

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**JÚLIO DE MESQUITA FILHO**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**GABRIEL AUGUSTO DAVID**

**DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA**  
**OCORRÊNCIA DE DESCARGAS CORONA EM**  
**SISTEMAS HVDC POR MEIO DE TÉCNICAS DE**  
**PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**

Bauru - SP  
2023

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**JÚLIO DE MESQUITA FILHO**  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**DETECÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA**  
**OCORRÊNCIA DE DESCARGAS CORONA EM**  
**SISTEMAS HVDC POR MEIO DE TÉCNICAS DE**  
**PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS**

**GABRIEL AUGUSTO DAVID**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru/FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” / UNESP, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

**Orientador:** Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior

**Coorientador:** Prof. Dr. Fabio Romano Lofrano Dotto

Bauru - SP  
2023

DAVID, GABRIEL AUGUSTO.

Detecção e caracterização da ocorrência de descargas corona em sistemas HVDC por meio de técnicas de processamento digital de sinais / GABRIEL AUGUSTO DAVID, 2023

93 f. : il.

Orientador: Pedro de Oliveira Conceição Junior

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023

1. HVDC. 2. Detecção de descarga corona. 3. Processamento digital de sinais. 4. Reconhecimento de padrões. 5. Diagnóstico de falhas. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Bauru II. Título.

# **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa apresenta uma nova metodologia para detecção e caracterização de descargas corona em sistemas de alta tensão em corrente contínua. O objetivo é reduzir as perdas de transmissão de energia elétrica e, por consequência, contribuir para uma maior eficiência energética e redução de custos para a sociedade. As descargas corona são um fenômeno elétrico que ocorre em linhas de transmissão de energia e podem causar interferências em equipamentos eletrônicos e perturbações na rede elétrica. Visando mitigar tais impactos negativos, a presente pesquisa possibilita que medidas preventivas sejam tomadas antes que o problema se torne mais grave. Importa destacar que este estudo recebeu o suporte da empresa Interligação Elétrica do Madeira S.A, que é responsável por uma das linhas de transmissão HVDC mais longas do mundo, com 2.385 quilômetros, conectando Porto Velho RO a Araraquara SP. O estudo forneceu uma base de conhecimento científico para um projeto desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que resultou na concepção de um dispositivo inovador para detecção HVDC, que atualmente é utilizado na linha de transmissão acima referida.

# **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research presents a novel methodology for detecting and characterizing corona discharges in high-voltage direct-current (HVDC) systems. The aim is to reduce electrical transmission losses and, consequently, contribute to greater energy efficiency and cost reduction for society. Corona discharges are an electrical phenomenon that occurs in power transmission lines and can cause interference with electronic equipment and disturbances in the power grid. To mitigate these negative impacts, the present study enables preventive measures to be taken before the problem becomes more severe. It is important to note that this research received support from the company Interligação Elétrica do Madeira S.A, which is responsible for one of the world's longest HVDC transmission lines, spanning 2,385 kilometers and connecting Porto Velho, RO to Araraquara, SP. The study provided a scientific knowledge base for a project developed under the Research & Development Program of the Brazilian National Electric Energy Agency (ANEEL), which resulted in the design of an innovative HVDC detection device that is currently used in the transmission line.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE GABRIEL AUGUSTO DAVID, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 15 dias do mês de março do ano de 2023, às 14:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de GABRIEL AUGUSTO DAVID, intitulada **Detecção e caracterização da ocorrência de descargas corona em sistemas HVDC por meio de técnicas de processamento digital de sinais**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JÚNIOR (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Eletrica e de Computacao / Escola de Engenharia de Sao Carlos Universidade de Sao Paulo, Professor Doutor BRUNO ALBUQUERQUE DE CASTRO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP, Prof. Dr. WENDERSON NASCIMENTO LOPES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Instituto Federal do Pará - IFPA. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: APROVA DO \_\_\_\_\_. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. PEDRO DE OLIVEIRA CONCEIÇÃO JÚNIOR

*Dedico aos meus familiares, amigos e professores  
que sempre me apoiaram e motivaram ao longo desta jornada.  
Em todos os instantes, a contribuição de todos foi essencial.*

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao Todo, mente universal, infinita e vivente, que nos rege e torna tudo possível.

Ao meu orientador, Professor Dr. Pedro de Oliveira Conceição Júnior minha profunda gratidão pela orientação, confiança, paciência e dedicação ao longo deste período, que, possibilitou que me tornasse um melhor profissional e acadêmico. Sobretudo agradeço a amizade e por compartilhar suas experiências e ensinamentos, que me serviram e seguirão servindo de exemplo para além deste período e trabalho.

Ao meu coorientador Dr. Fabio Romano Lofrano Dotto fundador e CEO da empresa FAROL Pesquisa & Desenvolvimento pela oportunidade, aprendizado e pelas valiosas contribuições a este trabalho.

Meu profundo agradecimento e apreço ao Dr. Paulo Roberto de Aguiar, professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela oportunidade, ensinamentos e amizade.

Aos meus amigos do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) Dr. Leandro Melo Campeiro, Dr. Thiago Glissoi Lopes, Me. Paulo Monteiro de Carvalho Monson e, em especial, a Me. Cristiano Soares Júnior, por todos os ensinamentos, conselhos, confiança e amizade que foram imprescindíveis ao longo desta jornada.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru, em especial, aos professores Eduardo Paciência Godoy e Bruno Albuquerque de Castro pela inestimável formação acadêmica.

Aos meus primeiros professores de Engenharia Elétrica que me motivaram a seguir neste caminho, Guilherme Augusto Marabuzzi Clerice, José Ricardo Giordano Pinheiro e João Carlos Angelico.

Agradeço à Interligação Elétrica do Madeira S.A (IE MADEIRA) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) sob a bolsa PD-06957-0005/2020 pelo apoio a este trabalho de pesquisa.

À Faculdade de Engenharia de Bauru, ao Departamento de Engenharia Elétrica, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e todos os funcionários pelo suporte.

Minha mais profunda gratidão aos meus pais, que são o meu alicerce, os meus maiores professores e exemplos, pelo apoio incondicional em prol de que pudesse ser, acima de tudo, uma boa pessoa. Ao meu pai, Carlos Augusto David símbolo de trabalho, foco, empenho, amor incondicional, alegria e perseverança sobre os tempos mais difíceis. À minha mãe, Célia Regina de Souza Nunes símbolo de fé, determinação, amor, paciência, superação, confiança e sabedoria inigualável neste mundo.

Aos meus irmãos Neto e Lívia, que sempre estiveram à disposição para me ensinar, proteger e aconselhar, guiando me assim, ao longo desta jornada com muito amor, sabedoria e às vezes, paciência. Essa conquista também é de vocês!

À minha companheira Victoria Scavassa Bailoni por todo amor, carinho, ensinamento, amizade e suporte constante nesta jornada. E a sua família, obrigado pela confiança e auxílio ao longo desta jornada.

Aos meus antepassados, em especial, minha querida avó Deolinda Colpachi David, onde quer que esteja, espero que saiba que meu progresso também é fruto do seu incondicional amor e confiança. Aos meus familiares Edson Nunes, Maria Lúcia de Souza Dalben e Raquel Augusto David, e a próxima geração, Felipe, Enrico e Théo.

Aos amigos e eternos professores Dr.Letícia Miquelin, Danilo Casarin, João Dalben e Derik Conte.

Agradeço a todos que de forma direta ou indireta contribuíram para a consumação desta importante etapa em minha vida.

“If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants.”

Sir Isaac Newton

# RESUMO

Embora linhas de transmissão de alta tensão sejam adequadas para transmissão de energia em longas distâncias, a busca contínua de redução de perdas na transmissão de energia elétrica de alta tensão em corrente contínua (HVDC – *high voltage direct current*) tem elevado a tensão de trabalho desses sistemas, atualmente, para valores médios de  $\pm 800$  kV. Por consequência, a intensidade do campo elétrico no entorno do condutor também é aumentada, provocando a ionização do ar no entorno das linhas de transmissão que leva à descarga corona, responsável por diversos efeitos negativos e perturbações. Baseando-se em tal problemática, o presente trabalho apresenta uma nova metodologia para a detecção e a caracterização da ocorrência de descargas corona em sistemas HVDC através da combinação de parâmetros de processamento digital de sinais para seleção de características mais representativas de descargas corona. A análise experimental foi realizada a partir da aplicação de tensões entre  $\pm 30$  kV a  $\pm 100$  kV por meio de um gerador de alta tensão DC (*direct-current*) em um condutor eletrodo, e os sinais de corrente elétrica proporcionais ao efeito corona foram coletados por um dispositivo detector HVDC responsável pela aquisição de dados. Os sinais coletados foram submetidos a análises estatísticas no domínio do tempo, tempo-frequência e critério de Hinkley com a finalidade de extrair informações relevantes acerca do fenômeno de descargas corona. Os resultados obtidos indicam a viabilidade do método proposto na identificação e caracterização do fenômeno seguindo as mudanças no conteúdo do sinal, especialmente, para faixas de frequências estreitas, sendo possível quantificar de forma simples o percentual de crescimento das descargas corona de 40-80 kHz em função da tensão aplicada na faixa, além de apresentar alta confiabilidade (82% a 93%) por meio do cálculo do desvio do valor médio quadrático (RMSD) baseado na aproximação por modelo linear. A banda de frequências resultante do estudo demonstrou-se favorável para estabelecer um limiar para o percentual de crescimento da descarga corona de acordo com seu perfil ou condição de aplicação, podendo essa informação ser útil na construção de dispositivos móveis de baixo consumo e desempenho computacional, alinhado as demandas de novas tecnologias da indústria 4.0 e Internet das coisas.

**Palavras-chave:** HVDC; detecção de descarga corona; processamento digital de sinais; reconhecimento de padrões; diagnóstico de falhas.

# ABSTRACT

Although high-voltage transmission lines are suitable for power transmission over long distances, the continuous search for reducing losses in high-voltage direct current (HVDC) electric power transmission has increased the working voltage of these systems to average values of  $\pm 800$  kV. In this context, the electric field intensity around the conductor is also increased, causing the ionization of the air around the transmission lines that leads to corona discharge, responsible for several negative effects and disturbances. Based on such problematic, the present work presents a new methodology for the detection and characterization of the occurrence of corona discharges in HVDC systems through the combination of digital signal processing parameters for the selection of optimal corona discharge characteristics. The experimental analysis was performed by applying voltages between  $\pm 30$  kV and  $\pm 100$  kV through a high voltage DC (direct-current) generator on an electrode conductor, and the electrical current signals proportional to the corona effect were collected by an HVDC detector device responsible for data acquisition. The collected signals were subjected to statistical analysis in the time domain, time-frequency and Hinkley criteria in order to extract relevant information about the corona discharge phenomenon. The results obtained indicate the viability of the proposed method in the identification and characterization of the phenomenon in a simple way following the changes in signal content, especially for narrow frequency bands, being possible to quantify in a simple way the percentage of growth of corona discharges as a function of the applied voltage in the 40-80 kHz range, besides presenting high reliability (82% to 93%) through the calculation of the root mean square deviation (RMSD) based on the approximation by linear model. The frequency band resulting from the study proved to be favorable for establishing a threshold for the percentage of corona discharge growth according to its profile or application condition, and this information can be useful in the construction of mobile devices with low consumption and computational performance, aligned with the demands of new technologies of Industry 4.0 and Internet of Things.

**Keywords:** HVDC; corona discharge; digital signal processing; pattern recognition; fault diagnosis.

# LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva típica comparação entre transmissões AC e DC. Fonte: Autor.....	14
Figura 2 – Mecanismo de formação do efeito corona. ....	29
Figura 3 – Efeito corona demonstrado em linhas HVAC e HVDC. ....	30
Figura 4 - Representação esquemática da aplicação de algumas métricas de análise. ....	36
Figura 5 - Exemplo de atenuação de filtro do tipo Butterworth para diferentes ordens $N$ .....	39
Figura 6: Diagrama esquemático da bancada de teste experimental. ....	43
Figura 7: (a) Dispositivo detector HVDC; (b) Fonte DC de até 120 kV.....	43
Figura 8: Banco de ensaios exemplificado duas das condições testadas: (a) Dispositivo posicionado à $0^\circ$ em relação a fonte e, haste à 30 cm de distância; (b) Dispositivo posicionado à $90^\circ$ em relação a fonte e, haste à 60 cm de distância. ....	44
Figura 9: Dispositivo de Detecção HVDC. ....	45
Figura 10 - Sistema de comunicação via infravermelho – interface USB-irDA2.....	46
Figura 11 - Exemplo de sinais de corrente no domínio do tempo obtidos a partir os ensaios laboratorias em duas medições: + 30 kV e + 100 kV. ....	47
Figura 12 - Framework proposto para realização dos ensaios laboratórias.....	48
Figura 13 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g90s polo positivo.....	51
Figura 14 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g90s polo negativo.....	51
Figura 15 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g0c polo positivo.....	52
Figura 16 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g0c polo negativo.....	52
Figura 17 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90s polo positivo.....	53
Figura 18 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90s polo negativo.....	53
Figura 19 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90c polo positivo.....	54
Figura 20 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90c polo negativo.....	54
Figura 21 - Caracterização do intervalo de tempo entre os pulsos e picos presentes nos sinais. ....	56
Figura 22 - Espectrograma completo da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s. ....	58
Figura 23 - Espectrograma da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s: parte real em 2D. ....	59

Figura 24 - Espectrograma da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo. ....	59
Figura 25 - Espectrograma completo da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c. ....	60
Figura 26 - Espectrograma da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c: parte real em 2D. ....	60
Figura 27 - Espectrograma da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo. ....	61
Figura 28 - Espectrograma completo da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s. ....	61
Figura 29 - Espectrograma da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s: parte real em 2D. ....	62
Figura 30 - Espectrograma da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo. ....	62
Figura 31 - Espectrograma completo da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c. ....	64
Figura 32 - Espectrograma da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c: parte real em 2D. ....	65
Figura 33 - Espectrograma da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo. ....	65
Figura 34 - Representação do critério de energia: sinal de +100 kV – ensaio #h30g90s. ....	67
Figura 35 - Representação do critério de energia: sinal de -100 kV – ensaio #h60g90s. ....	67
Figura 36 - Representação do critério de energia: sinal de +30 kV – ensaio #h30g0c. ....	69
Figura 37 - Representação do critério de energia: sinal de -50 kV – ensaio #h30g0c. ....	69
Figura 38 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de +100 kV ensaio #h30g90s. ....	70
Figura 39 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -100 kV ensaio #h60g90s. ....	71
Figura 40 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -80 kV ensaio #h30g0c. ....	71
Figura 41 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -80 kV ensaio #h60g90c. ....	72
Figura 42 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g90s – polo positivo. ....	73
Figura 43 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g90s – polo negativo. ....	74

Figura 44 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g0c – polo positivo.....	74
Figura 45 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g0c – polo negativo.....	75
Figura 46 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g0s – polo positivo.....	75
Figura 47 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g0s – polo negativo.....	76
Figura 48 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g90c – polo positivo.....	76
Figura 49 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g90c – polo negativo.....	77
Figura 50 - Percentual de crescimento das descargas corona.....	78

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Configuração experimental.....	44
Tabela 2 – Características mais representativas. ....	79

# LISTA DE ABREVIATURAS

**AC** – *Alternating Current*

**CV** – *Coeficiente de Variação*

**DC** – *Direct Current*

**DFT** – *Discrete Fourier Transform*

**FEM** – *Finite Element Method*

**FFT** – *Fast Fourier Transform*

**HV** – *High Voltage*

**HVAC** – *High Voltage Alternating Current*

**HVDC** – *High Voltage Direct Current*

**LT** – *Linha de Transmissão*

**NR** – *Normas Regulamentadoras*

**PD** – *Partial Discharge*

**RMS** – *Root Mean Square*

**RMSD** – *Root Mean Square Deviation*

**SNR** – *Signal-to-Noise Ratio*

**STATCOM** – *Static Compensators*

**STFT** – *Short Time Fourier Transform*

**SVC** – *Static Var Compensators*

**SVM** – *Support Vector Machines*

**TBD** – *Time Between Discharges*

**TOA** – *Time of Arrival*

**UHVDC** – *UltraHigh Voltage Direct Current*

**WFP** – *Wavelet First Pulse*

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 Contexto e motivação .....	13
1.2 Objetivos e contribuições do trabalho .....	18
1.3 Organização do Trabalho.....	19
1.4 Publicações obtidas .....	20
<b>ALTA TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA.....</b>	<b>21</b>
2.1 Sistemas HVDC.....	21
2.1.1 Sistemas AC versus DC.....	22
2.1.2 Manutenção em linhas e segurança do operador .....	23
2.1.3 Quantificação de tensão e corrente elétrica em sistemas HVDC .....	24
2.1.4 Importância da medição e detecção em sistemas HVDC .....	25
2.1.5 Alternativas para detecção e quantificação de tensão e/ou corrente elétrica.....	25
<b>DESCARGAS CORONA E PROCESSAMENTO DE SINAIS.....</b>	<b>28</b>
3.1 Descargas Corona em sistemas HVDC .....	28
3.1.1 Consequência das descargas corona em linhas de transmissão .....	31
3.2 Técnicas para extração de características e reconhecimento de padrões de descarga corona em sistemas HVDC .....	33
3.2.1 Análise estatística no domínio do tempo.....	35
3.2.2 Análise no domínio da frequência a partir da Transformada de Fourier.....	37
3.2.3 Análise no domínio tempo-frequência a partir da STFT .....	37
3.2.4 Filtragem digital .....	38
3.2.5 Critério de energia de Hinkley .....	39
3.2.6 Coeficiente de variação .....	40
<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>42</b>
4.1 Banco de Ensaios.....	42
4.2 Aquisição de Dados .....	45
4.3 Processamento de Sinais e extração de características.....	47
<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>

5.1 Resultados e discussões da análise no domínio do tempo.....	50
5.2 Resultados e discussões da análise no domínio do tempo-frequência.....	57
5.3 Resultados e discussões do critério de energia de Hinkley .....	65
5.4 Resultados e discussões da análise do Coeficiente de Variação .....	73
<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>80</b>
6.1 Conclusão .....	80
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

---

*Este capítulo fornece uma visão geral do presente trabalho, incluindo o contexto, motivação, objetivos e contribuições do estudo. Ao final, é fornecida a organização do documento e trabalhos relacionados publicados.*

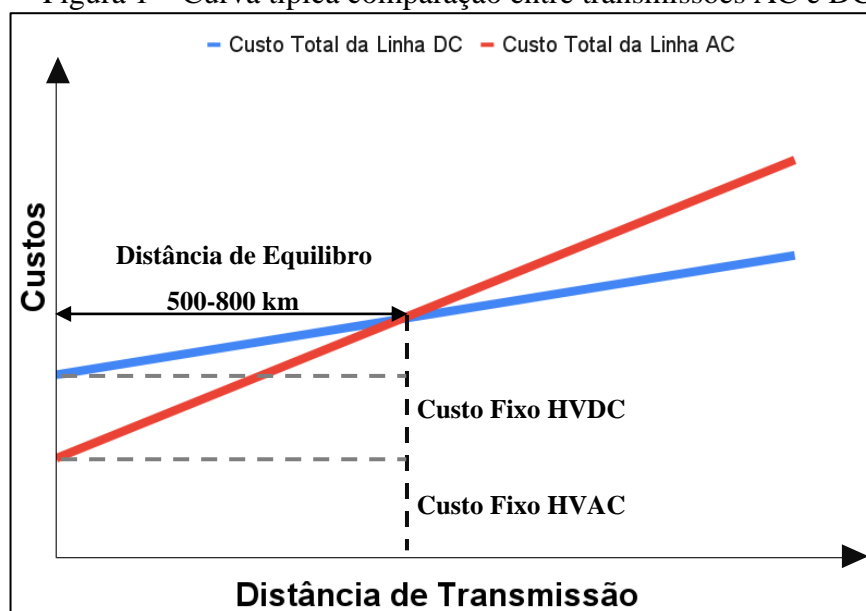
### 1.1 Contexto e motivação

Os sistemas de energia elétrica de alta tensão em corrente contínua (HVDC – *high voltage direct current*) estão desempenhando um papel cada vez mais significativo na transmissão de energia elétrica devido a sua superioridade econômica e suas inúmeras vantagens sobre os sistemas de alta tensão em corrente alternada (HVAC – *high voltage alternating current*). Devido aos progressos realizados no campo da eletrônica de potência, os sistemas HVDC sofreram diversos aprimoramentos nas últimas décadas e se tornaram uma tecnologia consolidada para a transmissão de energia elétrica em longas distâncias, particularmente, acima de 500 km. Quando comparados aos sistemas HVAC, as principais vantagens dos sistemas HVDC são: perdas reduzidas na transmissão em alta tensão (HV – *high voltage*), controle total do fluxo de energia, número reduzido de componentes, possibilidade de interconexão de sistemas assíncronos em corrente alternada (AC – *alternating current*), e compensação de potência reativa não necessária (ALASSI *et al.*, 2019; GHISLAIN OGOULOLA *et al.*, 2020).

As reivindicações a favor dos sistemas HVDC são suportadas pelas características particulares da transmissão de energia elétrica em corrente contínua (DC – *direct current*), tornando conveniente as aplicações destes sistemas. Por exemplo: (i) a transmissão DC resulta em menores perdas e custos em relação a uma linha de transmissão (LT) em corrente alternada

equivalente; (ii) a transmissão AC via cabos é impraticável a longas distâncias, especialmente após a distância de equilíbrio, sendo que tal restrição não se aplica para as linhas DC; (iii) o fluxo de energia em um sistema DC pode ser facilmente controlado em alta velocidade, e, portanto, tendo como base um sistema de controle apropriado, uma linha DC pode ser usada para aprimorar a estabilidade de um sistema AC; (iv) estações DC podem ser utilizadas para interligação de sistemas AC de diferentes frequências ou diferentes formas de controle, os custos e perdas do terminal, contudo, são maiores (ALASSI *et al.*, 2019; ARRILLAGA, 2008). A curva típica de comparação de custos entre as transmissões AC e DC é ilustrada na Figura 1. A distância de equilíbrio é o ponto ao qual os custos de construção e operação de uma linha de transmissão DC e AC se equiparam. Para distâncias maiores que a distância de equilíbrio, os custos AC tornam-se gradativamente maiores que os custos DC para a mesma distância. A distância de equilíbrio encontra-se na faixa de 500 km a 800 km, podendo variar de acordo com alguns fatores (classes de custo específicas do país, avaliação de perdas, custo da passagem etc.). A curva correspondente a linha DC não é tão íngreme quanto a curva AC devido aos custos desta última serem consideravelmente mais baixos por quilômetro. No entanto, para linhas AC de longas distâncias, o custo de compensação de energia reativa intermediária deve ser levado em consideração (SIEMENS-AG, 2011).

Figura 1 – Curva típica comparação entre transmissões AC e DC.



Fonte: Autor.

Por outro lado, é importante mencionar que nos sistemas HVDC, a medição deve ocorrer sob intenso campo eletromagnético que, por sua vez, possui elevados níveis de interferências e uma baixa relação sinal/ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*). Cumpre frisar que, conforme relatado por XIN; YUAN (2016), o ambiente eletromagnético (ruído audível,

interferência de rádio e de campo elétrico etc.) causado pela descarga corona não apenas afeta a linha de transmissão ou equipamento HVDC (isto é, restringe a seleção do condutor e o projeto estrutural dos parâmetros da linha de transmissão etc.), como também traz consequências ambientais ao entorno das linhas de transmissão. No contexto ambiental, é importante mencionar que, com a implementação em larga escala das linhas de transmissão HVDC, os impactos ambientais causados por ondas eletromagnéticas se tornaram foco de atenção da comunidade de engenharia elétrica. Para tanto, métodos precisos e eficientes de monitoramento e medição, bem como procedimentos rigorosos de manutenção devem ser constantemente empregados a fim de se: (i) promover o monitoramento e a inspeção apropriada, detectando e caracterizando ocorrências de eventos inerentes (interferências, descarga corona, etc.); (ii) promover correções necessárias para o funcionamento adequado do sistema; (iii) garantir segurança; e (iv) garantir que o sistema siga o padrão ambiental eletromagnético (CUI *et al.*, 2014a; WIJEWEERA *et al.*, 2009; YUAN *et al.*, 2016).

Além do contexto ambiental, a segurança de pessoas é, também, um fator crítico na transmissão de energia elétrica. Por exemplo, durante a manutenção dos sistemas HVDC, é necessário garantir a proteção do operador evitando, assim, que o mesmo sofra choque elétrico durante o reparo dos equipamentos HV (SUO *et al.*, 2020; WIJEWEERA *et al.*, 2009). Para este propósito, atualmente existem dispositivos comerciais equipados com um sistema de segurança que emite avisos quando da presença de tensão ou corrente nos sistemas HVDC (LINESTART-INC, 2020). Diversos métodos de proteção e segurança de pessoas em HV são também encontrados na literatura científica, os quais se baseiam na detecção da presença de tensão ou corrente no equipamento HV, focando principalmente em duas abordagens: (i) métodos de medição por contato; e (ii) métodos de medição por aproximação baseados na medição do campo elétrico (WIJEWEERA *et al.*, 2009; XIN; YUAN, 2016). Tais abordagens são de grande importância no estudo do ambiente eletromagnético no entorno das linhas de transmissão. As abordagens que focam na medição do campo elétrico têm sido particularmente mais difundidas em sistemas HV. Tais vantagens se devem ao fato de que as aplicações de medição de campos elétricos são robustas e consolidadas, uma vez que a medição do campo elétrico é utilizada para desenvolver sistemas de isolamento aprimorados e para garantir segurança de pessoas e equipamentos (WIJEWEERA *et al.*, 2009).

Diante disso, diversas pesquisas empenham-se para promover novas estratégias de monitoramento e inspeção de sistemas HVDC. SUO *et al.* (2020) aborda em seu trabalho uma forma de utilização da medição de campo elétrico no entorno das linhas de transmissão HVDC com vistas a garantir a segurança do operador contra choques elétricos durante a manutenção da

LT através da apresentação de um dispositivo inteligente equipado com um sistema de alerta preventivo, tendo como base a medição do campo elétrico na LT. Se o limiar de segurança for excedido, o dispositivo emitirá um sinal de alarme sonoro, solicitando que o operador se afaste da distância de risco. O trabalho de CUI et al. (2014b) propõe um sistema de medição distribuído baseado em uma rede de sensores sem fio coletando e monitorando o campo elétrico sob as linhas de transmissão HVDC. Para atingir este objetivo, o trabalho aborda o desenvolvimento de um sensor mecânico de campo elétrico baseado na Lei de Gauss empregando o microprocessador ARM e o módulo de radiofrequência Zigbee. O trabalho de XIN; YUAN (2016) apresenta um desenvolvimento de sensor de corrente aprimorado, baseado em resistência, para medição em banda larga da corrente de corona nas linhas HVDC. A partir de testes experimentais, o sistema proposto demonstrou adaptação ao ambiente eletromagnético complexo sob as linhas de transmissão, precisão, flexibilidade e estabilidade.

