagrados

estão os divisores de tensão, que podem ser resistivos, capacitivos ou mistos, tem a função de reduzir a tensão a valores mensuráveis preservando a proporcionalidade; os centelhadores esféricos, normalizados pela IEC 60052, que inferem a tensão a partir da distância de ruptura entre esferas padronizadas; e os medidores de campo elétrico. Cada método possui faixa de aplicação, exatidão e requisitos de calibração próprios, e a escolha adequada é determinante para a incerteza final da medição.

O sistema desta pesquisa articula esses elementos de forma coerente: a tensão aplicada é registrada por um divisor de alta tensão calibrado em laboratório acreditado, assegurando a rastreabilidade da grandeza, enquanto o próprio fenômeno de ruptura entre os eletrodos semiesféricos, análogo, em princípio, ao centelhador esférico normalizado, constitui o mensurando de interesse. A integração entre geração controlada, limitação de corrente por resistor de carga e medição rastreável é o que confere ao artefato a qualidade metrológica necessária para aspirar ao estatuto de referência, em conformidade com os princípios de Kind e Feser (2001) e Küchler (2018).

A segurança é parte indissociável da medição de alta tensão. Operar em níveis superiores a 1 kV exige isolamento adequado, aterramento confiável, limitação de corrente e protocolos rigorosos de operação. Esses requisitos, longe de serem acessórios, condicionam o próprio projeto do sistema de medição e a confiabilidade dos resultados, pois falhas de isolamento ou de aterramento introduziriam erros e riscos inaceitáveis. O detalhamento das medidas de segurança adotadas é apresentado na metodologia, junto à descrição do procedimento experimental.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve o percurso metodológico da pesquisa. Apresenta a Design Science Research (DSR) como método de pesquisa tecnológica, justifica sua adoção e detalha, segundo as seis etapas do modelo de Peffers et al. (2007), a identificação do problema, a definição dos objetivos da solução, a construção e o memorial descritivo do artefato, a demonstração, a avaliação e a comunicação dos resultados.

#### 3.1 Design Science Research

A pesquisa em engenharia convive com a tensão entre rigor metodológico e relevância prática: de um lado, a necessidade de teorias sólidas e validadas; de outro, a demanda por soluções aplicáveis a problemas concretos. A Design Science Research responde a essa dualidade ao deslocar o foco da descrição de fenômenos para a construção e a avaliação de artefatos, modelos, métodos, sistemas ou protótipos que resolvem problemas práticos e, simultaneamente, geram conhecimento científico generalizável (LACERDA et al., 2013).

A base conceitual da DSR remonta a Herbert Simon, em *The Sciences of the Artificial* (SIMON, 1996), que distingue as ciências naturais, voltadas a descrever como o mundo é, das ciências do artificial, dedicadas a projetar como o mundo deve ser para atingir objetivos. Nessa perspectiva, a engenharia é por excelência uma ciência do artificial, ocupada da concepção de artefatos que realizam funções específicas. Van Aken (2004) acrescenta a noção de classe de problemas: para que o conhecimento gerado seja generalizável, o artefato deve ser aplicável a uma classe, e não apenas a um caso isolado. Aqui, a classe de problemas define-se como medições de tensão de ruptura dielétrica em gases nobres sob pressão e encapsulamento controlados, de modo que o sistema desenvolvido para o argônio possa estender-se a outros gases nobres e configurações de alta tensão.

Hevner et al. (2004) estabelecem que a DSR deve atender simultaneamente a rigor científico e a relevância prática. O rigor decorre do uso de métodos sistemáticos de construção e avaliação e da fundamentação teórica; a relevância, do foco em problemas reais. Na metrologia de alta tensão, o rigor exige comparabilidade a nível internacional segundo normas como a IEC 60060-2 e a IEC 60052, e a relevância demanda um sistema seguro, funcional e capaz de fornecer dados rastreáveis. Diferentemente do estudo de caso, que analisa fenômenos em profundidade sem necessariamente gerar soluções replicáveis, e da pesquisa-ação, que intervém na prática sem o compromisso de construir artefatos generalizáveis, a DSR concebe e valida sistemas que ainda não existem (ROMME, 2003).

Adota-se o modelo de Peffers et al. (2007), estruturado em seis etapas: identificação do problema; definição dos objetivos da solução; construção do artefato; demonstração; avaliação; e comunicação dos resultados. Vaishnavi e Kuechler (2009) ressaltam o caráter iterativo do processo: as etapas podem ser revisitadas à medida que novos conhecimentos emergem. As seções seguintes percorrem cada etapa aplicada ao desenvolvimento do sistema experimental.

### **3.2 Etapa 1 – Identificação do Problema**

A primeira etapa delimita o problema que motiva a pesquisa e define o escopo do artefato. No contexto da metrologia de alta tensão no Brasil, o problema identificado é a ausência de rastreabilidade metrológica para tensões acima de 130 kV. O INMETRO (2025) reconhece a existência de padrões até esse limite, mas não acima dele, lacuna que compromete ensaios industriais e laboratoriais em faixas mais elevadas, como os de equipamentos de transmissão e de sistemas de isolamento.

Soma-se a isso a limitação da aplicação direta da Lei de Paschen em ambientes não controlados: impurezas no gás, rugosidade dos eletrodos e variações geométricas afastam os valores medidos dos previstos (MEEK; CRAGGS, 1978; LOEB, 1965). Essa divergência reforça a necessidade de um artefato capaz de gerar dados confiáveis e rastreáveis em condições controladas, que sirva de referência para validar medições de alta tensão e reduza a dependência nacional de padrões externos.

### **3.3 Etapa 2 – Definição dos Objetivos da Solução**

Definido o problema, estabelecem-se os objetivos da solução, estruturados em três eixos: segurança, funcionalidade e validade científica. A segurança impõe-se porque operar acima de 1 kV envolve riscos de descargas, arco voltaico e danos a equipamentos; o artefato incorpora encapsulamento em borossilicato, isolamento adequado, resistor de carga e aterramento confiável. A funcionalidade exige controle preciso da pressão (de 100 a 900 mbar), da distância entre eletrodos e da geometria, eletrodos semiesféricos de alumínio, para reduzir a concentração de campo e aproximar a condição uniforme. A validade científica requer que os dados sejam comparados a modelos teóricos e submetidos a análise estatística, incluindo a correlação de Pearson entre valores medidos e previstos.

Esses objetivos conectam-se diretamente à classe de problemas: um sistema seguro e funcional responde à necessidade prática de medições confiáveis, e a validação estatística contribui para o avanço teórico sobre a ruptura dielétrica em gases nobres, ampliando a aplicabilidade do artefato a outros contextos.

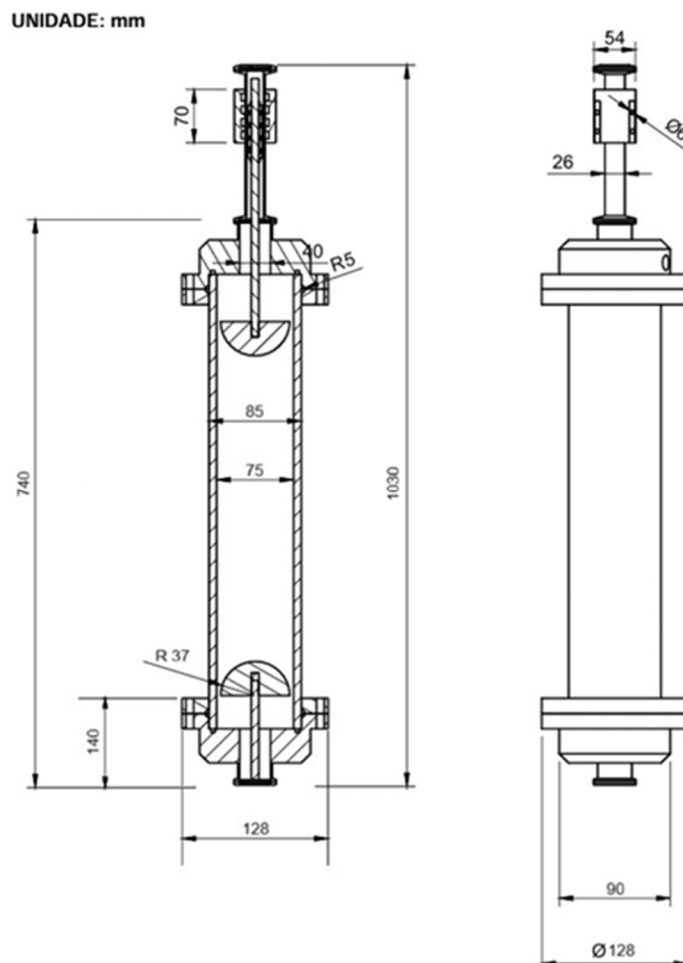
### 3.4 Etapa 3 – Construção do Artefato

A terceira etapa materializa a solução. A construção orientou-se por três princípios: segurança elétrica, precisão metrológica e documentação técnica, de modo que o sistema fosse funcional, adequado ao ambiente laboratorial e reconhecido como cientificamente válido. As subseções a seguir apresentam o memorial descritivo do artefato, o processo de patenteamento e os desafios enfrentados.

#### 3.4.1 Memorial descritivo do artefato

O artefato é um sistema de medição de tensão de ruptura por equilíbrio eletrostático, concebido para gerar e registrar descargas em argônio ultrapuro encapsulado sob pressão e distância controladas. Sua arquitetura integra cinco subsistemas: a câmara experimental, os eletrodos, o sistema de vácuo e bombeamento, o sistema de alta tensão e o sistema de medição e instrumentação. O conjunto e suas dimensões construtivas estão documentados no desenho técnico da Figura 13.

Figura 13 – Desenho técnico do sistema de medição de referência por equilíbrio eletrostático.



Fonte: Autor (2025).

**Câmara experimental.** Tubo de borossilicato que encapsula o argônio e isola a região de descarga do ambiente. O borossilicato foi escolhido por sua resistência térmica e elétrica, baixa condutividade e estabilidade química; sua transparência permite a observação direta da descarga. Conforme o desenho técnico (Figura 3), o conjunto possui altura total da ordem de 1030 mm e diâmetro externo de 128 mm, com flanges de vedação nas extremidades que asseguram a estanqueidade do volume gasoso.

**Eletrodos.** Par de eletrodos semiesféricos de alumínio, dispostos coaxialmente no interior da câmara. A geometria semiesférica reduz a concentração de linhas de campo e aproxima o campo da condição uniforme, preservando a hipótese subjacente à Lei de Paschen (Seção 1.2). O eletrodo inferior é fixo e o superior é móvel, acoplado a um movimentador magnético externo que permite ajustar a distância entre eletrodos sem violar a estanqueidade da câmara, recurso essencial para varrer diferentes espaçamentos sob a mesma carga de gás.

**Sistema de vácuo e bombeamento.** Composto por uma bomba mecânica de vácuo, pelo cilindro de argônio ultrapuro e por válvulas de admissão e isolamento. A bomba remove o ar atmosférico e estabelece o ambiente controlado, evitando que oxigênio e nitrogênio interfiram na ionização do argônio; as válvulas regulam a admissão do gás e o isolamento entre os ramos do sistema. A arquitetura desse subsistema é apresentada na Seção 3.5.1, nas Figuras 4 e 5.

**Sistema de alta tensão.** Responsável pela aplicação gradual da tensão até a ruptura. A alimentação em 220 V (corrente alternada) é elevada por transformador de alta tensão, e a saída é aplicada ao eletrodo móvel por meio de um resistor de carga que limita a corrente de descarga e protege o circuito. O eletrodo fixo é mantido no potencial de aterramento, garantindo segurança e estabilidade elétrica. A fonte dispõe de proteção contra sobrecarga e desligamento automático em caso de falha. O arranjo elétrico é detalhado na Seção 3.5.2 (Figura 6).

**Sistema de medição e instrumentação.** Reúne o medidor de tensão de alta tensão, um divisor calibrado em laboratório acreditado para o registro do valor de disparo, e os sensores de pressão, do tipo piezoelétrico e capacitivo, rastreáveis a padrões nacionais e internacionais, para o monitoramento da pressão do argônio. A distância entre eletrodos é definida e lida pelo conjunto do movimentador magnético. Esses instrumentos materializam as grandezas de entrada do mensurando e suas resoluções alimentam diretamente o orçamento de incerteza (Capítulo 4 e Apêndice A).

