

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Artur Dala Nora Quatrin

**ANÁLISE DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS DE DESCARGAS
PARCIAIS EM SISTEMA PONTA-PLANO POR MEIO DA
TRANSFORMADA HILBERT-HUANG E DE REDES NEURAIS DE
REGRESSÃO GENERALIZADA**

Santa Maria, RS

2023

Artur Dala Nora Quatrin

**ANÁLISE DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS DE DESCARGAS
PARCIAIS EM SISTEMA PONTA-PLANO POR MEIO DA
TRANSFORMADA HILBERT-HUANG E DE REDES NEURAIS DE
REGRESSÃO GENERALIZADA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Orientador: Prof. Dr. Aécio de Lima Oliveira

Santa Maria, RS

2023

Artur Dala Nora Quatrin

**ANÁLISE DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS DE DESCARGAS
PARCIAIS EM SISTEMA PONTA-PLANO POR MEIO DA
TRANSFORMADA HILBERT-HUANG E DE REDES NEURAIS DE
REGRESSÃO GENERALIZADA**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Engenheiro Eletricista**.

Aprovado em 15 de fevereiro de 2023:

Aécio de Lima Oliveira, Dr. Eng. (UFSM)

(Presidente/Orientador)

Luiz Fernando de Freitas Gutierrez, Dr. Eng. (UFSM)

Leonardo Felipe da Silva dos Santos, Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS

2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por tudo que Ele me reserva e por toda força que me nessa etapa.

Agradeço principalmente meus pais, Marisa e Elvio Inácio, meu irmão Pedro Henrique e minha irmã Maria Eduarda, pelo suporte incondicional, carinho e presença durante esse momento.

Aos meus colegas do Laboratório de Análise e Proteção de Sistemas Elétricos, em especial Leonardo de Freitas Silveira, Miguel Spagnolo Martins, Leonardo Felipe dos Santos e Kaynan Maresch de Andrade por toda amizade, ajuda e ensinamentos, foram todos excepcionais nessa caminhada.

A todos amigos que me ajudaram e torceram pelo meu sucesso, agradeço pela camaradagem dentro e fora do âmbito educacional, foram dias de diversão e dias de estudos que mantiveram o equilíbrio emocional nessa trajetória.

Ao professor Aécio de Lima Olivera pela orientação, confiança, atenção e disponibilidade durante a realização desse estudo.

Agradeço ao CNPQ e à CPFL Transmissão pelo suporte financeiro durante o projeto.

Por fim, a todos aqueles não citados nominalmente, mas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

ANÁLISE DE MEDIDAS ULTRASSÔNICAS DE DESCARGAS PARCIAIS EM SISTEMA PONTA-PLANO POR MEIO DA TRANSFORMADA HILBERT-HUANG E DE REDES NEURAIS DE REGRESSÃO GENERALIZADA

AUTOR: Artur Dala Nora Quatrin

ORIENTADOR: Aécio de Lima Oliveira

O sistema elétrico de potência é composto por sistemas de geração, transmissão e de distribuição. Para garantir a operação desse complexo sistema, é crucial verificar a condição operativa dos componentes envolvidos. A isolação de equipamentos de potência está sujeita a degradação por descargas parciais. A medição ultrassônica é uma técnica de inspeção não-invasiva, que permite averiguar a degradação da isolação por meio da análise dos dados de emissões acústicas. Esse trabalho propõe uma metodologia para detecção e classificação de descargas parciais por meio do uso conjunto da Transformada Hilbert-Huang e de redes neurais de regressão generalizada. A Transformada Hilbert-Huang é utilizada para verificar padrões de comportamento das descargas parciais domínio do tempo e da frequência. Com isso, foram extraídas variáveis que apresentavam padrões relevantes para descrever o fenômeno. Uma análise estatística é aplicada aos padrões e utilizando redes neurais artificiais afim de classificar o banco de dados e, assim, determinar a existência ou não de descargas parciais de acordo com a severidade apontada pelo sinal acústico. Dessa forma, a técnica de reconhecimento de padrões foi implementada. Como resultados, nota-se que os pulsos acústicos de descargas parciais se tornaram mais evidentes com o aumento de tensão. Além disso, permitiu-se a categorização de três padrões de comportamento por meio da investigação do espectro de frequência dos sinais acústicos, sendo eles reconhecidos como Ruído de Fundo, Descarga Moderada e Descarga Severa.

Palavras-chave: Transformada Hilbert-Huang; inspeção acústica; desvio padrão; GRNN; padrões.

ABSTRACT

ANALYSIS OF ULTRASSONIC MEASUREMENTS OF PARTIAL DISCHARGES IN TIP-FLAT SYSTEM BY HILBERT-HUANG TRANSFORM AND GENERALIZED REGRESSION NEURAL NETWORKS

AUTHOR: Artur Dala Nora Quatrin

ADVISOR: Aécio de Lima Oliveira

The electric power system comprises generation, transmission and distribution systems. To ensure the operation of this complex system, it is crucial to verify the operation condition of the involved components. Thus, the power equipment insulation is subject to degradation due to the possibility by partial discharges. The ultrasonic measurement is a non-invasive inspection technique of power equipment, which allows checking the insulation degradation through the analysis of acoustic emission data. This work proposes a methodology for partial discharge detection and classifying through the Hilbert-Huang Transform and generalized regression neural networks. The Hilbert-Huang Transform is used to verify behavioral patterns in partial discharges within time frequency domain. In this sense, variables that presented relevant patterns to describe this phenomenon were extracted. A statistical analysis is applied on patterns and analyzed by artificial neural networks in order to classify the database thereby, determinate the existence of partial discharges according to severity by the acoustic signal. As a result, it is noted that the acoustic pulses of partial discharges are more evident with the increase in voltage. Furthermore, the categorization of three behavior patterns was allowed through the investigation of frequency spectrum of the acoustic signals, which were recognized as Background Noise, Moderate Discharge and Several Discharge.

Keywords: Hilbert-Huang Transform; acoustic inspection; standard deviation; GRNN; patterns.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de Descargas Parciais.....	13
Figura 2 – Campo elétrico para eletrodo ponta-plano.	14
Figura 3– Doble PDS100.....	16
Figura 4 – Termovisor.	17
Figura 5 – Inspeção de Ultrassom.	18
Figura 6 – Sinal Teste.....	24
Figura 7 – Envelopes Máximo e Mínimo e média m1.....	25
Figura 8 – Dado inicial e h1.....	26
Figura 9- Modo de Decomposição Empírico.	28
Figura 10 - Espectro de Hilbert.	29
Figura 11 – Arquitetura da GRNN.	31
Figura 12 – Arranjo ponta-plano utilizado para os ensaios.	32
Figura 13 - Ilustração do Sistema Ponta-Plano.	33
Figura 14 – Fluxograma do Algoritmo.....	34
Figura 15 – Sinal Acústico Característico de DPs.....	35
Figura 16 - EMD – Sinal Acústico.	36
Figura 17 - Espectro de Hilbert do Sinal Acústico.....	37
Figura 18 - Energia Instantânea x Tempo.	38
Figura 19 - Sinal Acústico - Espectro de Hilbert e Energia Instantânea.	40
Figura 20 – Curva de Desvio Padrão.....	42
Figura 21 – Resultado possível para GRNN.	44
Figura 22 – Ensaio Elétrico de Ruído de Fundo.....	45
Figura 23 – Ensaio Elétrico de Descarga Moderada.	45
Figura 24 – Ensaio Elétrico para Descarga Severa.....	46
Figura 25 – Crescimento de Energia Instantânea por nível de tensão.....	48
Figura 26 – Padrão 1: Ruído de Fundo. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea.....	49
Figura 27 - Padrão 2: Descarga Moderada. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea. ..	50
Figura 28 - Padrão 3: Descarga Severa. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea.....	51
Figura 29 – Curva de Desvio Padrão – Ensaio 1.....	52
Figura 30 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 2.	53
Figura 31 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 3.	53
Figura 32 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 4.	54
Figura 33 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 5.	54
Figura 34 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 6.	55
Figura 35 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 7.	55
Figura 36 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 8.	56
Figura 37 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 9.	56
Figura 38 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 10.	57
Figura 39 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 11.	57
Figura 40 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 11.	58
Figura 41 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 13.	58
Figura 42 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 14.	59
Figura 43 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 15.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados Estatísticos.....	41
Tabela 2 – Processo de Treino da GRNN.	43
Tabela 3 – Resultados obtidos da GRNN.....	60
Tabela 4 – Acertos para cada padrão encontrado.....	61

SUMARIO

1	Introdução.....	10
1.1	Estutura do trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	12
2.2	Descargas PARCIAIS	12
2.2.1	Tipos de descargas parciais.....	12
2.3	métodos de inspeção	15
2.3.1	Método de Inspeção por Radiofrequência (RF)	15
2.3.2	Método de Inspeção por Termografia.....	16
2.3.3	Método de Inspeção por Ultrassom.....	17
2.4	Método de Medição Acústico	19
2.5	métodos para diagnósticos acústicos de descargas parciais.....	19
2.6	Transformada Hilbert-Huang (HHT)	22
2.6.1	Modo de Decomposição Empírico (EMD)	23
2.6.2	Análise Espectral de Hilbert	29
2.7	Rede Neural de Regressão Generalizada (GRNN)	30
2.8	Conclusões FINAIS	31
3	METODOLOGIA PROPOSTA	32
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	32
3.2	METODO DESENVOLVIDO	32
3.3	Processamento dos Dados Acústicos aplicando a HHT.....	34
3.4	Cálculo Estatístico.....	41
3.5	Aplicação da GRNN	42
3.6	Correlação com o Método Elétrico	44
3.7	Conclusões FINAIS	46
4	RESULTADOS OBTIDOS	47
4.1	Análise e Discussão da Transformada Hilbert-Huang.....	47
4.2	Resultados Estatísticos	52
4.3	CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS	60
4.4	Conclusões finais	61
5	conclusões.....	62
	Referências	63

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) é estruturado pelos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A satisfação do consumidor é uma das principais prioridades das concessionárias de energia, pois a energia elétrica deve ser fornecida com qualidade, segurança e confiabilidade. A manutenção do sistema elétrico é essencial e deve ser realizada rigorosamente. Com destaque, deve-se avaliar as condições dos meios isolantes dos equipamentos de subestações e de linhas de transmissão (isoladores, para-raios, chaves seccionadoras, entre outros), pois há histórico de falhas associado com a degradação (BEZERRA, 2004).