Neste contexto, cabe ressaltar a importância da medição de corrente corona em sistemas HVDC, que desempenha um papel fundamental uma vez que fornece informações importantes, como ocorrência de descarga corona, interferências eletromagnéticas HV, intensidade de corrente elétrica, entre outras características relevantes aos projetos de linhas de transmissão e equipamentos (OTTO; READER, 2010; SUO *et al.*, 2020; WIJEWEERA *et al.*, 2009; XIN; YUAN, 2016; YUAN *et al.*, 2012). As descargas corona são provocadas devido ao efeito causado pela ionização do ar ou outro fluido que envolve um condutor de alta tensão. Tratando-se de um efeito recorrente em linhas de transmissão HVDC, podendo provocar interferência de rádio e perda de energia elétrica. As perdas causadas por descargas corona podem afetar a operação segura e econômica das linhas de transmissão HVDC (XIN *et al.*, 2016). Diante disso, ao projetar linhas de transmissão HVDC, é essencial prever o campo elétrico gerado pelas descargas corona a fim de mitigar os efeitos adversos causados pelo aumento da magnitude do campo elétrico no entorno das linhas.

Dessa forma, as descargas corona tem sido alvo de diversas investigações teóricas e experimentais no campo vasto de descargas parciais (PD - *partial discharge*), com a finalidade de obter maior conhecimento e caracterização do fenômeno (ABOUELATTA *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2020). Assim, diversas abordagens foram propostas para estabelecer a detecção de HVDC com base no desenvolvimento de dispositivos de detecção de medição de corrente corona (LIU *et al.*, 2011; XIN; YUAN, 2016; YUAN *et al.*, 2012; ZHU *et al.*, 2013) e dispositivos de detecção de medição de campo eletromagnético (CUI *et al.*, 2018; SUO *et al.*, 2020; WIJEWEERA *et al.*, 2009; ZHU; LEE; PONG, 2019).

Entretanto, devido à complexidade de calcular o campo elétrico das linhas HVDC que sofrem distorções provocadas pelos mecanismos das descargas corona (ZOU *et al.*, 2017), tornou-se popular a utilização de técnicas de processamento digital de sinais elétricos ou acústicos que são medidos no sistema HV e carregam informações das descargas na forma de impulsos no domínio tempo. Métodos de reconhecimento de padrões ou algoritmos de aprendizagem de máquina também são empregados para extração de características. Recentes progressos no escopo de separação entre PD e fontes de ruídos são relatadas em (ARDILA-REY *et al.*, 2020). Em relação aos sistemas HVDC, destacam-se estudos usando métodos de elementos finitos (FEM - *Finite Element Method*) (FARD; REID; HEPBURN, 2017), técnicas de classificação de máquina de vetor suporte (SVM - *Support Vector Machines*) (CAVALLINI *et al.*, 2011), análise estatística baseada em tempo entre descargas (TBD - *Time Between Discharges*) (NIU; CAVALLINI; MONTANARI, 2008), monitoramento *on-line* de PD usando *clusters* baseados em mapas de classificação de tempo-frequência (JACOB; MCDERMID; KORDI, 2012) e reconhecimento de fonte *on-line* de PD usando redes neurais e análise de componentes independentes (CHANG *et al.*, 2006).

Diversos trabalhos têm sido conduzidos com foco principalmente na identificação corona de tensão e corrente de impulso (ÖNAL, 2018), identificação de sinais acústicos de descargas corona sob diferentes níveis de contaminação usando a transformada *wavelet* apresentando um modelo para extração de características relevantes do sinal (AL-GEELANI; PIAH; ABDUL-MALEK, 2018), desenvolvimento de algoritmo de filtragem *wavelet first pulse* (WFP), baseado em transformada *wavelet*, para medir os valores do tempo de chegada (TOA - *Time of Arrival*) de sinais eletromagnéticos para localização e estimação de fontes de descarga de corona em sistemas AC e DC (SZIRTES; CSELKO; BERTA, 2021), detecção acústica audiosônica de descarga corona aérea com base em transformada rápida de Fourier, técnicas de separação de descargas parciais e fontes de ruído elétrico (WAHYUDI *et al.*, 2019) e a análise da correlação matemática das características espectrais do sinal corrente elétrica relacionado à corona na banda de frequências de 5-20 kHz para uma linha de transmissão UHVDC (*ultrahigh voltage direct current*) através da utilização do método de gaiola corona externa (LIU *et al.*, 2018). Em complemento, o estudo das relações teóricas entre o espectro de energia de corrente corona e interferência de rádio em sistemas UHVDC (LIU *et al.*, 2016).

Apesar dos avanços e das contribuições existentes, ainda existem diversas lacunas de pesquisa para serem preenchidas no campo de extração de características de descarga corona, principalmente em sistemas HVDC e quanto aos métodos de determinação do perfil de descarga corona sob diferentes níveis de tensão e condições de operação. O principal motivo é a

complexidade, precisão comprometida, custos e etapas adicionais envolvidas, além do conhecimento específico necessário ao operador indo acima do treinamento adequado normalmente realizado em conformidade com as legislações vigentes. Sendo assim, soluções mais claras de detecção, menos complexas e de baixo custo são particularmente mais interessantes e atrativas para as necessidades dos sistemas HVDC.

## 1.2 Objetivos e contribuições do trabalho

Tendo como base a motivação discorrida, o presente trabalho aborda uma nova metodologia para extração e seleção de características relacionadas às descargas corona por meio do processamento digital de sinais de corrente elétrica em sistemas HVDC. A metodologia envolve uma nova combinação de parâmetros de processamento digital de sinais baseada em: (i) análise no domínio do tempo por meio da energia do sinal a partir do critério de Hinkley; (ii) análise no domínio do tempo-frequência com base na transformada de Fourier de tempo curto (STFT - *short time Fourier transform*); (iii) e Critério de Energia de Hinkley. A abordagem proposta permite a avaliação de informações importantes relativas às descargas corona, uma vez que a análise por meio das métricas de STFT fornece conhecimento sobre o mecanismo das descargas, bandas de frequência mais representativas e de maior intensidade dos sinais, duração dos impulsos das descargas e padrões de repetição. O critério de Hinkley, por outro lado, é uma métrica representativa que permite determinar, por meio dos tempos de chegada, os pontos de início e final das descargas baseado na energia dos sinais no tempo.

Isto posto, a inovação do presente estudo é a implementação da métrica de coeficiente de variação (CV) a partir dos valores de magnitude da STFT nas frequências mais representativas e nos instantes de tempo em que ocorreram as descargas corona, os quais são determinados pelo critério de Hinkley. A nova métrica  $CV_{STFT}$  permite entregar a distribuição em frequência e intensidade (em porcentagem) somente no tempo de ocorrência das descargas corona a partir de um sinal de referência (*baseline*). Por fim, a nova combinação faz o uso da métrica do desvio da raiz média quadrática (RMSD – *root mean square deviation*) para determinar a melhor banda de frequências que demonstra o percentual crescimento da descarga corona em função da tensão aplicada ao condutor HVDC.

Uma das vantagens da presente proposta é sua simplicidade e rapidez no cálculo dos parâmetros uma vez que não faz uso de técnicas complexas de separação de ruído ou algoritmo de aprendizado de máquina, pois aborda o problema da quantificação do nível de tensão por

meio de uma modelo de linearização do problema. Assim, a abordagem proposta visa estabelecer um limiar seguro para proteção no entorno das linhas de transmissão ou para fornecer informação útil sobre medição em campo de intensidade da corrente elétrica e da tensão, permitindo seu uso em sistemas microprocessados mais simples e em consonância as novas tecnologias de sistemas embarcados. Para validar a abordagem proposta para uma situação ampla de ensaios experimentais foram conduzidos para detecção de descarga corona em diferentes condições aplicando diversos valores de alta tensão em testes com e sem carga, e variação da posição da haste metálica condutiva e ângulo em relação a fonte de tensão. Sinais de corrente elétrica, foram medidos utilizando o sensor detector HVDC inovador, concebido por (DOTTO *et al.*, 2022), o qual é equipado com um sistema de aquisição de dados e cujo princípio de medição é baseado no efeito corona.

### 1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho segue estruturado em seis capítulos, da seguinte forma:

- ❖ Capítulo 1 – O primeiro capítulo trata da introdução do trabalho, apresentando a motivação da pesquisa, a importância das inspeções nas LT e da caracterização do efeito corona em sistemas HVDC, bem como a apresentação de trabalhos anteriores sobre o tema abordado e por fim, são apresentados os objetivos e organização do trabalho;
- ❖ Capítulo 2 – O segundo capítulo aborda o estado da arte de sobre o tema HVDC, investigando suas principais características e importância no setor de transmissão de energia elétrica;
- ❖ Capítulo 3 – O terceiro capítulo aborda o estado da arte sobre descargas corona e técnicas de processamento de sinais. Apresentando as principais técnicas de processamentos, bem como trabalhos anteriores relacionados a esta dissertação;
- ❖ Capítulo 4 – O quarto capítulo detalha equipamentos e procedimentos experimentais realizados para a implementação da abordagem proposta;
- ❖ Capítulo 5 – O quinto capítulo discute os resultados mais relevantes obtidos com a abordagem proposta;

- ❖ Capítulo 6 – O sexto capítulo conclui a dissertação, sintetizando as suas contribuições para a área do conhecimento, bem como aborda as perspectivas para trabalhos futuros.

Ao final do trabalho encontra-se a bibliografia consultada e referenciada.

## 1.4 Publicações obtidas

DAVID, G. A., OLIVEIRA JUNIOR, C. P., DOTTO, F. R. L., SANTOS, B. R. A. *Feasibility Study of the Application of Signal Processing Techniques to Corona Discharge Characterization on HVDC Systems*. In: *Engineering Proceedings*, v. 10, n. 1, p. 28, 2021.

DAVID, G. A., OLIVEIRA JUNIOR, C. P., DOTTO, F. R. L., SANTOS, B. R. A. *Corona discharge feature extraction in HVDC systems using the frequency spectrum of electrical current signals*. In: *Proceedings of the 14th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission-CLAGTEE*. 2022.

G. A. David, P. O. Conceição, F. R. L. Dotto and B. R. Dos Santos, "New Signal Processing-Based Methodology for Optimal Feature Selection of Corona Discharges Measurement in HVDC Systems," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, DOI: 10.1109/TIM.2023.3260879.

# Capítulo 2

## ALTA TENSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA

---

*Este capítulo reporta a revisão da literatura sobre o tema HVDC, sendo apresentado os principais aspectos envolvidos na geração e transmissão, as características do sistema e a importância para o setor de energia elétrica.*

### 2.1 Sistemas HVDC

A capacidade total mundial de transmissão HVDC operacional, esperada até 2022, ultrapassa 400 GW. Sendo que mais da metade dessa capacidade (~52%) é concentrada somente na Ásia devido ao domínio do mercado por parte de países como China e Índia. Na China, por exemplo, projetos recentes demonstraram capacidade operacional de transmissão excedendo 6400 MW/± 800 kV, sendo que alguns já atingiram 10.000 MW (ALASSI *et al.*, 2019).

Devido a todos os recursos anteriormente mencionados, os sistemas HVDC são particularmente mais interessantes para a transmissão de energia elétrica em alto mar, florestas ou em grandes centros urbanos. O Brasil, por exemplo, comporta diversos elos de transmissão HVDC. Dentre eles, destacam-se: (i) a LT Itaipu que interliga a usina em Foz do Iguaçu, Paraná (PR), à estação de Ibiúna, São Paulo (SP), com uma extensão de 780 km (bipolo 2 × 3150 MW, ±600 kV); (ii) a LT Rio Madeira que interliga as usinas Santo Antônio e Jirau, em Porto Velho, Rondônia (RO), à estação de Araraquara, SP, com uma extensão de 2350 km, bipolar (bipolo 2 × 3150 MW, ±600 kV); e (iii) a LT Belo Monte (Xingu/Estreito) que interliga a usina Belo Monte, Pará (PA) à estação de Ibiraci, Minas Gerais (MG), com uma extensão de 2092 km (bipolo 2 × 2000 MW, ±800 kV) (ANEEL, 2019).

### 2.1.1 Sistemas AC versus DC

A transferência de energia em uma linha AC depende da diferença angular entre os fasores de tensão entre os terminais da linha. Para um determinado nível de transferência de energia, esse ângulo aumenta com a distância. A transferência máxima de potência é limitada pelas considerações de estabilidade: estado estacionário e transitório. A capacidade de carga de uma linha AC é inversamente proporcional à distância de transmissão. Considerando que a capacidade de transmissão de energia das linhas DC não é afetada pela distância de transmissão, uma linha DC permite o controle total sobre a potência transmitida, bem como promove a capacidade de aprimoramento da estabilidade dinâmica nos sistemas AC, resultando em minimização de falhas e faltas (ARRILLAGA, 2008; SOOD, 2018).

O controle de tensão é uma tarefa difícil e, por vezes, complexa, nas linhas AC, uma vez que o perfil de tensão varia com a carga da linha. Um sistema de controle de potência reativo apropriado se faz necessário a fim de se manter constante a tensão entre as extremidades da linha AC. O aumento da capacidade de transmissão de energia e o controle de tensão é possível por meio do uso de indutores *shunt*, capacitores em série, compensadores estáticos (SVC - *static var compensators*) e, recentemente, com o uso da nova geração de compensadores estáticos (STATCOM - *static compensators*). Os sistemas AC também requerem controladores de geração automática, os quais devem ser coordenados usando sinais de frequência. Ainda assim, esta operação é suscetível a presença de grandes oscilações de potência e transmissão de distúrbios (SOOD, 2018).

A compensação de linha não necessária e a controlabilidade de fluxo de energia rápida e eficiente das linhas DC, faz com que os problemas e desafios anteriormente mencionados sejam minimizados. Além disso, uma capacidade de interconexão assíncrona entre dois sistemas de energia somente pode ser alcançada por meio de elos DC. Adicionalmente, em contraste com os sistemas AC, que operam como fases balanceadas e estão sujeitos a instabilidade quando um desequilíbrio ocorre, a impedância de aterramento é insignificante para correntes DC, sendo que um elo DC pode operar usando um condutor com retorno à terra (operação monopolar) (JOVCIC; AHMED, 2015).

Apesar dos inúmeros benefícios anteriormente mencionados, os sistemas DC também possuem desvantagens (ARRILLAGA, 2008; SOOD, 2018):

- Alto custo dos conversores de potência;
- Incapacidade de usar transformadores para alterar os níveis de tensão;
- Geração de componentes harmônicas;

- Exigência de potência reativa nos conversores;
- Complexidade dos controles.

### 2.1.2 Manutenção em linhas e segurança do operador

Dentre os diversos roteiros de manutenção adotados para os sistemas HVDC, destacam-se o processo de manutenção preditiva, cujo objetivo é prever e impedir condições de falha nos equipamentos e linhas de transmissão, e processo de manutenção preventiva, cujo objetivo é substituir componentes em períodos estipulados (antes da falha). A combinação de ambos os processos permite um planejamento correto da estratégia a ser adotada quando um processo de manutenção corretiva, por exemplo, for necessário. A escolha da técnica e equipamento apropriado para manutenção é uma etapa importante que influencia diretamente no tempo de operação de dispositivos, custos envolvidos, horas de trabalho, materiais de reposição etc. O principal objetivo é manter equipamentos e instalações em condição operacional satisfatória, fornecendo inspeção sistemática, detecção e correção de falhas incipientes, ensaios elétricos incluindo medições, ajustes e substituição de peças com vistas a impedir a ocorrência de falhas. Para tanto, sistemas de monitoramento equipados com tecnologia de ponta são empregados com o propósito de monitorar em tempo real e fornecer condições de controle para o sistema HVDC. Tecnologias avançadas baseadas em sensoriamento remoto, dispositivos *wireless*, drones, inteligência artificial e sistemas avançados de telecomunicação são empregados para atender este objetivo. Em síntese, os principais aspectos envolvidos são destacados a seguir (HAUSCHILD; LEMKE, 2014; MAWLE; PORATE; BURADE, 2015; WADHWA, 2017):

- **Inspeção** - consiste em ações de inspeção visual padrão por meio de helicóptero, ou inspeção detalhada com auxílio de tecnologias de sensoriamento (infravermelho e ultravioleta, por exemplo) ou outros dispositivos anteriormente mencionados, com vistas a: verificar obstáculos sob as linhas, o estado das fundações, a condição das torres e dos condutores, a condição do sistema de aterramento e proteção, verificação do aspecto geral da linha de transmissão, verificação de vegetações e outras instalações (sistemas de telecomunicações, edifícios, rodovias etc.) nas proximidades da linha de transmissão.
- **Teste de isoladores** - é realizado por meio de um dispositivo que obtém informações sobre distribuição de tensão ao longo dos elementos isolantes. O princípio de funcionamento deste dispositivo é baseado na medição automática e, dependendo da tecnologia do equipamento, a gravação do campo elétrico ao

longo do elemento isolante, o qual diminui consideravelmente frente a um isolador com revestimento interno que disposto sobre o elemento isolante.

- **Manutenção de linha viva** - refere-se as atividades de manutenção preventiva e, quando necessário, corretiva. As atividades são realizadas em linhas energizadas, e incluem o reparo de condutores e torres, montagem de desvios de transmissão temporários, substituição de componentes de isoladores, e montagem de sinalizadores anticolidões de aves.

É importante mencionar também que a segurança de pessoas, principalmente de operadores que atuam diretamente nas atividades de manutenção das linhas de transmissão, subestações e estações conversoras, é um dos aspectos cruciais nas atividades de manutenção. Neste contexto, o operador humano deve ser protegido contra choques elétricos causados por diversas anomalias do sistema, como sobretensão, por exemplo, ou, até mesmo, por tensão residual em pontos desenergizados e/ou isolados. Falhas nos próprios equipamentos de manutenção e testes elétricos também são fatores de risco para o operador. A rigor, os equipamentos de manutenção devem prever todos estes aspectos, sendo que aparelhos de detecção HVDC, equipados com sistemas de aviso prévio ao operador quando da presença de tensão, devem ser empregados. Por outro lado, um sistema de proteção com tais características ainda é um desafio a ser superado em sistemas HVDC. Além da segurança do operador, as atividades de manutenção devem ser ambientalmente adequadas, de forma que os impactos ao meio ambiente sejam mínimos ou zero quando uma intervenção for necessária (CUI *et al.*, 2014a; SUO *et al.*, 2020; XIN; YUAN, 2016).

### 2.1.3 Quantificação de tensão e corrente elétrica em sistemas HVDC

Atualmente, existem diversas normas técnicas direcionadas para os sistemas HVDC, as quais fornecem diretrizes para medição e testes, bem como a padronização das tecnologias envolvidas neste segmento. Os sistemas HVDC também devem operar em conformidade com normas regulamentadoras (NR) como, por exemplo, no caso do Brasil, a norma NR-10 (NR-10, 2019), que estabelece diretrizes para segurança em instalações e serviços em eletricidade. No que diz respeito a medição e testes, as diretrizes são promovidas em sua maioria por normas técnicas internacionais. Como exemplo, é importante destacar a norma *IEEE Std 1227-1990 IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities*, (IEEE-STD-1227, 2010) que fornece orientações para medir a força do campo elétrico, a densidade de corrente de íons, condutividade, densidade de carga espacial monopolar e

densidade de carga espacial líquida nas proximidades dos equipamentos HVDC (linhas de transmissão, estações conversoras e aparelhos relacionados). Em síntese, a ênfase desta norma é direcionada para: (i) definição de terminologias aplicadas; (ii) descrição da inter-relação entre parâmetros elétricos envolvidos; (iii) descrição dos princípios operacionais dos instrumentos de medição; (iv) estabelecimento de métodos de calibração; (v) estabelecimento de procedimentos de medição; e (vi) identificação de fontes de erro de medição.

### **2.1.4 Importância da medição e detecção em sistemas HVDC**

A fim de se garantir a correta funcionalidade dos equipamentos, bem como a eficiência da transmissão HVDC, é essencial que ensaios elétricos e medições em HV sejam efetuadas. Para tanto, roteiros baseados em instruções normativas, bem como equipamentos devidamente calibrados são utilizados em diversos testes em HV focando principalmente em: (i) medições de tensão e corrente em sistemas HVDC; (ii) ensaios elétricos não destrutivos para verificação de compatibilidade eletromagnética; (iii) testes de isolamento elétrico e proteção; (iv) testes de sincronização entre tensões AC/DC. Adicionalmente, sistemas de monitoramento e inspeção em tempo real são empregados para fins de identificação e localização de falhas nos sistemas HVDC, as quais são reparadas por meio de roteiros de manutenção (BALIGA, 2011; GHISLAIN OGOULOLA *et al.*, 2020; HAUSCHILD; LEMKE, 2014).

### **2.1.5 Alternativas para detecção e quantificação de tensão e/ou corrente elétrica**

O ambiente elétrico sob uma linha transmissão HVDC é influenciado por diversos fatores, tais como o campo elétrico, a densidade da corrente de íons, a densidade de carga espacial, a interferência de rádio, ruído audível e o campo magnético. O campo elétrico nas linhas de transmissão é um dos parâmetros mais importantes para avaliação dos impactos eletromagnéticos nos sistemas HVDC (CUI *et al.*, 2014b, 2018). Neste contexto, muitas abordagens têm sido propostas para medição do campo elétrico em linhas de transmissão com vistas a controlar e minimizar os efeitos eletromagnéticos, reduzir impactos ambientais e garantir segurança de pessoas, principalmente, neste último caso, quando das atividades de manutenção (CUI *et al.*, 2018; SUO *et al.*, 2020; WIJEWEERA *et al.*, 2009; XIN; YUAN,

2016; ZENG *et al.*, 2008). As principais soluções atuais são classificadas em duas principais abordagens, descritas a seguir:

- **Medições diretas** – são métodos de detecção por contato baseados na medição direta a partir de um dispositivo em contato com o equipamento HV;
- **Medições indiretas** – são os métodos de detecção por aproximação, onde a grandeza que se deseja medir é inferida a partir de quantificação de uma outra como, por exemplo, a medição do campo elétrico nas proximidades do equipamento HV.

Geralmente, em sistemas HV, a medição de quantidades transitórias não é registrada diretamente devido às suas grandes magnitudes. Medições de tensão e corrente em sistemas HVDC é um processo crítico influenciado por muitos fatores. Os equipamentos de HV possuem grandes capacitâncias dispersas em relação às estruturas aterradas e, portanto, grandes gradientes de tensão inerentes. Dessa forma, um operador humano, que manipula tais equipamentos, deve ser protegido contra estas sobretensões por meio de dispositivos de proteção. Além disso, são necessários sistemas robustos que devem ser capazes de controlar efeitos adversos como, por exemplo, a dissipação de calor dos circuitos e a interferência eletromagnética nas medições de tensão e corrente. As principais soluções empregadas na medição e testes em sistemas HVDC são descritas a seguir (HAUSCHILD; LEMKE, 2014; WADHWA, 2017)

- **Sphere gap** - é considerado um dos métodos padrão para a medição do valor de pico de DC/AC e tensão de impulso. É também utilizado como verificador de voltímetros e outros dispositivos usados em circuitos medição e teste em HV. Seu princípio se baseia em duas esferas metálicas idênticas separadas por certa distância por um gás que forma uma lacuna entre elas. A diferença de potencial entre as esferas é obtida até que uma faísca passe entre elas. A resistência à ruptura do gás depende do tamanho das esferas, da distância entre elas, dentre outros fatores.
- **Folga da haste** - pode ser usada para medir o valor de pico e tensão de impulso. Consiste em dois eletrodos de haste de 1,27 cm de seção quadrada em suas extremidades fixados em suportes isolantes. O comprimento da haste é igual ou superior a metade da folga entre a borda interna do suporte. O princípio de medição é baseado na detecção da tensão de ruptura, a qual é obtida a partir do aumento da folga da haste. Este aumento, por sua vez, é diretamente

proporcional ao aumento da densidade relativa do ar a partir de variações de pressão atmosférica. A tensão de ruptura também é sensível ao aumento da umidade relativa do ar, sendo que 15,5 mm Hg é a umidade padrão sob a qual o dispositivo é calibrado.

- **Voltímetro eletrostático** – quando uma tensão é aplicada a um arranjo de eletrodo de placas paralelas, um campo elétrico é produzido entre as placas. Um voltímetro eletrostático mede a tensão a partir da força desenvolvida entre as placas tendo como base a disposição das mesmas, isto é, uma das placas é rigidamente fixa enquanto a outra sofre uma breve movimentação, por parte do eletrodo, da ordem de milissegundos. Neste caso, devido a movimentação relativamente rápida, a mudança no campo elétrico é desprezível. Uma vez que a força no campo elétrico é proporcional ao quadrado da tensão RMS ( $V_{rms}$  - *root mean square*), o dispositivo, portanto, infere a tensão, podendo ser utilizado em ambos os sistemas AC e DC.
- **Medição de alta corrente DC** - correntes DC relativamente altas são utilizadas nos sistemas HVDC para testar disjuntores, para-raios de cabos etc. e ocorrem nas descargas atmosféricas, transientes de comutação e falhas de derivação. Diversos dispositivos especiais são utilizados para a medição de corrente corona. Dentre eles, destacam-se os dispositivos de medição baseada no efeito Hall. Assim, quando a corrente elétrica flui através de uma placa de metal disposta em um campo magnético perpendicular a ela, a força de Lorenz desviará os elétrons da estrutura do metal em uma direção perpendicular à direção do campo magnético e do fluxo da corrente. O deslocamento da carga resulta em uma força eletromotriz, na direção perpendicular, chamada de tensão de Hall. A tensão de Hall é proporcional à corrente, à densidade do fluxo magnético e inversamente proporcional à espessura da placa. Além do efeito Hall, a medição de correntes DC altas é também realizada por meio de: (i) dispositivos de correntes de frequência de alta potência, baseados em transformadores de corrente; (ii) dispositivos de medição de alta frequência e correntes de impulso, baseados no efeito de indução e efeito de Faraday.

# Capítulo 3

## DESCARGAS CORONA E PROCESSAMENTO DE SINAIS

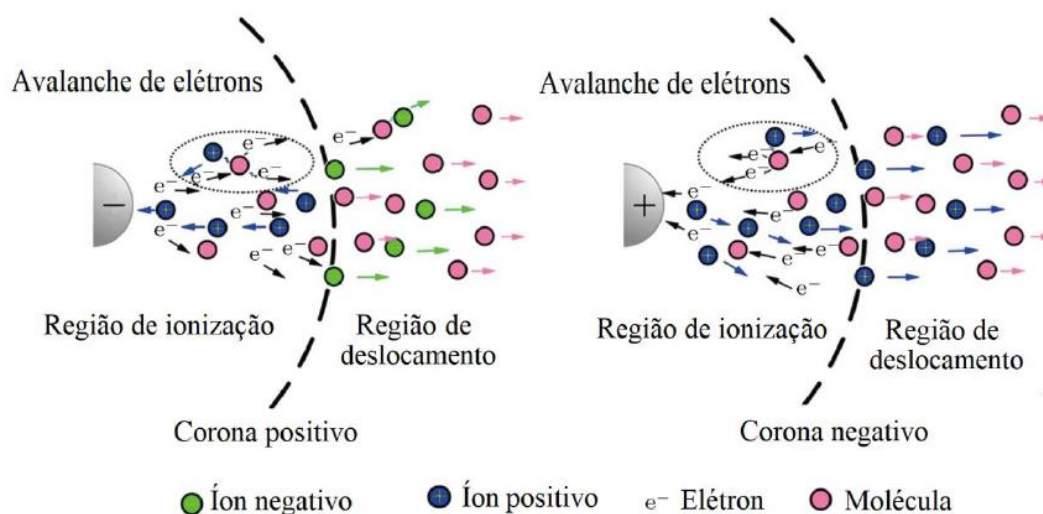
---

*Este capítulo apresenta a revisão da literatura sobre o tema descargas corona, assim como suas características e importância da detecção para os sistemas HVDC. Por fim, aborda-se as principais soluções para detecção de descargas corona, medições e caracterizações apresentando os principais trabalhos anteriores relacionados a área e as principais técnicas de processamento de sinais empregadas neste trabalho.*

### 3.1 Descargas Corona em sistemas HVDC

O efeito corona é o resultado da ionização do ar no entorno de elementos condutores, produzido pelos fortes campos elétricos presentes na superfície de pontos metálicos pontiagudos, condutores de pequeno diâmetro, dobras de ângulos agudos, entre outros, quando submetidos a altas tensões (ENA, 2009). O efeito corona permite com que todos os elétrons que se encontram em uma região de campo elétrico intenso sejam acelerados e ganhem energia suficiente para ionizar átomos de ar (com os quais colidem). Os pares íon/elétron produzidos são então acelerados e sofrem colisões. Neste caso, apenas as colisões de elétrons são ionizantes, ou seja, produzem o processo de decomposição em avalanche, restrita à região de ar adjacente ao "eletrodo corona". O mecanismo de formação do efeito corona é ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Mecanismo de formação do efeito corona.