Quanto aos procedimentos de montagem, a sequência construtiva compreendeu: usinagem e polimento dos eletrodos semiesféricos, para garantir acabamento superficial homogêneo; montagem dos eletrodos e do movimentador na câmara de borossilicato, com

vedação das flanges; integração da câmara ao sistema de vácuo e à linha de argônio por meio das válvulas; conexão do sistema de alta tensão ao eletrodo móvel e do aterramento ao eletrodo fixo; e instalação dos instrumentos de medição de tensão e pressão.

**Grandezas de influência e condições de operação.** Além das grandezas de entrada diretamente associadas ao mensurando; distância entre os eletrodos e pressão do gás, o sistema está sujeito a grandezas de influência que devem ser controladas ou monitoradas para preservar a validade das medições. A presença do argônio é assegurada pelo procedimento de evacuação prévia da câmara, que remove gases residuais capazes de alterar os coeficientes de ionização. O potencial de aterramento do eletrodo fixo é verificado a cada ensaio, garantindo referência elétrica estável e segurança operacional.

A operação do artefato segue um procedimento que assegura repetibilidade. Inicialmente, evacua-se a câmara e admite-se o argônio até a pressão de ensaio, monitorada pelos sensores rastreáveis e registra-se seu valor. Em seguida, ajusta-se a distância entre eletrodos por meio do movimentador magnético. Estabilizadas as condições, eleva-se gradualmente a tensão aplicada ao eletrodo móvel até a ocorrência da descarga disruptiva, momento em que o medidor registra a tensão de ruptura. O procedimento é repetido para cada combinação de pressão e distância, compondo o conjunto de dados analisado no Capítulo 4. A elevação gradual da tensão, associada à limitação de corrente pelo resistor de carga, evita solicitações abruptas e preserva a integridade dos eletrodos e do encapsulamento.

#### *3.4.2 Processo de patenteamento*

O projeto do artefato foi documentado em esquemas técnicos detalhados (Figura 3) e teve sua patente depositada junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), o que protege a propriedade intelectual e reconhece a inovação tecnológica envolvida. O depósito reforça a relevância prática da pesquisa e a aplicabilidade do sistema em contextos industriais e laboratoriais.

#### *3.4.3 Desafios da construção*

- Controle de impurezas: assegurar a pureza do argônio encapsulado exigiu bombeamento e válvulas de admissão cuidadosamente projetados;
- Estanqueidade do sistema: manter pressão constante demandou vedação confiável das flanges e do acoplamento do eletrodo móvel;
- Isolamento elétrico: operar em alta tensão requereu materiais de elevada rigidez dielétrica e isolamento redundante;

- Documentação técnica: registrar cada etapa de forma replicável foi essencial à validade científica.

Esses desafios foram superados por planejamento e disciplina na execução, resultando em um sistema seguro, funcional e cientificamente válido.

### **3.5 Etapa 4 – Demonstração**

#### *3.5.0 Protocolo de Segurança Elétrica*

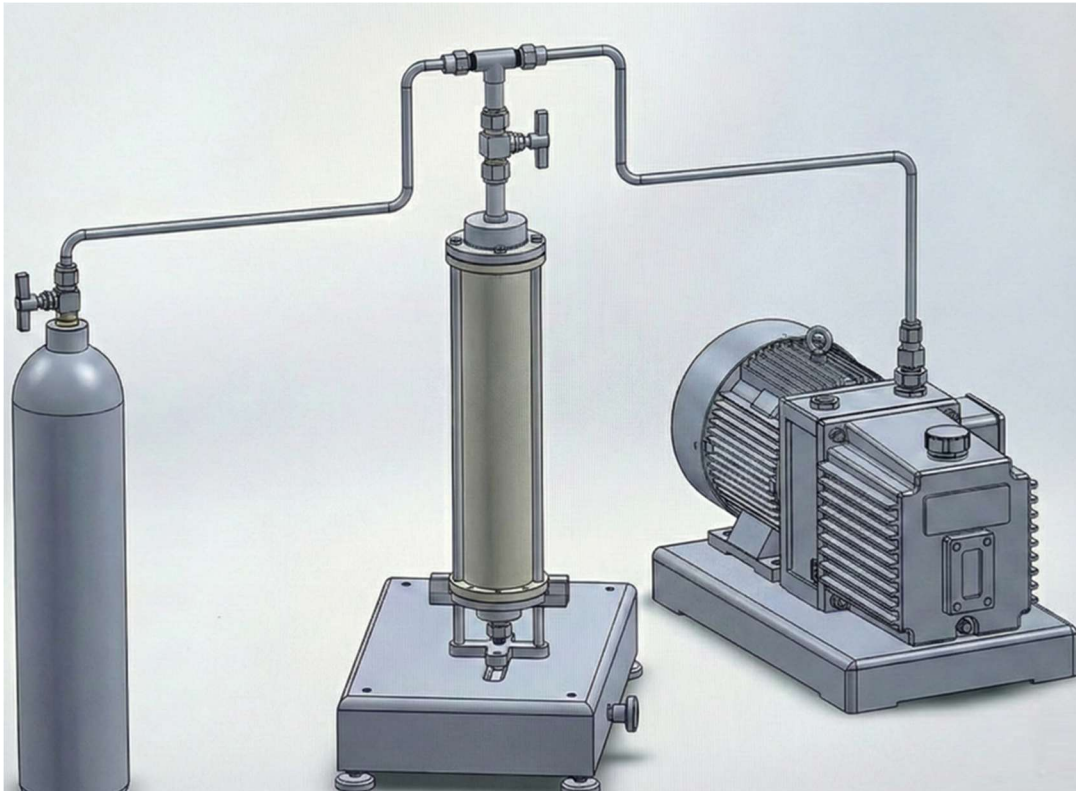
Dada a operação em tensões superiores a 1 kV, a demonstração foi precedida e regida por um protocolo de segurança elétrica que condiciona cada ensaio. O protocolo compreende a verificação prévia do aterramento do eletrodo fixo e da estrutura, a confirmação da integridade do isolamento do encapsulamento de borossilicato, a limitação da corrente de descarga pelo resistor de carga e a delimitação de zona de exclusão em torno da bancada durante a aplicação de tensão. A elevação da tensão é sempre gradual, permitindo a interrupção imediata diante de qualquer anomalia, e a fonte dispõe de proteção contra sobrecarga e desligamento automático em caso de falha.

A demonstração coloca o artefato em operação para verificar se cumpre sua função básica. Os ensaios foram realizados em laboratório, observando o comportamento da descarga em argônio ultrapuro sob diferentes condições de pressão e distância e registrando a tensão de ruptura em cada caso.

#### *3.5.1 Preparação do sistema experimental*

A preparação compreendeu o bombeamento do sistema, a admissão do gás e a medição da pressão. No bombeamento, a câmara foi conectada à bomba de vácuo para remover o ar atmosférico e criar o ambiente controlado, evitando interferência de oxigênio e nitrogênio na ionização do argônio, conforme a Figura 14.

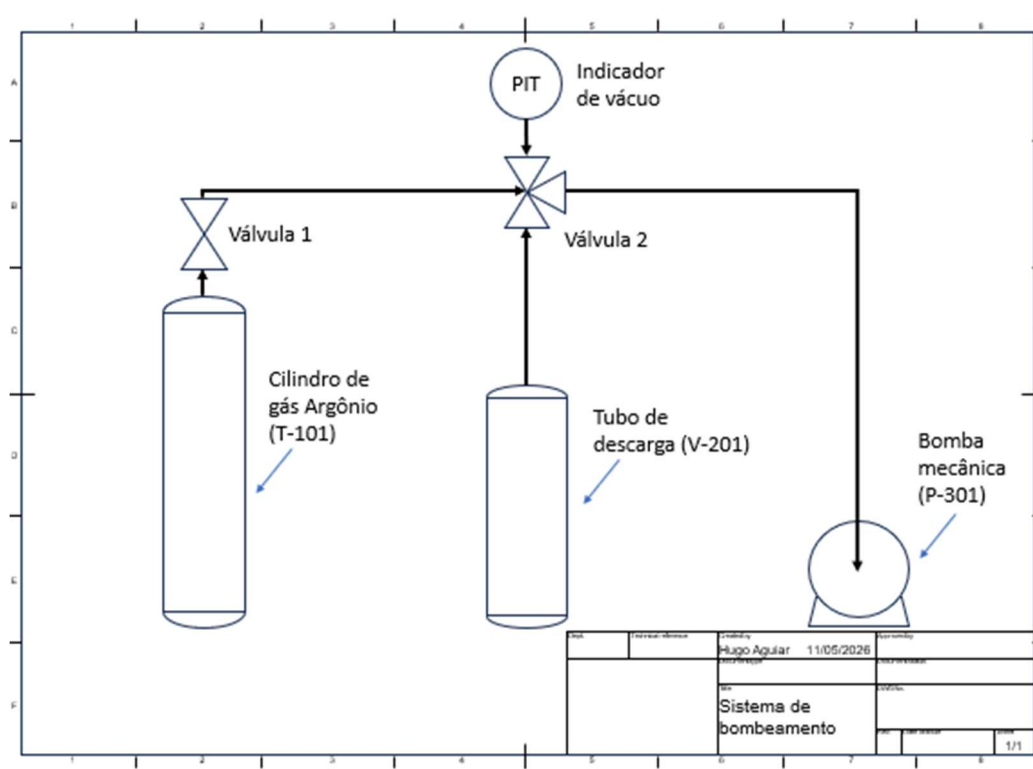
Figura 14 – Representação do sistema de bombeamento.



Fonte: Autor (2025).

Na admissão, o sistema foi interligado ao cilindro de argônio ultrapuro por válvulas ajustadas, garantindo a introdução apenas do gás de interesse. Na medição da pressão, após o preenchimento da câmara, o nível foi ajustado para cada valor experimental (100, 500 e 900 mbar) por meio do medidor padrão. Empregaram-se sensores piezoelétricos e capacitivos calibrados e rastreáveis, pois, no contexto da Lei de Paschen, o produto  $p \cdot d$  é a variável crítica que define VB, e a metrologia do vácuo é indispensável à rastreabilidade em processos de pesquisa e desenvolvimento (PARAGUASSU et al., 2004; INMETRO, 2012). A arquitetura de tubulação e instrumentação do subsistema é apresentada na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama do sistema de bombeamento (P&ID).

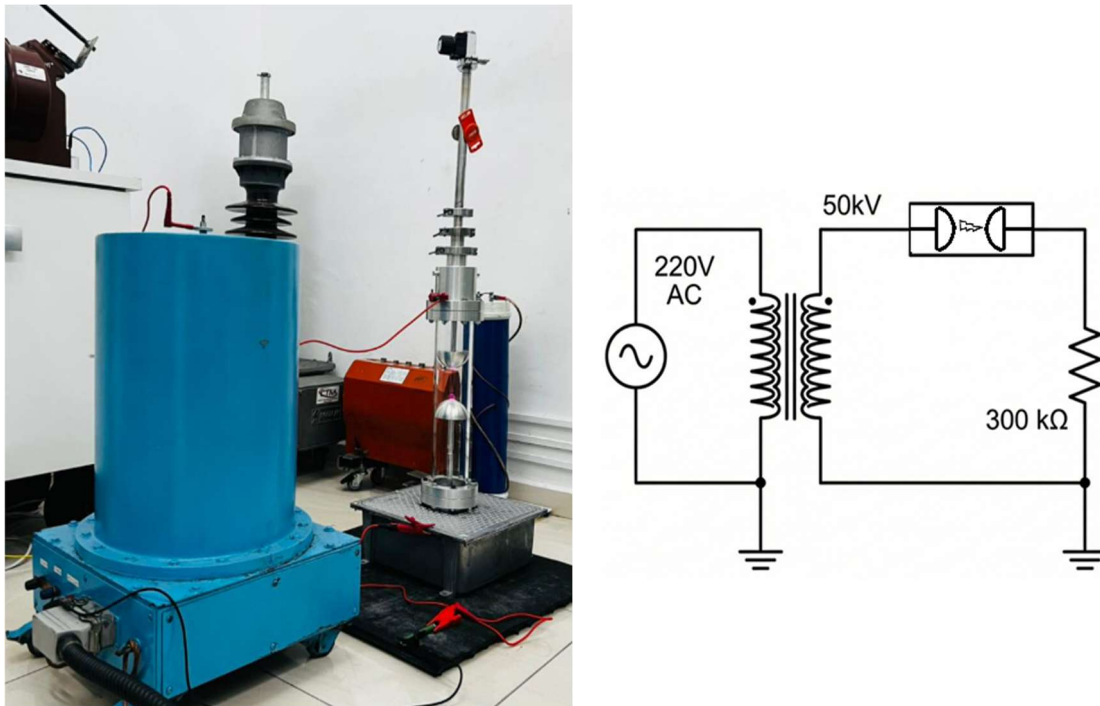


Fonte: Autor (2026).