Dentre os equipamentos do sistema de potência, o isolador é um dos que apresenta maior histórico de falhas (BEZERRA, 2004). Sua função é garantir a isolação elétrica de componentes com diferentes níveis de tensão entre seus pontos de sustentação adjacentes, assegurando a transmissão de energia entre os condutores energizados (THOMAZINI, 2009).

A degradação da isolação dos isoladores é um assunto importante de estudo, pois afeta equipamentos essenciais para o funcionamento do sistema elétrico, a sua qualidade deve ser mantida íntegra. Mas, em razão da exposição a condições climáticas e regime de trabalho contínuo, os isoladores sofrem deteriorações internas e/ou externas, frequentemente originadas por Descargas Parciais (DPs).

As DPs, de acordo com a norma IEC 60270 (2015), podem ser compreendidas como uma descarga elétrica localizada que pode gerar um curto circuito parcial a isolação entre os condutores energizados e as estruturas adjacentes. As DPs podem ser classificadas como: descargas internas, superficiais e descargas corona.

Diversas tecnologias têm sido utilizadas para avaliação da degradação da isolação de equipamentos elétricos, dentre as quais se destacam: medição por radiofrequência (RF), termografia, inspeção acústica, inspeção por ultravioleta (UV), medição da capacitância, medição do fator de potência da isolação e método elétrico. O enfoque desse trabalho se restringe à tecnologia de medição acústica. Essa técnica requer o uso de sensor que capte vibrações acústicas e ultrassônicas até 100 kHz acoplado a uma antena. A inspeção acústica é eficaz para obtenção dos dados das DPs, uma vez que se trata de uma metodologia segura e não invasiva, garantindo a manutenção preditiva do objeto sob análise (DE MORAIS et al., 2022; SANTOS et al., 2020b).

Para analisar os dados acústicos, utilizou-se a Transformada Hilbert-Huang (HHT, do inglês *Hilbert Huang Transform*), uma ferramenta de processamento de dados não lineares e não estacionários, permitindo a análise dos sinais ultrassônicos tanto no espectro de tempo quanto da frequência. Isto permite a análise de padrões de comportamento dos sinais medidos por meio de ensaios em um sistema de arranjo ponta-plano. Como ferramenta de automatização para detectar descargas parciais, foi utilizada a Rede Neural de Regressão Generalizada (GRNN, do inglês *Generalized Regression Neural Network*), para classificar os dados extraídos pela HHT.

Mediante a metodologia, este trabalho tem o enfoque de detectar e classificar a ocorrência de DPs no arranjo ponta-plano e, por meio da ferramenta automatizada apresentada anteriormente, classificar essas assinaturas de acordo com a severidade da ocorrência de DPs. No decorrer deste estudo, estarão detalhados os procedimentos realizados desde o tratamento das assinaturas acústicas até a classificação final vinda da extração dos dados.

1.1 ESTUTURA DO TRABALHO

No Capítulo 2 serão abordados os assuntos presentes neste trabalho, tal como definição do problema, consequências e métodos de solução. Ademais, será apresentado a metodologia proposta.

No Capítulo 3 é apresentada, a metodologia implementada por meio de *softwares* computacionais. É detalhado o funcionamento do algoritmo de detecção e classificação das DPs por meio da inspeção acústica. Além disso, apresenta-se as variáveis utilizadas para análise de padrões.

No Capítulo 4 é apresentado, em detalhes, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia apresentada. Experimentos com a HHT e a GRNN com os diferentes tipos de DPs são apresentados, abordando seus padrões de comportamento e a classificação da descarga conforme sua severidade.

No Capítulo 5, conclusões e propostas para novos trabalhos serão apresentadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Este capítulo é dedicado ao estudo teórico relacionado a DPs e suas consequências aos meios dielétricos dos equipamentos elétricos. A seguir, serão apresentados os conceitos matemáticos envolvendo a Transformada Hilbert-Huang, como o Método de Decomposição Empírico e a Análise Espectral de Hilbert. Por fim, as redes neurais de regressão generalizada.

2.2 DESCARGAS PARCIAIS

Segundo a norma ABNT IEC 60270 (2017), as DPs são descargas elétricas localizadas que curto-circuitam parcialmente o material isolante entre os condutores e que podem ou não ocorrer nas adjacências de um condutor. As DPs ocorrem pela ionização de uma determinada região do equipamento de isolamento. Várias situações cooperam para o surgimento de DPs, como o formato do eletrodo, a tensão aplicada, as adversidades temporais sobre o qual o equipamento está exposto (PEIXOTO; BARROS; GRANDE, 2011).

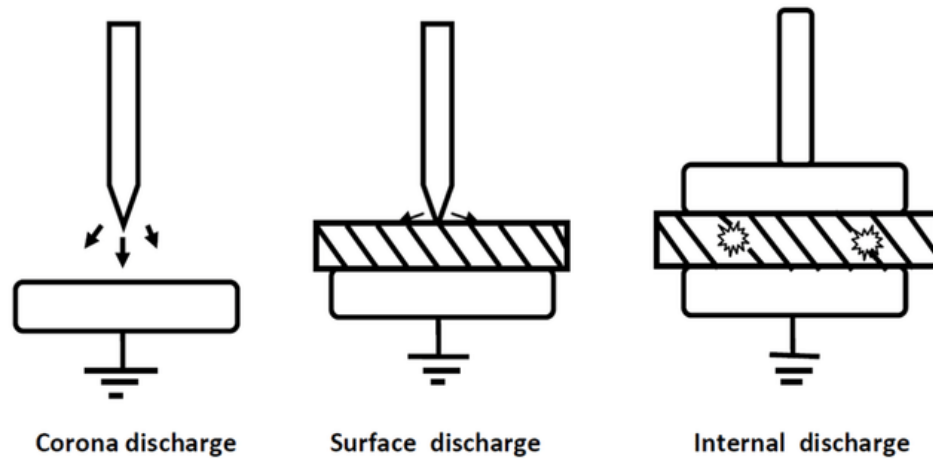
As DPs englobam um grupo de fenômenos: descarga parcial do tipo corona, que se originam através da formação de campo elétrico não homogêneo em torno de um condutor submetido a uma determinada tensão, descarga superficial que ocorre em equipamentos de alta tensão, apresentando um grande campo elétrico tangencial e descarga interna, que ocorre em vácuos dentro dielétricos sólidos e líquidos (HAQUE et al., 2021).

2.2.1 Tipos de descargas parciais

Os três tipos principais de DPs são: descarga parcial do tipo corona, superficial e interna. A atividade da DP depende principalmente da intensidade de tensão estabelecida em uma determinada área e sua não homogeneidade. Dependendo da intensidade da DP, os equipamentos defeituosos geram faíscas e, em casos severos, arcos elétricos (HAQUE et al., 2021).

A Figura 1 ilustra os três principais tipos de DPs mencionados.

Figura 1 – Tipos de Descargas Parciais.