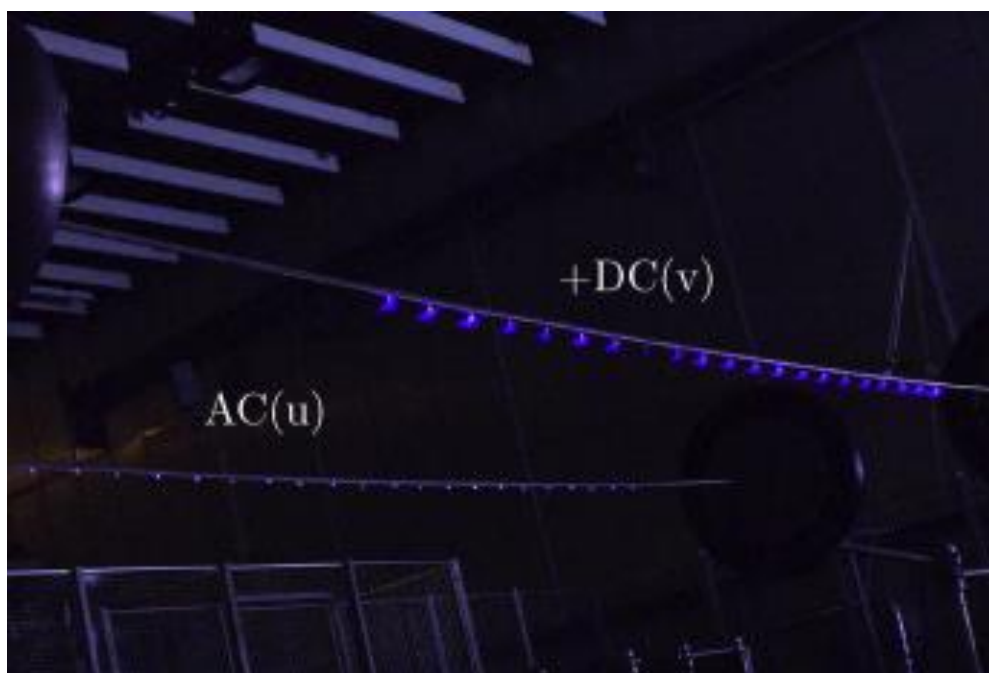


Fonte: Adaptado de (ZHANG *et al.*, 2019).

Posteriormente, o átomo atingido pode ser revertido ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas. Esse processo de ionização dá origem ao chamado efeito corona. A “coroa” aparece como uma fraca descarga (com aspecto semelhante à corona solar observada durante eclipses solares totais) irradiando para fora de seu ponto de ocorrência, produzindo ruído de crepitação que em alguns casos, nas proximidades das linhas de alta tensão, podendo ser audível. Toda a energia irradiada pelo efeito corona provém do campo elétrico do condutor carregado. Portanto, verifica-se uma dissipação de energia através da superfície desse condutor.

No processo de descarga corona, devido à falta de homogeneidade do campo elétrico, a atividade de ionização primária é confinada a uma área próxima ao eletrodo onde o campo elétrico local é bastante forte. Em especial, esse fenômeno se desenvolve em uma fina camada de ar, pequena ou grande, próxima ao eletrodo cujo raio de curvatura é bastante pequeno. A fina camada de ar é onde a luminescência do gás ionizado ficará contida, sendo chamada de área de ionização, camada corona ou camada Halo (LIU *et al.*, 2014). Fora desta área, onde o campo elétrico é fraco, dificilmente ocorre a ionização do ar ou o efeito de luminescência. O trabalho de HEDTKE; PFEIFFER; FRANCK (2019) apresenta o efeito corona ativo de forma visível em linhas HVAC (200kVrms) e HVDC (+240kV) conforme apresentado na figura 3.

Figura 3 – Efeito corona demonstrado em linhas HVAC e HVDC.



Fonte: Adaptado de (HEDTKE; PFEIFFER; FRANCK, 2019).

Os íons produzidos pelas descargas de corona nas linhas são transportados pelo vento e desaparecem conforme se distanciam da linha e à medida que as partículas carregadas se recombinam ou são depositadas nas superfícies ao entorno (ENA, 2009). A geração de íons por efeito corona depende da intensidade do campo elétrico nos conectores e condutores da linha de transmissão, denominado gradiente de tensão superficial. As linhas de transmissão e distribuição são projetadas com um gradiente de tensão superficial muito menor do que o gradiente de tensão inicial geralmente definido em 16 kV/cm, o que evita a produção de descargas corona.

Em qualquer arranjo geométrico que se estabeleça um espaço não uniforme entre dois eletrodos submetidos a diferenças de potencial considerável, é possível a produção do fenômeno de descarga corona (MANTACH, 2018). A probabilidade de ocorrência de descargas corona nas linhas é reduzida usando acessórios com cantos arredondados e aplicando-se condutores de diâmetro maior. Para linhas de alta tensão e ultra alta tensão (acima de 275kV), o gradiente de tensão é reduzido (consequentemente reduzindo a probabilidade de descargas corona) se forem utilizados arranjos de condutores agrupados, ou seja, dois a quatro condutores por fase, separados por 40 cm ou mais por meio de espaçadores. Anéis de corona metálicos também podem ser instalados ao redor dos acessórios para distribuir o gradiente de tensão em uma área de superfície maior (ENA, 2009).

O trabalho de PEEK (1920), foi o primeiro a citar ocorrência do efeito corona. Em sua publicação, o autor demonstra que, ao se elevar a tensão entre dois condutores lisos acima de

um determinado potencial crítico, ocorre um ruído sibilante, com emissão simultânea de fraca luz violeta que pode ser visualizada em ambientes escuros. Durante esse processo, observou-se ainda a formação de Ozônio e a presença de uma corrente de descarga que sustenta o processo de forma estável. Deste modo, o autor concluiu que, como resultado, a descarga corona é acompanhada por dissipação de energia manifestada de diversos modos: reações químicas, emissão de ruído, luz e calor. Em seu trabalho, o autor registrou a energia envolvida no processo através de um wattímetro que sofre aumento significativo com a elevação do nível de tensão aplicada, além de pontuar as diferenças entre descarga corona ocorrendo a partir de DC e AC.

Fenômenos de descargas parciais são detectados com mais facilidade onde há uma distribuição de campo elétrico não uniforme, especialmente quando o isolamento dos equipamentos de isolação encontram-se deteriorados. Neste tipo de situação a distribuição de campo elétrico não uniforme evolui para campo elétrico local de maior intensidade (LIU *et al.*, 2014). Durante a ocorrência de neblina e chuvas, as gotas de água podem elevar o gradiente de tensão da superfície dos condutores, aumentando a probabilidade de ocorrência de descargas corona. Esses eventos podem ocorrer durante condições atmosféricas de elevadas umidades, mas apresentam efeito temporário.

### 3.1.1 Consequência das descargas corona em linhas de transmissão

As perdas causadas por descargas corona podem afetar a operação segura e econômica das linhas de transmissão HVDC, sendo não apenas um fator determinante para seleção para seção do condutor, mas também podendo afetar o investimento e o custo anual da operação (XIN *et al.*, 2016). Além da dissipação de energia provocada pela ocorrência de descargas coronas em linhas de transmissão HVDC, Abouelatta *et al.* (2021) citam em seu trabalho que os sistemas de transmissão HVDC funcionam excedendo a tensão de início da corona, o que pode levar a diversos efeitos como por exemplo, ruído audível, interferência de rádio e TV, perdas de energia e deterioração dos sistemas de isolamento e problemas biológicos. Dessa forma, conforme ZOU *et al.* (2017), a distorção do campo eletromagnético causado pela descarga corona não apenas afeta a linha de transmissão ou equipamento HVDC (isto é, restringe a seleção do condutor e o projeto estrutural dos parâmetros da linha de transmissão etc.), como também traz consequências ambientais, assim como a formação de Ozônio e geração de campo de íon, podendo provocar perturbações no entorno. Em complemento, LIU *et al.* (2020), menciona que o ruído audível provocado pelas descargas corona tem um sério impacto negativo na vida e na saúde dos residentes das proximidades das linhas de transmissão.

Dessa forma, devido à grande atenção de órgãos de proteção ambiental e do público em geral, o ruído audível se tornou o fator dominante na seleção de condutores de linhas de transmissão HVDC e no projeto de estruturas de torres. Ademais, conforme mencionado anteriormente, outros fatores externos podem provocar o aumento significativo da amplitude das descargas coronas como precipitação, poluição, arranhões entre outros fatores que provocam distorções no gradiente de superfície dos condutores. Como efeito secundário, ocorre também o aumento do ruído audível. Para as variações de precipitação o fenômeno ocorre de forma mais intensa durante as transições entre o tempo seco e o úmido (HEDTKE; PFEIFFER; FRANCK, 2019).

Problemas em equipamentos de medição também são registrados no entorno das linhas de transmissão. Segundo MA et al. (2017), a descarga corona nas proximidades das linhas HVDC criam fluxos de íons que induzem um efeito de carga ao equipamento de medição, causando erros de medição significativos. Ressalta-se ainda, que para linhas de transmissão HVAC, os íons gerados pelo efeito corona no primeiro semiciclo são atraídos novamente para linha devido à mudança na polaridade da tensão no segundo semiciclo. Entretanto, para transmissão HVDC, os íons do entorno da linha são atraídos para o solo devido ao campo elétrico. Como resultado, há íons carregados em quase todo o espaço entre os cabos do polo e o solo provocado distúrbios no entorno da linha de transmissão (ZHU; LEE; PONG, 2019).

Embora linhas de transmissão de alta tensão sejam adequadas para transmissão de energia em longas distâncias, a alta tensão presente neste tipo de sistema favorece a ocorrência de descargas coronas uma vez que o efeito corona ocorre quando a tensão (ou seja, o campo elétrico) do condutor de transmissão é forte o suficiente (ZHU; LEE; PONG, 2019). Neste contexto, a busca contínua de baixas perdas nas linhas de transmissão HVDC tem elevado a tensão de trabalho nos sistemas de transmissão, atualmente para valores médios de 800kV, requerendo medições ou monitoramento dos campos elétricos próximos às linhas de transmissão HVDC para garantir a segurança, prever a estabilidade e falhas e diagnosticar a confiabilidade dos sistemas de transmissão de energia (MA et al., 2017). Além dos sistemas HVDC, HVAC os efeitos de descargas coronas também podem surgir em sistemas híbridos AC/DC (ZHOU et al., 2012).

No entanto, é difícil calcular o campo elétrico das linhas HVDC devido aos complicados mecanismos de descarga corona (ZOU et al., 2017). O estudo profundo sobre as características da corrente corona pode melhorar ainda mais a compreensão teórica do desempenho do efeito corona e contribuir com a análise do mecanismo e as distorções eletromagnéticas das linhas de transmissão, que tem grande importância na otimização do projeto das linhas de transmissão

(LIU *et al.*, 2018). Em vista disto, ao projetar linhas de transmissão HVDC, é fundamental prever o campo elétrico gerado por descargas corona, a fim de mitigar efeitos adversos causados pelo aumento da magnitude do campo elétrico no solo e no entorno. Dessa forma, torna-se de grande importância a detecção e a caracterização da ocorrência de descargas corona em sistemas HVDC, auxiliando na realização do projeto ideal e segurança da manutenção em linhas de transmissão, dessa forma atendendo aos requisitos de segurança e proteção ambiental.

### **3.2 Técnicas para extração de características e reconhecimento de padrões de descarga corona em sistemas HVDC**

A descrição matemática de uma descarga corona depende de inúmeras variáveis relacionadas à geometria dos eletrodos, às condições dos gases no entorno e à forma com que o campo elétrico é estabelecido no eletrodo ativo (RAIZER, 1991). Por essa razão, pesquisadores buscam por modelos que descrevam de forma adequada o fenômeno físico conforme as características particulares dos problemas estudados. Neste contexto, diversos métodos de detecção de descarga corona são relatados na literatura, conforme relatado por LIU *et al.* (2014), na teoria da detecção de corona apresentam-se vários métodos relativamente novos, como por exemplo, método de detecção por imagem infravermelha, método de detecção por imagem ultravioleta, método de detecção ultrassônica corona e método de detecção por pulso ultravioleta.

Entre os efeitos provocados pelo fenômeno, a corrente corona é a característica mais típica para caracterizar a descarga corona. Mediante a isto, diversos trabalhos foram realizados no campo de pesquisa da corrente corona e alcançaram muitos resultados significativos. Dessa forma, pesquisas sobre as características do espectro da corrente corona e as relações entre os efeitos corona são de grande importância no projeto de otimização da linha de transmissão UHVDC (LIU *et al.*, 2016). Existem várias técnicas e métodos de processamento de sinal para extração e seleção de características. Quando se trata da detecção de eventos e reconhecimento de padrões, como a detecção de transitórios, detecção (e/ou localização) de descargas parciais e descargas corona em sinais de corrente elétrica em alta tensão, a literatura científica reporta um vasto número de trabalhos de pesquisa que reportam estudos de casos com aplicação efetiva de diversas técnicas de processamento de sinais. Destacam-se neste sentido os seguintes

trabalhos: (CASTRO *et al.*, 2017; LETERME; BARNES; VAN HERTEM, 2018; MARKALOUS *et al.*, 2008; ZHU *et al.*, 2013).

De forma geral, os sinais podem ser analisados quanto ao domínio do tempo, domínio da frequência e domínio tempo-frequência. A análise no domínio do tempo é o tipo de estudo mais comum já que esta é a forma original em que o sinal é obtido, isto é, no caso de um sinal lido pelo dispositivo detector HVDC o valor do sinal (corrente elétrica) é estendido para todos os números reais em várias instâncias separadas em intervalos discretos de tempo (amostras). A partir deste sinal, análises estatísticas podem ser conduzidas tendo como base séries temporais, métricas representativas quando a tendência e desvio de padrões de comportamento.

O uso de técnicas de processamento digital de sinais para reconhecimento de padrões de descarga corona tornou-se popular devido ao fato de fornecer informações para otimização do processo através das características atuais dos sinais. A partir disso, conforme relatado anteriormente, diversos trabalhos têm abordado o tema de medições e caracterização de descargas corona em sistemas HVDC, entre os quais diversos resultados significativos foram alcançados, como por exemplo, a identificação corona de tensão e corrente de impulso (ÖNAL, 2018), identificação de sinais acústicos de descargas corona sob diferentes níveis de contaminação usando a transformada *wavelet* (AL-GEELANI; PIAH; ABDUL-MALEK, 2018), detecção acústica audiosônica de descarga corona aérea com base em FFT, técnicas de separação de descargas parciais e fontes de ruído elétrico (WAHYUDI *et al.*, 2019).

O trabalho de XIN *et al.* (2016) desenvolve um sistema preciso medição de corrente corona com base no método dos elementos finitos, instrumentação virtual, tecnologias anti-interferência eletromagnéticas e comunicação de fibra óptica através de um sistema fixo com circuito equivalente RLC não linear. De maneira similar, o trabalho de YUAN *et al.* (2012) apresenta o desenvolvimento de um sensor de medição de corrente corona utilizando métodos de elementos finitos e métodos de simulação de carga em ambiente HVDC, cuja impedância se mantém invariável para variações de altas frequências com largura de banda até 14 MHz. Em ambos os trabalhos, os autores abordam as medições e análise no domínio do tempo.

O trabalho de OTTO; READER (2010) aborda a utilização de técnica de gaiola corona em sistemas HVAC com o intuito de prever o ruído de rádio gerado pelo efeito corona aplicados em sistemas HVDC. Em seu trabalho o autor utilizou técnicas de processamentos de sinais no domínio do tempo e frequência para apresentar funções que descrevem as condições de excitação do fenômeno, bem como calcular características de propagação do ruído corona ao longo das linhas de energia. O trabalho de LIU *et al.* (2018) apresenta análise das características espectrais da corrente corona em linha de transmissão UHVDC através da utilização do método

de gaiola corona externa implantados a linhas de transmissão UHVDC em Pequim e Tibete. O autor analisou a relação entre os diferentes componentes do espectro da corrente corona que comina em uma expressão linear universal representando a correlação entre os componentes espectrais sob diferentes condições na faixa de 5-20 kHz. Em complemento, LIU *et al.* (2016) aborda o estudo de características espectrais e a regularidade de variação da corrente corona dentro da banda do espectro de 0,15 - 4 MHz, além da correlação entre o espectro de energia da corrente corona e a interferência de rádio para as mesmas condições. De acordo com a análise apresentada em seu trabalho, os espectros de energia de corrente corona e a interferência de rádio dentro da banda de 0,15 - 4 MHz são aproximadamente lineares.

Embora haja diversos trabalhos que estudem a detecção do efeito corona, poucos trabalhos tem por objetivo de caracterização do efeito corona no condutor. Também conforme citado por XIN et al. (2016), estudos sobre perdas por efeito corona em linhas de transmissão são mais focados principalmente em linhas AC, sendo a pesquisas em linhas de transmissão DC apresentadas em menor quantidade. Este fato ocorre devido a maior uso de sistemas AC para transmissão de energia até o presente estudo (XIN *et al.*, 2016). Porém, com a ampliação da tecnologia de transmissão DC, em especial HVDC, surge a necessidade de ampliação de pesquisas que abordem mais amplamente este tema.

No entanto, existem poucas pesquisas que abordam descargas corona e processamentos de sinais voltadas para buscas de características espectrais de corrente corona, isto é, com foco em obter padrões de taxa de repetição, intensidade de pulso e outras características da descargas corona são refletidas no espectro da corrente corona (LIU *et al.*, 2018). Logo, uma grande parte dos trabalhos de processamentos de sinais relacionados as descargas coronas em sistemas HVDC são realizados com análises no domínio do tempo.

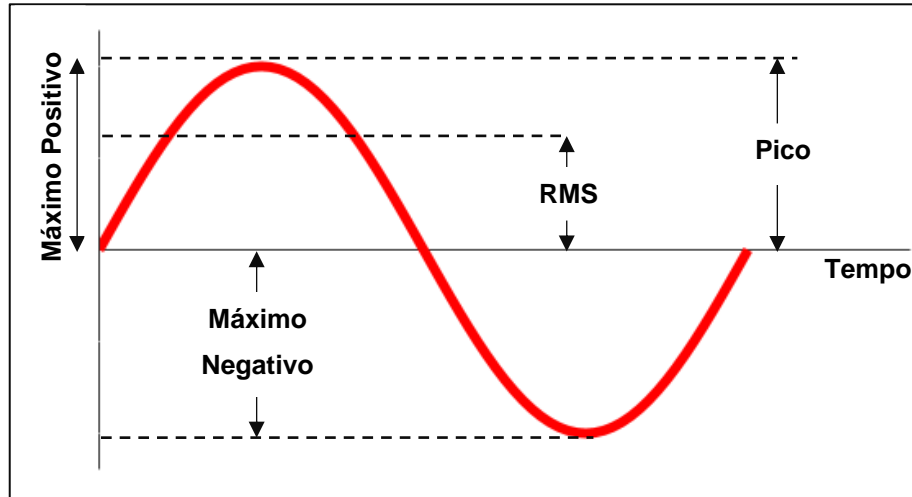
### 3.2.1 Análise estatística no domínio do tempo

Destaca-se como análise estatística no domínio do tempo empregada no presente trabalho o estudo do valor médio, valor de pico (máximo valor  $\pm$  do sinal), e valor RMS (Figura 4. O valor RMS é definido como a raiz quadrada da média aritmética dos valores quadráticos de um sinal discreto conforme dado pela equação 1:

$$Erms = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

Onde  $N$  é o número discreto de amostras corresponde a constante de integração de tempo;  $x_i$  é o sinal de corrente elétrica discreto composto por cada uma de suas amostras  $i$  (CASTRO *et al.*, 2017).

Figura 4 - Representação esquemática da aplicação de algumas métricas de análise.



Fonte: Autor.

Uma outra forma de análise estatística de sinais se dá por meio da análise da tendência e padrão de comportamento tendo como referência uma função crescente de coeficiente linear (*linear fit* – 450). Neste caso, o coeficiente de determinação  $R^2$  (*R-squared*) pode ser empregado para o cálculo da variação percentual dos valores de um sinal em relação a uma função crescente de coeficiente linear. O coeficiente de determinação  $R^2$  tem como base o coeficiente de correlação que expressa o quão forte é a relação entre as duas variáveis. Sendo assim, o coeficiente de determinação  $R^2$  expresso em (2) é definido como o quadrado do coeficiente de correlação  $C_c$ , expresso por (3):

$$R_{squared} = C_c^2 \quad (2)$$

$$C_c = \sum_{k=0}^n \frac{\sum_{k=1}^N (x_p(k) - \bar{x}_p) - (x_E(k) - \bar{x}_E)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N (x_p(k) - \bar{x}_p)^2} - \sqrt{\sum_{k=1}^N (x_E(k) - \bar{x}_E)^2}} \quad (3)$$

onde  $x_E$  e  $x_p$  são respectivamente o sinal de corrente elétrica investigado no presente estudo e o sinal de referência (*linear fit*).

### 3.2.2 Análise no domínio da frequência a partir da Transformada de Fourier

Neste tipo de análise, o gráfico no domínio da frequência apresenta a quantidade da variável física (amplitude, energia e potência) dentro de cada faixa de frequência ao longo de um intervalo de várias frequências. Teoricamente, uma análise no domínio da frequência pode incluir informações sobre a mudança de fase que devem ser aplicadas a cada senoide para recuperação do sinal de tempo original. Mais importante do que isto é saber que um sinal no domínio do tempo pode ser convertido para o domínio da frequência por meio de ferramentas matemáticas permitindo a obtenção do chamado espectro de frequências. Por fim, uma análise no domínio tempo-frequência identifica o instante de tempo que estão presentes as várias frequências de um sinal. Sendo assim, é possível identificar os instantes de tempo em que ocorreram fenômenos de maior intensidade (por meio de um espectrograma), como uma descarga corona, e ao mesmo tempo em que é possível observar quais são as frequências deste fenômeno.

Quando se deseja obter uma melhor compreensão das ocorrências nos dados, utiliza-se o espectro de frequência, que fornece em muitos casos, a informação detalhada sobre a condição de sinais que não pode ser obtida no domínio tempo. O conteúdo de frequências pode ser obtido pela aplicação de métodos e ferramentas como as transformadas de Fourier. Um dos métodos utilizados na análise em frequência do sinal é a Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fast Fourier Transform*). A FFT é um método de computar a Transformada Discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*) de maneira eficiente, com menor custo computacional e o menor tempo de processamento (CONCEIÇÃO JUNIOR *et al.*, 2016).

### 3.2.3 Análise no domínio tempo-frequência a partir da STFT

A transformada de Fourier de curto prazo (STFT – *short-time Fourier transform*) pode ser empregada para avaliar a mudança do conteúdo em frequência ao longo do tempo nos sinais de corrente elétrica obtidos a partir os ensaios realizados com o dispositivo com vistas a detectar informações relevantes quanto aos instantes de tempo e frequências em que predominam a ocorrência de fenômenos. A STFT de um sinal é obtida deslizando uma janela de análise de comprimento  $M$  sobre o sinal e calculando a DFT dos sinais em cada segmento conforme dado por (4):

$$X(k + 1) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n + 1) f_N^{kn} \quad (4)$$

onde  $X$  é o valor calculado da DFT do sinal  $x$  para  $N$  amostras do sinal e frequência  $f_N$  (MATHWORKS, 2023).

A janela percorre todo o sinal em intervalos de  $R$  amostras. Se um comprimento de sobreposição  $L$  diferente de zero é especificado, a sobreposição dos segmentos com janelas compensa a atenuação do sinal nas bordas da janela. A DFT de cada segmento é adicionada à uma matriz que contém a magnitude e a fase para cada instante de tempo e frequência. O número de linhas na matriz STFT é igual ao número de pontos da DFT (MATHWORKS, 2020; SMITH, 2020). O número de colunas é dado por (5):

$$k = \left\lfloor \frac{N_x - L}{M - L} \right\rfloor \quad (5)$$

onde  $N_x$  é o comprimento do sinal original  $x(n)$  e os símbolos  $\lfloor \rfloor$  denotam a função piso.

A matriz STFT é dada por  $X(f) = [X_1(f) X_2(f) X_3(f) \dots X_k(f)]$  de tal forma que o  $m$ -ésimo elemento desta matriz é dado por (6):

$$X_m(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)g(n - mR) e^{-j2\pi fn} \quad (6)$$

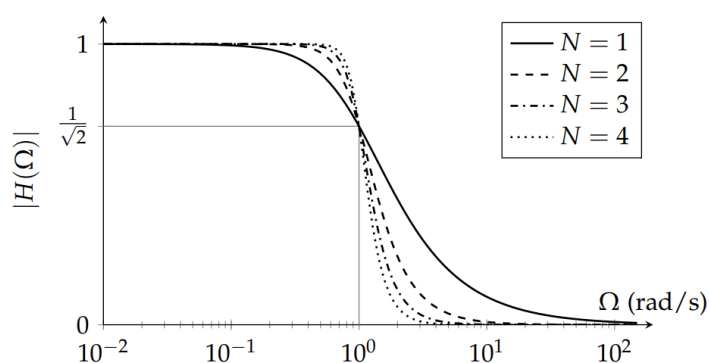
onde  $g(n)$  é função janela de comprimento  $M$ ;  $X_m(f)$  é a DFT dos segmentos janelados e centrados sobre o tempo  $mR$ ;  $R$  é o tamanho dos saltos (intervalos) entre DFTs sucessivas. O quadrado da magnitude da STFT produz a representação por espectrograma a partir da função de densidade espectral de potência (MATHWORKS, 2020; SMITH, 2020).

### 3.2.4 Filtragem digital

Os filtros digitais de resposta infinita ao impulso (IIR) são empregados para seleção de informações relevantes dos sinais coletados durante os ensaios experimentais em laboratório conduzidos com o dispositivo detector HVDC. Um filtro digital IIR  $H(e^{j\omega})$  pode ser concebido a partir de sua transformação para um projeto de filtro analógico  $H_c(j\Omega)$  equivalente. Este filtro

analógico é então concebido por meio de um cálculo padrão. Uma vez que o filtro analógico equivalente foi efetivamente concebido, seu projeto é mapeado novamente para domínio discreto visando a obtenção de um filtro digital que atenda as especificações (OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, 2013). No presente projeto, foram empregados projetos de filtros digitais IIR Butterworth, que visa a obtenção de uma resposta em frequência o mais plana possível da banda de passagem. O quadrado da magnitude da resposta em frequência de um filtro Butterworth de ordem  $N$ , onde, quanto maior o valor de  $N$  mais próximo de um filtro passa-baixas ideal (Figura 5).