### 3.5.2 Montagem do circuito

O circuito experimental foi montado conforme o esquema da Figura 16. O eletrodo fixo foi conectado ao potencial de aterramento, garantindo segurança e estabilidade; o eletrodo móvel, à fonte de alta tensão, permitindo a aplicação gradual da tensão até a ruptura; e o sistema de medição registrou os valores de disparo com precisão. A configuração assegurou ensaios controlados e repetíveis.

Figura 16 – Circuito de aplicação de alta tensão e bancada experimental.



Fonte: Autor (2025).

### 3.5.3 Procedimento experimental

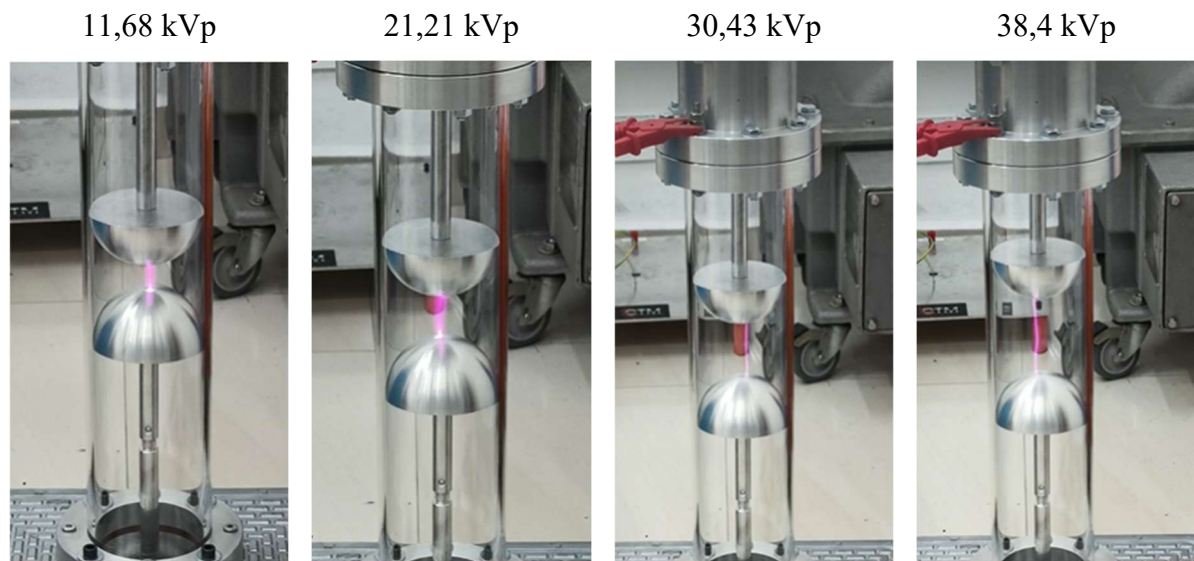
Cada ensaio consistiu na aplicação de tensão crescente até a ruptura, segundo a sequência: ajuste da pressão interna; definição da distância entre eletrodos em incrementos controlados; aplicação gradual da alta tensão, monitorada em tempo real; registro da tensão de disparo no instante da ruptura; e observação visual da descarga, registrada em imagens e vídeos. O procedimento foi repetido em diferentes combinações de pressão e distância, compondo um conjunto robusto de dados.

A tensão foi aplicada em corrente alternada na frequência da rede, 60 Hz, e medida em valor eficaz (RMS). Como a ruptura em regime alternado de baixa frequência ocorre no instante de pico de cada semiciclo (Seção 1.12), os valores eficazes registrados foram convertidos ao valor de pico pela multiplicação por  $\sqrt{2}$  (KIND; FESER, 2001; KÜCHLER, 2018), sob o entendimento de que a tensão de ruptura equivale ao pico da tensão eficaz. Por essa razão, todos os valores de tensão apresentados neste trabalho, incluindo os da Tabela 1 e dos cálculos subsequentes, estão expressos em quilovolts de pico (kV<sub>p</sub>). Essa convenção assegura a coerência entre os dados experimentais, obtidos em AC, e as previsões da Lei de Paschen, formulada para o valor estático (DC) da tensão de ruptura, e alinha-se à prática normalizada em metrologia de alta tensão.

### 3.5.4 Observação da descarga

Durante os ensaios, observou-se a descarga eletrostática entre os eletrodos, caracterizada pela emissão de luz e pelo arco formado no instante da ruptura. A Figura 17 registra a descarga em diferentes distâncias entre eletrodos, evidenciando o canal de plasma entre as faces semiesféricas. A baixa afinidade eletrônica do argônio favorece descargas previsíveis, confirmando a adequação do gás como meio experimental (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005).

Figura 17 – Descarga eletrostática entre os eletrodos em diferentes distâncias.



Fonte: Autor (2025).

### 3.5.5 Resultados iniciais da demonstração

Os resultados iniciais indicaram que VB varia significativamente com a pressão e a distância. Em pressões mais altas (500 e 900 mbar), os valores medidos aproximaram-se dos previstos pela Lei de Paschen; em pressão mais baixa (100 mbar), os níveis de tensão obtidos para cada descarga foram significativamente inferiores aos demais pontos de pressão experimentados, levando as análises da pesquisa para os valores mais elevados. Esses resultados motivaram a avaliação estatística detalhada apresentada no Capítulo 4.

## 3.6 Etapa 5 – Avaliação

A avaliação analisa sistematicamente os resultados, comparando-os ao modelo teórico e submetendo-os a métodos estatísticos para verificar confiabilidade e validade. É a etapa em que se confirma se o artefato resolve o problema identificado e contribui para o avanço teórico (HEVNER et al., 2004).

### 3.6.1 Comparação com a Lei de Paschen e análise de correlação

A avaliação compara os valores medidos aos previstos pela Lei de Paschen (Seção 1.6) e quantifica a concordância pelo coeficiente de correlação de Pearson, que mede a força da relação linear entre duas variáveis, no intervalo de  $-1$  a  $+1$ . Calculado entre valores medidos e previstos, um coeficiente próximo de  $+1$  indica forte correlação e confirma a confiabilidade do artefato. A aplicação desse procedimento e seus resultados quantitativos são apresentados no Capítulo 4.

## 3.7 Etapa 6 – Comunicação dos Resultados

A comunicação assegura que o conhecimento produzido seja disseminado, debatido e validado (TREMBLAY; HEVNER; BERNDT, 2010). Os resultados desta pesquisa são comunicados pela própria dissertação, registro oficial do trabalho; pela apresentação em eventos técnico-científicos da área; por publicações em periódicos especializados; e pelo depósito de patente junto ao INPI, que protege a inovação tecnológica e reconhece a contribuição prática do artefato.

## 3.8 Plano de Tratamento e Análise dos Dados

O tratamento dos dados foi planejado em frentes complementares, executadas após a coleta sistemática dos valores de tensão de ruptura. A primeira é a comparação ponto a ponto entre os valores medidos e os previstos pela Lei de Paschen, com cálculo do erro absoluto e relativo para cada combinação de pressão e distância, permitindo avaliar a aderência local do modelo. A segunda é a análise de correlação, conduzida pelo coeficiente de Pearson entre as séries de valores, com verificação de significância estatística por meio do *p-valor* e dos graus de liberdade, destinada a quantificar a força e a confiabilidade da relação linear. A terceira é a regressão linear aplicada ao comportamento do erro, que fornece a equação de tendência empregada para projetar a exatidão do modelo em faixas estendidas de tensão.

Esse encadeamento garante que a avaliação não se restrinja à inspeção visual das curvas, mas se apoie em estatística inferencial. A definição prévia do método, antes da interpretação dos resultados, preserva o rigor metodológico e evita ajustes oportunistas, em conformidade com as boas práticas de pesquisa científica. Os resultados da aplicação desse plano, incluindo os valores de correlação e a análise de resíduos, são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

## 3.9 Síntese da Aplicação do DSR

A aplicação da DSR mostrou-se adequada por integrar teoria e prática, o artefato fundamenta-se na Lei de Paschen e é validado em laboratório, por produzir conhecimento prescritivo sobre como construir sistemas dessa classe, por garantir rigor mediante etapas sistemáticas e por responder a um problema real de relevância nacional. O caráter iterativo do método permitiu refinar a construção e a demonstração à luz das avaliações sucessivas, confirmando a DSR como escolha metodológica pertinente para pesquisas de engenharia que envolvem inovação tecnológica e desenvolvimento de sistemas experimentais.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos na demonstração e na avaliação do artefato. Inicialmente, justifica-se tecnicamente a seleção da condição de pressão como referência para a análise detalhada. Em seguida, confrontam-se os valores experimentais de tensão de ruptura dielétrica (VB) com as previsões da Lei de Paschen, avalia-se a concordância por meio da correlação de Pearson e discute-se a regressão linear que descreve o comportamento dos dados. Por fim, realiza-se o tratamento das incertezas segundo o GUM, identificando as fontes dominantes e quantificando a incerteza expandida do resultado.

### 4.1 Seleção da Condição Experimental de Referência

Os ensaios de ruptura elétrica foram conduzidos em argônio ultrapuro encapsulado sob três pressões, 100 mbar, 500 mbar e 900 mbar, variando-se a distância entre os eletrodos por meio do movimentador magnético. Embora as três condições tenham sido estudadas, a curva obtida em 500 mbar foi selecionada para a análise detalhada por reunir, simultaneamente, os critérios técnicos de estabilidade, representatividade, comparabilidade e adequação à análise estatística que se discutem a seguir.

A escolha decorre da interação entre quatro fatores operacionais do sistema: a potência disponível na fonte de alta tensão, o intervalo de distâncias entre os eletrodos mecanicamente acessível pelo movimentador, o resistor de carga empregado na limitação de corrente e a temperatura do tubo de borossilicato durante os ensaios. Em pressões mais baixas, próximas a 100 mbar, o produto pressão-distância (pd) desloca-se para a região ascendente da curva de Paschen na qual pequenas variações de distância produzem grandes variações de VB, ampliando a sensibilidade do ensaio a flutuações experimentais. Em pressões mais elevadas, próximas a 900 mbar, a tensão de ruptura cresce a ponto de aproximar-se dos limites de potência da fonte e de solicitar termicamente o tubo de borossilicato, comprometendo a repetibilidade. A condição intermediária de 500 mbar posiciona o conjunto de pontos experimentais em um trecho da curva em que a relação entre distância e tensão é estável e quase linear, favorecendo a reprodutibilidade das medições.

Além da estabilidade operacional, esta condição apresentou a maior aderência ao modelo teórico de Paschen, o que a torna representativa do comportamento físico que se pretende padronizar. Essa aderência confere comparabilidade direta entre valores medidos e previstos e assegura relevância estatística ao conjunto de dados, condição necessária para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson e para a avaliação rigorosa das incertezas. Por reunir estabilidade experimental, representatividade física, comparabilidade com o modelo e

adequação à análise estatística, a curva de 500 mbar constitui a base sobre a qual se desenvolvem as seções seguintes.

#### 4.2 Comparação entre Valores Medidos e Previstos

Os valores experimentais foram comparados aos previstos pela Lei de Paschen, empregando as constantes  $A = 8,6257 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  e  $B = 132,01 \text{ V}/(\text{Pa} \cdot \text{m})$ , obtidas da literatura especializada (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005), e o coeficiente de emissão secundária  $\gamma_{se} = 0,05$ , sob pressão de referência  $p = 50000 \text{ Pa}$ . A aplicação desses parâmetros produziu concordância expressiva entre valores previstos e medidos, destacando-se os pontos de 46,30 kV e 61,43 kV, nos quais os erros relativos foram inferiores a 1%, conforme a Tabela 1.

As medições foram realizadas em corrente alternada a 60 Hz, em valor eficaz, e convertidas ao valor de pico pela multiplicação por  $\sqrt{2}$ , em conformidade com o entendimento de que a tensão de ruptura corresponde ao pico da tensão eficaz (Seção 1.12 e Seção 3.5.3). Essa convenção garante a comparabilidade direta entre os dados experimentais, obtidos em AC, e as previsões da Lei de Paschen, expressas no valor estático da tensão de ruptura.