Fonte: HAQUE et al., 2021

2.2.1.1 Descarga Corona

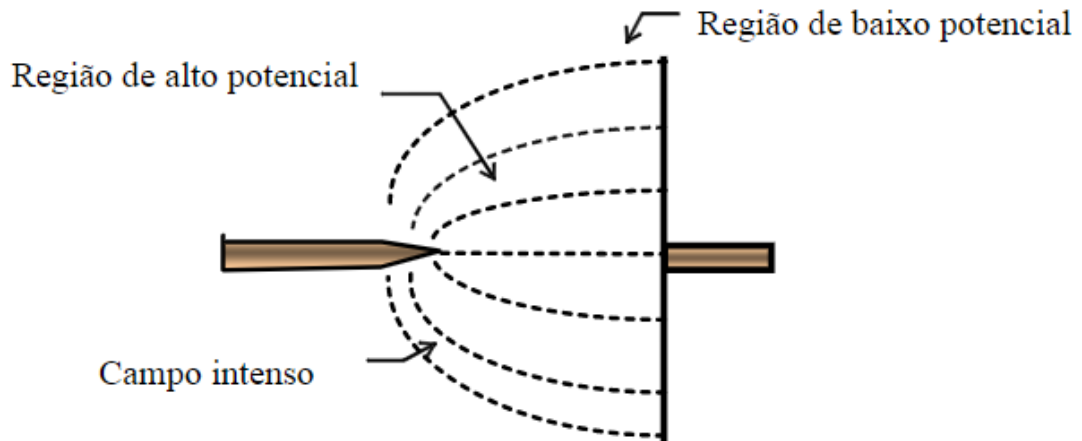
Descargas Corona são descargas elétricas autossustentadas por meio da formação de fortes campos elétricos em razão da ionização dos gases do ambiente. Esses campos elétricos são intensos e não uniformes. A intensidade do campo elétrico está relacionada com os níveis de tensão aplicados. A descarga do tipo corona é um fenômeno que pode ocorrer em linhas de transmissão, transformadores, dispositivos de proteção, isoladores, fios de curto diâmetro, pontas de eletrodos, entre outros (FLORENTINO, 2019).

A intensidade dessa ionização com o ar acarreta na formação de ozônio, um gás que é responsável pela formação de fissuras na isolação dos equipamentos juntamente com o agrupamento de compostos químicos oriundos da formação do ozônio. Essa fissura pode acarretar na condução de corrente elétrica no equipamento, deixando-os suscetíveis a maiores danos, reduzindo sua vida útil (FLORENTINO, 2019).

A formação do campo elétrico é influenciada pela geométrica dos eletrodos ao qual o fenômeno de DPs está submetido. Se, por exemplo, o eletrodo de ensaio tiver o formato de ponta, o gradiente de tensão é alto e caso haja tensão aplicada em um plano, esse gradiente será ainda mais alto, favorecendo o surgimento de campo elétrico (HAUSMANN, 2019).

A Figura 2 ilustra um exemplo da distribuição do campo elétrico para um condutor ponta e plano. Nele, é mostrado como os elétrons livres do campo elétrico se comportam, favorecendo assim o surgimento de descargas do tipo corona.

Figura 2 – Campo elétrico para eletrodo ponta-plano.



Fonte: CUENCA, 2005

2.2.1.2 Descarga Parcial Superficial

DPS superficiais ocorrem tipicamente onde existe descontinuidade nas permissividades dos meios (fronteiras entre meios), normalmente partindo de um eletrodo em direção à superfície do dielétrico. Para a ocorrência deste tipo de descarga é necessário que a componente de campo elétrico tangente à superfície exceda certo valor crítico, iniciando o processo de descarga superficial (PALITÓ, 2015).

A DP superficial pode alterar a superfície do dielétrico, fazendo caminhos condutores ao longo do equipamento, em direção ao campo elétrico. Estes caminhos condutores conhecidos como “trilhamento”, podendo levar a ruptura completa do dielétrico (HAUSMANN, 2019).

2.2.1.3 Descarga Parcial Interna

DPs internas ocorrem em uma ou mais cavidades no interior de um material dielétrico isolante. Entre as principais razões para o surgimento de descargas internas nas cavidades, pode-se citar as menores rigidez dielétrica e permissividade dielétrica dos gases quando comparadas às dos isolamentos líquidos ou sólidos e a conseqüente intensificação do campo elétrico no interior da cavidade com menor tensão de ruptura. Além disso, as descargas parciais são de curta duração em relação ao período da tensão senoidal aplicada (MACÊDO, 2014).

2.3 MÉTODOS DE INSPEÇÃO

Existem métodos de inspeção de descargas que diferem entre si, em função dos diversos fenômenos físicos e químicos originados a partir da ocorrência das descargas, como ondas sonoras, ultravioletas, entre outros. Como exemplos de métodos de inspeção mais utilizados destaca-se, a radiação eletromagnética, variações térmicas (energia na forma de calor) e ruído acústico. À vista disso, vários desses fenômenos podem ser utilizados para auxiliar na detecção de DPs, dependendo da natureza da análise, das características do equipamento sob ensaio e das condições ambientes (PALITÓ, 2015). Nas seções a seguir, serão mostradas várias inspeções possíveis para a detecção de DPs.

2.3.1 Método de Inspeção por Radiofrequência (RF)

O teste de tensão de RF é baseado no fato de que DPs geram ondas eletromagnéticas na forma de interferência estática. O receptor é calibrado em micro-volts para medir o valor do sinal de entrada. Este método possui característica quantitativa, ou seja, não é uma metodologia que permite localizar precisamente o local das DPs. Este fato é justificado pelas fontes de centelhamento ou corona na rede, os quais emitem ondas eletromagnéticas que se propagam em diversas direções no espaço (MACHADO; KOWALSKI, 2011).

A medição por RF é bastante usada para linhas de transmissão, uma vez que é uma técnica precisa e não invasiva, detectando os sinais de rádio frequência por meio de uma antena

(CUENCA, 2005). A Figura 3 ilustra um equipamento de medição em RF, da marca Doble PDS100, um medidor de radiofrequência de DPs muito utilizado em subestações por realizar detecção de DPs a uma distância segura.

Figura 3– Doble PDS100.



Fonte: Fabricante. [<https://www.doble.com/product/pds100/>]

2.3.2 Método de Inspeção por Termografia

O método da termografia consiste na teoria de que todo corpo de temperatura acima do zero absoluto (0 K) emite ondas eletromagnéticas por meio da excitação de moléculas que é constituído. Assim, quanto maior a temperatura, maior será a excitação molecular e, conseqüentemente, maior a radiação emitida (PALITÓ, 2015).

A transferência de calor por radiação eletromagnética é invisível a olho nu. Nesse caso, são utilizadas câmeras especiais, os termovisores, cuja função é converter essa radiação térmica do objeto sob análise em imagem visível ao olho humano. A Figura 4 ilustra um termovisor.

Figura 4 – Termovisor.



Fonte: Instrutemp.

A inspeção de isoladores utilizando a técnica de termovisão apresenta vantagens como: verificação em tempo real, técnica não invasiva e boa precisão dos sensores. Entretanto, somente consegue-se detectar falhas nos isoladores quando estão avançadas, requisitando também experiência do operador e boas condições climáticas para uso (SANTOS, 2012).

2.3.3 Método de Inspeção por Ultrassom

As ondas de ultrassom são ondas sonoras que possuem frequência de oscilação acima de 20 kHz, sendo que o ouvido humano consegue interpretar sons na faixa dos 20 Hz até 20 kHz. Assim, para detecção de DPs, deve-se utilizar de tecnologias que permitem detectar ondas sonoras acima das faixas de frequência percebidas pelo ouvido humano. Nas linhas de transmissão, as principais fontes de ruídos de ultrassom são DPs, corona ou arcos elétricos (MACHADO; KOWALSKI, 2011).

Diversos sensores, com alta sensibilidade para faixas de frequência acima da frequência audível são utilizados para localização das descargas parciais, como localização de descargas corona no ar, descargas internas em transformadores (CAMPBELL et al., 1994; CUENCA, 2005). O método acústico vem se destacando nos últimos anos como técnica de inspeção, por

se tratar de um método seguro e não invasivo, tornando-se eficaz para experiências em laboratório e em campo. Entretanto, deve-se atentar a locais com bastante interferência sonora de ruídos, como barulhos industriais e de tráfego, que podem afetar a precisão da medição.

A Figura 5 mostra um equipamento para detecção do ultrassom SONAPHONE III e como é feita a inspeção de ultrassom em sistemas de distribuição.

Figura 5 – Inspeção de Ultrassom.



Fonte: Autor.

As assinaturas acústicas são medidas através de um sensor de ondas mecânicas em que as ondas que estão sob medida são direcionadas a um único ponto através da antena parabólica presente no instrumento. O sensor na ponta do equipamento recebe as ondas direcionadas e

envia um sinal elétrico até o aparelho SONAPHONE III. Assim, é possível fazer a leitura das assinaturas através de *softwares* computacionais.

2.4 MÉTODO DE MEDIÇÃO ACÚSTICO

Para a realização deste trabalho, utilizou-se o método de medição acústico. Além disso, a obtenção dos dados extraídos pela inspeção ultrassom possuem grande aplicabilidade experimental, como a utilização de *softwares* computacionais para o processamento dos dados adquiridos.

As DPs, emitem ondas que se assemelham a micro explosões, originando ondas mecânicas que se propagam no ar. Assim, é possível captar essas ondas sonoras por meio do método de inspeção por ultrassom, com uso de sensores que captam essas ondas mecânicas e processam os dados resultantes, fornecendo-os ao operador.

As ondas geradas pelas DPs são captadas por um operador que aponta o equipamento para a região sob análise. As ondas são refletidas para o sensor através de uma antena parabólica e convertidas em um sinal elétrico que é amplificado e digitalizado dentro do sensor. A conversão do sinal acústico pode ser feita por meio de um transdutor mecânico que possui em seu interior um circuito de pré-amplificação, tornando possível a leitura dos sinais de ultrassom em equipamentos elétricos como osciloscópios e computadores (PALITÓ, 2015).