Figura 5 - Exemplo de atenuação de filtro do tipo Butterworth para diferentes ordens  $N$



Fonte: Adaptado de (OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, 2013)

### 3.2.5 Critério de energia de Hinkley

O critério de energia de Hinkley trata-se de uma técnica avançada de processamento de sinais que caracteriza variações predominantes no conteúdo em frequência e na energia de um sinal aleatório, sendo capaz de detectar diversas informações relevantes como tempo de chegada e mudanças no padrão de comportamento do sinal ao longo do tempo (CASTRO *et al.*, 2017; MARKALOUS *et al.*, 2008). O critério de energia  $S(k)$  de um sinal discreto  $x$  é definido como a somatória cumulativa dos valores de amplitude deste sinal, conforme expresso por (7):

$$S(k) = \sum_{k=1}^i \left( x_k^2 - \frac{S_N}{N} \right) \quad (7)$$

onde  $i$  é o número de amostras de uma parte selecionada do sinal,  $S_N$  representa a energia total e  $N$  é o comprimento do sinal.

É importante mencionar que, segundo Hinkley (1971), o ponto de mínimo global da curva do critério de energia corresponde ao tempo de início do evento ou mudança

predominante no sinal. De mesma forma, o ponto de mínimo global é efetivamente usado para detecção de transitórios e localização de início de descargas parciais, conforme relatado nos trabalhos de Castro et al. (2016, 2017), onde tal métrica foi empregada para detecção de descargas parciais em transformadores de potência utilizando sinais acústicos de transdutores piezelétricos. Essa métrica será utilizada no contexto do presente estudo com propósito de detecção dos pontos início e final das descargas corona em sistemas HVDC, uma tarefa difícil sem este cálculo em função das inúmeras fontes de ruídos presentes nos sinais.

### 3.2.6 Coeficiente de variação

O coeficiente de variação (CV) é uma medida padronizada de dispersão de uma distribuição de probabilidade ou distribuição de frequência que mostra a razão entre o desvio padrão  $\sigma$  dos dados e seu valor médio  $\mu$ , isto é, mede a variabilidade dos dados. O CV é significativo como uma unidade de razão, que também pode ser expresso em porcentagem, conforme (8):

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \quad (8)$$

Assim, um valor pequeno de CV significa que os dados têm pequenas variações ou dispersão entre amostras nos dados. No caso de sinais de corrente elétrica que carregam informações de descarga corona ao redor de um condutor, podem ocorrer flutuações nos espectros dos sinais muito diferentes em duas ou mais condições de operação ou de tensão aplicadas. O presente estudo, portanto, introduz o CV para análises de vários segmentos espectrais nos instantes de tempo de ocorrência das descargas, medindo a variabilidade espectral para diferentes níveis de tensão e condições de operação, visando determinar diferentes perfis de descarga corona em sistemas HVDC. Para tanto, a metodologia proposta faz uso da matriz STFT  $X_m(f)$ , apenas para os elementos  $m$  referentes a uma janela de tempo  $mR$  entre os instantes de tempo de início e fim da descarga corona, determinados pelo critério de Hinkley, para um dado sinal de corrente elétrica. Dessa forma, a taxa de desvio padrão para a média a partir da matriz SFTF é obtida através das equações (9) e (10):

$$\mu_{STFT}(f) = \left| \frac{1}{N} \sum_{m=ns}^{ne} X_m(f) \right| \quad (9)$$

$$\sigma_{STFT}(f) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{m=ns}^{ne} (X_m(f) - \mu_{STFT}(f))^2} \quad (10)$$

Dessa forma, gerando a métrica  $CV_{STFT}$ , conforme (11):

$$CV_{STFT}(f) = \frac{\sigma_{STFT}(f)}{\mu_{STFT}(f)} \quad (11)$$

Neste caso,  $CV_{STFT}$  será mais representativa quanto a variação do perfil da descarga corona para duas ou mais condições de operação ou tensões aplicadas a uma faixa estreita de frequência. Para aumentar a robustez da metodologia proposta, foi proposto o uso do desvio quadrático médio (RMSD – *root mean square deviation*), que é uma métrica representativa baseada na norma Euclidiana, para medir variações entre valores observados a partir de uma referência. O presente estudo introduz o cálculo do RMSD para a matriz  $CV_{STFT}$  visando determinar a melhor banda de frequências que expressa o percentual de crescimento das descargas corona em função da tensão aplicada (segundo um ajuste linear) adotando um valor de referência. O RMSD calculado para a matriz  $CV_{STFT}$  é expresso em (12):

$$RMSD_{CV_{STFT}} = \sum_{k=\omega_1}^{\omega_F} \sqrt{\frac{[CV_{STFT,O}(k) - CV_{STFT,R}(k)]^2}{[CV_{STFT,R}(k)]^2}} \quad (12)$$

onde,  $CV_{STFT,R}(k)$  e  $CV_{STFT,O}(k)$ , representam os perfis de variabilidade e distribuição de um range de frequência a partir de  $\omega_1$  até  $\omega_F$ , nos instantes de tempo de ocorrência de uma descarga corona para um sinal de corrente elétrica tomado como referência  $R$  e aquele em que observada maior intensidade  $O$ .

No presente estudo, o sinal de referência adotado corresponde a condição mais branda, isto é, o valor mais baixo de tensão aplicada, que indica pouca transição entre ruído e descarga devido à baixa intensidade da amplitude da corrente. Assim, quando a condição transita para descarga corona correspondente ao valor mais alto de tensão aplicada, é esperado que o índice RMSD irá aumentar, permitindo a seleção de um percentual de aumento de acordo com as condições de operação e nível de tensão aplicada.

# Capítulo 4

## MATERIAL E MÉTODOS

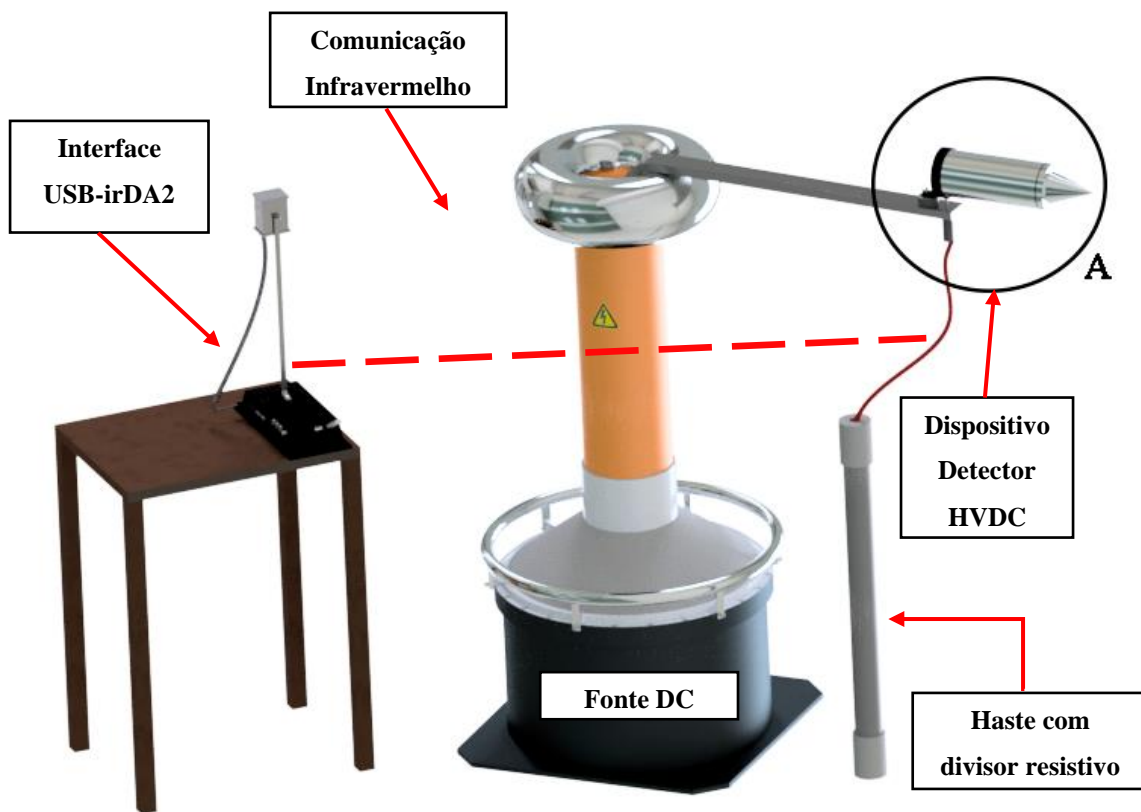
---

*Neste capítulo, a modelagem do problema, desenvolvimento do experimento, medições, instrumentação e análise dos dados são descritos. A eficácia da abordagem proposta foi avaliada através de testes experimentais e coleta de dados para extração de características.*

### 4.1 Banco de Ensaios

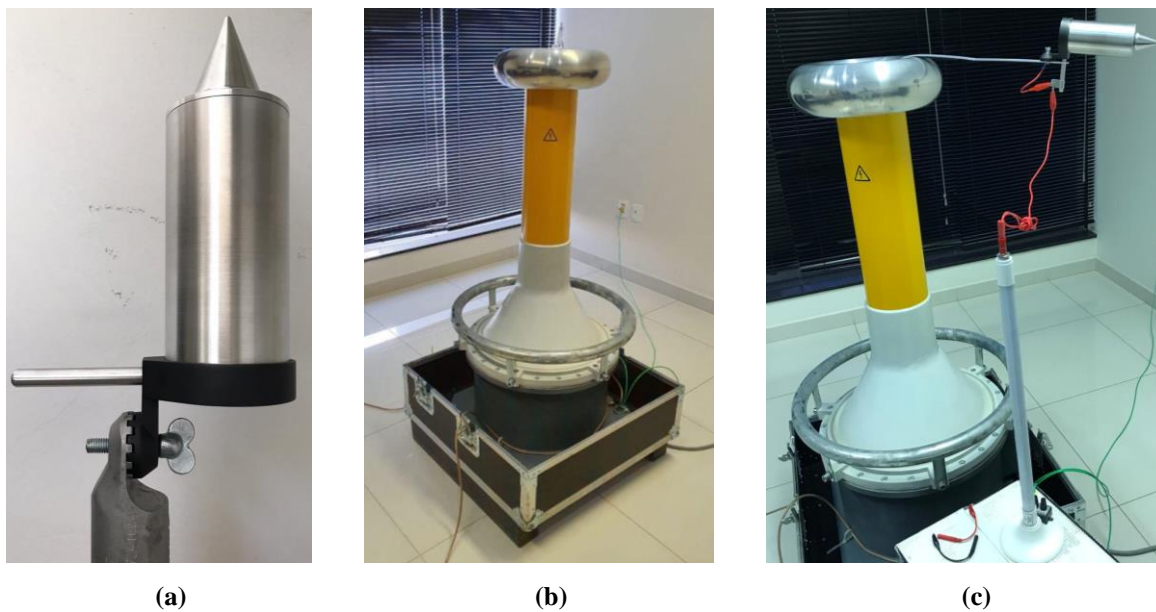
Uma análise experimental foi realizada em laboratório com ambiente e condições controladas visando a medição de sinais de corrente elétrica que carregam informações sobre descargas corona sob diferentes condições de operação em sistemas HVDC, a fim de se validar a metodologia proposta. A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático da metodologia proposta para o experimento. O sinal de corrente elétrica é medido a partir de um sensor eletromecânico HVDC concebido por DOTTO *et al.* (2022), equipado com extremidade pontiaguda, que viabiliza o fenômeno corona pelo efeito das pontas, o qual é fixado a uma haste de contato que funciona como condutor de alta tensão (Figura 7.a). Os ensaios foram conduzidos aplicando tensões variando de  $\pm 10$  kV a  $\pm 100$  kV utilizando uma fonte DC de até 110 kV modelo Baur PGK 110/ HB (Figura 7.b) com saída retificada em meia onda (possibilidade de inversão da barra retificadora para escolha de semiciclos senoidais positivos ou negativos). O dispositivo detector HVDC foi devidamente fixado em uma haste de alumínio (Figura 7.c) e o experimento foi reproduzido para diferentes condições de operação, permitindo a obtenção de diferentes perfis de descarga corona, isto é, com carga e sem carga com distanciamento fixo de 1,5 metro entre os eletrodos positivo e negativo em diferentes distancias e ângulos do sistema de medição em relação à fonte, conforme detalhamento apresentado na Tabela 1 e destacada na Figura 8.

Figura 6: Diagrama esquemático da bancada de teste experimental.



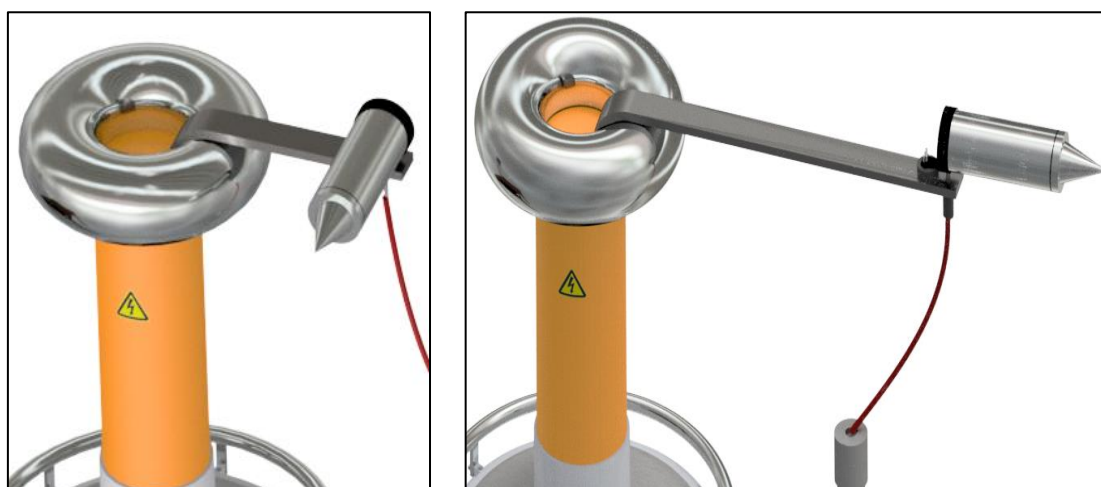
Fonte: Autor.

Figura 7: (a) Dispositivo detector HVDC; (b) Fonte DC de até 120 kV.



Fonte: Autor.

Figura 8: Banco de ensaios exemplificado duas das condições testadas: (a) Dispositivo posicionado à 0° em relação a fonte e, haste à 30 cm de distância; (b) Dispositivo posicionado à 90° em relação a fonte e, haste à 60 cm de distância.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

**Tabela 1** – Configuração experimental.

Identificação do ensaio	Detalhamento	Medições
#h30g0s	Haste posicionada à 30 cm; dispositivo à 0 graus em relação a fonte; ensaio sem carga	de ±10 kV à ±100 kV
#h30g90s	Haste posicionada à 30 cm; dispositivo à 90 graus em relação a fonte; ensaio sem carga	
#h30g0c	Haste posicionada à 30 cm; dispositivo à 0 graus em relação a fonte; ensaio com carga	de ±10 kV à ±80 kV
#h30g90c	Haste posicionada à 30 cm; dispositivo à 90 graus em relação a fonte; ensaio com carga	
#h60g0s	Haste posicionada à 60 cm; dispositivo à 0 graus em relação a fonte; ensaio sem carga	de ±10 kV à ±100 kV
#h60g90s	Haste posicionada à 60 cm; dispositivo à 90 graus em relação a fonte; ensaio sem carga	
#h60g0c	Haste posicionada à 60 cm; dispositivo à 0 graus em relação a fonte; ensaio com carga	de ±10 kV à ±80 kV
#h60g90c	Haste posicionada à 60 cm; dispositivo à 90 graus em relação a fonte; ensaio com carga	

Cabe ressaltar que as tensões aplicadas aos ensaios conduzidos com carga não ultrapassaram o valor de ±80 kV, devido a limitação construtiva do divisor resistivo (distância física segura de isolamento), isto é, ±80 kV é o valor máximo suportado pelo dispositivo bem como as variáveis e influências do ambiente como temperatura, humidade e pressão atmosférica, foram mantidas constantes em 30° C, 78%, e 101,6 kPa, respectivamente.

## 4.2 Aquisição de Dados

Conforme mencionado anteriormente, os sinais elétricos foram coletados e armazenados durante os ensaios experimentais através do dispositivo HVDC desenvolvido por DOTTO et al. (2022), a versão final do dispositivo é apresentada na Figura 9. O dispositivo HVDC trata-se de uma alternativa tecnológica baseada no estudo e desenvolvimento de um dispositivo eletrônico portátil simples e eficiente que possibilita a detecção e quantificação de alta tensão e polaridade em sistemas HVDC.

Figura 9: Dispositivo de Detecção HVDC.



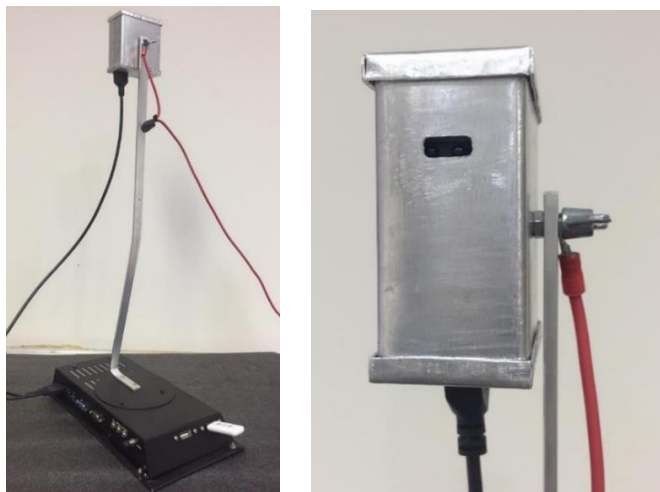
Fonte: Adaptado de (DOTTO *et al.*, 2022).

O princípio de medição do dispositivo baseia-se no efeito corona que é induzido pela presença de uma ponta proporcionando um caminho para a passagem de corrente elétrica. Este princípio pode ser ilustrado por um material condutor energizado cuja superfície tem uma forma não esférica com cargas elétricas distribuídas que permanecem em equilíbrio potencial. Quando tal potencial elétrico atinge uma certa intensidade, a deformação do campo elétrico causada pela maior densidade de carga nas regiões pontiagudas pode exceder o gradiente disruptivo do ar e ionizar as moléculas de gás no ar circundante. Conforme explicado anteriormente na Seção 3.1, o processo de ionização que dá origem ao efeito corona geralmente é iniciado pela aceleração de elétrons livres em um meio gasoso, que capta energia suficiente para produzir novos elétrons ao colidir com outros átomos. Subsequentemente, o átomo que foi atingido pode voltar ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia na forma de calor, luz, energia acústica e radiação eletromagnética. Toda energia irradiada deve vir do campo elétrico da carga condutora, fazendo com que a ponta do dispositivo produza uma corrente proporcional a este campo. No dispositivo HVDC, a detecção ocorre quando o dispositivo entra em contato com o sistema HVDC com base no efeito corona. A corrente elétrica de alta tensão resultante é

detectada através da ponta de alumínio mantida a uma distância de cerca de 5mm da superfície energizada. O sinal de corrente elétrica é detectado através de uma resistência shunt, cuja tensão é proporcional ao efeito corona. O dispositivo proposto foi analisado por meio de modelos de descargas corona e testes experimentais de alta tensão em condições reais, apresentando um desempenho satisfatório na detecção, quantificação e identificação de polaridade em um sistema de transmissão HVDC de 600kV, com erro variando entre 1,79% e 2,72% em relação a modelos teóricos (DOTTO *et al.*, 2022).

Os dados lidos pelo dispositivo detector HVDC durante os ensaios experimentais foram coletados e armazenados para posterior processamento e análise. O sistema de comunicação por infravermelho irDA2 (Figura 10) que possibilita a interface entre dispositivos por meio de um *link* óptico foi devidamente conectado ao PC via USB onde os dados são armazenados. Os comandos trafegam pelo *link* óptico, acionando a aquisição de dados e ajustando os ganhos do sinal. O sistema possibilita, durante os ensaios, a aquisição de dados de forma automática adotando parâmetros de ganhos variável com base em algoritmos de autoajustes bem como taxas de amostragem da ordem de 1.875 MHz com uma banda limitada a 950 kHz por filtros internos. Os dados foram coletados para cada uma das condições testadas nos ensaios experimentais que foram descritas na Tabela 1.

Figura 10 - Sistema de comunicação via infravermelho – interface USB-irDA2



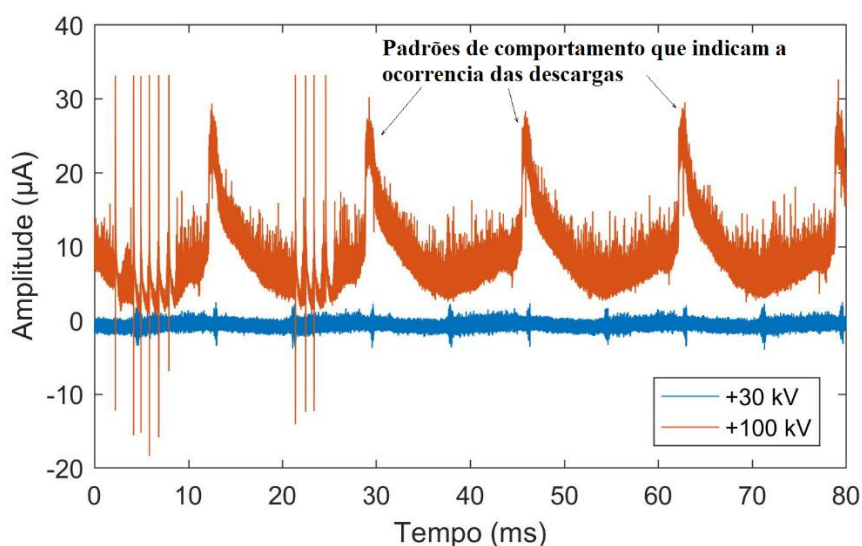
Fonte: Autor.

Destacam-se ainda as seguintes configurações adotadas: (i) acoplamento capacitivo de entrada com para banda passante de até 1MHz; (ii) filtro *anti-aliasing* passa baixa cobrindo toda a banda de frequências, ou seja, frequência de corte em 950 kHz; e (iii) algoritmo de auto ganho em tempo real de forma a deixar o sinal sempre ocupando toda a faixa do conversor ADC.

### 4.3 Processamento de Sinais e extração de características

Os sinais de corrente elétrica lidos pelo dispositivo detector HVDC são de natureza analógica em sua forma e conteúdo original. Tais sinais correspondentes as medições em alta tensão são pré-processados, quando da fase de aquisição de dados, por meio de amplificação, filtragem, isolamento, conversão de analógico para digital, fomentando a obtenção de sinais digitais no domínio do tempo conforme ilustra a Figura 11.

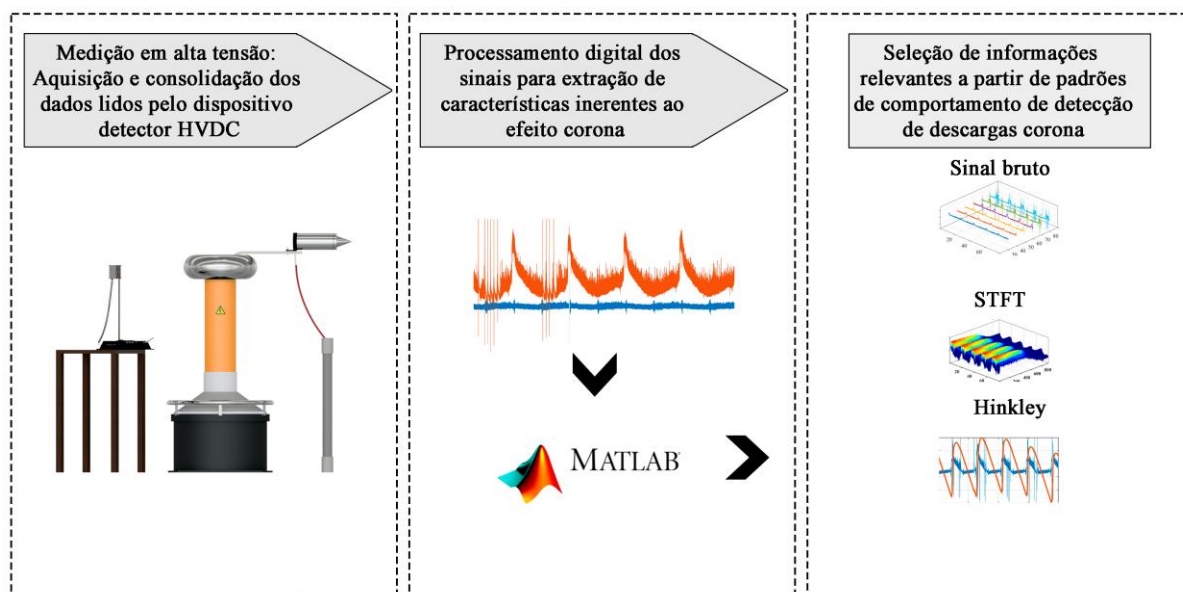
Figura 11 - Exemplo de sinais de corrente no domínio do tempo obtidos a partir dos ensaios laboratoriais em duas medições: + 30 kV e + 100 kV.



Fonte: Autor.

Os sinais coletados pelo dispositivo detector HVDC foram analisados tanto no domínio do tempo quanto no domínio tempo-frequência. De forma geral, os resultados e métodos foram obtidos e avaliados tendo como base o *framework* apresentado na Figura 12. Foram realizados os processamentos computacionais dos dados HVDC coletados nos ensaios experimentais por meio da aplicação de algoritmos de processamento digital de sinais utilizando os métodos e técnicas descritas no capítulo 3 empregadas no *software Matlab*®.

Figura 12 - Framework proposto para realização dos ensaios laboratórias.



Fonte: Autor.

Primeiramente realizou-se uma análise no domínio do tempo sem qualquer processamento, através de sinais brutos. Neste contexto, vale ressaltar que os sinais no domínio do tempo são de natureza periódica em função das características da fonte DC usada no experimento (saída meia onda retificada). De acordo com a frequência de amostragem cada sinal coletado possui duração de 80ms e 150.000 amostras. Posteriormente, realizou-se um estudo dos sinais no domínio tempo-frequência por meio do espectrograma a partir do emprego da STFT utilizando janelas variando de 1.024 a 8.192 amostras, função de janela do tipo *Kaizer* com parâmetro *Beta* igual 5, a fim de se obter parâmetros ótimos que viabilizassem uma resolução viável de escala no tempo e em frequência. Os estudos a cerca da utilização do comprimento de janelas, bem como seu tipo e parâmetros foram realizados de forma empírica. Em seguida, foi implementado um algoritmo para o cálculo do critério de energia de Hinkley nos sinais puros a fim de obter os instantes de tempo em milissegundos de início e fim das descargas corona com base na energia do sinal e tempo de chegada. Os parâmetros obtidos a partir da STFT e critério de Hinkley serviram de base para posterior implementação do algoritmo para o cálculo da nova métrica  $CV_{STFT}$  que estuda a distribuição e variabilidade em frequência e somente no tempo de ocorrência das descargas corona para determinar os diferentes perfis de descarga corona. Conforme definido no capítulo 3, o estudo foi auxiliado pelo cálculo da métrica RMSD a partir da matriz  $CV_{STFT}$  a fim de determinar a melhor banda de frequências que indica o percentual de variabilidade das descargas para cada nível de tensão que foi aplicada nos experimentos. As observações e cálculos tiveram como referência os sinais

de corrente elétrica referente a  $\pm 30$  kV e a métrica RMSD ( $CV_{STFT}$ ) foi calculada para diversas faixas e sub-faixas de frequência dentro do range obtido pelo  $CV_{STFT}$ . A banda de frequências mais adequada foi escolhida de acordo com a tendência, considerando ajuste linear e a função *R square*. O detalhamento dos resultados é apresentado no capítulo 5, apresentado a seguir.