Tabela 1 – Resultados dos experimentos de VB em 500 mbar

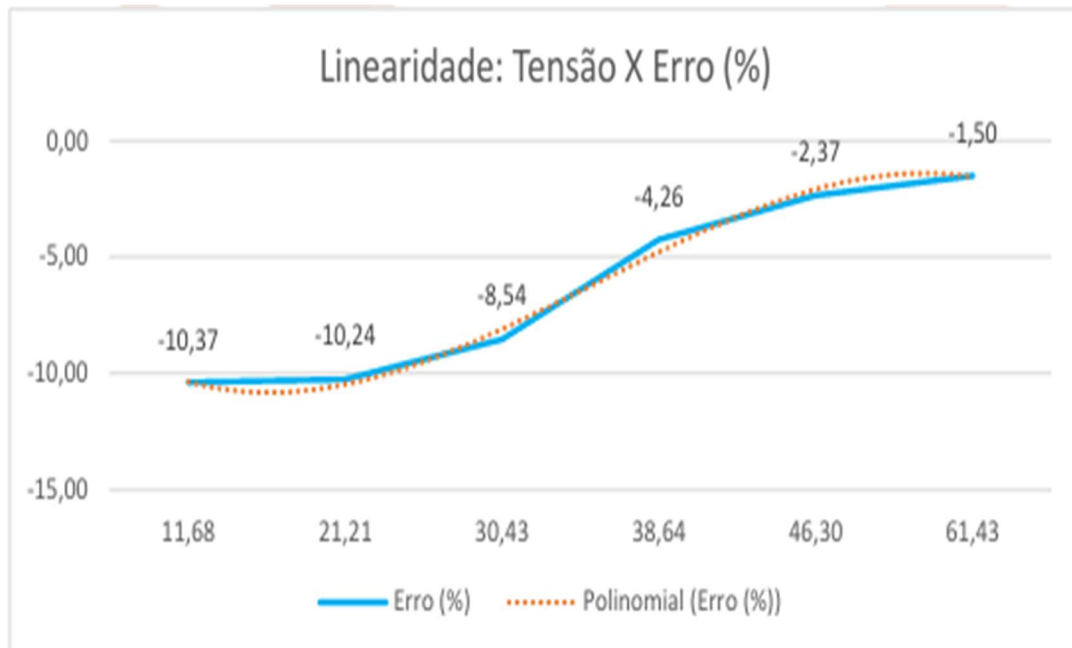
| Distância (mm) | Previsto $V_{prev}$ (kVp) | Experimento $V_{exp}$ (kVp) | Erro (kVp) | Erro (%) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|------------|----------|
| 11,5           | 10,47                     | 11,68                       | -1,21      | -10,38   |
| 22             | 19,04                     | 21,21                       | -2,18      | -10,27   |
| 34             | 27,83                     | 30,43                       | -2,60      | -8,56    |
| 47             | 36,99                     | 38,64                       | -1,65      | -4,27    |
| 59             | 45,20                     | 46,30                       | -1,10      | -2,37    |
| 80             | 60,51                     | 61,43                       | -0,92      | -1,50    |

*Parâmetros utilizados:  $A = 8,6257 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $B = 132,01 \text{ V}/(\text{Pa} \cdot \text{m})$ ;  $\gamma_{se} = 0,05$ ;  $p = 50000 \text{ Pa}$ ;  $d = (11,5; 22; 34; 47; 59; 80) \text{ mm}$ .*

Fonte: Autor, 2026.

Observa-se que o erro relativo decresce de forma sistemática à medida que a distância  $e$ , consequentemente, a tensão de ruptura aumenta, partindo de -10,38% no ponto de menor separação (11,5 mm) e convergindo para -1,50% no ponto de 80 mm. Esse comportamento é coerente com a física do fenômeno: em distâncias menores, o sistema opera em região mais sensível da curva de Paschen, na qual a influência relativa da resolução dos instrumentos e das pequenas variações geométricas é maior; em distâncias maiores, a medição torna-se proporcionalmente mais estável e a previsão teórica aproxima-se do valor medido.

Gráfico 1 – Linearidade entre tensão experimental e erro percentual



Fonte: Autor, 2026.

A análise do comportamento linear entre os pontos de 38,64 kV e 61,43 kV permite projetar a tendência do erro percentual para tensões da ordem de 100 kV. Aplicando-se a equação de tendência  $y = 0,0570482441330092x - 5,0078204349872700$ , verifica-se que a exatidão tende a permanecer inferior a 1% nessa faixa estendida. Essa concordância reforça a validade empírica da Lei de Paschen para o argônio encapsulado e indica que o modelo matemático ajustado descreve adequadamente o regime de operação estudado.

#### 4.3 Validação Empírica da Lei de Paschen

As constantes A e B da Lei de Paschen possuem natureza empírica e dependem do gás, de sua pureza, da geometria dos eletrodos e das condições experimentais. Neste trabalho, seus valores foram fundamentados na literatura científica e referidos às condições específicas de argônio ultrapuro sob pressão controlada. A confiabilidade dessa transposição foi avaliada pela correlação de Pearson entre as séries de valores, cujo resultado, superior a 0,99, é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise de correlação de Pearson

**Matriz de Correlações**

| Matriz de Correlações |              | Previsto (kV) | Experimental (kV) | Distância (mm) |
|-----------------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|
| Previsto (kV)         | R de Pearson | —             |                   |                |
|                       | gl           | —             |                   |                |
|                       | p-value      | —             |                   |                |
| Experimental (kV)     | R de Pearson | 0.999         | —                 |                |
|                       | gl           | 4             | —                 |                |
|                       | p-value      | < .001        | —                 |                |
| Distância (mm)        | R de Pearson | 1.000         | 0.999             | —              |
|                       | gl           | 4             | 4                 | —              |
|                       | p-value      | < .001        | < .001            | —              |

Fonte: Autor, 2026.

Os coeficientes de correlação obtidos: 0,999 entre valores experimentais e previstos, 1,000 entre distância e previsto e 0,999 entre distância e experimental, com p-valor inferior a 0,001 para quatro graus de liberdade indicam relação linear praticamente perfeita entre as variáveis. Esse grau de correlação confirma que o modelo teórico reproduz fielmente o comportamento medido e atesta a confiabilidade do artefato como instrumento de caracterização de VB.

#### 4.3.1 Origem e interpretação dos coeficientes A e B

Os coeficientes A e B derivam da descrição do primeiro coeficiente de ionização de Townsend na forma  $\alpha = A \cdot p \cdot \exp(-B \cdot p/E)$ , em que A relaciona-se à frequência de colisões ionizantes por unidade de comprimento e pressão, e B associa-se à energia necessária para a ionização, refletindo o potencial de ionização efetivo do gás. Os valores adotados:  $A = 8,6257 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  e  $B = 132,01 \text{ V}/(\text{Pa} \cdot \text{m})$  provêm de Lieberman e Lichtenberg (2005), referência consolidada em física de descargas e processamento por plasma.

Do ponto de vista do método, a obtenção desses parâmetros apoia-se em ajuste por regressão linear da forma linearizada da relação de Townsend: ao tomar-se o logaritmo da expressão de  $\alpha$ , obtém-se uma dependência linear entre  $\ln(\alpha/p)$  e o inverso do campo elétrico reduzido ( $p/E$ ), cujo coeficiente angular fornece B e cujo coeficiente linear fornece A. Aplicada aos dados de ruptura, essa linearização traduz-se na reta de tendência observada no Gráfico 1, na qual a relação entre tensão de ruptura e erro percentual exibe comportamento linear no intervalo pesquisado.

A interpretação física dos resultados indica que os parâmetros tabelados descrevem satisfatoriamente o argônio ultrapuro encapsulado: a forte linearidade e a correlação superior a

0,99 demonstram que o ajuste é representativo do regime experimental. Reconhecem-se, contudo, as limitações da abordagem. Os coeficientes A e B são estritamente válidos dentro do intervalo de  $p_d$  ensaiado e para a geometria semiesférica adotada; sua extrapolação para pressões, distâncias ou geometrias muito distintas requer nova validação, pois a Lei de Paschen pressupõe campo aproximadamente uniforme e desvios geométricos alteram a distribuição de campo e, por consequência, os valores efetivos das constantes.

Os parâmetros assim validados podem ser considerados mais precisos, para a aplicação específica, do que os valores normativos da IEC 60052, uma vez que a norma estabelece referências consensuais para medições em ar atmosférico, sem contemplar a especificidade de gases nobres em ambientes encapsulados. A abordagem experimental adotada reduz incertezas associadas a impurezas, variações geométricas e condições ambientais, ampliando a rastreabilidade metrológica dos resultados.

#### **4.4 Tratamento das Incertezas**

O tratamento das incertezas seguiu o Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). Cada componente foi caracterizado segundo seu tipo de distribuição, valor de entrada, divisor estatístico e coeficiente de sensibilidade. Os coeficientes de sensibilidade foram obtidos a partir das derivadas parciais da equação de Paschen em relação a cada variável de entrada, estimando o impacto de pequenas variações sobre o valor de saída. As incertezas padrão foram calculadas pela divisão do valor de entrada pelo divisor correspondente ao tipo de distribuição: retangular, normal ou triangular e ponderadas pelos respectivos coeficientes de sensibilidade, compondo a incerteza padrão combinada.

A análise dos componentes revelou hierarquia clara entre as fontes de incerteza. A distância entre eletrodos, em suas parcelas de resolução e de leitura, constituiu a contribuição dominante, responsável por mais de 80% da incerteza total. A pressão respondeu por contribuição secundária, da ordem de 15%. A impureza do gás mostrou-se desprezível, confirmando a eficácia do emprego de argônio ultrapuro, e a imprecisão da curva teórica contribuiu com menos de 1%. A composição dessas parcelas e a aplicação do fator de abrangência  $k = 2,00$  conduziram a uma incerteza expandida de  $U_{exp} = 0,523$  kV, equivalente a 0,85% do valor medido no ponto de 61,43 kV, conforme detalhado na Tabela 3.

Tabela 3 – Cálculo da incerteza de medição

| Ponto (kV) |            |            |         |         |            |         |          |          |            |
|------------|------------|------------|---------|---------|------------|---------|----------|----------|------------|
| 61,43      |            |            |         |         |            |         |          |          |            |
| Componente | Descrição  | Valor      | Unidade | Divisor | Tipo       | GL      | Upad     | c.i.     | Saída (kV) |
| variância  | desv pad   | 0,00707107 | kV      | 1       | normal     | 2       | 0,007071 | 1        | 0,00707107 |
| d          | Resolução  | 0,0005     | m       | 2,45    | triangular | 1000000 | 0,000204 | 767,92   | 0,1567506  |
|            | Leitura    | 0,0005     | m       | 2       | k          | 1000000 | 0,00025  | 767,92   | 0,19197949 |
| p          | Resolução  | 1          | Pa      | 3,46    | retangular | 100000  | 0,288675 | 1,60E-03 | 0,00046188 |
|            | Leitura    | 105        | Pa      | 2,04    | k          | 100000  | 51,47059 | 1,60E-03 | 0,08235294 |
| Gás        | Impureza   | 0,0001     | %       | 1       | normal     | 100000  | 0,0001   | 100      | 4,987E-06  |
| Eletrodo   | Impureza   | 0,1        | %       | 1       | normal     | 100000  | 0,1      | 100      | 0,004987   |
|            | Formato    | 0,1        | %       | 1       | normal     | 100000  | 0,1      | 100      | 0,004987   |
| Curva      | Imprecisão | 0,1        | %       | 1       | normal     | 100000  | 0,1      | 100      | 0,004987   |

|                |             |    |
|----------------|-------------|----|
| Raiz(Somaquad) | 0,26        |    |
| GL             | 71188189,23 |    |
| k              | 2,00        |    |
| Uexp           | 0,523       | kV |
| Uexp%          | 0,85        | %  |

Fonte: Autor, 2026.

O resultado é satisfatório do ponto de vista metrológico, pois a variabilidade total do sistema permanece inferior a 1%. A predominância da resolução dos instrumentos e da pureza do gás como fatores determinantes confirma que o uso de argônio ultrapuro e de sistemas de medição de alta precisão reduz significativamente a incerteza, evidenciando a importância de condições experimentais controladas para a confiabilidade dos resultados. O detalhamento completo das fórmulas, substituições numéricas e da propagação das incertezas que conduzem a esse valor encontra-se no Apêndice A.

#### 4.5 Análise de Resíduos e Qualidade do Ajuste

A qualidade do ajuste entre o modelo teórico e os dados experimentais pode ser examinada pela análise dos resíduos, definidos como a diferença entre o valor experimental e o valor previsto em cada ponto. A inspeção da coluna de erros da Tabela 1 revela um padrão sistemático: os resíduos são todos negativos e decrescem em magnitude relativa à medida que a tensão aumenta, partindo de -10,38% no menor espaçamento e convergindo para -1,50% no maior. Esse comportamento monotônico, em vez de aleatório, indica a presença de uma componente sistemática associada à região de operação na curva de Paschen, e não de mero ruído de medição.