2.5 MÉTODOS PARA DIAGNÓSTICOS ACÚSTICOS DE DESCARGAS PARCIAIS

O desenvolvimento de metodologias eficazes para detecção de descargas parciais não é simples. No que diz respeito a DPs, torna-se difícil mensurar o limiar em que o equipamento deve ser retirado de operação do sistema elétrico. Desse modo, muitos estudos foram realizados buscando desenvolver metodologias capazes de inspecionar esse evento.

Neste contexto, essa seção apresentará uma revisão sobre os trabalhos envolvendo diagnósticos acústicos para detecção de descargas parciais publicados nos últimos cinco anos.

GAO et al. (2019) propôs o uso da inspeção acústica por meio de matrizes de sensores com o intuito de detectar descargas parciais no interior de um transformador. A pesquisa começa mostrando ao leitor o princípio de propagação da onda sonora no interior do transformador e os principais desafios encontrados para localizar as DPs. Para resolver esse problema, o autor explora a distribuição das ondas acústicas através de simulação numérica e verificar a melhor posição para alocar os sensores. A técnica proposta por (GAO et al., 2019) monitora a ocorrência das DPs no interior do óleo do transformador e localiza a posição da DP com um erro de medição baixo, pois o experimento é realizado algumas vezes para verificar a consistência das medições.

Hausmann (2019) propôs a interpretação gráfica de DPs utilizando o método de inspeção por ultrassom. Neste estudo, a autora demonstra um estudo referente a inspeção da degradação dos isoladores devido a ocorrência de DPs. Além disso, Hausmann (2019) apresenta uma alternativa para análise dos dados ultrassom medidos através de experimentos em laboratório, como a análise das assinaturas acústicas no domínio da frequência, submetendo-os a Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). A autora realizou ensaios com eletrodos submetidos a diferentes valores de tensão aplicada e condições de ensaio, como eletrodo seco, poluição salina e lama. Por fim, é mostrado o comportamento das DPs no domínio da frequência em seus mais diversos cenários, em que é feita análises gráficas para cada ensaio.

Recentemente, Rathod (2022) utilizou detecção de DPs baseado na emissão acústica em transformadores. A metodologia proposta baseia-se na técnica de Diferença de Tempo de Chegada (TDoA, do inglês *Time Difference of Arrival*). O estudo descreve o mecanismo das DPs, princípios básicos e propriedades da emissão acústica, que é realizada nesse trabalho através de sensores, filtros e amplificadores para a aquisição de dados. Rathod (2022) evidencia as principais vantagens e desvantagens entre o método acústico em relação ao método elétrico. Como vantagem, é citado a imunidade do método acústico perante a interferências eletromagnéticas, em contrapartida o método elétrico não é afetado por ruídos externos. Por fim, o autor propõe o uso de algoritmos de localização de DPs em transformadores, utilizando quatro sensores acústicos e, ressaltando a principal qualidade da emissão acústica, a facilidade com o trabalho experimental.

Antony (2018) apresentou uma proposta de trabalho envolvendo a combinação entre o sistema de sensores eletroacústicos usados para localização de DPs em transformadores com seu método computacional não-iterativo. A motivação para realização deste estudo é comparar

a utilização dos sistemas de sensores juntamente com o algoritmo não-iterativo, em relação ao tempo em que as DPs são localizadas, com um algoritmo utilizando o Método de Newton. Os cálculos matemáticos realizados por Antony (2018) mostram que a disposição dos sensores altera o tempo de processamento computacional para encontrar o foco de DP e que o tempo de processamento computacional envolvendo seu método é muito menor que o algoritmo usando o método de Newton.

Santos et al. (2020) propôs a aplicação da Transformada Wavelet Discreta como ferramenta caracterizadora de DP com as assinaturas sendo extraídas através de um transdutor piezoelétrico. A motivação para esse estudo está na tentativa do autor em mostrar que a ferramenta proposta reduza custos de manutenção através de ações preditivas, evitando danos severos aos equipamentos. O experimento foi realizado em laboratório, onde são ligados sensores na parte externa de um transformador e conforme foram extraídas as assinaturas acústicas dos sensores, calculava-se os coeficientes wavelet. Por fim, Santos et al. (2020) conclui que os coeficientes wavelet se mostram uma ótima ferramenta para análise quantitativa das DPs, uma vez que a energia dos coeficientes aumenta conforme a tensão aplicada aumenta.

Thungsuk et al. (2022) apresenta um experimento envolvendo sensores de emissão acústica juntamente com sensores de alta-frequência para detecção da posição das DPs em um transformador de resina fundida. A motivação do autor para realização desse trabalho é propor a investigação de DPs em transformadores de resina fundida para avaliação de danos enquanto o transformador está operando. Thungsuk et al. (2022) destaca a severidade das DPs através da correlação entre o sinal elétrico e acústico da DP. Experimentalmente, instalou-se quatro sensores de emissão acústica no invólucro do transformador, enquanto o sensor de alta frequência foi instalado no terra do transformador e através da utilização do *software* PowerPD foi capaz de avaliar as formas de onda vindas dos sensores de emissão acústica e através de diversos ensaios de distâncias entre sensores, o autor mostrou que é possível a localização das DPs internas do transformador.

Besharatifard et al. (2022) propôs uma técnica de análise de DPs em transformadores imersos em óleo utilizando sensores de emissão acústica piezoelétricos de baixo custo, investigando as assinaturas também no domínio da frequência. E metodologia experimental do autor visa o acoplamento dos sensores no invólucro de um transformador de potência imerso em óleo, utilizando dois tipos de sensores piezoelétricos para comparação. Para análise no domínio da frequência, Besharatifard et al. (2022) utilizou o algoritmo de FFT e ver as frequências de vibração de cada assinatura do experimento. Em sequência, o autor realizou uma

análise de energia espectral oriunda da FFT aplicada, nela são demonstrados graficamente como se comportam os sensores de acordo com a frequência das DPs. Por fim, o autor calcula parâmetros estatísticos para incluir na validação dos resultados físicos dos sensores e mostrar a natureza das DPs encontradas, assim mostrando que sensores de baixo custo também podem ser utilizados para monitoramento de DPs em transformadores.

2.6 TRANSFORMADA HILBERT-HUANG (HHT)

A Transformada Hilbert (HT, do inglês, *Hilbert Transform*) é um método de análise de dados especialmente para representações em tempo-frequência, que produz representações físicas de dados não lineares e não estacionários. A HT foi motivada pela necessidade de descrever a não linearidade em detalhes, juntamente com a descrição das variações ocorridas pelos processos não estacionários (HUANG, 2014).

No passado, utilizava-se a análise linear de Fourier. Nela, as distorções de frequência não podiam ser decifradas, exceto usando a teoria de frequências harmônicas. Por isso, qualquer distorção de onda não linear era descrita como uma distorção harmônica (HUANG, 2014). Por isso, qualquer onda não linear distorcida é referida como uma “distorção harmônica”.

Como esses dados não podem representar significador físicos, cabe realizar estudos referentes a medidas de frequências instantâneas. E um método fácil de computar as frequências instantâneas é usando a Transformada Hilbert (HUANG, 2014). Matematicamente, a Transformada Hilbert pode ser definida como uma função analítica $z(t)$ mostrada na equação (1):

$$z(t) = x(t) + iy(t) \quad (1)$$

em que a parte real $x(t)$ é uma função real e a parte imaginária $y(t)$ é dada pela equação (2):

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \cdot P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} \cdot d\tau \quad (2)$$

em que P representa o valor de aproximação de Cauchy da integral singular. Representando a equação (1) na forma polar, temos a representação na equação (3):

$$z(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

em que $a(t)$ e $\theta(t)$ são a amplitude e a fase instantâneas, respectivamente. Assim, definidas como:

$$a(t) = \sqrt{x^2 + y^2} \text{ e } \theta(t) = \arctan(y/x) \quad (4)$$

Então, para definirmos a frequência instantânea, apresentada por HUANG, 2014, temos que:

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (5)$$

Mesmo com um método para encontrar frequências instantâneas, a representação sensível desses valores não pôde ser encontrada através de funções arbitrárias. Como resultado, a aplicação da HT só se limitou a aplicações de bandas estreitas.

O método começou a ter uso vantajoso quando HUANG et al., 1998 introduziu a Decomposição de modo empírico, ou EMD (do inglês, *Empirical Mode Decomposition*), dando origem a Transformada Hilbert-Huang (HHT, do inglês *Hilbert-Huang Transform*). Assim, pode-se dizer que a HHT é a combinação dos resultados do EMD juntamente com a análise do espectro de frequências instantâneas de Hilbert. A HHT retorna à reconstrução das componentes decompostas pelo EMD, fornecendo acesso as componentes no domínio da frequência dos sinais temporais analisados neste trabalho.