# Capítulo 5

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

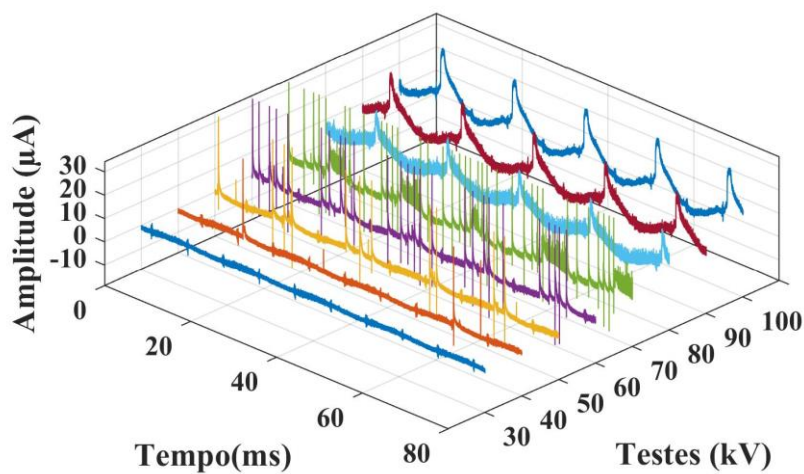
*Neste capítulo são analisados e discutidos os resultados obtidos através dos experimentos descritos no capítulo 4. Primeiramente são apresentados a análise dos sinais no domínio do tempo, subseção 5.2. Em seguida, a subseção 5.3 aborda os resultados das análises no domínio do domínio tempo frequência; Na Subseção 5.4 são abortados os resultados da análise através de técnicas estatísticas para seleção de resultados mais promissores obtidos a partir do estudo do critério de energia de Hinkley.*

### 5.1 Resultados e discussões da análise no domínio do tempo

Esta subseção apresenta uma análise inicial dos sinais de corrente elétrica no domínio tempo que foram obtidos nos ensaios experimentais. Os sinais “puros”, isto é, sem qualquer processamento, são apresentados nas Figuras de 13 a 20 de acordo com os parâmetros referidos no capítulo 4. Vale ressaltar, conforme destacado anteriormente, que os ensaios descritos a seguir foram realizados utilizando a fonte DC pulsante de até 110kV, considerando um distanciamento (altura) fixo de 1,5 metros entre eletrodos (positivo e negativo) e que as variáveis envolvidas na medição foram mantidas constantes, possibilitando uma comparação entre os sinais coletados em diferentes condições. Por fim, destaca-se para esta análise quatro condições de testes: #h30g90s, #h30g0c, #h60g90s e #h60g90c.

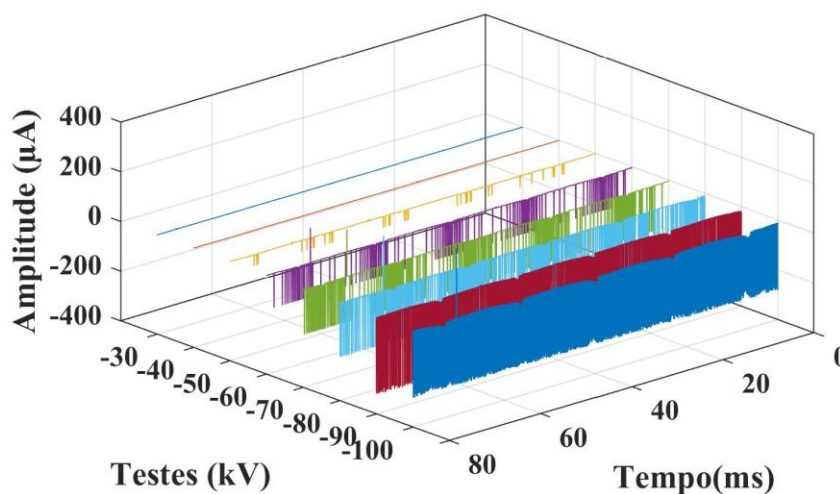
Os sinais de corrente elétrica correspondentes à condições de ensaio na configuração #h30g90s (haste à 30 cm, 90° e ensaio sem carga) com tensões aplicadas ao sistema variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 100$  kV são apresentados nas Figura 13 (medições no polo positivo) e Figura 14 (medições no polo negativo).

Figura 13 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g90s polo positivo.



Fonte: Autor.

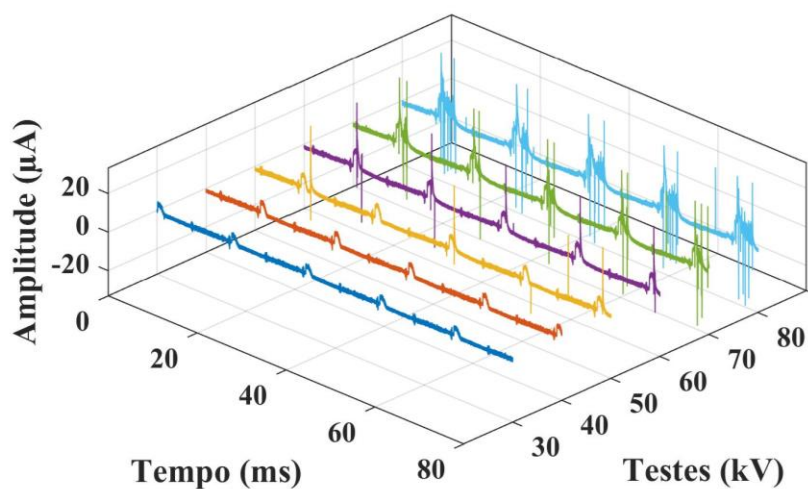
Figura 14 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g90s polo negativo.



Fonte: Autor.

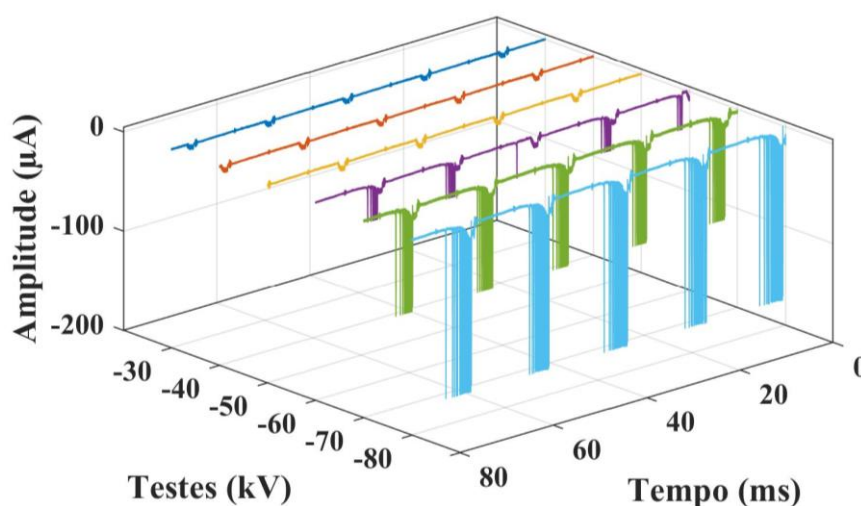
Os sinais de corrente elétrica correspondentes a condição de ensaio na configuração #h30g0c (haste à 30 cm, 0° e ensaio com carga) com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 80$  kV são apresentados nas Figura 15 (medições no polo positivo) e Figura 16 (medições no polo negativo).

Figura 15 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g0c polo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 16 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h30g0c polo negativo.



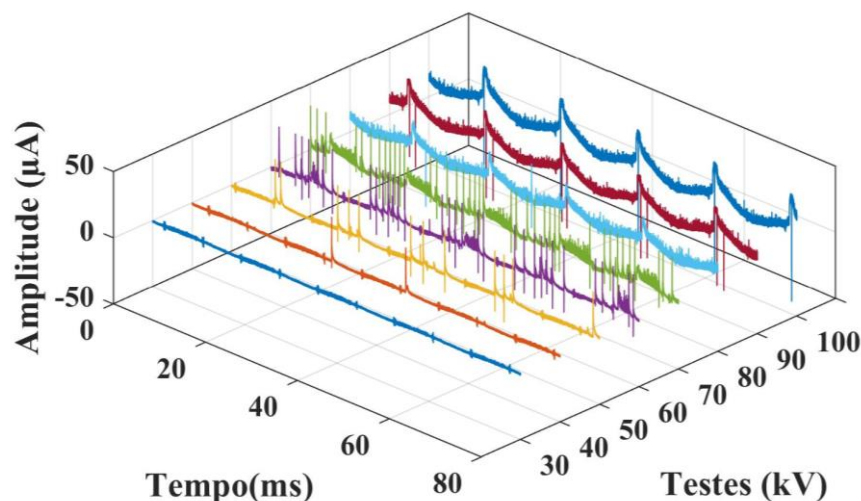
Fonte: Autor.

É possível observar nestes gráficos o comportamento dos sinais em termos de variação de amplitude e tendência ao longo do tempo, no caso, no tempo de duração de 80ms. Também é possível notar a evolução dos sinais em termos de intensidade nas diferentes medições de tensão variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 100$  kV (ensaio sem carga) e  $\pm 30$  kV à  $\pm 80$  kV (ensaio com carga).

É importante observar que os sinais diferem em variações de amplitude, tendência, intensidade e padrão de comportamento entre os valores tensão referente ao polo positivo e negativo, bem como quando se compara os sinais dos testes conduzidos sem carga com àqueles realizados com carga. Os sinais de corrente elétrica correspondentes ao ensaio na configuração

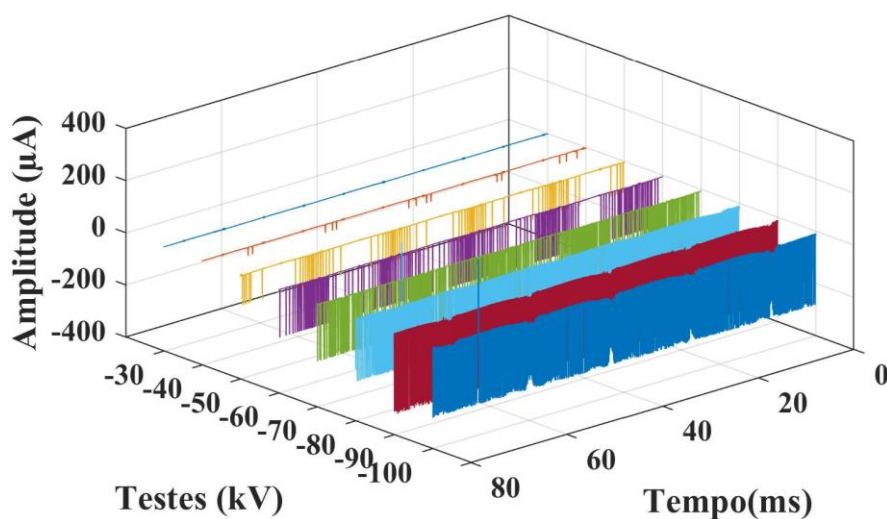
#h60g90s (haste à 60 cm, 90° e ensaio sem carga) com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 100$  kV são apresentados nas Figura 17 (medições no polo positivo) e Figura 18 (medições no polo negativo).

Figura 17 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90s polo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90s polo negativo.

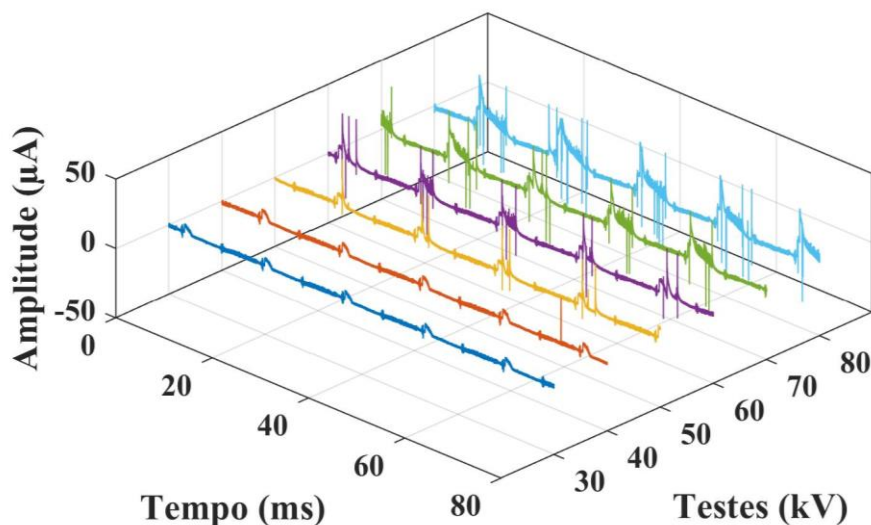


Fonte: Autor.

De uma forma geral, é interessante observar um padrão de comportamento notável na forma de pulsos (mais intensos) e picos (intermediários e de curta duração) com intervalos de tempo periódicos, isto é, igualmente espaçados, presente em todos os sinais e para ambos os ensaios conduzidos com e sem carga. Pode se notar que à medida que os valores de tensão se elevavam os pulsos se tornavam cada vez mais proeminentes apresentando maior amplitude

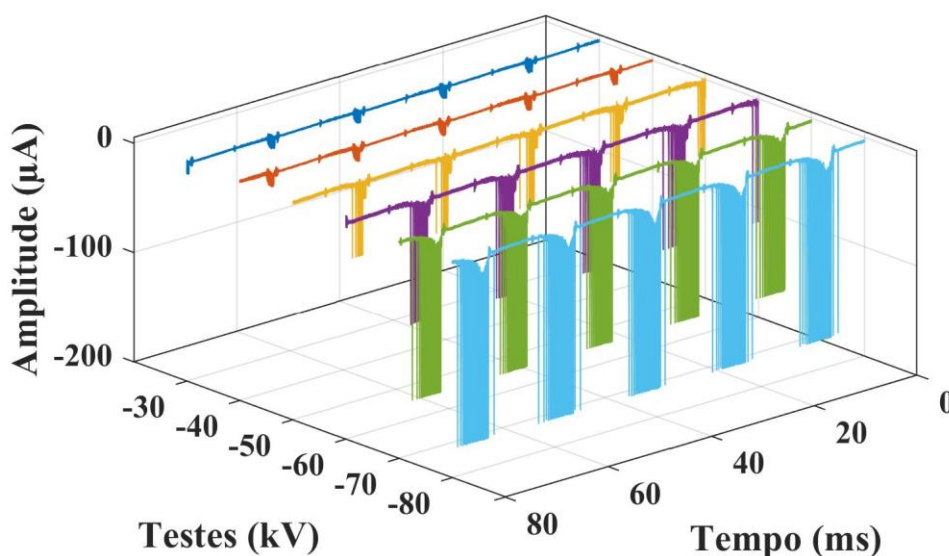
(acima de  $20 \mu\text{A}$ ) e maior duração, indicando maior intensidade quanto a caracterização de ocorrências e de fenômenos. Os sinais de corrente elétrica correspondentes ao ensaio #h60g90c (haste à 60 cm,  $90^\circ$  e ensaio com carga) com tensões aplicadas variando de  $\pm 30 \text{ kV}$  à  $\pm 80 \text{ kV}$  são apresentados nas Figura 19 (medições no polo positivo) e Figura 20 (medições no polo negativo).

Figura 19 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90c polo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 20 - Sinais “puros” no domínio do tempo: ensaio #h60g90c polo negativo.



Fonte: Autor.

Em todos os gráficos das figuras apresentas nesta análise (Figuras de 13 à 20), pode-se constatar que para os sinais de corrente elétrica correspondentes aos valores de tensão mais

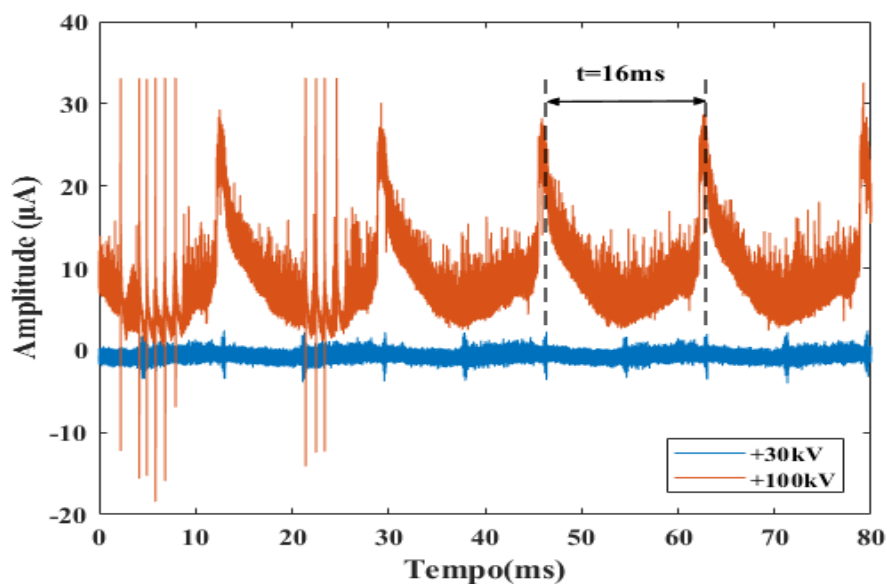
baixos, principalmente para os valores de  $\pm 30$  kV,  $\pm 40$  kV e  $\pm 50$  kV, nota-se que os pulsos e picos são de baixa intensidade (abaixo de  $10 \mu\text{A}$ ) e possuíam menor duração quando são comparadas as ocorrências presente nos sinais correspondentes aos valores de tensão mais altos (a partir de  $\pm 50$  kV), principalmente para os valores de  $\pm 60$  kV,  $\pm 70$  kV e  $\pm 80$  kV (ensaio com carga) e  $\pm 80$  kV,  $\pm 90$  kV e  $\pm 100$  kV (ensaio sem carga). Considerando que a fonte DC (Baur de até 110 kV) é composta por um retificador meia onda (configurável para funcionar no semiciclo positivo ou negativo em função da inversão da barra retificadora), existe a necessidade da permanência da tensão em um valor acima de 50 kV para que o efeito da corrente corona ocorra de forma efetiva. Por outro lado, se a amplitude está próxima a este valor, a descarga ocorre em intervalos de tempo pequenos e não é sustentada por todo o semiciclo retificado, pois ao alcançar um patamar de descarga, a fonte retorna a 0V no semiciclo subsequente extinguindo a permanência deste efeito. Nota-se que a partir de 60kV, a descarga se mantém por maior duração se tornando cada vez mais intensa conforme a tensão aplicada aumenta. Outro fator importante que pôde ser analisado se refere a carga que fornece um caminho para a ocorrência da descarga corona, reduzindo o efeito capacitivo dos polos da fonte HV. Na ausência de carga, apesar da fonte possuir um retificador de meia onda, os eletrodos positivo e negativo da fonte possuem um efeito capacitivo e a distância para descarga entre a ponta ativa e o terminal negativo da fonte torna-se maior.

Destaca-se também, ainda nos gráficos das Figuras de 16 a 20, uma diferença notável observada entre os sinais correspondentes aos valores de tensão no polo positivo em relação aqueles do polo negativo. De uma forma geral, os sinais correspondentes aos valores de tensão negativas apresentaram uma maior intensidade e um número maior de ocorrências de picos, porém, com duração mais curta, principalmente a partir da aplicação do valor de -60 kV, em decorrência da característica da resposta do sistema ao semiciclo senoidal negativo. Ressalta-se ainda uma diferença dos sinais correspondentes aos valores de tensão negativas, isto é, comparando os mesmos valores de tensão, para os ensaios conduzidos sem a carga em relação àqueles realizados com a carga. Neste contexto, pode-se observar que os sinais correspondentes aos valores de tensão negativas dos ensaios conduzidos sem carga apresentaram picos de alta intensidade e curta duração entre os pulsos que caracterizavam a ocorrência do fenômeno. Por outro lado, os sinais correspondentes aos valores de tensão negativas dos ensaios conduzidos com carga, apresentaram intervalos de tempo, entre os pulsos, sem a ocorrência de eventos intermediários. Uma diferença entre os ensaios conduzidos com e sem a carga também pode ser observada para os sinais correspondentes aos valores de tensão positivas, porém, mais sutil quando comparada com as diferenças notadas nos sinais dos valores de tensão negativas. É

importante enfatizar que as diferenças observadas nos sinais entre os ensaios conduzidos com e sem a carga ocorreram também devido a influência da carga resistiva no padrão de comportamento dos sinais.

Por fim, cabe destacar em tais gráficos a ocorrência periódica dos impulsos e picos nos sinais ao longo do tempo, é que os intervalos destes pulsos e picos são igualmente espaçados à uma duração de tempo de 16ms (Figura 21), o que corresponde a frequência de 60Hz do semiciclo senoidal presente no sistema. Isso ocorreu, portanto, para os sinais correspondentes aos valores de tensão de ambos os polos positivos e negativos.

Figura 21 - Caracterização do intervalo de tempo entre os pulsos e picos presentes nos sinais.



Fonte: Autor.

É de extrema importância enfatizar que o estudo apresentado nesta subseção, mesmo se tratando de uma análise inicial por considerar apenas o domínio do tempo, forneceu importantes diretrizes para o emprego de outras ferramentas que permitiram a extração das características mais relevantes acerca do fenômeno de descarga de corona a exclusão de informação não útil presente no conteúdo dos sinais. A próxima subseção apresenta os principais resultados das análises dos sinais no domínio do tempo-frequência.

## 5.2 Resultados e discussões da análise no domínio do tempo-frequência

Esta subseção detalha os resultados da análise dos sinais de corrente elétrica obtidos a partir dos ensaios com o dispositivo detector HVDC no domínio do tempo-frequência com o propósito de caracterizar as frequências que melhor representam a ocorrência do fenômeno de descargas e sua relação com os instantes de tempo relacionados.

Para uma melhor visualização da intensidade dos fenômenos e ocorrências predominantes nos sinais de corrente elétrica coletados pelo dispositivo detector HVDC em relação a frequência e aos instantes de tempo, um estudo no domínio tempo-frequência foi realizado a partir do emprego da STFT utilizando o procedimento descrito no item (3.2.3). Os resultados podem ser visualizados a partir dos espectrogramas apresentados nas Figuras de 22 a 29. O espectrograma transpõe a intensidade dos sinais a partir de escala de cores que representa a magnitude em dB. Naturalmente, conforme já destacado, o gráfico permite identificar quais as frequências e os instantes de tempo relacionados aos trechos que apresentam magnitudes mais elevadas e significativas.

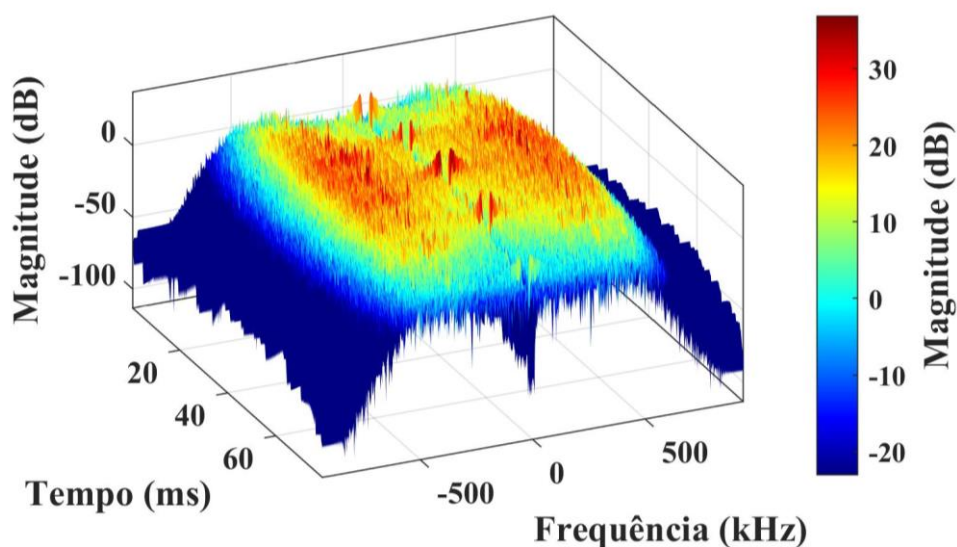
Observou-se que o espectro de frequências é limitado a faixa de 0-937,5 kHz correspondente a frequência de Nyquist para o experimento. Cabe ressaltar que foi removido o offset (nível DC) dos sinais, ainda no domínio do tempo e antes do cálculo, a fim de eliminar o conteúdo dos sinais à 0 Hz. Especificamente, a intensidade dos sinais de corrente elétrica em cada faixa de frequência é expressa pela magnitude (em dB). Portanto, é possível estudar as faixas de frequência que são predominantes em termos de ocorrência de fenômenos no domínio do tempo, bem como conhecer a faixa de frequência a partir da qual os sinais sofrem atenuação (os sinais sofrem atenuação de aproximadamente -6 dB uma vez que foi usado uma escala logarítmica no eixo y de  $20 \cdot \log_{10}$ ).

Importa destacar que as Figuras de 22 a 29 reportam apenas os resultados obtidos para sinais correspondentes aos valores de tensão mais altos de cada ensaio, isto é,  $\pm 100$  kV para o ensaio sem carga e  $\pm 80$  kV para o ensaio com carga, uma vez que tais sinais possuem intensidades de corrente mais elevadas em relação aos outros valores de tensão e, portanto, são mais interessantes para estudo. Assim como mostrado anteriormente na análise dos sinais no domínio do tempo (item 5.1), nos gráficos de espectrograma da STFT o eixo do tempo reporta o tempo de duração de 0 a 80 ms. O eixo das frequências, neste caso, foi configurado para exibição de frequências até 500 kHz com vistas a focar nas faixas ocorrência do fenômeno. A

Figura 22 apresenta o espectrograma completo da STFT para o sinal correspondente à tensão de + 100 kV e ao ensaio na configuração #h30g90s.

Para uma identificação mais efetiva dos instantes de tempo e das frequências relacionadas ao fenômeno de descarga de corona, a Figura 23 apresenta o espectrograma da STFT do sinal mostrado anteriormente na Figura 22, porém, em duas dimensões (2D) e com a parte real apenas.

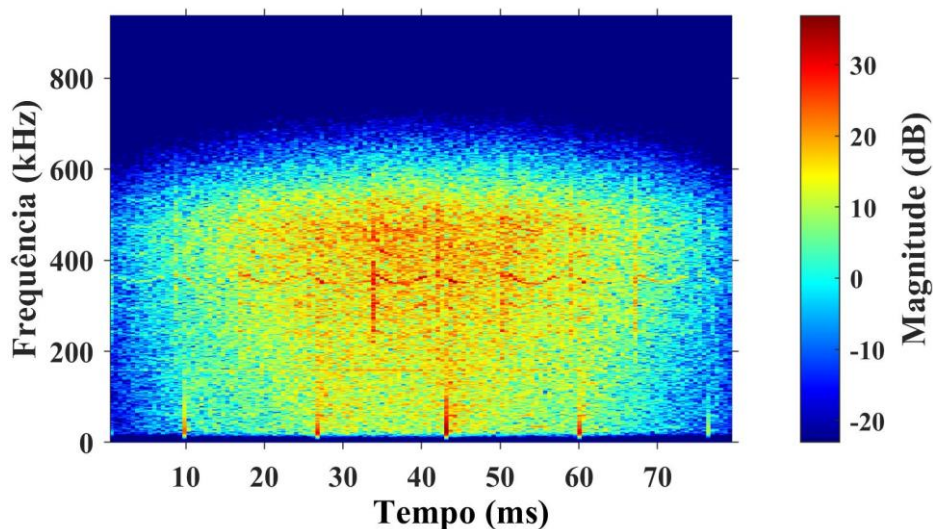
Figura 22 - Espectrograma completo da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s.