A interpretação física desse padrão é consistente com a fundamentação teórica. Nos menores espaçamentos, o sistema opera em trecho mais sensível da curva, no qual a influência relativa da resolução na medição da distância, fonte dominante de incerteza, é proporcionalmente maior, ampliando o desvio percentual. À medida que a distância cresce, a medição torna-se proporcionalmente mais estável e o resíduo relativo aproxima-se de zero. A elevada correlação de Pearson, superior a 0,99, confirma que, descontada essa tendência sistemática, a relação linear entre as variáveis é aderente, atestando que o modelo descreve o fenômeno com fidelidade no intervalo analisado.

A reta de tendência ajustada ao comportamento do erro permite, ainda, projetar a exatidão do modelo para tensões superiores às ensaiadas. A extrapolação indica que, na ordem de 100 kV, o erro tende a permanecer inferior a 1%, o que sugere robustez do modelo na faixa estendida. Tal projeção deve, contudo, ser interpretada como indicativa, uma vez que a validade da Lei de Paschen pressupõe a manutenção do regime de Townsend e da condição de campo quase uniforme, conforme discutido nas limitações da pesquisa.

#### **4.6 Discussão Integrada dos Resultados**

Reunidos os resultados das seções anteriores, configura-se um quadro coerente que sustenta a proposta central do trabalho. A concordância crescente entre valores medidos e previstos, a correlação de Pearson praticamente unitária, a estrutura dos resíduos compatível com a física do fenômeno e a incerteza expandida inferior a 1% convergem para uma mesma conclusão: o sistema desenvolvido caracteriza a tensão de ruptura do argônio encapsulado com exatidão e rastreabilidade compatíveis com requisitos metroológicos exigentes.

O confronto com o patamar normativo é especialmente satisfatório. Enquanto a IEC 60052 estabelece incerteza típica da ordem de 3% para medições em ar atmosférico a 95% de confiança, os resultados aqui obtidos, em condições controladas de argônio encapsulado, atingiram 0,85%. Essa diferença não decorre de uma suposta deficiência da norma, mas da especificidade das condições: a norma fornece referências consensuais e generalistas para o ar, ao passo que este trabalho explora um meio inerte, puro e encapsulado, no qual as fontes de variabilidade associadas a impurezas e condições ambientais são drasticamente reduzidas. Os parâmetros A e B, retirados da literatura e validados empiricamente, mostram-se assim mais representativos para o contexto da pesquisa.

Do ponto de vista metodológico, a aplicação da Design Science Research articulou de forma consistente a construção do artefato, sua demonstração experimental e a avaliação rigorosa dos resultados. A integração entre fundamentação teórica, memorial descritivo,

tratamento estatístico e análise de incerteza materializa o duplo compromisso da DSR com rigor científico e relevância prática, sustentando a contribuição do trabalho tanto para o avanço do conhecimento quanto para a infraestrutura metrológica nacional em alta tensão.

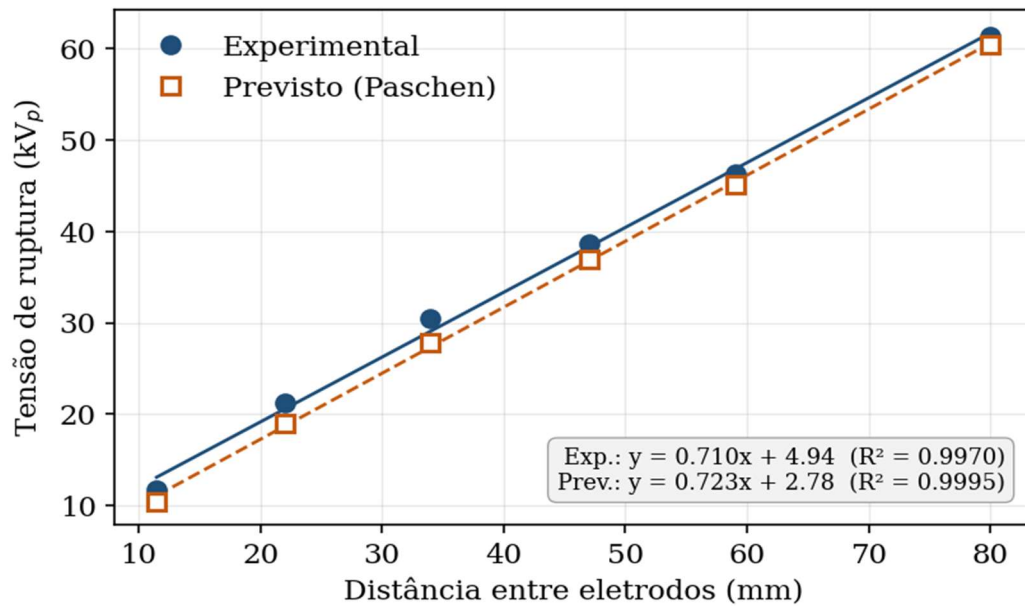
#### **4.7 Análises Gráficas Complementares e Métodos Quantitativos**

Para aprofundar a validação do artefato, aplicaram-se análises gráficas ao conjunto de dados de e métodos quantitativos complementares: regressão linear da tensão de ruptura em função da distância, análise de concordância entre valores experimentais e previstos, análise de resíduos, concordância de métodos pela técnica de Bland-Altman e hierarquização das fontes de incerteza por diagrama de Pareto. Todas as análises baseiam-se exclusivamente nos valores medidos, expressos em quilovolts de pico (kVp), sem qualquer alteração dos resultados originais.

##### *4.7.1 Regressão linear da tensão de ruptura em função da distância*

A primeira análise ajusta, por mínimos quadrados ordinários, modelos lineares para as tensões experimental e prevista em função da distância entre eletrodos. O Gráfico 2 apresenta os dois ajustes. A série experimental é descrita por  $V_{\text{exp}} = 0,710 \cdot d + 4,94$ , com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9970$ , e a série prevista por  $V_{\text{prev}} = 0,723 \cdot d + 2,78$ , com  $R^2 = 0,9995$ . A proximidade entre os coeficientes angulares: 0,710 e 0,723 kVp/mm indica que medição e modelo compartilham praticamente a mesma taxa de variação da tensão com a distância, enquanto a diferença entre os coeficientes lineares reflete o deslocamento sistemático discutido adiante.

Gráfico 2 – Regressão linear da tensão de ruptura em função da distância (500 mbar)



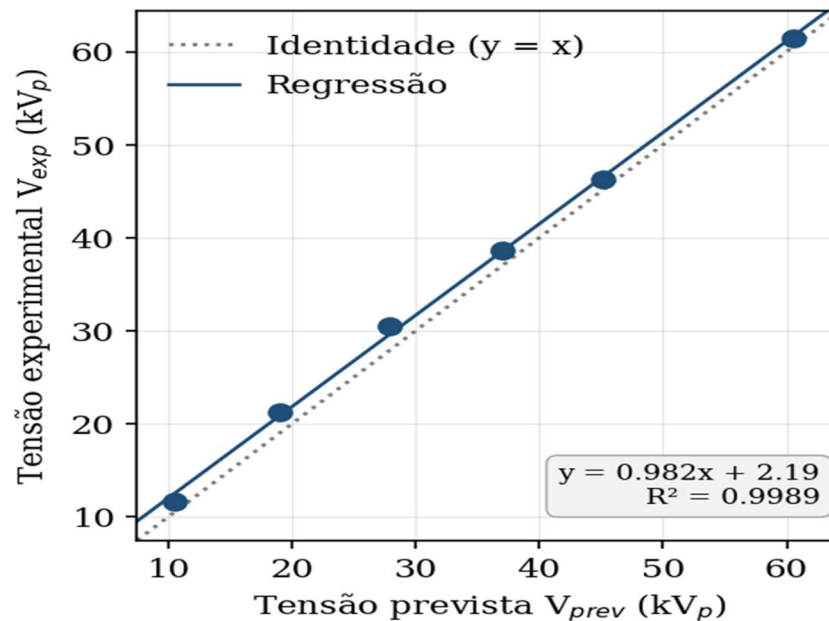
Fonte: Autor, 2026.

Os elevados coeficientes de determinação confirmam que, na faixa de produto pressão-distância pesquisada, a tensão de ruptura varia de forma essencialmente linear com a distância. Esse resultado é coerente com a fundamentação teórica: o sistema opera em um trecho da curva de Paschen no qual a relação entre tensão e distância é aproximadamente linear, o que favorece a previsibilidade e a reprodutibilidade das medições.

#### 4.7.2 Concordância entre valores experimentais e previstos

A segunda análise confronta diretamente as tensões experimental e prevista. O Gráfico 3 dispõe os pares de valores em relação à reta de identidade ( $y = x$ ), que representaria concordância, e à reta de regressão ajustada aos dados. A regressão resulta em  $V_{\text{exp}} = 0,982 \cdot V_{\text{prev}} + 2,19$ , com  $R^2 = 0,9989$ . O coeficiente angular muito próximo da unidade (0,982) demonstra proporcionalidade entre as duas grandezas, enquanto o intercepto positivo de 2,19 kV<sub>p</sub> evidencia que o modelo tende a subestimar ligeiramente a tensão de ruptura, sobretudo nos menores valores.

Gráfico 3 – Concordância entre tensão experimental e prevista, com reta de identidade

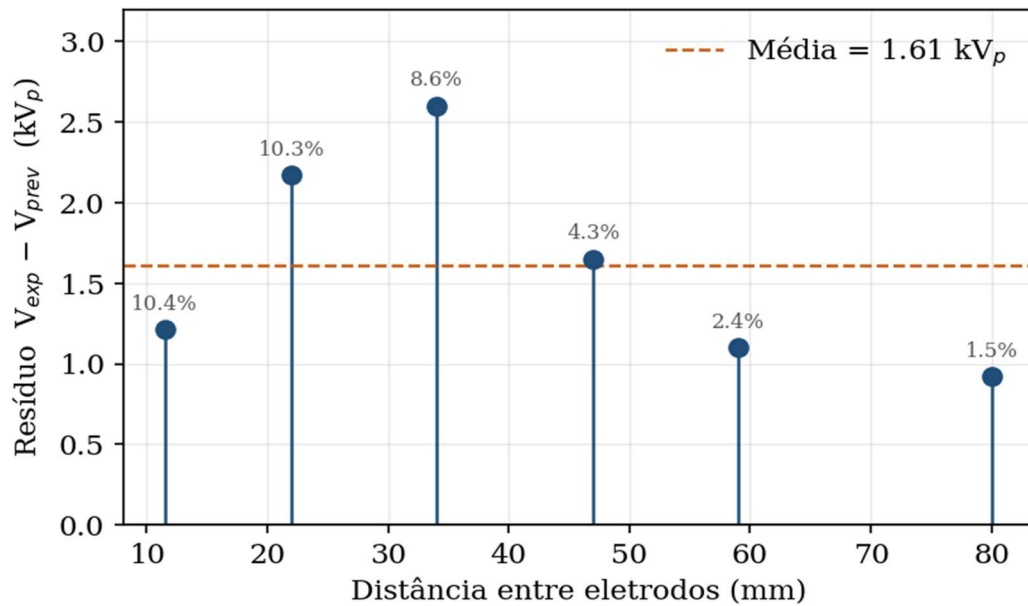


Fonte: Autor, 2026.

O posicionamento consistente dos pontos acima da reta de identidade revela um viés sistemático, e não disperso: a previsão teórica situa-se sempre abaixo do valor medido. Esse padrão é fisicamente plausível, pois as constantes A e B foram extraídas da literatura para condições de referência, ao passo que a geometria real dos eletrodos e as condições específicas do ensaio introduzem pequenas diferenças. A magnitude reduzida do desvio e o  $R^2$  próximo da unidade confirmam, contudo, a adequação do modelo.

#### 4.7.3 Análise de resíduos

A análise de resíduos examina a diferença entre o valor experimental e o previsto em cada ponto. O Gráfico 4 apresenta esses resíduos em função da distância, com a respectiva indicação do erro relativo. Todos os resíduos são positivos, com média de 1,61 kVp e desvio-padrão de 0,66 kVp, confirmando quantitativamente a sistemática do modelo. Observa-se um comportamento não monotônico do resíduo absoluto, que atinge seu valor máximo de 2,60 kVp na distância intermediária de 34 mm e decresce em direção às extremidades.