2.6.1 Modo de Decomposição Empírico (EMD)

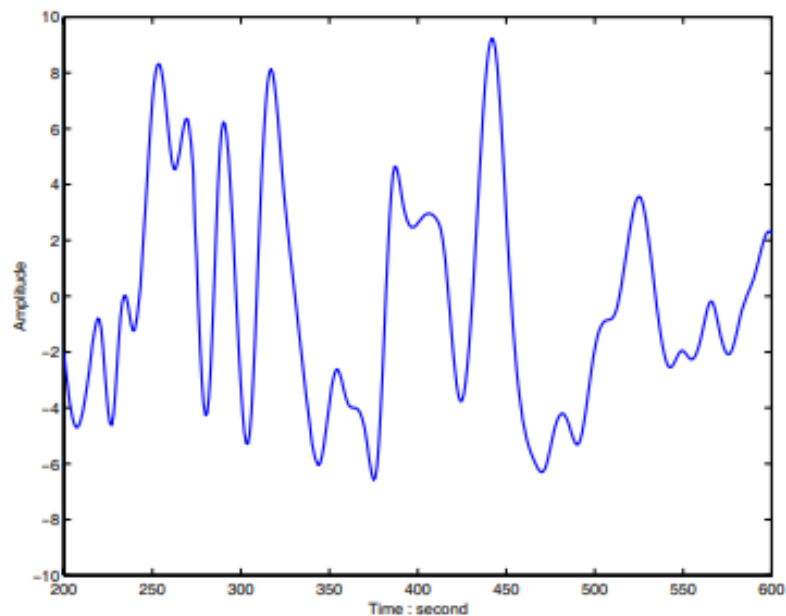
O EMD é uma técnica de análise de funções temporais visando decompor um sinal temporal e um número finito de componentes de diferentes escalas de tempo. A ideia do EMD é que cada função seja representada como uma soma de componentes de diferentes frequências. Essas componentes intrínsecas a série temporal são denominadas Funções de Modo Intrínseco (IMF, do inglês *Intrinsic Mode Functions*) (HUANG et al., 1998).

O EMD é baseado na abordagem de uma sucessiva decomposição temporal da série, para isso, a função deve satisfazer as seguintes definições usadas em (ATTOH-OKINE; HUANG, 2005; HUANG et al., 1998):

- Uma IMF de uma função qualquer deve ter igual número de cruzamentos por zero e número de máximos e mínimos, ou diferindo em, no máximo 1 unidade;
- A média dos envelopes máximo e mínimo definidos pelos máximos e mínimos locais deve ser igual a zero.

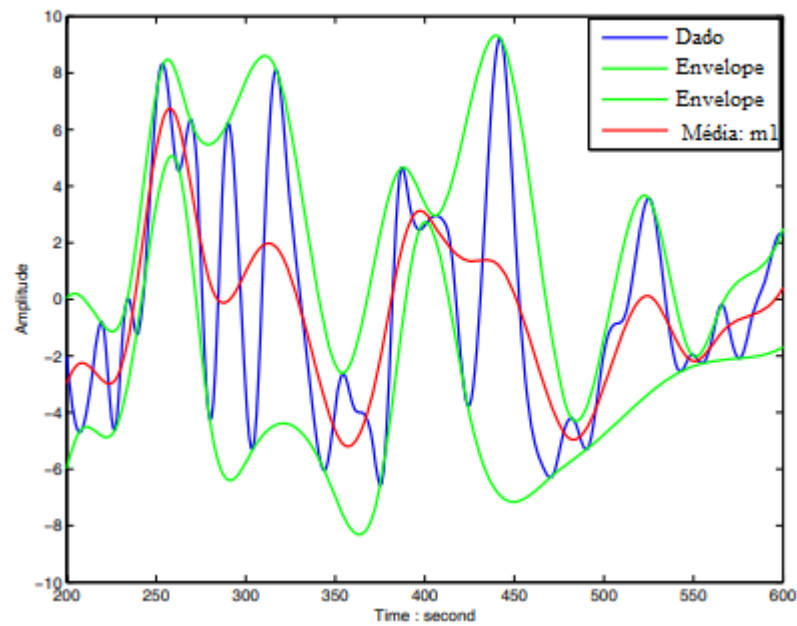
Uma IMF representa uma oscilação simples com valores variáveis de tempo e frequência. A fim de se obter uma IMF, são necessários seguir os seguintes passos: Primeiramente, dado um sinal temporal $x(t)$ mostrado na Figura 6, conecta-se os pontos de máximo e mínimos através de uma linha de interpolação cúbica, formando os envelopes máximo e mínimo que devem cobrir todo o dado, a média m_1 entre os envelopes é mostrada na Figura 7.

Figura 6 – Sinal Teste.



Fonte: HUANG, 2014.

Figura 7 – Envelopes Máximo e Mínimo e média m_1 .

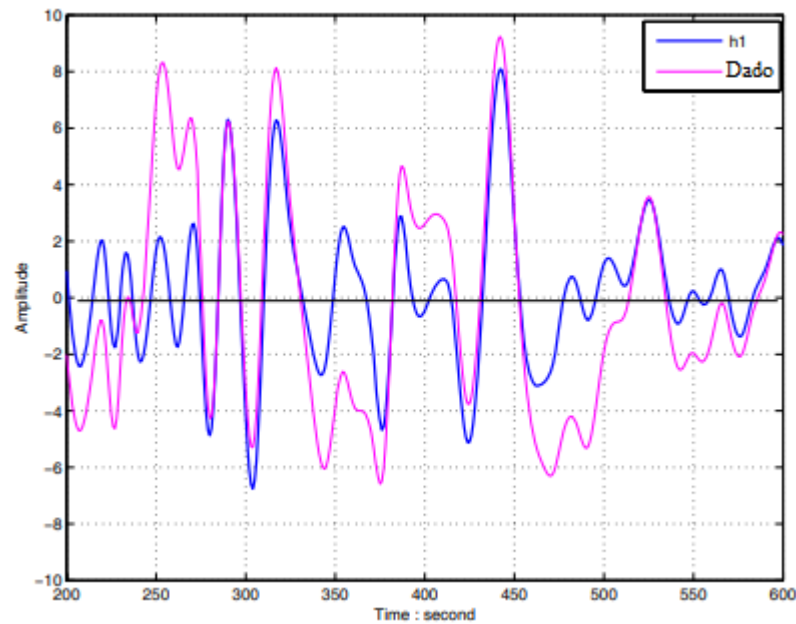


Fonte: HUANG, 2014

Assim, calcula-se a primeira componente h_1 do sinal subtraindo a média dos envelopes do sinal original $x(t)$, como mostrado na equação (6)

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (6)$$

Atribuindo a equação (6) ao sinal acima, temos a comparação de h_1 com o sinal original, mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Dado inicial e h_1 .

Fonte: HUANG, 2014

Na equação (6), a função h_{11} é tratada como a primeira IMF (IMF primitiva) obtida através desse processo e deve satisfazer a definição de IMF. Então, o mesmo processo acima deve ser feito finitas vezes até que o sinal “h” resultante não satisfaça a definição de IMF. Assim, temos na equação (7) a fórmula generalizada:

$$h_{1(n-1)} - m_{1n} = h_{1n} \quad (7)$$

Nota-se que não é possível encontrarmos infinitos valores de h_{1n} que satisfaçam a definição de IMF. Dessa forma, é estabelecido um número máximo de interações até que seja obtido um valor de função de longo período, denominado residual. Esse processo de várias interações gera IMFs de amplitude cada vez menor, até que reste um valor em que não é possível aplicar a definição matemática. Esse processo recebe o nome de peneiramento (ou do inglês, *sifting*) (ATTOH-OKINE; HUANG, 2005; HUANG et al., 1998). Escrevendo que $c_1 = h_{1n}$ e sendo a primeira IMF a ser obtida, escrevemos a função residual de acordo com a equação (8):

$$x(t) - c_1 = r_1 \quad (8)$$

Como, cada sinal possui um número finito de interações para a decomposição, pode-se afirmar que a função é dada pelo somatório de suas IMF decompostas juntamente com seus residuais, como apresentado na equação (9):

$$x(t) = \sum_{k=0}^n c_k + r_n \quad (9)$$

A fim de demonstrar a integridade da decomposição, a Figura 9 mostra a decomposição feita para um sinal de DP do banco de dados de amostra utilizados para estruturar esse trabalho, utilizando o software MatLab2021b. Na figura é possível visualizar todo o processo de peneiramento do sinal acústico e como as IMFs são semelhantes no domínio do tempo, porém diferem em amplitude.