Fonte: Autor.

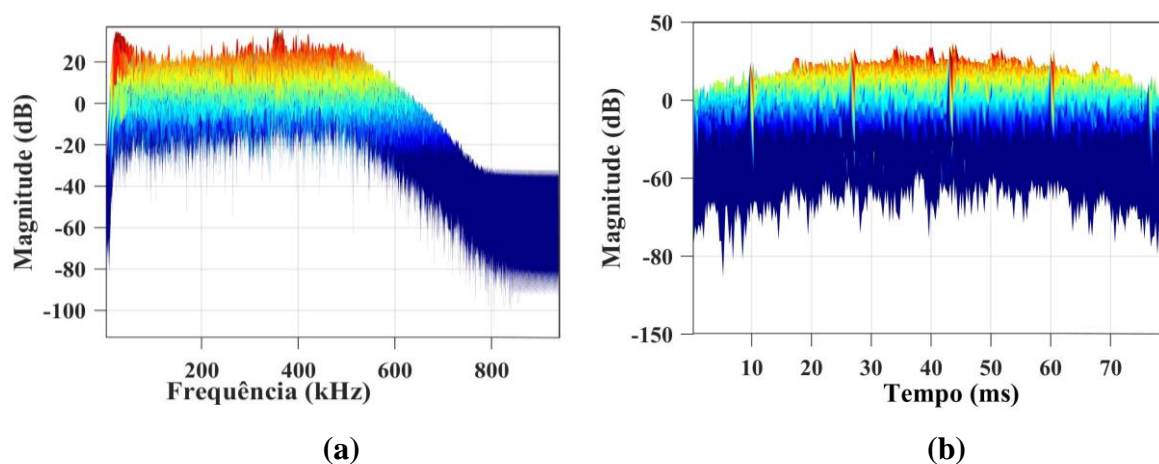
A Figura 23 também mostra o mesmo sinal (+100 kV ensaio #h30g90s) apresentado nas Figura 22 e Figura 23, mas com foco apenas na magnitude do espectro de frequências (Figura 24a) e instantes de tempo (Figura 24b). Em geral, os resultados desta condição apresentaram baixa nitidez e distinção entre as ocorrências de descargas uma vez que a intensidade dos fenômenos se mostrou mais baixa.

Figura 23 - Espectrograma da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s: parte real em 2D.



Fonte: Autor.

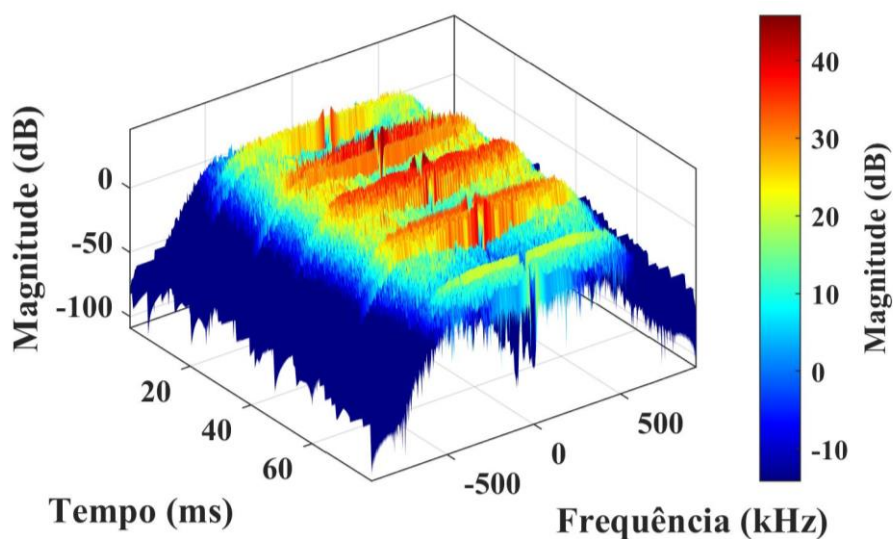
Figura 24 - Espectrograma da STFT do sinal de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo.



Fonte: Autor.

A Figura 25 apresenta o espectrograma completo da STFT para o sinal correspondente à tensão de + 80 kV e ao ensaio na configuração #h30g0c. A Figura 26 apresenta a parte real em 2D do espectrograma da STFT do sinal da Figura 25. Neste caso, é possível observar mais nitidamente a ocorrência do fenômeno de descarga uma vez que a intensidade dos pulsos é mais elevada em relação aos resultados obtidos para o valor de +100 kV correspondente ao ensaio #h30g90s. A principal razão de tal diferença ocorrer se deve a influência da carga.

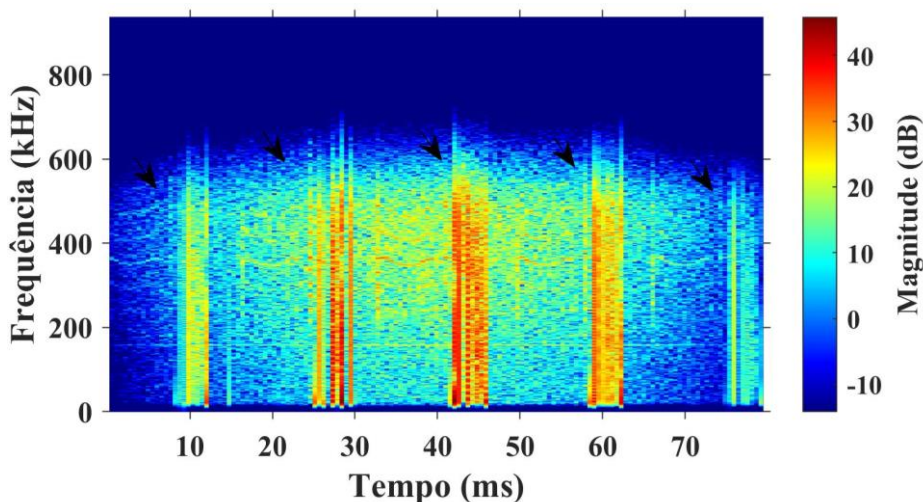
Figura 25 - Espectrograma completo da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c.



Fonte: Autor.

A ocorrência dos vários pulsos de descarga de corona é indicada pelas setas presentes na Figura 26. Observa-se a ocorrência de cinco descargas com pulsos de duração de tempo de aproximadamente 5ms em diferentes instantes de tempo ao longo da duração total de 80ms. Das cinco descargas que ocorreram, as três que ocorreram nos instantes de tempo de aproximadamente 25ms à 30ms; 41ms à 46ms; e 58ms à 62ms foram de maior intensidade.

Figura 26 - Espectrograma da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c: parte real em 2D.

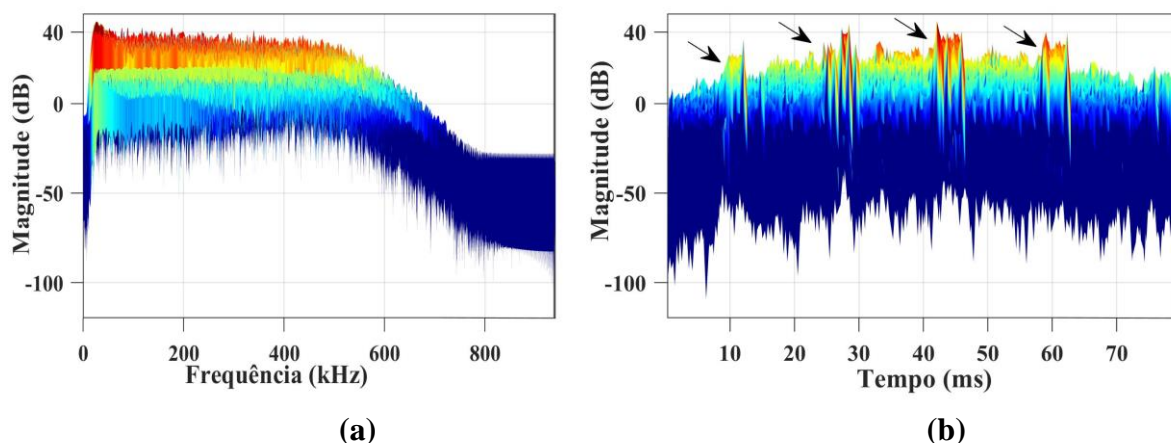


Fonte: Autor.

A Figura 27 também mostra o mesmo sinal (+80 kV ensaio #h30g0c) apresentado nas Figura 25 e Figura 26, mas com foco apenas na magnitude do espectro de frequências (Figura

27a) e instantes de tempo (Figura 27b). Os instantes de tempo de ocorrência das descargas são também indicados por setas na Figura 27b.

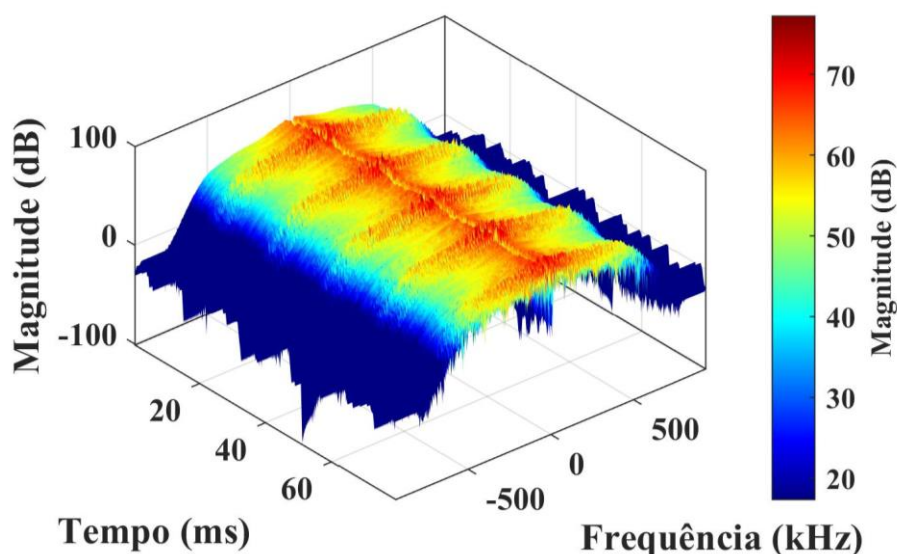
Figura 27 - Espectrograma da STFT do sinal de +80 kV correspondente ao ensaio #h30g0c com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo.



Fonte: Autor.

A Figura 28 apresenta o espectrograma completo da STFT para o sinal correspondente à tensão de -100 kV e ao ensaio na configuração #h60g90s. A Figura 29 apresenta a parte real em 2D do espectrograma da STFT do sinal da Figura 28.

Figura 28 - Espectrograma completo da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s.



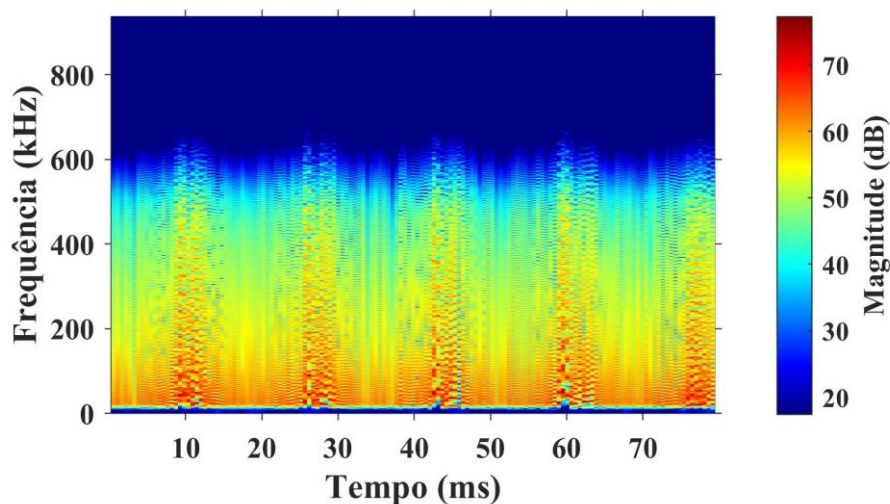
Fonte: Autor.

Em contraste com o resultado anterior (Figura 26) para um ensaio realizado com carga (#h30g0c), o resultado mostrado na Figura 29 indica a ocorrência de vários picos intermediários entre os pulsos correspondentes a ocorrência das descargas. Como já foi observado em análises

anteriores, esta é uma característica particular do semiciclo senoidal negativo (quando do ensaio sem carga) que novamente foi evidência a partir do espectrograma da STFT. Conseqüentemente, essa influência dificulta a identificação e tempo de duração de ocorrência das descargas de corona. Nota-se que as ocorrências se encontram principalmente em frequências abaixo de 200 kHz.

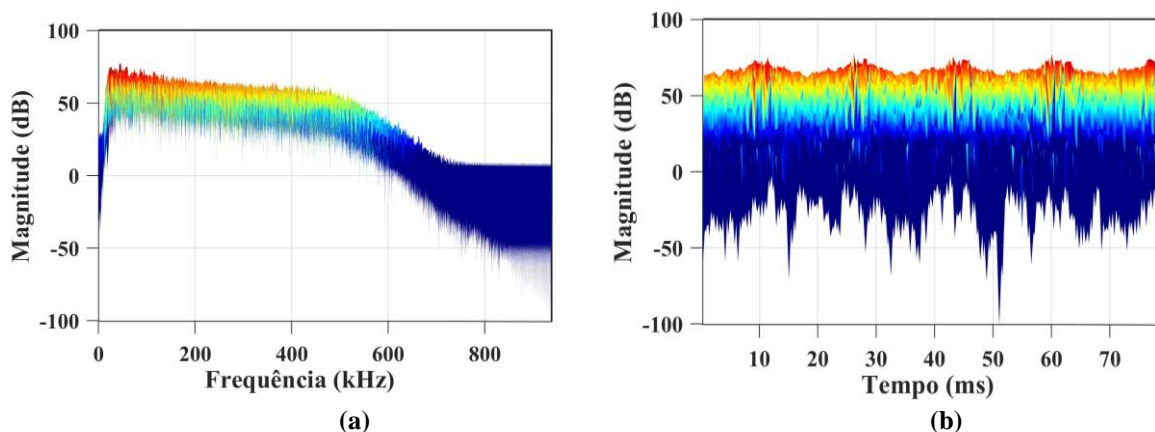
A Figura 30 também mostra o mesmo sinal (-100 kV ensaio #h60g90s) apresentado nas Figura 28 e Figura 29, mas com foco apenas na magnitude do espectro de frequências (Figura 30a) e instantes de tempo (Figura 30b). Os resultados evidenciam o que foi observado anteriormente na Figura 28.

Figura 29 - Espectrograma da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s: parte real em 2D.



Fonte: Autor.

Figura 30 - Espectrograma da STFT do sinal de -100 kV correspondente ao ensaio #h60g90s com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo.



Fonte: Autor.

A Figura 31 apresenta o espectrograma completo da STFT para o sinal correspondente à tensão de -80 kV e ao ensaio na configuração #h60g90c. A Figura 32 apresenta a parte real em 2D do espectrograma da STFT do sinal da Figura 31. Dentre todos os resultados da STFT obtidos no presente trabalho, esta condição foi aquela que mais destacou em relação a intensidade da ocorrência do fenômeno de descarga. É notória a clara distinção e nitidez em relação aos pulsos da descarga, os instantes de tempo e duração, bem como as frequências de ocorrência do fenômeno. Destaca-se também na Figura 32 a satisfatória resolução do espectrograma da STFT que permite um claro estudo da referida condição apresentada. Como pode-se observar na Figura 32, que os cinco pulsos de descarga de corona encontram-se igualmente espaçados (em 16ms) e com frequências mais significativas abaixo de 20 kHz.

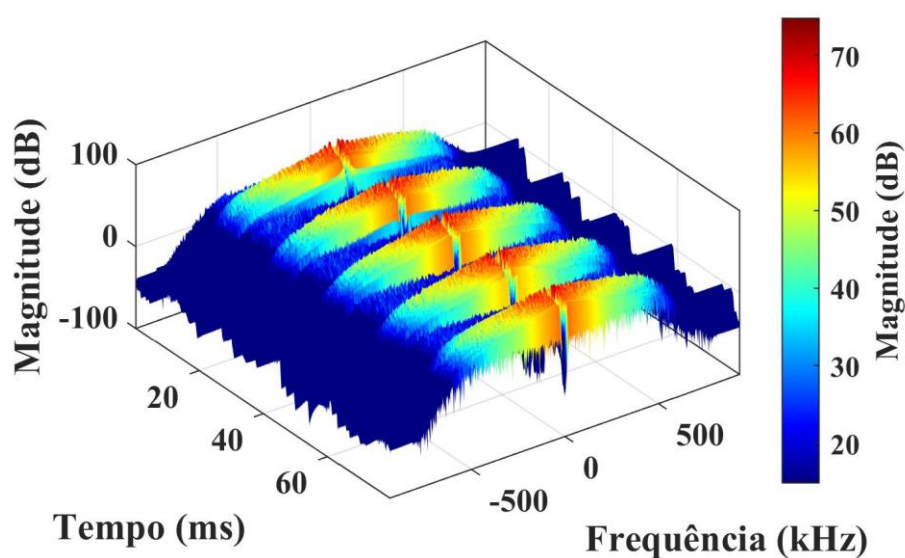
Observando as Figuras de 22 a 33, é notável em todos os gráficos com foco no espectro de frequências que a atividade predominante relacionada a caracterização de fenômenos e ocorrências se concentra abaixo de 200 kHz. Cumpre frisar, no entanto, que a largura de banda de frequências que efetivamente caracteriza a ocorrência do fenômeno é dependente da faixa de radiação da descarga de corona, conforme descreve (ZHU et al., 2013), e o sistema de medição deve ser projetado de acordo com tal intensidade. De acordo com a lei da atenuação de ondas eletromagnéticas no ar, relatado por (SHUO-HONG, 2002), a amplitude do sinal diminui com o aumento do intervalo de detecção. Isto posto, o sinal de radiação gerado pela alta tensão nas linhas de transmissão também reduz significativamente a relação sinal-ruído do sinal de descarga corona. Portanto, características de ganho devem ser consideradas quando o dispositivo detector HVDC for exposto às linhas de transmissão. Dessa forma, para efetiva detecção da descarga de corona, o sistema de medição deve comportar recursos de *hardware* que permitem a coleta dos sinais nas frequências relacionadas ao fenômeno. Por essa razão, acredita-se que a ocorrência das descargas de corona se estenderia em proporções e significância relativamente baixas para frequências mais altas do que aquelas do presente trabalho.

A Figura 33 também mostra o mesmo sinal (-80 kV ensaio #h60g90c) apresentado nas Figura 31 e Figura 32, mas com foco apenas na magnitude do espectro de frequências (Figura 33a) e instantes de tempo (Figura 33b). Novamente é possível observar a característica particular dos ensaios conduzidos com a carga, especialmente no caso de uma tensão aplicada ao polo negativo, isto é, em contraste com o resultado anterior (Figura 29, ensaio sem carga), o sinal não apresenta os picos intermediário nos intervalos dos pulsos.

O resultado expressivo obtido para o sinal correspondente a tensão de -80 kV e ensaio #h60g90c também transparece a eficácia da aplicação da STFT como ferramenta de análise,

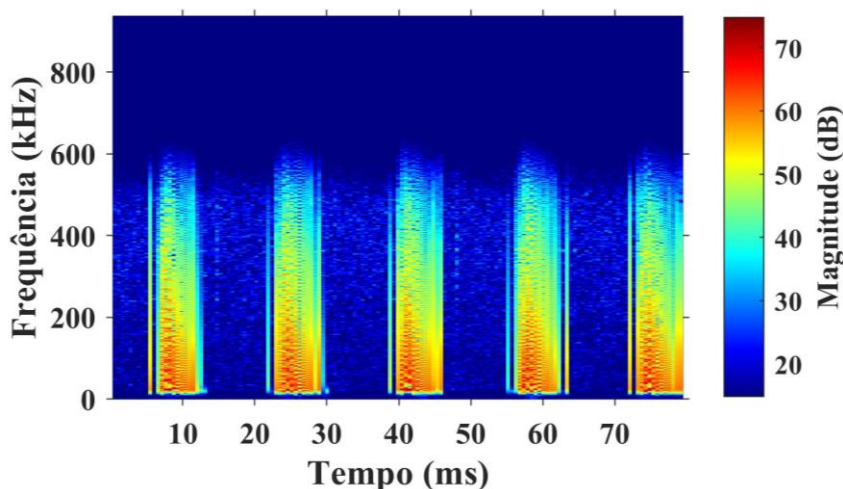
detecção e caracterização de ocorrências e fenômenos presente nos sinais de corrente elétrica coletados pelo dispositivo detector HVDC. O estudo no domínio do tempo-frequência permitiu uma avaliação da resposta em frequência do sistema de medição do aparelho bem como uma identificação das frequências e faixas de frequências mais sensíveis a ocorrência do fenômeno da descarga de corona. Para uma avaliação mais apropriada da eficácia de faixas específicas de frequência, o uso de filtros digitais e ferramentas estatísticas se fazem necessários. A próxima seção apresenta os resultados do estudo do critério de energia de Hinkley.

Figura 31 - Espectrograma completo da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c.



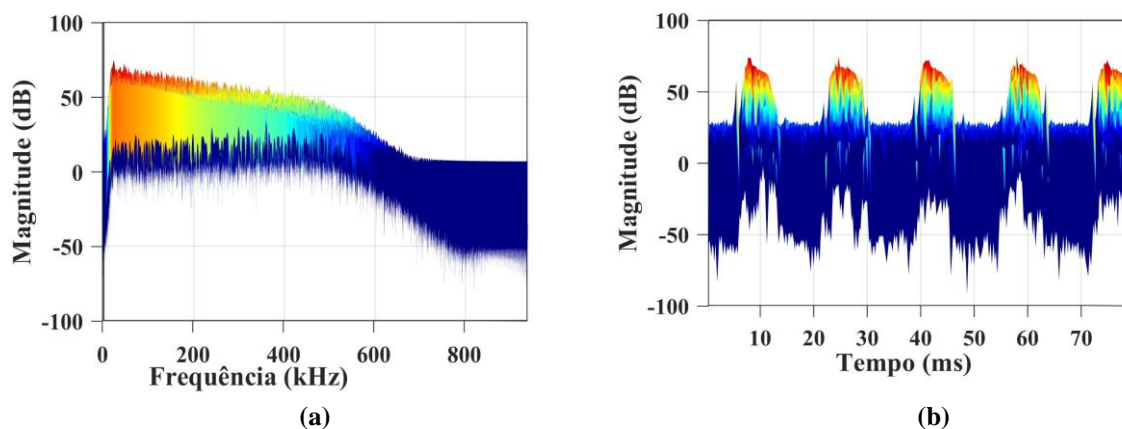
Fonte: Autor.

Figura 32 - Espectrograma da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c: parte real em 2D.



Fonte: Autor.

Figura 33 - Espectrograma da STFT do sinal de -80 kV correspondente ao ensaio #h60g90c com foco: (a) espectro de frequências; (b) instantes de tempo.



Fonte: Autor.

### 5.3 Resultados e discussões do critério de energia de Hinkley

Esta subseção detalha os resultados obtidos a partir da aplicação do critério de energia de Hinkley nos sinais de corrente elétrica coletados pelo dispositivo detector HVDC durante os ensaios experimentais conduzidos em laboratório. É de extrema importância enfatizar que os resultados das análises no domínio tempo-frequência a partir da STFT, reportados na Subseção 5.2, foram expressivos e serviram satisfatoriamente o propósito da efetiva detecção dos instantes de tempo e duração, bem como as frequências relacionadas a ocorrência do fenômeno

da descarga de corona. No entanto, quando o propósito é a localização do ponto exato da ocorrência da descarga de corona, isto é, o exato instante de tempo de início da ocorrência do fenômeno, as ferramentas anteriormente citadas não necessariamente são aquelas mais apropriadas em razão da sobreposição espectral dificultar o alcance de tal propósito. Da mesma forma, apesar do comportamento dos sinais puramente analisados no domínio do tempo indicar a ocorrência das descargas por meio dos pulsos, não é possível determinar qual foi o exato instante de tempo que a descarga de corona ocorreu. Nesta direção, o critério de energia se apresenta como uma ferramenta potencialmente satisfatória para servir o propósito de localização do fenômeno da descarga de corona uma vez que, conforme definido na Subseção 3.2.5, tal métrica expressa uma curva de energia do sinal de corrente elétrica caracterizada por um ponto de mínimo global que efetivamente indica o início da ocorrência do fenômeno segundo o critério de energia de Hinkley.

Como já conduzido anteriormente, apenas os resultados mais expressivos obtidos para as condições mais representativas dos ensaios são ilustradas na presente subseção. As constatações observadas para grupo seletivo de condições experimentais que foram cuidadosamente selecionadas e reportadas nesta subseção, contudo, podem ser generalizadas para todas as condições experimentalmente (Tabela 1). Os resultados são ilustrados nas Figuras de 34 a 41. Importa destacar que os valores apresentados em todos os gráficos de tais figuras foram normalizados entre 0 e 1 (polo positivo) e 0 -1 (polo negativo) uma vez que as grandezas são de proporções diferentes entre os sinais de corrente elétrica e do critério de energia. Por exemplo, os resultados do critério de energia para o sinal de corrente elétrica correspondente à aplicação das tensões de +100 kV (do ensaio na configuração #h30g90s) e -100 kV (do ensaio na configuração #h60g90s) são ilustrados nas Figura 34 e Figura 35, respectivamente.

Observando a Figura 34, é possível notar que o comportamento do sinal do critério de energia (na cor laranja) acompanha a tendência do sinal original (na cor azul) ao longo do tempo. Assim, nota-se que as curvas do critério de energia periodicamente decaem até um ponto de mínimo local, para cada pulso de descarga (do sinal na cor azul), representando o início das descargas de corona e, em seguida, cresce até um ponto máximo correspondente a energia parcial de cada pulso de descarga de corona. Importa destacar que os valores de amplitude dos pontos de mínimo local sucessivamente decrescem ao longo das cinco descargas presente no sinal original. Da mesma forma, observa-se um deslocamento dos pontos máximos do critério de energia em relação aos picos dos pulsos de descargas do sinal original.

No caso do sinal correspondente ao valor de tensão de -100 kV (Figura 35), é importante destacar papel do critério de energia em razão da dificuldade de detecção dos instantes de tempo

relacionados à ocorrência das descargas devido ao comportamento do semiciclo senoidal negativo quando dos ensaios sem carga conforme já destacado em análises anteriores. Mesmo com tal particularidade, o critério de energia foi capaz de localizar, por meio dos pontos de mínimo locais observados na Figura 35, os instantes de tempo de ocorrência das descargas de corona. Nota-se um comportamento similar àquele observado na Figura 34 em relação aos pontos de mínimo locais, isto é, uma tendência de evolução decrescente, em termos de energia parcial de cada descarga.

Figura 34 - Representação do critério de energia: sinal de +100 kV – ensaio #h30g90s.