Gráfico 4 – Resíduos ( $V_{exp} - V_{prev}$ ) por distância, com erro relativo associado

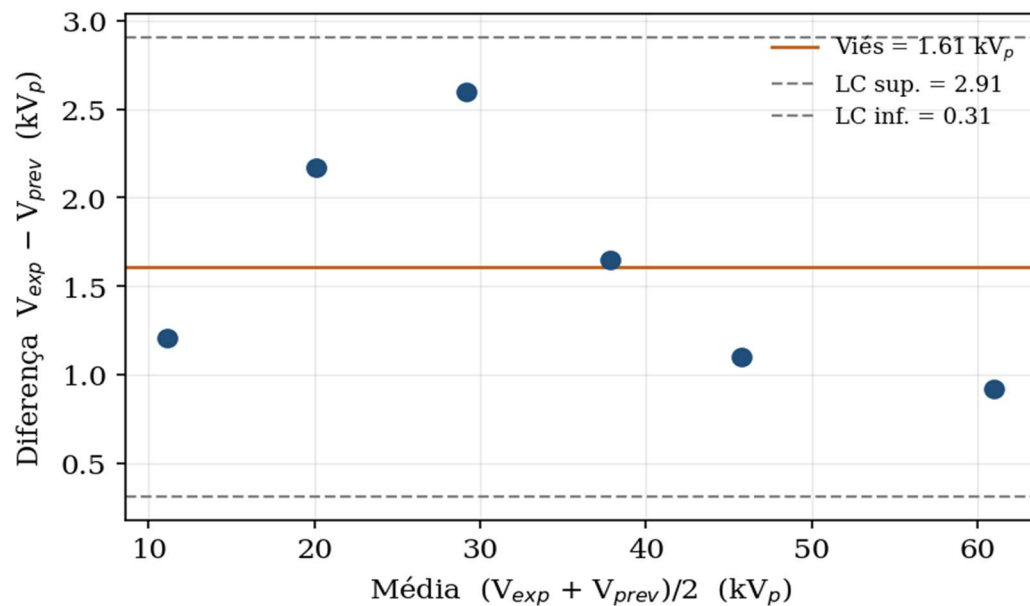
Fonte: Autor, 2026.

É fundamental distinguir o comportamento do resíduo absoluto do comportamento do erro relativo. Enquanto o resíduo em kV<sub>p</sub> não decresce de modo monotônico, o erro relativo diminui sistematicamente de 10,38% no menor espaçamento para 1,50% no maior, como já evidenciado na Tabela 1 e no Gráfico 1. Essa distinção decorre do crescimento do denominador: para um resíduo absoluto de ordem comparável, o erro percentual reduz-se à medida que a tensão de ruptura aumenta. Em termos metrológicos, isso significa que a exatidão relativa do sistema melhora nas tensões mais elevadas, justamente a faixa de maior interesse para aplicações de alta tensão.

#### 4.7.4 Concordância de métodos pela técnica de Bland-Altman

A técnica de Bland-Altman, consagrada na comparação entre dois métodos de medição, avalia a concordância representando a diferença entre os métodos em função de sua média. Aqui, os métodos comparados são a previsão teórica e a medição experimental. O Gráfico 5 apresenta o resultado: o viés médio é de 1,61 kV<sub>p</sub>, e os limites de concordância, definidos como o viés acrescido de mais ou menos 1,96 desvio padrão, situam-se entre 0,31 e 2,91 kV<sub>p</sub>.

Gráfico 5 – Análise de concordância de Bland-Altman entre previsão e experimento



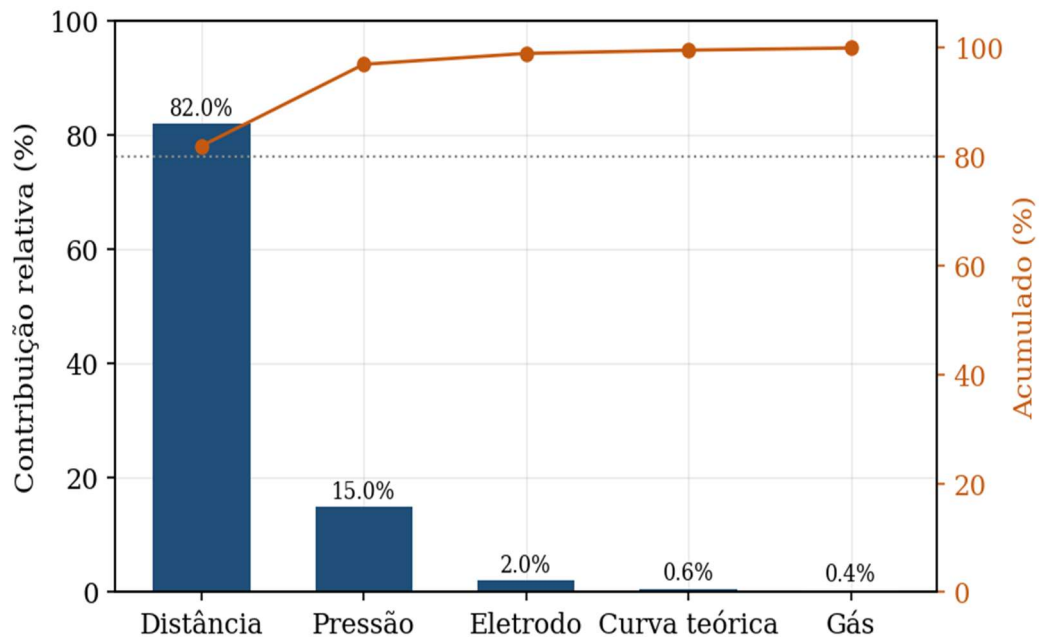
Fonte: Autor, 2026.

O fato de todos os pontos situarem-se acima da linha de viés nulo confirma a natureza sistemática e não aleatória da diferença entre previsão e experimento. O viés médio de 1,61 kVp corresponde a aproximadamente 4% do valor médio da faixa ensaiada, e os limites de concordância são estreitos, atestando boa consistência entre os métodos. A ausência de tendência crescente da diferença com a média indica que o viés não se amplifica com a tensão, o que reforça a robustez do modelo ao longo de todo o intervalo medido.

#### 4.7.5 Hierarquização das fontes de incerteza por diagrama de Pareto

Por fim, aplicou-se o diagrama de Pareto ferramenta clássica da engenharia da qualidade à hierarquização das fontes de incerteza identificadas no orçamento da Seção 4.4. O Gráfico 6 ordena as contribuições de forma decrescente e acrescenta a curva de percentual acumulado. As participações aproximadas, coerentes com o orçamento de incerteza da Tabela 3, são: distância entre eletrodos, cerca de 82%; pressão, cerca de 15%; geometria do eletrodo, cerca de 2%; imprecisão da curva teórica e impureza do gás, inferiores a 1% cada.

Gráfico 6 – Diagrama de Pareto das fontes de incerteza de medição



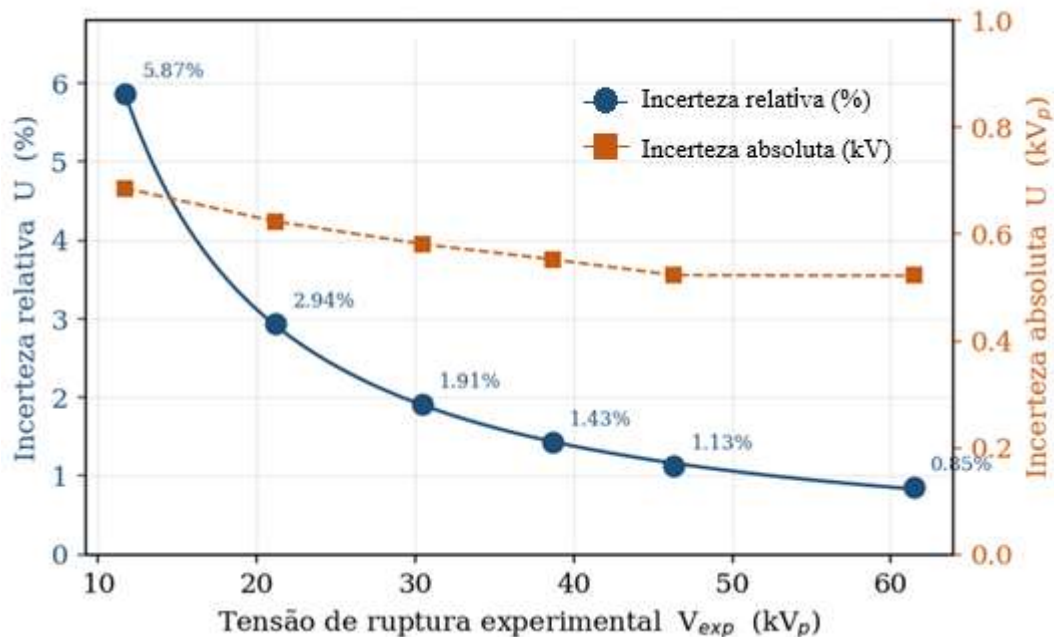
Fonte: Autor, 2026.

O diagrama evidencia que uma única fonte a distância entre eletrodos já ultrapassa o limiar de 80% comumente adotado como critério de priorização, e que distância e pressão respondem, em conjunto, por cerca de 97% da incerteza total. Essa hierarquização orienta objetivamente os esforços de melhoria: ganhos expressivos de exatidão dependem, sobretudo, do aprimoramento da medição da distância entre os eletrodos, ao passo que investimentos em controle de pureza do gás ou refinamento da curva teórica teriam efeito marginal. A análise traduz, em linguagem própria da qualidade, a conclusão metrológica já antecipada no tratamento das incertezas.

#### 4.7.6 Comportamento da incerteza em função da tensão

A última análise examina como a incerteza de medição se comporta ao longo da faixa de tensão ensaiada, a partir da coluna de incerteza relativa da Tabela 1. O Gráfico 7 apresenta, em eixo duplo, a incerteza relativa (em %) e a incerteza absoluta (em kVp) em função da tensão de ruptura experimental. A incerteza relativa decresce acentuadamente, de 5,87% no menor ponto (11,68 kVp) para 0,85% no maior (61,43 kVp), e é descrita com excelente aderência por uma lei de potência,  $U(\%) = 106,2 \cdot V^{-1,18}$ , com coeficiente de determinação  $R^2 = 0,9999$ .

Gráfico 7 – Comportamento das incertezas relativa e absoluta em função da tensão experimental



Fonte: Autor, 2026.

O mecanismo subjacente a esse comportamento é revelado pela incerteza absoluta, que permanece aproximadamente constante ao longo de toda a faixa, variando apenas de 0,69 kVp no menor ponto a 0,52 kVp no maior. Como a incerteza absoluta é quase invariante, a incerteza relativa, sua razão pela tensão medida decai de forma praticamente inversa ao aumento da tensão, o que explica o expoente próximo de  $-1$  da lei de potência ajustada. Esse achado tem significado metrológico direto: a exatidão relativa do sistema melhora à medida que a tensão de ruptura cresce, atingindo o valor mínimo de 0,85% no ponto de 61,43 kVp, coerente com a incerteza expandida  $U_{exp} = 0,523$  kVp determinada na Seção 4.4. Confirma-se, assim, que a faixa de tensões mais elevadas, de maior interesse para aplicações de alta tensão é também a de melhor desempenho metrológico do artefato.

Em síntese, as análises convergem e se reforçam mutuamente: a forte linearidade, a concordância quase unitária entre previsão e experimento, a estrutura sistemática e contida dos resíduos, o viés reduzido revelado pela análise de Bland-Altman e a clara hierarquização das incertezas compõem um quadro quantitativo robusto, que sustenta a validade do artefato como sistema de medição de referência.

## CONCLUSÃO

Esta dissertação procura responder o seguinte problema de pesquisa: como padronizar medições de alta tensão por meio da ionização de gases? Os resultados obtidos permitem responder afirmativamente a essa questão: a tensão de ruptura dielétrica (VB) em argônio ultrapuro encapsulado pode ser caracterizada e padronizada com elevada exatidão e rastreabilidade, desde que a medição seja conduzida em sistema experimental controlado e fundamentada na Lei de Paschen.

O objetivo geral: caracterizar experimentalmente a tensão de ruptura dielétrica com vistas à padronização dessa grandeza, foi plenamente alcançado. O sistema desenvolvido permitiu medir VB de forma reprodutível e comparar os valores obtidos com as previsões teóricas, obtendo correlação de Pearson superior a 0,99 e incerteza expandida inferior a 1%. Os objetivos específicos foram igualmente atendidos, como se sintetiza a seguir.