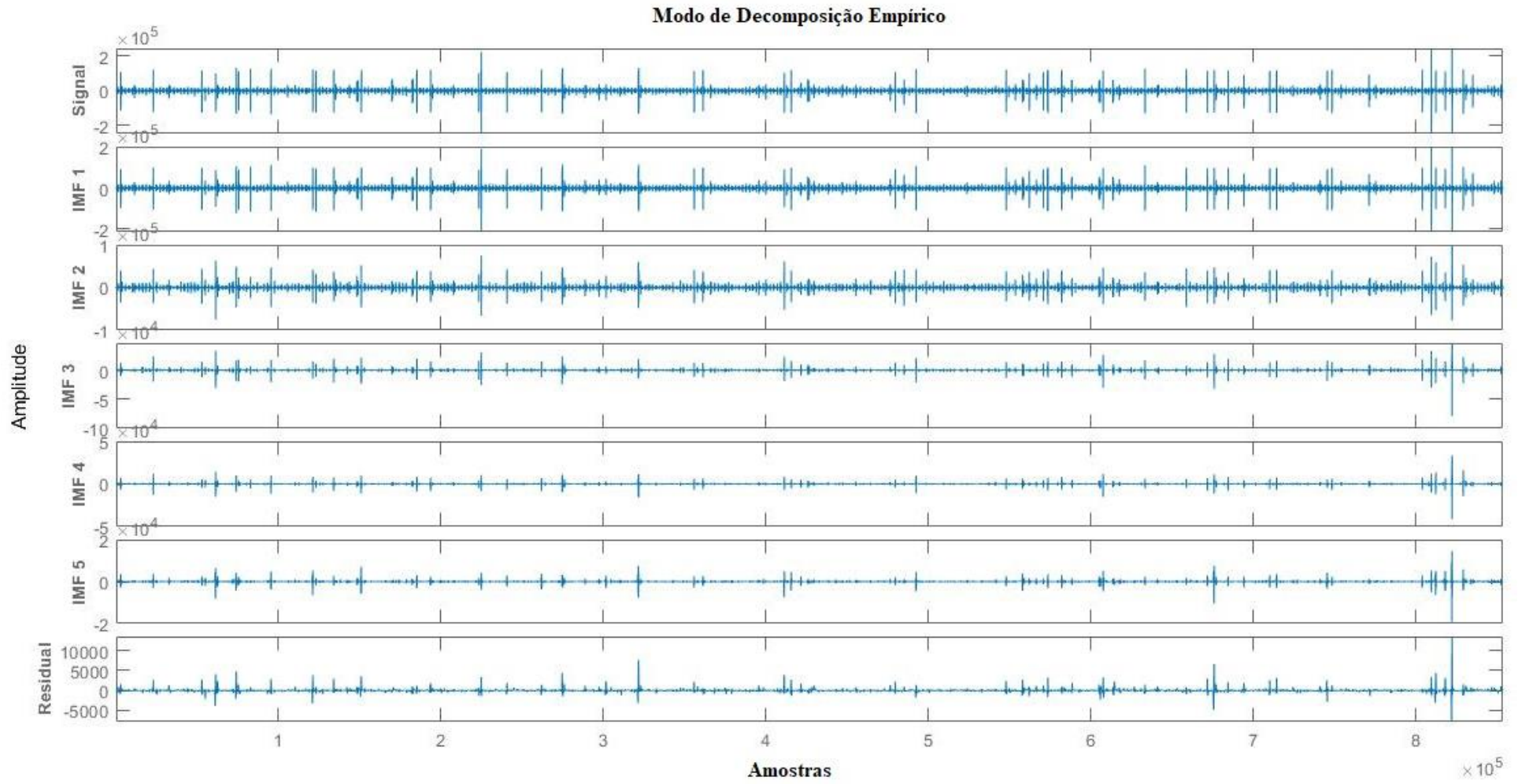
Como mostrado na definição, o processo de peneiramento é feito de maneira que a componente resultante desse processo não apresente nenhum significado físico, ou seja, uma IMF com amplitude insignificante que não haja diferença nos resultados que o processo requer. Para isso, estipula-se um critério de parada, utilizado quando necessita a interrupção do peneiramento. Esse critério pode ser utilizado de diversas formas, como visto em (ATTOH-OKINE; HUANG, 2005), entre eles:

- Número máximo de interações;
- Amplitude mínima de residual definida pelo operador;
- Tamanho de amostra.

O critério de parada mais utilizado para esse método é o critério de parada similar ao teste de convergência de Cauchy, se os valores do teste ultrapassarem o valor pré estabelecido pelo operador, o processo de peneiramento é parado. A equação que rege o critério de parada é mostrada na equação (5):

$$SD = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{n-1}(t) - h_n|^2}{\sum_{t=0}^T h_{n-1}^2(t)} \quad (5)$$

Figura 9- Modo de Decomposição Empírico.



Fonte: Autor.

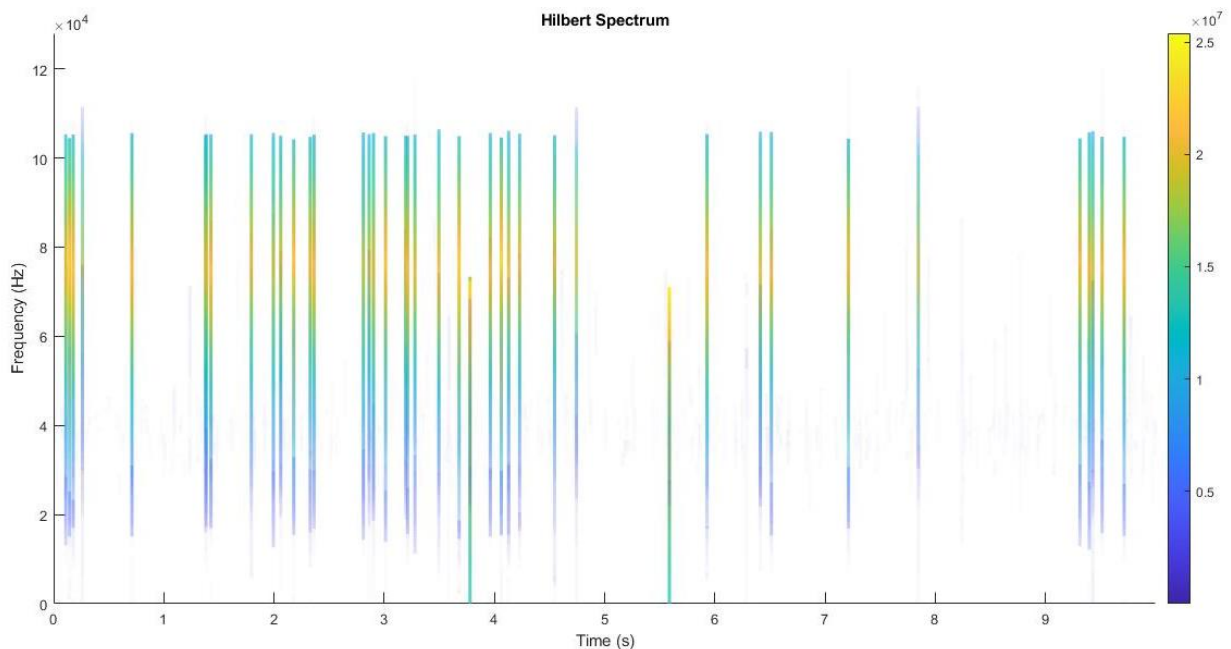
2.6.2 Análise Espectral de Hilbert

Assim que as IMFs foram encontradas, é possível aplicar a Transformada de Hilbert em cada IMF. Tal método possui a finalidade de distribuir as amplitudes no domínio da frequência, sendo denominado Espectro de Hilbert. Assim, é possível calcular os valores de frequência instantânea de todos os modos de vibração do sinal de acordo com a taxa de amostragem definida.

Para a Análise Espectral de Hilbert, o sinal residual escrito por r_n é descartado propositalmente, por se tratar de uma função de baixo período, monotônica ou uma função constante. A exclusão do resíduo deve ser estudada previamente para que o mesmo não interfira no cálculo da energia instantânea do espectro (SANTOS et al., 2020b).

A Figura 10 ilustra a distribuição de amplitudes de acordo com a frequência das vibrações, conhecido como Espectro de Hilbert, $H(\omega, t)$, e o quadrado da amplitude é descrita como a energia instantânea do espectro (SANTOS et al., 2020b). Para a demonstração, foi utilizado um sinal acústico aleatório.

Figura 10 - Espectro de Hilbert.



Fonte: Autor.

Nota-se na Figura 10, pelo diagrama de cores, que a energia instantânea é maior em determinadas faixas de frequência do espectro e para o trabalho proposto, é um estudo fundamental para a análise de padrões de comportamento dos sinais ultrassônicos.