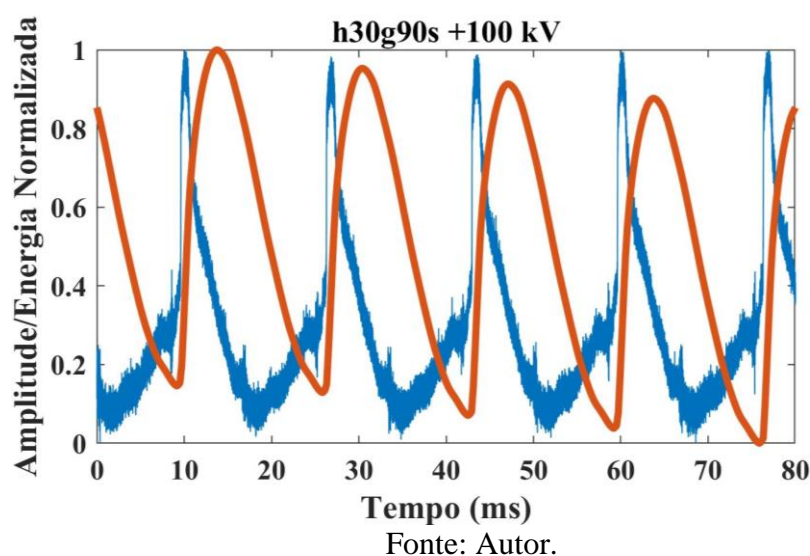
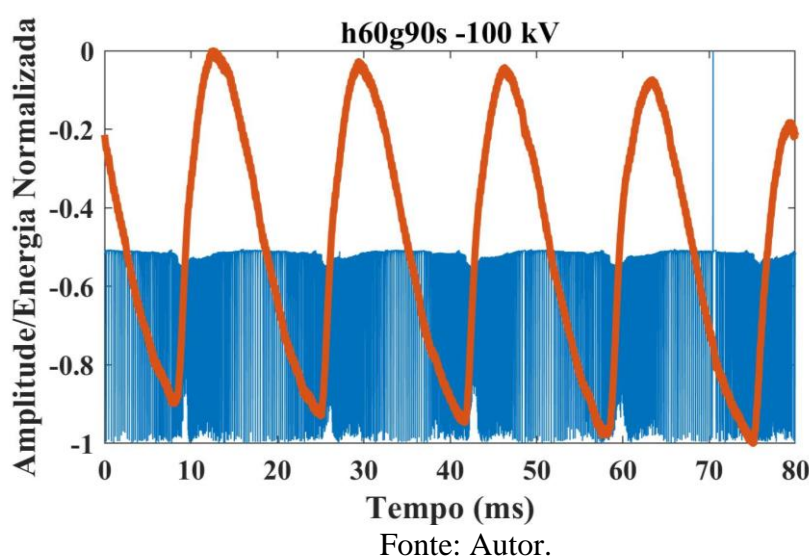


Figura 35 - Representação do critério de energia: sinal de -100 kV – ensaio #h60g90s.



Os resultados do critério de energia foram também avaliados para os sinais de corrente elétrica correspondentes à diferentes valores de tensão aplicados ao sistema, como no caso da

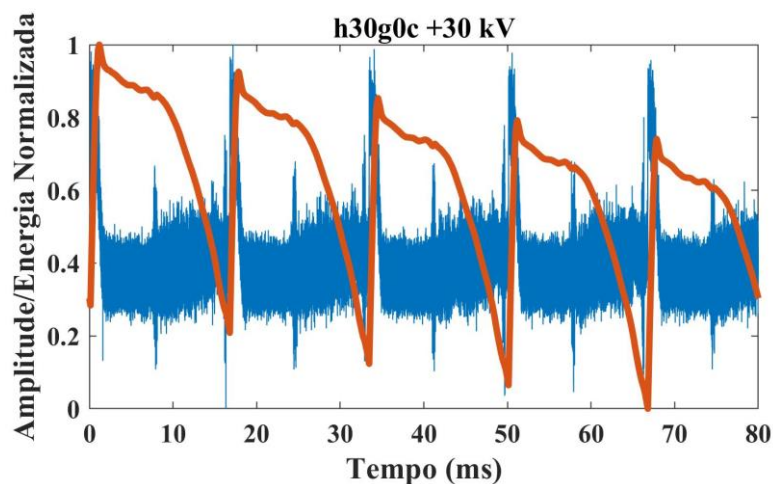
Figura 36 que ilustra o critério de energia para o sinal correspondente ao valor de tensão de +30 kV do ensaio na configuração #h30g0c e a Figura 37 que ilustra o critério de energia para o sinal correspondente ao valor de tensão de -50 kV do ensaio na configuração #h30g0c. Esta análise também teve o propósito de estudar os resultados dos ensaios conduzidos com carga em relação àqueles sem carga reportados anteriormente nas Figura 34 e Figura 35.

No caso da Figura 36, observando o sinal original (na cor azul), é notório a dificuldade de se observar a ocorrência das descargas com mais clareza, principalmente devido à presença em destaque dos picos intermediários defasados à 8ms em relação aos pulsos de mais intensidade. Ainda assim, importa destacar que o critério de energia foi também capaz de detectar a ocorrências das descargas mesmo para um sinal de corrente elétrica de mais baixa intensidade entre os demais (+30 kV) e com uma baixa SNR, demonstrando novamente sua eficácia no presente trabalho. Os resultados observados na Figura 36 apresentam conformidade com resultados de pesquisa da literatura científica relacionada, isto é, conforme relatado por MARKALOUS *et al.* (2008), a partir de experimentos conduzidos em transformadores de potência, o critério de energia compara cada amostra na energia por meio da média de todo o sinal, minimizando os efeitos de ruídos.

Ainda no gráfico da Figura 36, novamente é possível observar um comportamento similar àquele observado nas Figura 34 e Figura 35 em relação aos pontos de mínimo locais, isto é, uma tendência de evolução decrescente, em termos de energia parcial de cada descarga.

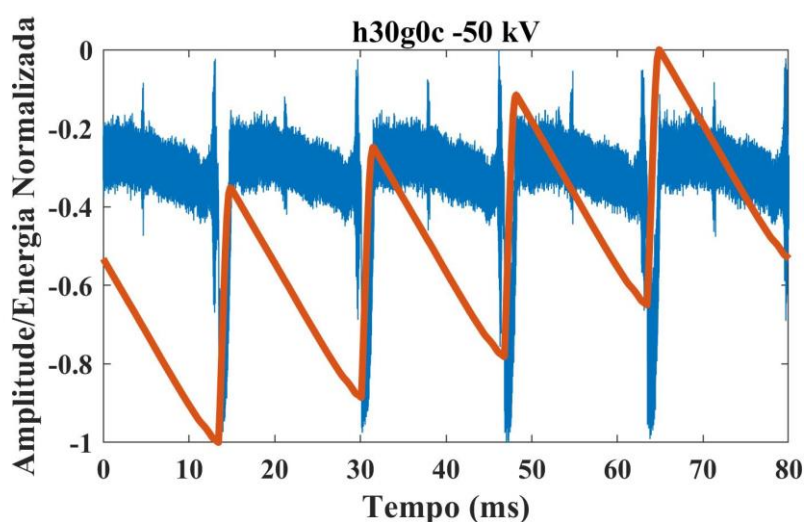
A eficácia do critério de energia também pode ser comprovada para um sinal de corrente elétrica de intensidade intermediária, como aquele correspondente ao valor de tensão de -50 kV (Figura 37). Apesar da efetiva detecção dos pontos de ocorrência das descargas, o critério de energia apresentou comportamento distinto para este caso, isto é, em contraste aos resultados observados nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36, a tendência de evolução da energia foi crescente em relação aos pontos de mínimo locais de cada descarga presente no sinal original. Além da influência da carga, vale ressaltar que as variações de configuração de cada ensaio (por exemplo, neste caso a posição do dispositivo à 30 cm na haste e a 0° em relação a fonte) também contribui para a tendência e padrão de comportamento do critério de energia.

Figura 36 - Representação do critério de energia: sinal de +30 kV – ensaio #h30g0c.



Fonte: Autor.

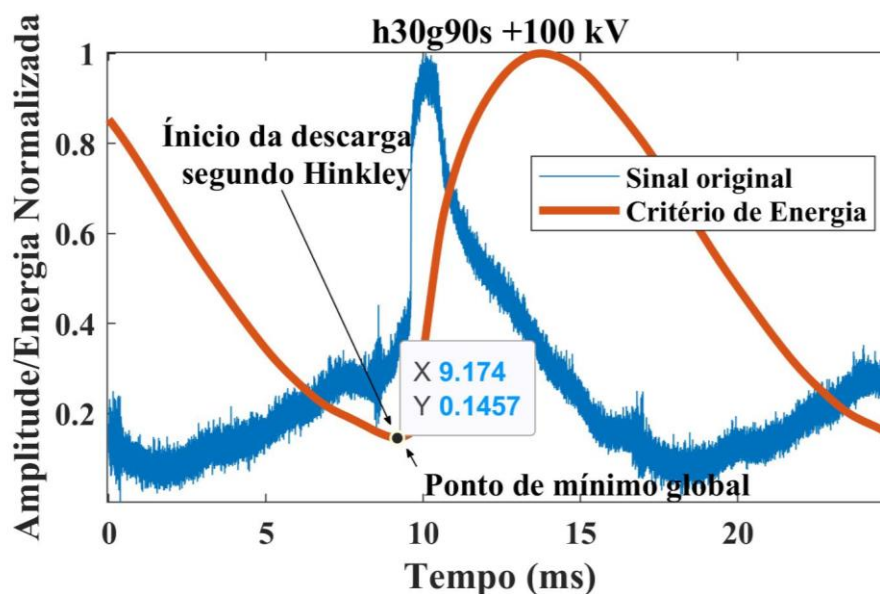
Figura 37 - Representação do critério de energia: sinal de -50 kV – ensaio #h30g0c.



Fonte: Autor.

Para uma melhor visualização dos resultados do critério de energia, os gráficos das Figuras de 38 a 41 delimitam o foco no estudo das primeiras ocorrências de descarga de corona nos sinais de corrente elétrica que, em geral, contemplam pelo menos cinco ocorrências do fenômeno. A Figura 38 ilustra a representação do critério de energia com foco na detecção e localização da primeira ocorrência de descarga de corona para o sinal de +100 kV do ensaio na configuração #h30g90s. É possível observar pulso da descarga no sinal original (na cor azul) e o sinal do critério de energia (na cor laranja) com ponto de mínimo global indicando, segundo Hinkley, o instante de tempo exato de início da descarga, o qual ocorreu precisamente à 9,174 ms.

Figura 38 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de +100 kV ensaio #h30g90s.



A Figura 39 ilustra a representação do critério de energia com foco na detecção e localização da primeira ocorrência de descarga de corona para o sinal de -100 kV do ensaio na configuração #h60g90s. Neste caso, conforme indica o ponto de mínimo global, a primeira descarga de corona ocorreu precisamente à 8,013 ms.

A Figura 40 ilustra a representação do critério de energia com foco na detecção e localização da primeira ocorrência de descarga de corona para o sinal de -80 kV do ensaio na configuração #h30g0c. Neste caso, conforme indica o ponto de mínimo global, a referida descarga de corona ocorreu precisamente à 16,013 ms.

Figura 39 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -100 kV ensaio #h60g90s.

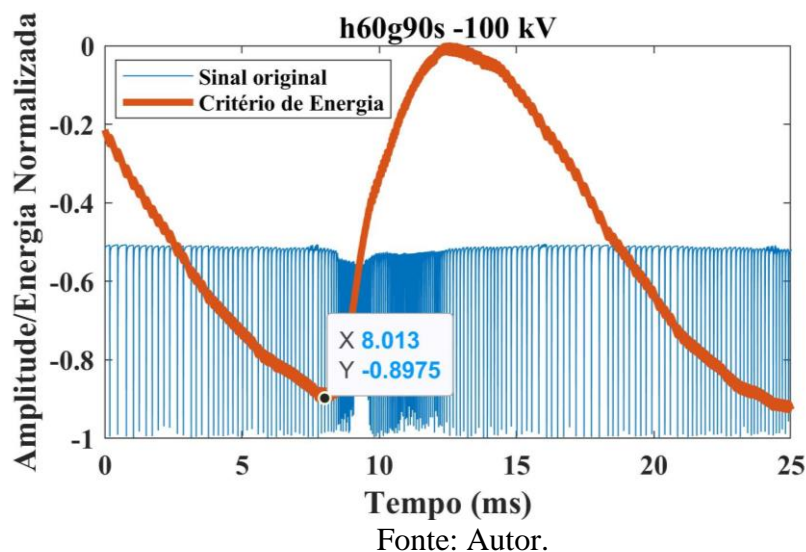
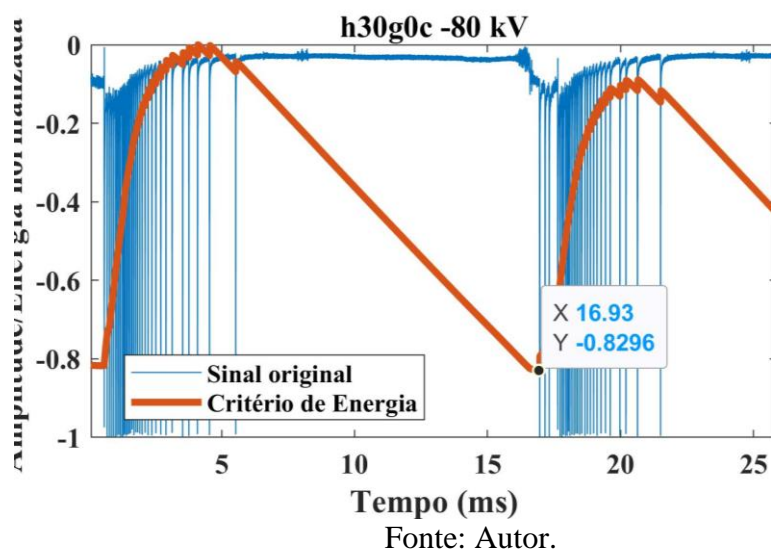


Figura 40 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -80 kV ensaio #h30g0c.

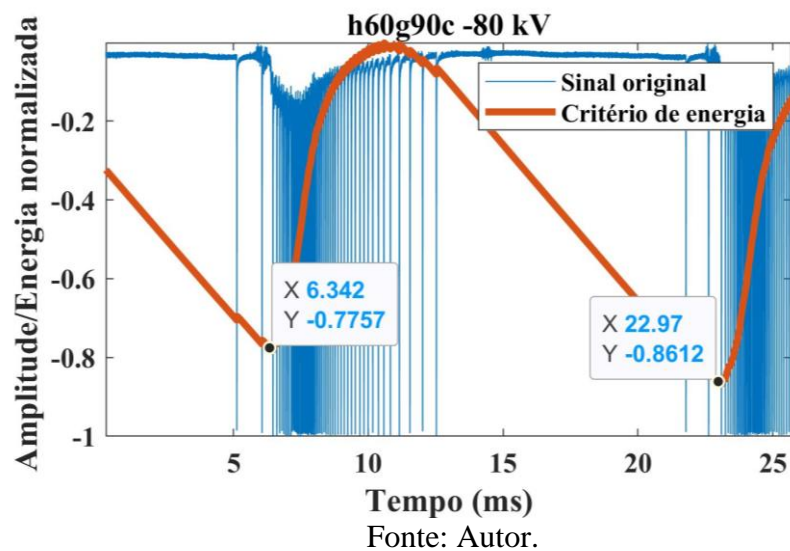


Por fim, a Figura 41 ilustra a representação do critério de energia com foco na detecção e localização de duas ocorrências de descarga de corona para o sinal de -80 kV do ensaio na configuração #h60g90c. Neste caso, conforme indica o ponto de mínimo global, as duas descargas de corona ocorreram precisamente nos instantes de tempo de 6,342 ms e 22,97 ms.

Uma última constatação inferida nos resultados reportados na presente seção que reforça a importância de aplicação do critério de energia, é a variação significativa dos instantes de tempo de início das descargas, os quais também diferem por influência das diferentes condições (ensaios conduzidos com e sem carga, tensões aplicadas ao polo positivo e negativo, etc.) e

configurações (variação da posição na haste e ângulo em relação a fonte de tensão) dos ensaios experimentais realizados neste trabalho.

Figura 41 - Representação do critério de energia com foco na detecção e localização de ocorrências: sinal de -80 kV ensaio #h60g90c.

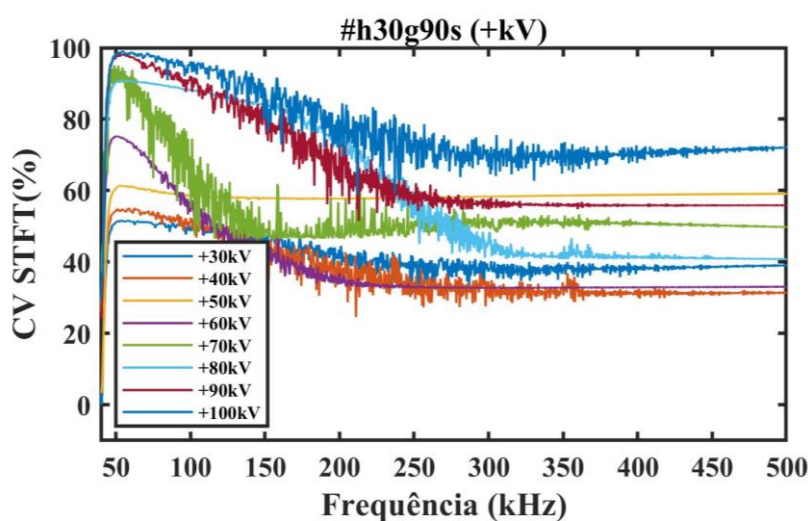


## 5.4 Resultados e discussões da análise do Coeficiente de Variação

Esta subseção detalha os resultados obtidos com aplicação da métrica  $CV_{STFT}$  nos sinais de corrente elétrica coletados pelo dispositivo detector HVDC durante os ensaios experimentais. A partir dos resultados obtidos anteriormente pelos espectrogramas da STFT, foi escolhido um range de frequência que demonstrou ser mais representativo, de 20 a 500 kHz, para análises de vários segmentos espectrais nos instantes de tempo de ocorrência das descargas a partir da matriz de valores de magnitudes da STFT. Aplicando  $CV_{STFT}$  nos vários segmentos espectrais de 20 a 500 kHz em cada trecho de descarga corona tem-se o resultado mostrado nas Figuras 42 a 50. Cada uma das figuras representa um tipo de ensaio conduzido e em cada gráfico tem-se um vetor resultante que expressa a variabilidade espectral e sua comparação com os diferentes níveis de tensão aplicadas. Novamente, destaca-se para as análises quatro condições de testes: para as análises quatro condições de testes: #h30g90s, #h30g0c, #h60g0s e #h60g90c.

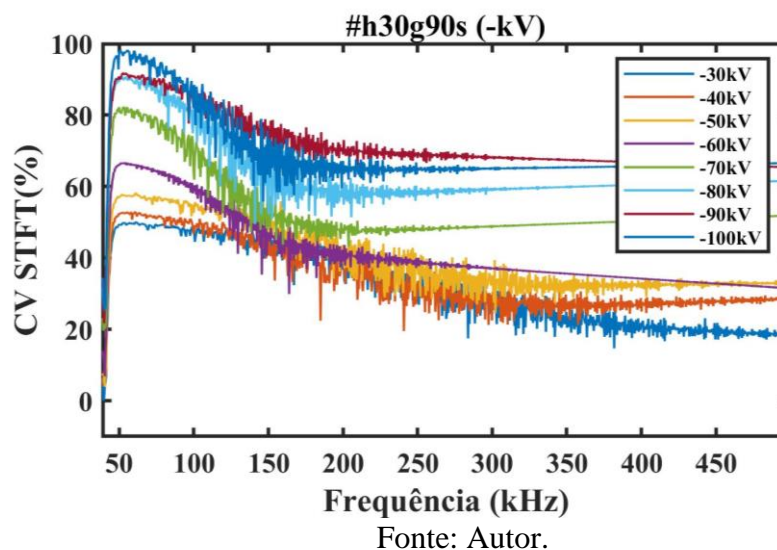
O  $CV_{STFT}$  dos sinais correspondentes ao ensaio #h30g90s com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 100$  kV são apresentados nas Figura 42 (polo positivo) e Figura 43 (polo negativo).

Figura 42 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g90s – polo positivo.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g90s – polo negativo.



O  $CV_{STFT}$  dos sinais correspondentes ao ensaio #h30g0c com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 80$  kV são apresentados nas Figura 44 (polo positivo) e Figura 45 (polo negativo).

Figura 44 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g0c – polo positivo.

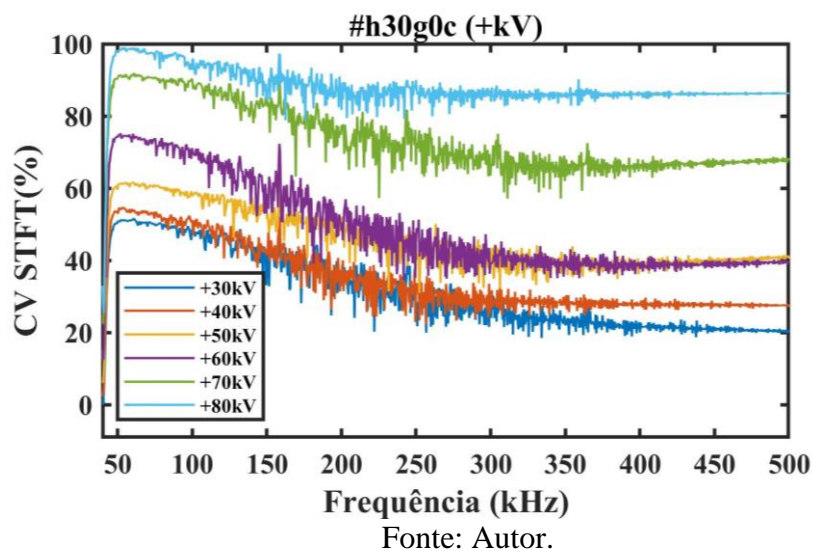
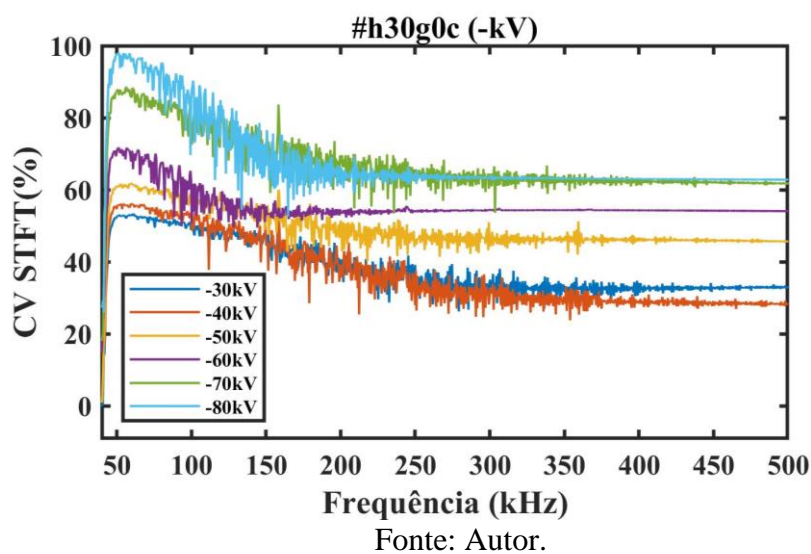


Figura 45 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h30g0c – polo negativo.



O  $CV_{STFT}$  dos sinais correspondentes ao ensaio #h60g0s com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 100$  kV são apresentados nas Figura 46 (polo positivo) e Figura 47 (polo negativo).

Figura 46 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g0s – polo positivo.

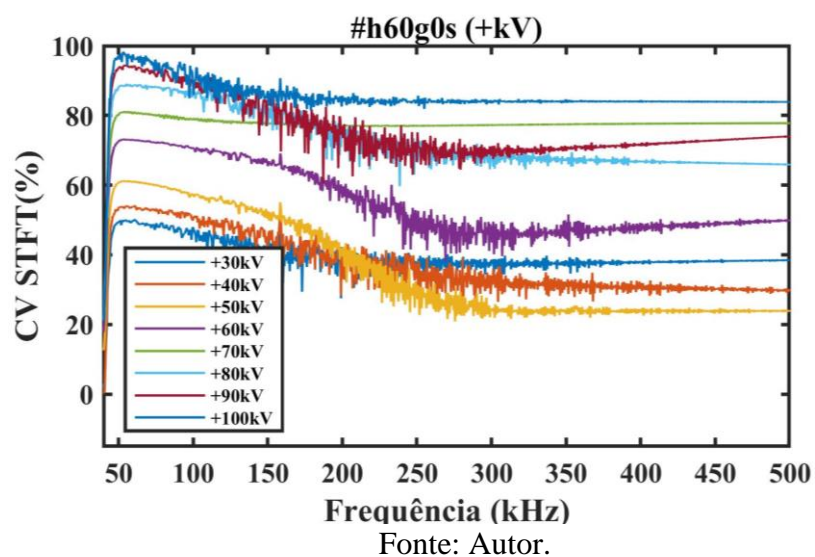
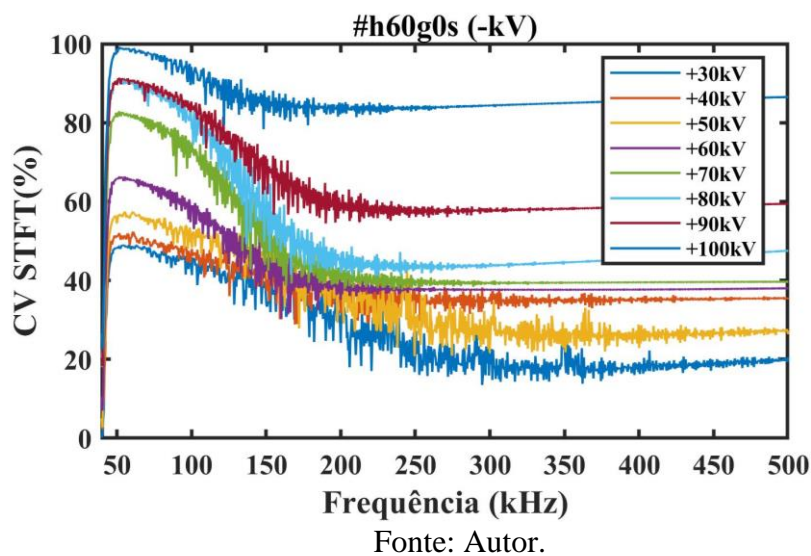


Figura 47 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g0s – polo negativo.



O  $CV_{STFT}$  dos sinais correspondentes ao ensaio #h60g90c com tensões aplicadas variando de  $\pm 30$  kV à  $\pm 80$  kV são apresentados nas Figura 48 (polo positivo) e Figura 49 (polo negativo).

Figura 48 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g90c – polo positivo.