O primeiro objetivo específico: projetar e construir um protótipo experimental capaz de controlar pressão, distância e geometria dos eletrodos, foi cumprido com a construção do artefato descrito no memorial descritivo, dotado de câmara em borossilicato, eletrodos semiesféricos de alumínio acionados por movimentador magnético, sistema de vácuo e bombeamento e sistema de alta tensão com resistor de carga. O segundo objetivo: realizar testes sistemáticos variando pressão e distância e registrar os valores de VB, foi atendido pelos ensaios conduzidos a 100, 500 e 900 mbar em distâncias de 11,5 a 80 mm. O terceiro objetivo: comparar os resultados experimentais com os valores previstos pela Lei de Paschen, concretizou-se na Tabela 1 e no Gráfico 1, que evidenciaram concordância crescente com o aumento da distância. O quarto objetivo: avaliar a reprodutibilidade e a confiabilidade das medições com foco na rastreabilidade metrológica, foi alcançado pela análise de correlação de Pearson e pelo tratamento das incertezas segundo o GUM, que resultou em  $U_{exp} = 0,523 \text{ kV}$  (0,85%). O quinto objetivo: discutir as implicações dos resultados para aplicações industriais e para o fortalecimento da infraestrutura metrológica nacional, desenvolveu-se ao longo do Capítulo 4 e consolida-se nas contribuições descritas adiante.

Quanto à validação do método, confirma-se que: a Lei de Paschen pode ser reproduzida com precisão em argônio sob pressão conhecida; as constantes A e B retiradas da literatura mostraram-se adequadas e foram validadas empiricamente; nos pontos de 46,30 kV e 61,43 kV os erros tenderam a zero, reforçando a confiabilidade do modelo; e a incerteza combinada de

0,85% é significativamente inferior aos 3% típicos, a 95% de confiança, estabelecidos como referência pela IEC 60052 para medições em ar atmosférico. Esses achados demonstram o potencial do método para o contexto específico de gases nobres encapsulados.

### **Alinhamento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**

Os resultados desta pesquisa alinham-se a dois Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030. O ODS 7: Energia Limpa e Acessível, é contemplado na medida em que medições confiáveis de alta tensão são pré-requisito para a operação segura e eficiente de sistemas elétricos, incluindo a integração de fontes renováveis e a redução de perdas. A disponibilidade de referências metrológicas rastreáveis em alta tensão fortalece a qualidade da infraestrutura energética e, por consequência, a confiabilidade do fornecimento.

O ODS 9: Indústria, Inovação e Infraestrutura, que é atendido pelo próprio caráter do trabalho: o desenvolvimento de um artefato inovador, objeto de depósito de patente, que amplia a capacidade nacional de medição em alta tensão e reduz a dependência de padrões externos. Ao fornecer parâmetros validados e um sistema documentado, a pesquisa contribui para a construção de uma infraestrutura tecnológica resiliente e para o fortalecimento da inovação industrial no país, conectando a produção científica a impactos socioeconômicos concretos.

### **Contribuições da Pesquisa**

Do ponto de vista científico, o trabalho fornece evidência empírica robusta de que a Lei de Paschen descreve com fidelidade a ruptura dielétrica do argônio encapsulado no intervalo pesquisado, validando experimentalmente os coeficientes A e B obtidos da literatura. Do ponto de vista metrológico, estabelece um procedimento rastreável de caracterização de VB, com incerteza expandida inferior a 1%, compatível com os requisitos de comparabilidade internacional. Do ponto de vista tecnológico, materializa-se em um artefato inovador, objeto de depósito de patente junto ao INPI, que integra segurança elétrica, controle preciso de parâmetros e documentação técnica. Do ponto de vista industrial, oferece parâmetros validados aplicáveis ao controle de descargas e ao projeto de sistemas de alta tensão, contribuindo para reduzir a dependência de padrões externos e para fortalecer a autonomia metrológica nacional, em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 7 e 9.

### **Limitações da Pesquisa**

Os coeficientes A e B foram validados especificamente para o argônio ultrapuro e para a geometria semiesférica adotada, de modo que sua extrapolação a outros gases, geometrias ou

faixas de pressão e tensão requer nova validação. A faixa de tensão ensaiada limitou-se a faixa de 60 kVp, em valores acessíveis pelo sistema, e a incerteza foi dominada pela resolução na medição da distância entre eletrodos, o que delimita o patamar de exatidão atingível com a instrumentação empregada.

### **Sugestões para Trabalhos Futuros**

A partir das limitações identificadas, delineiam-se diversas frentes de continuidade. Recomenda-se estender a caracterização a outros gases nobres, como neônio, xenônio e hélio, ampliando a generalização dos parâmetros e da metodologia para a classe de problemas definida. Sugere-se escalar o sistema para tensões superiores a 100 kV, ampliando a faixa de aplicação industrial e aproximando-o das condições de ensaios em equipamentos de potência. Indica-se, ainda, o aprimoramento da instrumentação de medição da distância entre os eletrodos, fonte dominante de incerteza, com vistas a reduzir o patamar de exatidão alcançado. Por fim, os resultados podem subsidiar o desenvolvimento de padrões metrológicos nacionais para alta tensão e fundamentar a colaboração com organismos de normalização, contribuindo para a consolidação da rastreabilidade e para a redução da dependência de referências externas.

Diante do exposto, conclui-se que os resultados desta pesquisa são aptos a servir como referência de rastreabilidade metrológica em aplicações de alta tensão, contribuindo para o avanço da metrologia científica ao fornecer parâmetros validados que fundamentam futuras aplicações em sistemas de ruptura dielétrica em gases nobres encapsulados.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR IEC 60060-2. Técnicas de ensaios elétricos de alta-tensão – Parte 2: Sistemas de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2016. 88 p.
- ABNT NBR ISO/IEC 17025. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 36 p.
- BATISTA, G. H. A. Estudo da eficiência de sistemas de proteção contra descargas atmosféricas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. 145 p.
- BAYAZIT, N. Investigating design: A review of forty years of design research. *Design Issues*, v. 20, n. 1, p. 16-29, 2004.
- BAZELYAN, E. M.; ALEKSANDROV, N. L. *Physics of Lightning and Lightning Protection*. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- BAZELYAN, E. M.; RAIZER, Y. P. *Lightning Physics and Lightning Protection*. Bristol: Institute of Physics Publishing, 2000. 320 p.
- BENBASAT, I.; WEBER, R. Research commentary: Rethinking diversity in information systems research. *Information Systems Research*, v. 7, n. 4, p. 389-399, 1996.
- BIPM. *The International System of Units (SI)*. 9th ed. Sèvres: Bureau International des Poids et Mesures, 2019. 220 p.
- CANTAMESSA, M. Design research in engineering: A critical review. *Design Studies*, v. 24, n. 2, p. 183-194, 2003.
- ÇAĞDAŞ, V.; STUBKJÆR, E. Design research in cadastral systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 35, n. 1, p. 77-87, 2011.
- CHAKRABARTI, A. Design research in engineering: A review. *Journal of Engineering Design*, v. 21, n. 5, p. 563-577, 2010.
- CHAPMAN, B. *Glow Discharge Processes: Sputtering and Plasma Etching*. New York: Wiley, 1980. p. 45-98.
- CHEN, F. F. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 3. ed. Cham: Springer, 2016. v. 1, p. 200-265.
- CIPM. *Mutual Recognition Arrangement (MRA)*. Sèvres: Comité International des Poids et Mesures, 1999. Atualizado em 2020.
- DEGASPERI, F. T. Modelagem e análise detalhadas de sistemas de vácuo. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.
- DEGASPERI, F. T. Contribuições para análise, cálculo e modelagem de sistemas de vácuo. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- DEGASPERI, F. T. Equação fundamental do processo de bombeamento em vácuo. *Boletim Técnico da Faculdade de Tecnologia de São Paulo*, São Paulo, v. 41, n. 1, p. 19-24, 2016.
- DEGASPERI, F. T. Vazamento virtual: modelagem com solução analítica. *Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo*, São Paulo, v. 37, n. 3, 2018.

- FARADAY, M. Experimental Researches in Electricity. London: Taylor and Francis, 1855. v. 2, p. 210-265.
- GALLIMBERTI, I. The Mechanism of the Long Spark Formation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, v. 12, n. 10, 1979.
- GYUK, G. Paschen's Breakdown Voltage in Air and Pure Gases. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1289, n. 1, p. 012014, 2019. DOI: 10.1088/1742-6596/1289/1/012014.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentals of Physics. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2013. v. 1, p. 145-180.
- HEVNER, A.; MARCH, S.; PARK, J.; RAM, S. Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.
- HEYLEN, H. Electrical breakdown in gases: theory and applications. *Journal of Electrostatics*, 2006. 406 p.
- IEC 60052. Voltage measurement by means of standard air gaps. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2002. 54 p.
- IEC 60060-2. High-voltage test techniques – Part 2: Measuring systems. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2025. 95 p.
- ILAC. International Laboratory Accreditation Cooperation. Sydney: ILAC, 2018.
- INMETRO. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM). Rio de Janeiro: Inmetro, 2008. 120 p.
- INMETRO. Laboratórios de Metrologia Elétrica – Lamat. Rio de Janeiro: Inmetro, [s.d.].
- INMETRO. Padrões de Tensão Baseados no Efeito Josephson. Rio de Janeiro: Inmetro, 2006. 85 p.
- INMETRO. Plano Nacional de Metrologia Elétrica de Alta Tensão. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, 2025.
- INMETRO. Sistema Internacional de Unidades (SI). Rio de Janeiro: Inmetro, 2025. 210 p.
- INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM). Rio de Janeiro: Inmetro, 2012. 92 p.
- JÄRVINEN, P. Action research is similar to design science. *Quality & Quantity*, v. 41, n. 1, p. 37-54, 2007.
- JCGM. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). JCGM 100:2008. Paris: Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. 120 p.
- JCGM. International Vocabulary of Metrology (VIM). JCGM 200:2012. Paris: Joint Committee for Guides in Metrology, 2012. 92 p.
- KARNOPP, D. Introdução à Física de Plasmas. Porto Alegre: UFRGS, 2020. 210 p.
- KIND, D.; FESER, K. High-Voltage Test Techniques. Berlin: Springer, 2001. 483 p.
- KÜCHLER, A. High Voltage Engineering: Fundamentals. 2. ed. Berlin: Springer, 2018. 621 p.
- LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. *Gestão & Produção*, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.
- LIEBERMAN, M. A.; LICHTENBERG, A. J. Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. 2. ed. Hoboken: Wiley, 2005.

- LOEB, L. B. *Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms*. Berkeley: University of California Press, 1965. p. 55-110.
- MANSON, S. M. Is design science research different from other research methods? *Information Systems Frontiers*, v. 8, n. 1, p. 5-14, 2006.
- MARCH, S.; SMITH, G. Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, v. 15, n. 4, p. 251-266, 1995.
- MAXWELL, J. C. *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Oxford: Clarendon Press, 1873. v. 1, p. 1-450.
- MEEK, J. M.; CRAGGS, J. D. *Electrical Breakdown of Gases*. Oxford: Clarendon Press, 1978. 464 p.
- PASCHEN, F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz. *Annalen der Physik*, 1889.
- PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M.; CHATTERJEE, S. A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, v. 24, n. 3, p. 45-77, 2007.
- RAIZER, Y. P. *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer, 1997. 752 p.
- RAIZER, Y. P. *Spark Discharge*. Boca Raton: CRC Press, 1997. 320 p.
- RAKOV, V. A.; UMAN, M. A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. p. 300-365.
- ROMME, A. G. L. Making a difference: Organization as design. *Organization Science*, v. 14, n. 5, p. 558-573, 2003.
- RONCHI, C. *Plasma Physics and Engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 75-140.
- SCIELO. Aplicações do Design Science Research em pesquisas tecnológicas. *Revista Tecnologia e Sociedade*, v. 16, n. 42, p. 1-15, 2020.
- SEIN, M.; HENFRIDSSON, O.; PURAO, S.; ROSSI, M.; LINDGREN, R. Action Design Research. *MIS Quarterly*, v. 35, n. 1, p. 37-56, 2011.
- SIMON, H. A. *The Sciences of the Artificial*. 3rd ed. Cambridge: MIT Press, 1996.
- THOMSON, J. J. *Electricity and Matter*. New York: Charles Scribner's Sons, 1906. p. 45-98.
- TOWNSEND, J. S. *The Theory of Ionization of Gases by Collision*. Cambridge: Cambridge University Press, 1915.
- TREMBLAY, M. C.; HEVNER, A. R.; BERNDT, D. J. Focus groups for artifact evaluation in design research. *Communications of the Association for Information Systems*, v. 26, n. 1, p. 599-618, 2010.
- UMAN, M. A. *The Lightning Discharge*. Mineola: Dover Publications, 2001. 377 p.
- VAISHNAVI, V.; KUECHLER, W. *Design Science Research Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology*. New York: Auerbach Publications, 2009.
- VAN AKEN, J. E. Management research based on the paradigm of the design sciences: The quest for field-tested and grounded technological rules. *Journal of Management Studies*, v. 41, n. 2, p. 219-246, 2004.