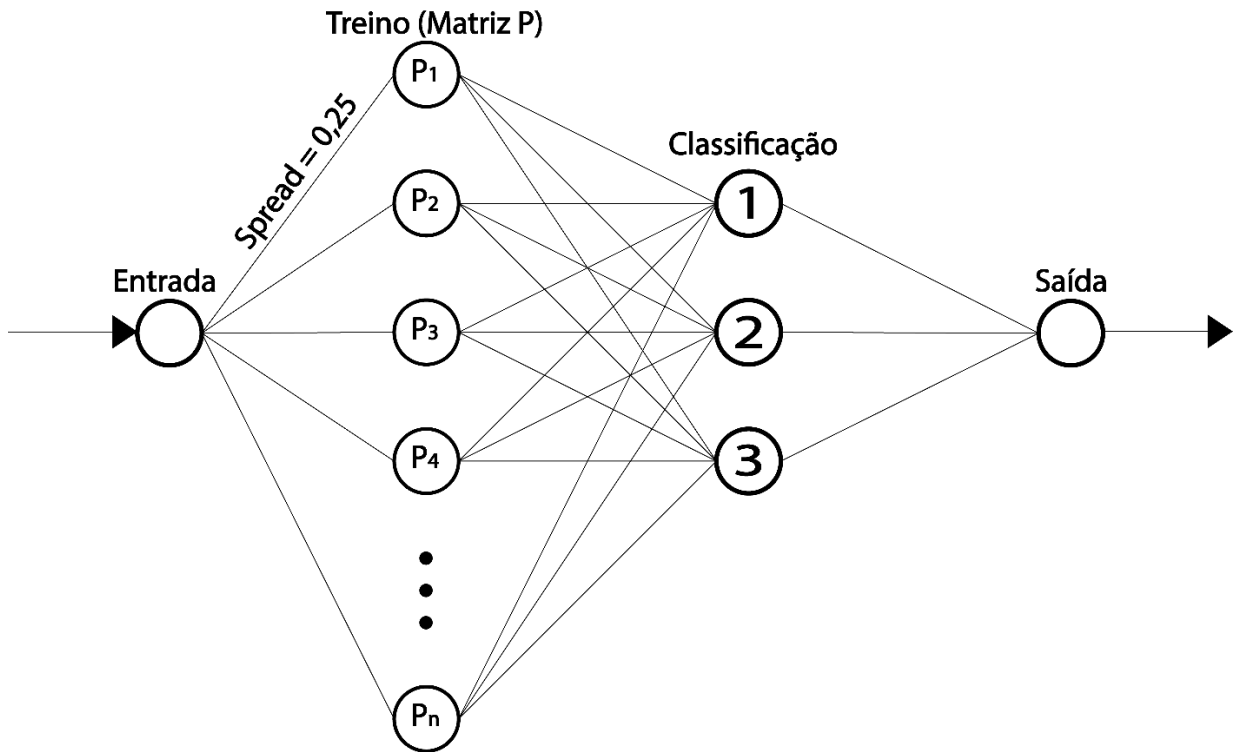
2.7 REDE NEURAL DE REGRESSÃO GENERALIZADA (GRNN)

A GRNN é uma rede neural artificial capaz de realizar a estimação de uma variável dependente através de uma independente por meio de um conjunto de variáveis (número finito) de treinamento (KENJI, 2011). A rede é composta por uma camada de entrada, duas intermediárias e uma de saída, cada uma delas dependendo da quantidade de amostras de treinamento.

A GRNN tem sido bastante usada nos últimos anos, principalmente para análise de padrões de séries temporais (KENJI, 2011), pois trata-se de uma rede adaptativa e de fácil uso pelo operador, aumentando a eficiência de generalização da rede.

A regressão da GRNN consiste em estimar o valor da variável dependente através da independente. Em termos empíricos, a variável dependente corresponde ao valor de saída da GRNN, em que a generalização já foi concluída e determinada através das variáveis independentes, que são as variáveis de entrada. Essas variáveis podem ser descritas também como um conjunto de vetores que representam um certo padrão, para que, de acordo com as variáveis utilizadas como treinamento, a rede possa encontrar um padrão e determinar sua saída. Um exemplo da arquitetura da GRNN utilizada para compor esse trabalho é ilustrada na Figura 11.

Figura 11 – Arquitetura da GRNN.



Fonte: Autor.

A função de transferência usada pela GRNN trabalha com a distância gaussiana definida pela função *spread*, que define a área de vizinhança entre as variáveis independentes com as variáveis dependentes. Quanto maior o valor do *spread* (valor entre 0 e 1), maior será a área gaussiana de vizinhança, ou seja, menor a precisão de acerto na matriz de resultados da GRNN conforme a quantidade de padrões pré-estabelecidos. Cabe ao programador estipular um valor de *spread* que entregue resultados de padrões satisfatórios com o menor uso de variáveis de treino.

2.8 CONCLUSÕES FINAIS

Com base no exposto até aqui, apresentou-se os princípios básicos para realização da metodologia de análise de padrões com base na aplicação da HHT e posteriormente, automatização de classificação da GRNN. Além disso, cabe dizer que os métodos aplicados tem resultados convergentes, pois abordam os problemas em diferentes metodologias, apresentando o mesmo resultado final.

3 METODOLOGIA PROPOSTA

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos executados para a realização deste trabalho, as formas de medição, simulações computacionais baseadas na teoria exposta na seção anterior.

3.2 METODO DESENVOLVIDO

Para desenvolver a teoria exposta na revisão bibliográfica, primeiramente, os sinais acústicos foram adquiridos através dos ensaios desenvolvidos pelo Laboratório de Alta e Extra-Alta Tensão (LEAT) da Universidade Federal do Pará (UFPA). A metodologia empregada para realização dos ensaios acústicos foi feita através de um sistema de arranjo ponta-plano, como mostra a Figura 12.

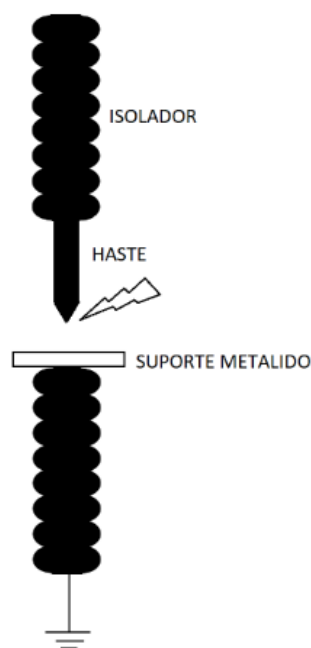
Figura 12 – Arranjo ponta-plano utilizado para os ensaios.



Fonte: DE MORAIS et al., 2022.

O Sistema ponta-plano é um arranjo composto por eletrodo em forma de haste metálica suportado com um isolador e um disco metálico também suportado por um isolador. A configuração desse sistema permite que haja distribuição de campo elétrico na haste em várias situações. A proposta desse arranjo é fazer com que, conforme a tensão aplicada no sistema, ocorra o acúmulo de campo elétrico na ponta da haste, forçando o surgimento de DPs e facilitando com que as DPs sejam em sua maioria descargas do tipo corona, como mostra a Figura 13 (CUENCA, 2005; DE MORAIS et al., 2022).

Figura 13 - Ilustração do Sistema Ponta-Plano.



Fonte: Autor.

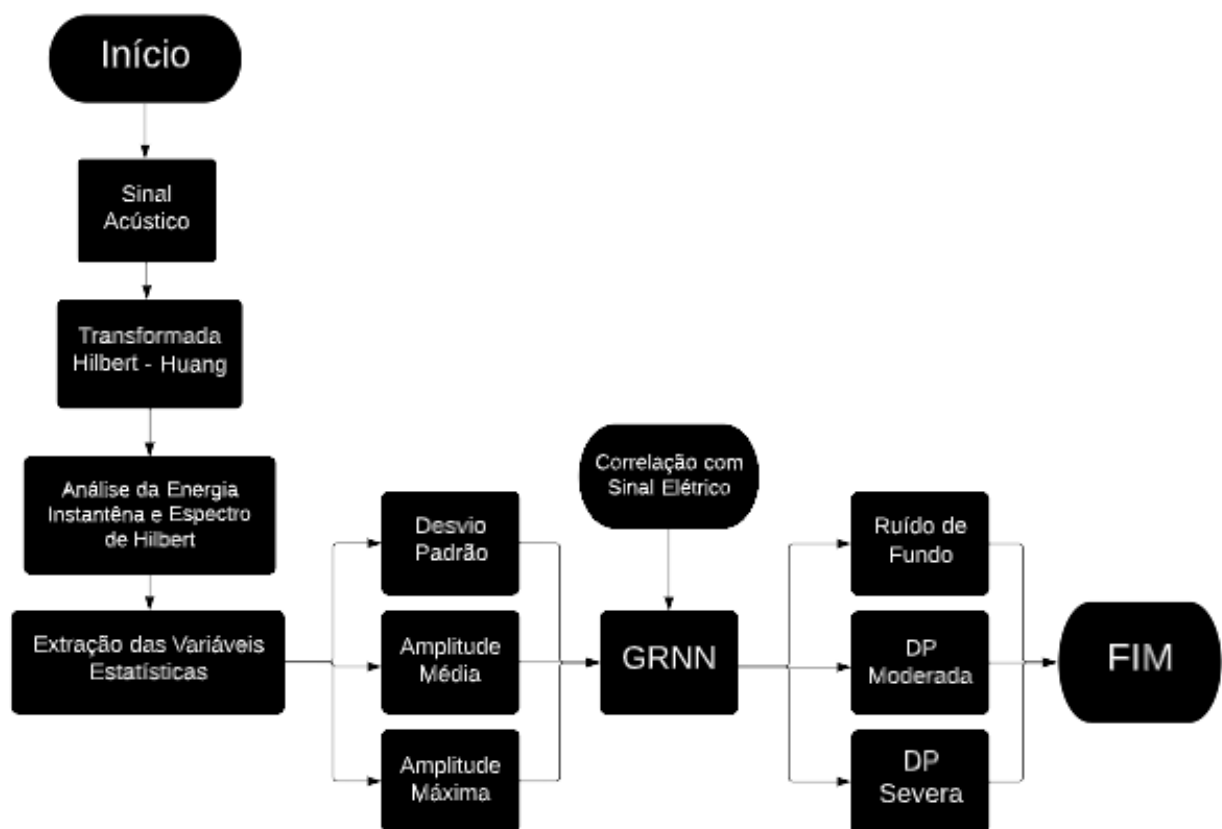
Foram realizados ensaios com a distância da ponta e do plano com 8 mm e 15 mm. Tal distância foi necessária devido ao uso de uma fonte alternada para aquisição dos sinais, em que segundo DE MORAIS et al. (2022), constatou-se que espaçamentos inferiores a 8 mm não permitiam ajuste de tensão em condição ambiental para ensaios com poluição, gerando disrupção no sistema para valores de tensão até 7 kV.