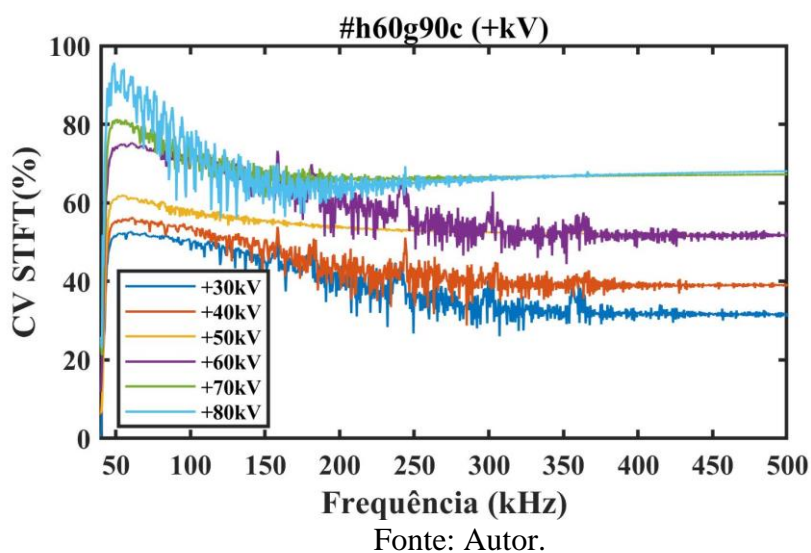
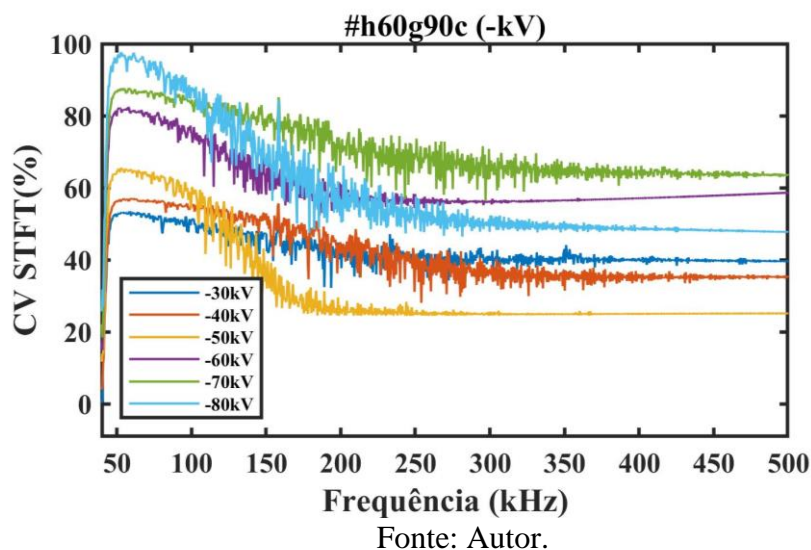


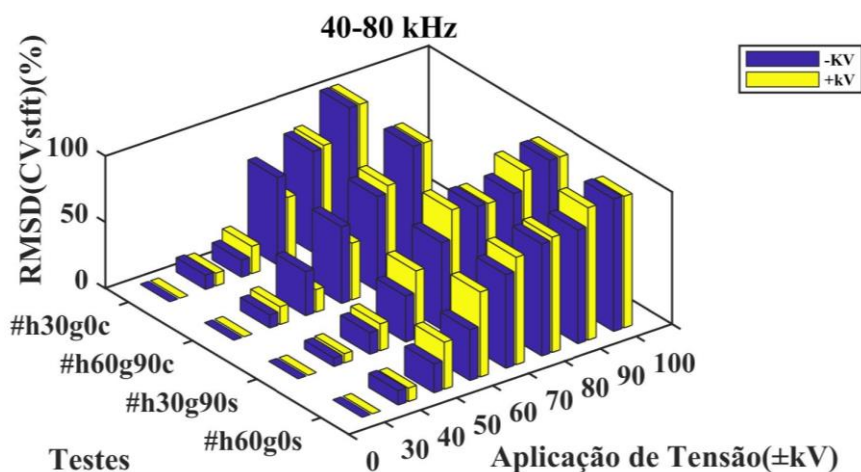
Figura 49 - Perfil de variabilidade espectral das descargas corona: ensaio #h60g90c – polo negativo.



Nota-se que os sinais de referência  $\pm 30$  kV sempre apresentam CV mais baixos ao longo do espectro para todas as condições em função da baixa SNR e baixa atividade de transição entre descarga e ruído. Assim, afirma-se que o perfil da descarga corona para esta condição apresenta baixa variabilidade. Resultados similares são observados nas descargas corona dos próximos valores de tensão, isto é,  $\pm 40$  kV e  $\pm 50$  kV, os quais, apesar de apresentar um sutil crescimento do CV em relação à  $\pm 30$  kV, apresentam perfil médio de variabilidade ao longo do espectro, devido à baixa intensidade de corrente elétrica. Uma transição começa ser observada a partir das descargas parciais nos valores  $\pm 60$  kV, seguido das condições em que o perfil da descarga corona é de maior intensidade, isto é, para  $\pm 70$  kV,  $\pm 80$  kV,  $\pm 90$  kV e  $\pm 100$  kV (para ensaios sem carga - #h30g90s e #h60g0s), ou para  $\pm 70$  kV e  $\pm 80$  kV (para ensaios com carga - #h30g0c e #h60g90c). Assim, a métrica  $CV_{STFT}$  indica que as descargas corona apresentam grandes variabilidades espectrais para valores de tensão maiores ou a partir de  $\pm 60$  kV, em relação ao perfil de referência de  $\pm 30$  kV.

Visando determinar a melhor banda de frequências que expressa o percentual de crescimento das descargas corona em função da tensão aplicada dentro do perfil de variabilidade mostrado nos gráficos de  $CV_{STFT}$ , calculou-se o RMSD para a matriz  $CV_{STFT}$ , adotando as descargas corona para tensões de  $\pm 30$  kV como referência (*baseline*), e variando sub-faixas dentro do range de 20-500 kHz da matriz  $CV_{STFT}$ . Como resultado, verificou-se que a banda de frequências de 40-80 kHz demonstrou ser mais adequada para representação do perfil da descarga corona para expressar o seu percentual de crescimento em função do nível de tensão aplicada. Os resultados são mostrados na Figura 50.

Figura 50 - Percentual de crescimento das descargas corona.



Fonte: Autor.

O critério para escolha da melhor banda de frequências seguiu os valores do coeficiente de determinação  $R^2$ , ou seja, quando a tendência de crescimento do índice RMSD melhor se ajustava a um ajuste linear ( $45^\circ$ ). Esta informação torna-se relevante, pois o uso desta técnica identifica uma banda onde o problema pode ser abordado de forma linear e a banda escolhida demonstrou-se factível de ser implementada em dispositivos eletrônicos embarcados, haja vista que a taxa de aquisição para a banda selecionada e a utilização de uma métrica RMSD simples seria suficiente para quantificar a tensão aplicada. As características mais representativas são ilustradas na Tabela 2. Nota-se que a confiança para banda de frequências 40-80 kHz foi acima de 90% para a maioria dos ensaios, com exceção de dois casos que demonstrou confiança de 89% (#h30g90s – tensões negativas) e 82% (#h60g90c – tensões negativas).

Conforme Tabela 2, se observa que o percentual de crescimento das descargas corona foi em geral maior do que 10% após o valor de  $\pm 50$  kV para as condições #h30g90s, #h30g0c e #h60g0s (tensões positivas). Nas condições #h60g0s (tensões positivas) e #h60g90c, o limiar de 10% de crescimento das descargas corona pode ser estabelecido a partir de  $\pm 40$  kV, já que a partir de  $\pm 50$  kV apresentou percentuais de 36,52%, 40,42% e 16,28%, por exemplo. Os resultados indicam a viabilidade da nova metodologia proposta no presente estudo para quantificar de forma simples o percentual de variabilidade em frequência do perfil da descarga corona sob diferentes níveis de tensão e condições de operação em sistemas HVDC. Assim, foi possível estabelecer um limiar para percentual de crescimento da descarga corona de acordo com seu perfil, por uma abordagem de linearização do problema, podendo essa informação ser útil no entorno das linhas de transmissão ou para fornecer informação sobre medição em campo de intensidade corrente elétrica e tensão.

**Tabela 2** – Características mais representativas.

Teste	+kV	RMSD (40 – 80 kHz)	R <sup>2</sup>	-kV	RMSD (40 – 80 kHz)	R <sup>2</sup>
#h30g0s	30	0%	0,90	30	0%	0,89
	40	0,40%		40	0,03%	
	50	8,87%		50	2,2%	
	60	19,7%		60	22,50%	
	70	41,5%		70	72,58%	
	80	49,61%		80	92,32%	
	90	69,23%		90	95,88%	
	100	100%		100	100%	
#h30g0c	30	0%	0,91	30	0%	0,92
	40	4,25%		40	0,89%	
	50	6,37%		50	11,98%	
	60	46,6%		60	55,74%	
	70	75,75%		70	64,03%	
	80	100%		80	100%	
#h60g0s	30	0%	0,92	30	0%	0,93
	40	0,03%		40	9,9%	
	50	4,13%		50	36,52%	
	60	45,97%		60	64,36%	
	70	71,61%		70	81,71%	
	80	71,55%		80	87,23%	
	90	82,67%		90	100%	
	100	100%		100	98,2%	
#h60g90c	30	0%	0,97	30	0%	0,82
	40	9,71%		40	0,26%	
	50	40,42%		50	16,28%	
	60	47,22%		60	37,10%	
	70	71,79%		70	41,63%	
	80	100%		80	100%	

# Capítulo 6

## CONCLUSÃO

---

*Este capítulo conclui a dissertação, resumindo suas contribuições para o conhecimento existente, bem como futuros desenvolvimentos e desafios.*

### 6.1 Conclusão

O presente tem como objetivo apresentar uma nova abordagem para detecção e caracterização de ocorrência de descargas corona em sistemas de alta tensão em corrente contínua (HVDC) utilizando técnicas e métodos de processamento digital de sinais. A eficácia da abordagem proposta foi avaliada por meio testes experimentais realizados em laboratório com ambiente controlado, processamentos de sinais e análise de dados. Os dados coletados pelo dispositivo detector HVDC nas diferentes condições e configurações dos ensaios experimentais foram analisados usando métricas e ferramentas presentes na literatura técnico-científica. Tais como, análise estatísticas no domínio do tempo (estudo dos sinais “puros”), análise no domínio da frequência (análise espectral de frequência), tempo-frequência, critério de energia de Hinkley e por fim, coeficiente de variação STFT referentes ao fenômeno e sua ocorrência.

A análise inicial no domínio do tempo contribuiu para a identificar as intensidades dos sinais de corrente elétrica correspondentes aos diferentes valores de tensão aplicados nos polos positivos e negativos. Os sinais foram caracterizados pelos pulsos (das descargas) e picos com intervalos de tempo periódicos que se tornavam mais proeminentes e com maior amplitude e duração à medida que os valores de tensão se elevavam. Também foi possível constatar as diferenças entre os ensaios conduzidos com e sem a carga e principalmente visualizar a influência da carga no padrão de comportamento dos sinais de corrente elétrica. As particularidades do semiciclo senoidal negativo também provocaram influências significativas

no padrão de comportamento dos sinais correspondentes às tensões aplicadas ao polo negativo, principalmente para os ensaios conduzidos sem a carga.

A análise no domínio do tempo-frequência (STFT) contribuiu para uma avaliação da resposta em frequência dos sinais elétricos coletados bem como uma identificação das frequências, e faixas de frequências, mais sensíveis a ocorrência do fenômeno da descarga de corona. A STFT também contribuiu quanto a visualização dos instantes de tempo de maior intensidade dos fenômenos predominantes nos sinais de corrente elétrica coletados pelo dispositivo detector HVDC. Os instantes de tempo de ocorrência dos fenômenos foram mais bem visualizados por meio do critério de energia de Hinkley. Neste contexto, é de extrema importância enfatizar as contribuições do emprego do critério de energia para o presente estudo, isto é, a partir de seu ponto de mínimo global, o critério de energia efetivamente e precisamente indicou o exato instante de tempo (da ordem de ms) de início das descargas de corona dos sinais de corrente elétrica. Por fim, o presente trabalho explorou o emprego de uma nova combinação de parâmetros de processamento de sinais baseada na STFT, critério de Hinkley, implementando uma nova métrica a partir do coeficiente de variação,  $CV_{STFT}$ , para análises de vários segmentos espectrais nos instantes de tempo de ocorrência das descargas, medindo a variabilidade espectral para diferentes níveis de tensão aplicadas e condições de operação testadas experimentalmente (ensaios com carga, sem carga, variação de distância e ângulo do ponto de medição), e determinando diferentes perfis de descarga corona em sistemas HVDC. Os resultados indicam a viabilidade da nova metodologia proposta a partir da seleção da banda de frequências ótima, na faixa de 40-80 kHz, demonstrando confiabilidades de 90%, 91%, 92%, e 97% para o polo positivo e 89%, 92%, 93%, e 82 % para o polo negativo, por meio do cálculo do RMSD na matriz  $CV_{STFT}$ . Desta forma, fica evidente que apesar dos modelos de descarga corona apresentarem resposta não linear, após a extração da banda de interesse, o problema passa a ter um comportamento linear, possibilitando a sua implementação em sistemas eletrônicos embarcados de baixo custo, em sintonia com a aplicação das novas tecnologias voltadas à Internet das Coisas e Indústria 4.0.

Dessa forma, o presente estudo indicou que os métodos propostos atendem as principais especificações na identificação e caracterização de descargas corona em sistemas HVDC, podendo assim, contribuir para um maior entendimento a cerca deste fenômeno e buscar métodos mais efetivos mitigação do mesmo em linhas de alta transmissão HVDC. Podendo ser efetivo em auxiliar a realização próximo ao projeto ideal aumentando a segurança da manutenção em linhas de transmissão e atendendo aos requisitos de proteção ambiental, segurança e confiabilidade dos sistemas de energia.

# REFERÊNCIAS

---

ABOUELATTA, M. A.; WARD, S. A.; SAYED, A. M.; MAHMOUD, K.; LEHTONEN, M.; DARWISH, M. M. F. Measurement and assessment of corona current density for HVDC bundle conductors by FDM integrated with full multigrid technique. **Electric Power Systems Research**, v. 199, n. November 2020, p. 107370, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107370>

ALASSI, A.; BAÑALES, S.; ELLABBAN, O.; ADAM, G.; MACIVER, C. HVDC Transmission: Technology Review, Market Trends and Future Outlook. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, n. April, p. 530–554, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.062>

AL-GEELANI, N. A.; PIAH, M. A. M.; ABDUL-MALEK, Z. Identification of acoustic signals of corona discharges under different contamination levels using wavelet transform. **Electrical Engineering**, v. 100, n. 2, p. 1059–1067, 2018.

ANEEL. **Regulamentação da prestação do serviço público de transmissão de energia elétrica associada às instalações de Transmissão em Corrente Contínua em Alta Tensão - CCAT**. [s. l.], 2019.

ARDILA-REY, J. A.; CERDA-LUNA, M. P.; ROZAS-VALDERRAMA, R. A.; DE CASTRO, B. A.; ANDREOLI, A. L.; MUHAMMAD-SUKKI, F. Separation techniques of partial discharges and electrical noise sources: A review of recent progress. **IEEE Access**, v. 8, p. 199449–199461, 2020.

ARRILLAGA, J. **High voltage direct current transmission**. 2. ed. [S. l.]: Iet, 2008. v. 29.

BALIGA, B. J. **Advanced high voltage power device concepts**. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

CASTRO, B.; CLERICE, G.; RAMOS, C.; ANDREOLI, A.; BAPTISTA, F.; CAMPOS, F.; ULSON, J. Partial discharge monitoring in power transformers using low-cost piezoelectric sensors. **Sensors**, v. 16, n. 8, p. 1266, 2016.

CASTRO, B. A. de; BRUNINI, D. D. M.; BAPTISTA, F. G.; ANDREOLI, A. L.; ALFREDO, J.; ULSON, C. Assessment of Macro Fiber Composite Sensors for Measurement of Acoustic Partial Discharge Signals in Power Transformers. v. 17, n. 18, p. 6090–6099, 2017.

CAVALLINI, A.; MONTANARI, G. C.; TOZZI, M.; CHEN, X. Diagnostic of HVDC systems using partial discharges. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 18, n. 1, p. 275–284, 2011.

CHANG, C. S.; JIN, J.; CHANG, C.; HOSHINO, T.; HANAI, M.; KOBAYASHI, N. Online source recognition of partial discharge for gas insulated substations using independent component analysis. **IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation**, v. 13, n. 4, p. 892–902, 2006.

CONCEIÇÃO JUNIOR, P. de O.; MARCHI, M.; MARTINS, C. H. R.; D'ADDONA, D.; AGUIAR, P. R. de; BIANCHI, E. C. Estimação espectral do sinal de vibração para o monitoramento do desgaste do dressador de ponta única TT - Spectral estimation of vibration signal for monitoring the wear of single-point dresser. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 4, p.827–840, 2016. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1517-70762016000400827#:~:text=Uma análise do espectro de,FFT - Fast Fourier Transform](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762016000400827#:~:text=Uma análise do espectro de,FFT - Fast Fourier Transform)).

CUI, J.; ZHOU, J.; PENG, Y.; HE, Y.; YANG, H.; MAO, J.; ZHANG, M.; WANG, Y.; WANG, S. Atmospheric wet deposition of nitrogen and sulfur in the agroecosystem in developing and developed areas of Southeastern China. **Atmospheric Environment**, v. 89, p. 102–108, 2014 a. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.02.007>

CUI, Y.; LV, J.; YUAN, H.; ZHAO, L.; LIU, Y.; YANG, H. Development of a wireless sensor network for distributed measurement of total electric field under HVDC transmission lines. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 10, n. 5, p. 850842, 2014 b.

CUI, Y.; YUAN, H.; SONG, X.; ZHAO, L.; LIU, Y.; LIN, L. Model, Design, and Testing of Field Mill Sensors for Measuring Electric Fields Under High-Voltage Direct-Current Power Lines. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 1, n. 65, p. 608–615, 2018.

DOTTO, F. R. L.; CONCEICAO JUNIOR, P. O.; ANDREOLI, A. L.; DE OLIVEIRA JUNIOR, R. G.; ROBERTO DOS SANTOS, B. R. Development of a portable corona current measuring device for high voltage detection in HVDC systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, p. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3165290>

ENA. Comments on the Corona – Ion Hypothesis. **Energy Networks Association**, n. November, p. 1–4, 2009. Disponível em: <http://www.ena.asn.au/sites/default/files/comments-on-the-corona-ion-hypothesis-updated-november-2009.pdf>

FARD, M. A.; REID, A. J.; HEPBURN, D. M. Analysis of HVDC superimposed harmonic voltage effects on partial discharge behavior in solid dielectric media. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 24, n. 1, p. 7–16, 2017.

GHISLAIN OGOULOLA, C. E.; JUNQUEIRA REZEK, A. J.; FIFATIN, F. xavier; SILVA, V. Z.; GONZATTI, R. B.; DE OLIVEIRA, J. C.; LORENZO CORREA, R. di. An alternative proposal for HVDC transmission systems using 24-pulse AC/DC converters based on three-winding non-conventional transformers. **Electric Power Systems Research**, v. 182, n. October 2019, p. 106230, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106230>

HAUSCHILD, W.; LEMKE, E. **High-voltage test and measuring techniques**. [S. l.]: Springer, 2014. v. 1.

HEDTKE, S.; PFEIFFER, M.; FRANCK, C. M. Corona discharge pulse pattern and audible noise on hybrid AC/DC transmission lines under electric field bias, ripple and ion coupling. **Journal of Electrostatics**, v. 102, p. 103373, 2019.

HINKLEY, D. v. Inference about the change-point from cumulative sum tests. **Biometrika**, v. 58, n. 3, p. 509–523, 1971.

IEEE-STD-1227. IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities. **Piscataway: IEEE SA Standards Board**, 2010.

JACOB, N. D.; MCDERMID, W. M.; KORDI, B. On-line monitoring of partial discharges in a HVDC station environment. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 19, n. 3, p. 925–935, 2012.

JOVICIC, D.; AHMED, K. **High Voltage Engineering**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MPER.1995.384315>  
MEI

LETTERME, W.; BARNES, M.; VAN HERTEM, D. Signal processing for fast fault detection in HVDC grids. **CSEE Journal of Power and Energy Systems**, v. 4, n. 4, p. 469–478, 2018.

LINESTART-INC. **Voltage Detector for direct current 20-800 kV – HVDC-H/-L**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://linestar.ca/testing-locating-instruments/identifiers-detectors/voltage-detectors/voltage-detector-for-direct-current-20-800-kv-hvdc-h-l/>.

LIU, S.; HUANG, D.; ZHANG, Y.; ZOU, X.; LIU, Y.; HUANG, S.; ZHANG, L. Research on ultraviolet detection of insulator corona discharge. *In*: 2014, **2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation**. [S. l.: s. n.] p. 1347–1352. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885895>

LIU, Y.; XV, J.; LIU, Y.; YUAN, H.; CUI, Y. A Method for the Indirect Detection of Audible Noise from High-Voltage Direct Current Transmission Lines. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 69, n. 7, p. 4358–4369, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2942251>

LIU, Y.; YUAN, H.; YANG, Q.; CUI, Y. Design of the corona current measurement sensor with wide bandwidth under dc ultra-high-voltage environment. **Measurement Science and Technology**, v. 22, n. 12, p. 125202, 2011.

LIU, Y.; ZHOU, L.; LIU, Y.; YUAN, H.; JI, L.; WANG, Q. Analysis on the spectrum characteristic of corona Current and its relationship with Radio Interference on UHVDC transmission line. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 6, p. 3336–3345, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.006108>

LIU, Y.; ZHOU, L.; YUAN, H.; LIU, Y.; JI, L. Analysis of self-correlation characteristics of corona current spectrum on UHVDC transmission line. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 25, n. 3, p. 928–938, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006933>

MA, Q.; HUANG, K.; YU, Z.; WANG, Z. A MEMS-Based Electric Field Sensor for Measurement of High-Voltage DC Synthetic Fields in Air. **IEEE Sensors Journal**, v. 17, n. 23, p. 7866–7876, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2762327>

MANTACH, S. Simplified Numerical Models in Simulating Corona Discharge and EHD Flows. 2018.

MARKALOUS, S. M.; RING, Z.; TENBOHLEN, S.; FESER, K. Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals. p. 1576–1583, 2008.

MATHWORKS. **Short-time Fourier transform**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/45197-short-time-fourier-transform-stft-with-matlab>> />. Acesso: 24 Ago, 2020.

MATHWORKS. **Discrete Fourier Transform**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/signal/ug/discrete-fourier-transform.html>>. Acesso: 24 Jan, 2023.

MAWLE, P. P.; PORATE, K. B.; BURADE, P. G. Over Head Transmission Lines Live Line Maintenance Techniques Based on Condition Monitoring in Indian Power Scenario. **INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENCE, SPIRITUALITY, BUSINESS AND TECHNOLOGY (IJSSBT)**, v. 3, n. 2, 2015.

NIU, H. Q.; CAVALLINI, A.; MONTANARI, G. C. Identification of partial discharge phenomena in HVDC apparatus. *In*: 2008, **Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation**. [S. l.: s. n.] p. 373–376.

NR-10. **Norma Regulamentadora 10 - SEGURANÇA EM INSTALAÇÕES E SERVIÇOS EM ELETRICIDADE**. [S. l.: s. n.]

ÖNAL, E. Corona Identification of Impulse Voltage and Current. **Electrica**, v. 18, n. 1, p. 78–82, 2018.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. **Discrete-Time Signal Processing**. 3ª ed. [S. l.: s. n.].

OTTO, A. J.; READER, H. C. Wideband and narrowband HVDC conductor corona test methods for radio noise prediction. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2950–2957, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2051689>

PEEK, F. W. **Dielectric phenomena in high voltage engineering**. [S. l.]: McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1920.

RAIZER, Y. P. **Gas Discharge Physics**. Berlin: Springer, 1991.

SHUO-HONG, G. **Electrodynamics**. [S. l.]: Beijing: Higher Education Press, 2002.

SIEMENS-AG. **High Voltage Direct Current Transmission – Proven Technology for Power Exchange**. [s. l.], 2011. Disponível em: %3C[www.siemens.com/energy/hvdc](http://www.siemens.com/energy/hvdc)>.

SMITH, J. O. **Spectral Audio Signal Processing**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://ccrma.stanford.edu/~jos/sasp>. Acesso em: 9 dez. 2021.

SOOD, V. K. HVDC transmission. *In*: **Power electronics handbook**. [S. l.]: Elsevier, 2018. p. 847–884.

SUO, C.; SUN, H.; ZHANG, W.; ZHOU, N.; CHEN, W. Adaptive Safety Early Warning Device for Non-contact Measurement of HVDC Electric Field. **Electronics**, v. 9, n. 2, p. 329, 2020.

SZIRTES, M.; CSELKO, R.; BERTA, I. Developing a Filtering Algorithm for Partial Discharge Location Approximation Using the Emitted Electromagnetic Signals of Corona Discharges. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 57, n. 1, p. 932–940, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3038627>

WADHWA, C. L. High Voltage Engineering. **New Delhi: New Age International Publishers**, v. 2, 2017.

WAHYUDI, M.; TUMIRAN, T.; NEGARA, I. M. Y.; SETIAWAN, N. A.; SUGIYANTORO, B. Audiosonic Acoustic Detection of Air Corona Discharge based on Fast Fourier Transform. *In: 2019, 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). [S. l.: s. n.]* p. 1–6.

WIJEWEERA, G.; BAHREYNI, B.; SHAFAI, C.; RAJAPAKSE, A.; SWATEK, D. R. Micromachined electric-field sensor to measure AC and DC fields in power systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 24, n. 3, p. 988–995, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2008427>

XIN, E.; XU, R.; YUAN, H.; LU, J. Design and application of corona current measurement system under high-voltage direct-current environment. *In: 2016, Proceedings - 5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control, IMCCC 2015.*: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2016. p. 692–696. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2015.151>

XIN, E.; YUAN, H. Development of a sensor for corona current measurement under high-voltage direct-current transmission lines. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 8, p. 1550147716664243, 2016.

YUAN, C.; XIE, C.; LI, L.; XU, X.; GUBANSKI, S. M.; HE, Z. Dielectric response characterization of in-service aged sheds of (U) HVDC silicone rubber composite insulators. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 3, p. 1418–1426, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.005659>

YUAN, H.; YANG, Q.; LIU, Y.; LU, J.; AKHTAR, S. A. Development and application of high-frequency sensor for corona current measurement under ultra-high-voltage direct-current environment. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 61, n. 4, p. 1064–1071, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIM.2011.2179337>

ZENG, R.; ZHANG, Y.; CHEN, W.; ZHANG, B. Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 15, n. 1, p. 302–310, 2008.

ZHANG, T.; ZHANG, Y.; JI, Q.; LI, B.; OUYANG, J. Characteristics and underlying physics of ionic wind in dc corona discharge under different polarities. **Chinese Physics B**, v. 28, n. 7, p. 75202, 2019.

ZHOU, X.; CUI, X.; LU, T.; LIU, Y.; LI, X.; FANG, C. Measurement and modeling of low-frequency current from hybrid AC/DC corona. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 27, n. 3, p. 1678–1686, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2195730>

ZHU, K.; LEE, W. K.; PONG, P. W. T. Non-Contact Voltage Monitoring of HVDC Transmission Lines Based on Electromagnetic Fields. **IEEE Sensors Journal**, v. 19, n. 8, p. 3121–3129, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2892498>

ZHU, L.; LIU, S. H.; ZHANG, Y.; HUANG, F. Y.; ZHU, H. J. Design of Sensor for Detecting Corona Discharge Signal in Specific Band. *In*: 2013, **Applied Mechanics and Materials**. [S. l.: s. n.] p. 158–162.

ZOU, Z.; LI, D.; XU, J.; CUI, X.; LU, T.; BIAN, X. Impact of fine particles on the direct current electric field of the conductor due to corona discharge. **Journal of Electrostatics**, v. 88, p. 106–110, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.02.001>.