WEIBULL, W. A Statistical Distribution Function of Wide Applicability. *Journal of Applied Mechanics*, v. 18, n. 3, p. 293-297, 1951.

## APÊNDICE A – MEMORIAL DESCRITIVO DOS CÁLCULOS

Este apêndice documenta detalhadamente o procedimento de cálculo que sustenta os resultados apresentados no Capítulo 4. Reproduzem-se as fórmulas empregadas, a origem das variáveis, as substituições numéricas e a metodologia de propagação de incertezas. Nenhum resultado é alterado: o objetivo é exclusivamente registrar, de forma rastreável, como os valores foram obtidos.

### A.1 Aplicação da Lei de Paschen

A tensão de ruptura é calculada pela forma fechada da Lei de Paschen:

$$V_B = B \cdot p \cdot d / \{ \ln(A \cdot p \cdot d) - \ln[ \ln(1 + 1/\gamma_{se}) ] \}$$

em que  $p$  é a pressão (Pa),  $d$  a distância entre eletrodos (m),  $A = 8,6257 \text{ Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  e  $B = 132,01 \text{ V}/(\text{Pa} \cdot \text{m})$  as constantes do gás (LIEBERMAN; LICHTENBERG, 2005), e  $\gamma_{se} = 0,05$  o coeficiente de emissão secundária. Adota-se a pressão de referência  $p = 50000 \text{ Pa}$  (500 mbar) e o conjunto de distâncias  $d = (11,5; 22; 34; 47; 59; 80) \text{ mm}$ .

A título de exemplo, para  $d = 11,5 \text{ mm} = 0,0115 \text{ m}$ , o produto  $p \cdot d = 50000 \times 0,0115 = 575 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ . A substituição na expressão acima conduz ao valor previsto  $V_{prev} = 10,47 \text{ kV}$  registrado na Tabela 1. O mesmo procedimento, aplicado às demais distâncias, gera a coluna completa de valores previstos (19,04; 27,83; 36,99; 45,20; 60,51 kV), confrontados aos valores experimentais (11,68; 21,21; 30,43; 38,64; 46,30; 61,43 kV). O erro absoluto é a diferença  $V_{prev} - V_{exp}$ , e o erro percentual, sua razão pelo valor experimental, conforme os valores tabelados.

### A.2 Coeficiente de Correlação de Pearson

A confiabilidade da concordância é avaliada pelo coeficiente de correlação de Pearson, definido por  $r = \Sigma[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})] / \sqrt{\Sigma(x_i - \bar{x})^2 \cdot \Sigma(y_i - \bar{y})^2}$ , aplicado aos pares distância–previsto, distância–experimental e experimental–previsto. Os valores obtidos: 1,000; 0,999 e 0,999, respectivamente, com quatro graus de liberdade e *p*-valor inferior a 0,001 que constam da Tabela 2 e indicam relação linear praticamente perfeita.

### A.3 Avaliação e Propagação das Incertezas (GUM)

A incerteza é avaliada segundo o GUM. Cada grandeza de entrada  $x_i$  recebe uma incerteza padrão  $u_i$ , obtida pela divisão de seu valor de entrada pelo divisor estatístico associado ao tipo de distribuição: divisor  $\sqrt{3}$  ( $\approx 1,73$ ) para distribuição retangular, 2 para a normal a 95% e  $\sqrt{6}$  ( $\approx 2,45$ ) para a triangular. As componentes consideradas, conforme a Tabela 3, são: a

resolução e a leitura da distância entre eletrodos (0,0005 m cada, distribuições triangular e normal); a resolução e a leitura da pressão (1 Pa, retangular; 105 Pa, normal); a impureza do gás (0,0001%); a impureza e o formato do eletrodo (0,1% cada); e a imprecisão da curva teórica (0,1%).

A incerteza padrão combinada resulta da lei de propagação  $u_c^2 = \sum (c_i \cdot u_i)^2$ , em que os coeficientes de sensibilidade  $c_i = \partial V_B / \partial x_i$  são as derivadas parciais da equação de Paschen em relação a cada variável. A raiz da soma quadrática das contribuições resulta em 0,26 kV.

O Quadro A.1 sintetiza os componentes considerados, seus valores de entrada, os tipos de distribuição e os divisores estatísticos aplicados, conforme registrado na Tabela 3 do Capítulo 4. A apresentação tem caráter de memorial: reproduz a estrutura do orçamento de incerteza sem alterar qualquer valor.

Quadro A.1 – Componentes do orçamento de incerteza

| Componente            | Valor de entrada | Distribuição | Divisor |
|-----------------------|------------------|--------------|---------|
| Distância – resolução | 0,0005 m         | Triangular   | 2,45    |
| Distância – leitura   | 0,0005 m         | Normal       | 2       |
| Pressão – resolução   | 1 Pa             | Retangular   | 3,46    |
| Pressão – leitura     | 105 Pa           | Normal       | 2,04    |
| Gás – impureza        | 0,0001%          | Retangular   | —       |
| Eletrodo – impureza   | 0,1%             | Retangular   | —       |
| Eletrodo – formato    | 0,1%             | Retangular   | —       |
| Curva – imprecisão    | 0,1%             | Retangular   | —       |

Fonte: Autor, 2026 (a partir da Tabela 3).

Os graus de liberdade efetivos são estimados pela equação de Welch-Satterthwaite,  $v_{ef} = u_c^4 / \sum (c_i \cdot u_i)^4 / v_i$ , obtendo-se  $v_{ef} = 71188189,23$ , valor elevado que justifica a adoção do fator de abrangência  $k = 2,00$  para um nível de confiança de aproximadamente 95%.

A incerteza expandida é, então,  $U = k \cdot u_c = 2,00 \times 0,26 \text{ kV}$ , resultando em  $U_{exp} = 0,523 \text{ kV}$ , equivalente a 0,85% do valor medido no ponto de 61,43 kV. A análise das contribuições confirma a predominância da distância entre eletrodos (mais de 80% da incerteza total), seguida da pressão (cerca de 15%), sendo desprezíveis as parcelas de impureza do gás e da curva teórica (inferior a 1%).

O resultado da medição é, portanto, expresso como  $V_B = (61,43 \pm 0,52) \text{ kV}$ , com fator de abrangência  $k = 2,00$  e nível de confiança de aproximadamente 95%, rastreável ao Sistema Internacional de Unidades. Esse valor de incerteza, inferior a 1%, é consistente com os critérios de qualidade metrológica discutidos no Capítulo 4 e supera o patamar de referência da IEC 60052 para medições em ar atmosférico.

## APÊNDICE B – DEDUÇÕES MATEMÁTICAS COMPLEMENTARES

Este apêndice reúne deduções matemáticas que sustentam os modelos empregados no corpo do trabalho. O objetivo é documentar a origem das expressões utilizadas, sem alterar quaisquer resultados experimentais.

### B.1 Dedução da Condição de Ruptura de Townsend

Considere-se uma população inicial de  $n_0$  elétrons emitidos do cátodo. Ao percorrer o espaçamento  $d$  sob ionização por impacto, o número de elétrons cresce exponencialmente segundo  $n(d) = n_0 \cdot e^{\alpha d}$ , em que  $\alpha$  é o primeiro coeficiente de Townsend. Cada avalanche produz  $(e^{\alpha d} - 1)$  novos íons positivos que, ao atingirem o cátodo, liberam elétrons secundários com eficiência  $\gamma$ , o segundo coeficiente de Townsend.

A descarga torna-se autossustentada quando cada avalanche é capaz de regenerar, por emissão secundária, ao menos um elétron que inicie uma nova avalanche. Essa condição traduz-se matematicamente por  $\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) \geq 1$ . No limiar exato da ruptura, a igualdade  $\gamma \cdot (e^{\alpha d} - 1) = 1$  fornece a relação que, combinada à dependência de  $\alpha$  com o campo, conduz à Lei de Paschen.

### B.2 Obtenção da Forma Fechada da Lei de Paschen

Substituindo  $\alpha = A \cdot p \cdot \exp(-B \cdot p/E)$  com  $E = V/d$  na condição de autossustentação e isolando a tensão, obtém-se a forma fechada empregada no Apêndice A:  $V_B = B \cdot p \cdot d / \{ \ln(A \cdot p \cdot d) - \ln[ \ln(1 + 1/\gamma) ] \}$ . Essa expressão evidencia que a tensão de ruptura depende do produto  $p \cdot d$  como variável natural, fundamento físico do agrupamento das curvas de diferentes pressões e distâncias em uma única curva característica.

### B.3 Mínimo de Paschen

A curva de  $V_B$  em função de  $p \cdot d$  apresenta um mínimo, obtido impondo  $dV_B/d(p \cdot d) = 0$ . A derivação conduz às expressões do produto crítico  $(p \cdot d)_{\min} = e \cdot \ln(1 + 1/\gamma)/A$  e da tensão mínima de ruptura  $V_{B,\min} = (e \cdot B/A) \cdot \ln(1 + 1/\gamma)$ , em que  $e$  é a base do logaritmo natural. Essas relações mostram que tanto a posição quanto o valor do mínimo dependem exclusivamente das constantes do gás  $A$  e  $B$  e do coeficiente de emissão secundária  $\gamma$ , parâmetros documentados e empregados nesta pesquisa.

### B.4 Coeficientes de Sensibilidade do Orçamento de Incerteza

Os coeficientes de sensibilidade utilizados na propagação de incerteza (Apêndice A) são as derivadas parciais da forma fechada de  $V_B$  em relação a cada grandeza de entrada. Para a

distância,  $c_d = \partial V_B / \partial d$ ; para a pressão,  $c_p = \partial V_B / \partial p$ . Como  $V_B$  cresce de modo aproximadamente proporcional ao produto  $p \cdot d$ , ambos os coeficientes são positivos e de magnitude comparável; a maior contribuição relativa da distância no orçamento final decorre de sua resolução de medição, e não de um coeficiente de sensibilidade desproporcional. Essa análise confirma quantitativamente a hierarquia das fontes de incerteza discutida no Capítulo 4: a distância entre eletrodos responde por mais de 80% da incerteza total, seguida da pressão, com cerca de 15%.

## APÊNDICE C – GLOSSÁRIO DE TERMOS TÉCNICOS

Este glossário reúne, para consulta rápida, os principais termos técnicos empregados na dissertação, com definições sucintas alinhadas ao Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) e à literatura de física de descargas.

**Avalanche eletrônica.** multiplicação em cascata de elétrons por ionização por impacto sucessiva ao longo do espaçamento entre eletrodos.

**Campo elétrico reduzido.** razão entre o campo elétrico e a densidade do gás, parâmetro que governa a energia média dos elétrons e a taxa de ionização.

**Coefficiente de abrangência (k).** fator pelo qual se multiplica a incerteza-padrão combinada para obter a incerteza expandida em dado nível de confiança.

**Emissão secundária.** liberação de elétrons da superfície do cátodo provocada pelo impacto de íons positivos, quantificada pelo segundo coeficiente de Townsend ( $\gamma$ ).

**Incerteza expandida.** intervalo em torno do resultado de medição que se espera abranger uma fração elevada da distribuição dos valores atribuíveis ao mensurando.

**Livre caminho médio.** distância média percorrida por uma partícula entre colisões sucessivas, inversamente proporcional à pressão do gás.

**Mensurando.** grandeza que se pretende medir; neste trabalho, a tensão de ruptura dielétrica (VB).

**Mínimo de Paschen.** ponto de menor tensão de ruptura na curva de VB em função do produto pressão-distância.

**Rastreabilidade metrológica.** propriedade de um resultado de medição relacioná-lo a referências por meio de uma cadeia documentada e ininterrupta de calibrações.

**Ruptura dielétrica.** transição abrupta de um meio isolante para condutor quando o campo elétrico aplicado supera um valor crítico.

**Seção de choque de ionização.** medida da probabilidade efetiva de que uma colisão entre elétron e átomo resulte em ionização.

**Streamer.** canal ionizado filamentar que se propaga rapidamente, característico do regime de ruptura em altos valores de pressão-distância.