Todos os ensaios foram realizados com variação da tensão aplicada de 10 kV até a tensão de ruptura do dispositivo de proteção, em torno de 86 kV, a passos de tensão de 10 kV. Os ensaios foram realizados em três cenários: arranjo limpo, com poluição salina e sujeira que imita uma poeira. Ademais, os sinais foram medidos a distâncias de 8 e 16 metros. Também é

utilizado o tempo de 10 segundos para os ensaios, em que é possível boa visualização do fenômeno possibilitando sua aparição repetidas vezes, gerando uma grande quantidade de dados.

A partir do banco de assinaturas acústicas, foi desenvolvida a metodologia deste trabalho conforme apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma do Algoritmo.

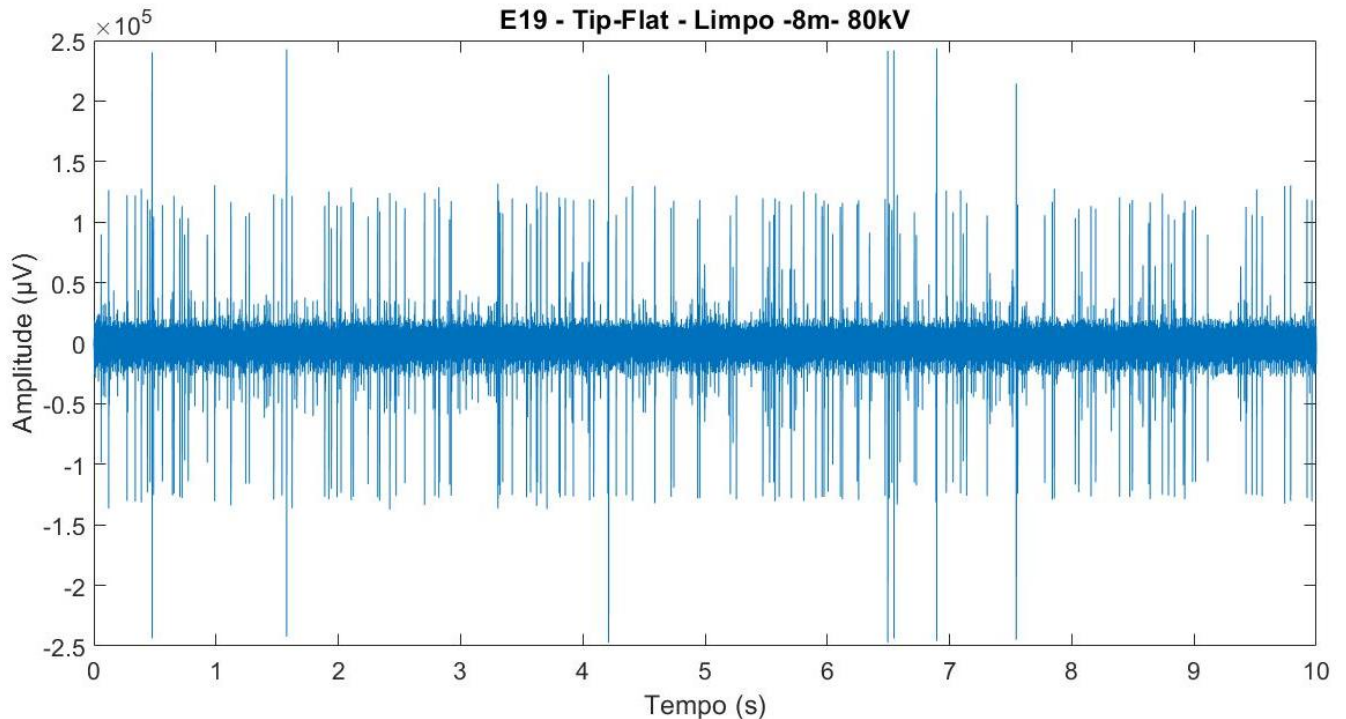


Fonte: Autor.

3.3 PROCESSAMENTO DOS DADOS ACÚSTICOS APLICANDO A HHT.

Primeiramente, apresenta-se na Figura 15 o ensaio do sinal acústico de um cenário e ensaio aleatório com a característica de DPs de acordo com (TANG; TAI; SU, 2007; VALENCIA FERREIRA DA LUZ; MARKS, 2019; WANG et al., 2006).

Figura 15 – Sinal Acústico Característico de DPs.



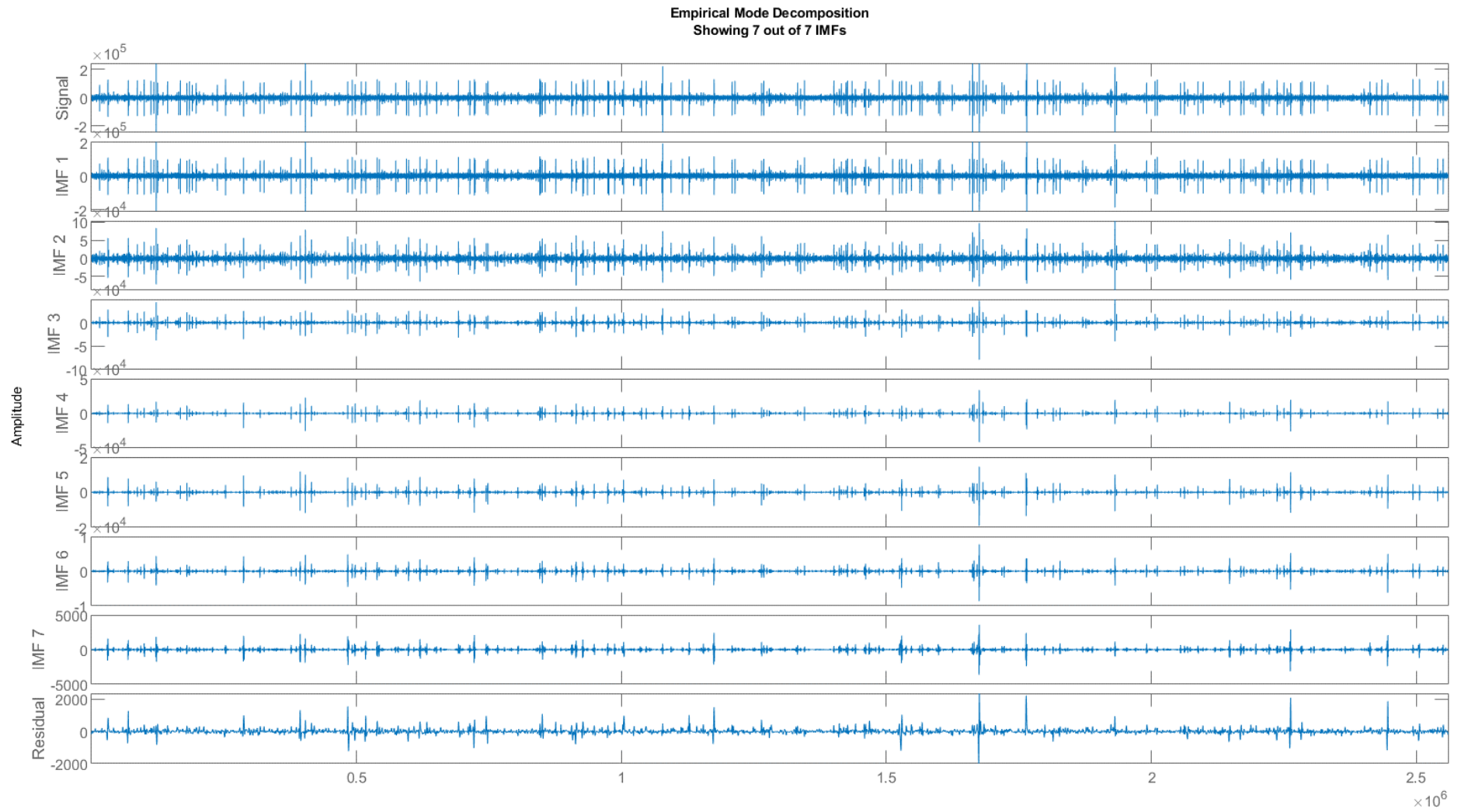
Fonte: Autor.

Com base na figura acima, percebe-se a ocorrência de picos de amplitude em pequenos intervalos de tempo captados pelo sensor acústico, de acordo com VALENCIA FERREIRA DA LUZ; MARKS, 2019 e MARKALOUS; TENBOHLEN; FESER, 2008, trata-se de um sinal com a presença de DPs.

Posteriormente, aplica-se o tratamento do sinal acústico através do EMD. Como descrito na revisão bibliográfica, não é possível definir empiricamente um valor máximo de IMFs que apresentam sentido físico para a decomposição. Então utilizou-se como padrão para todo o banco de dados, um número de sete IMFs, como mostra a Figura 16.

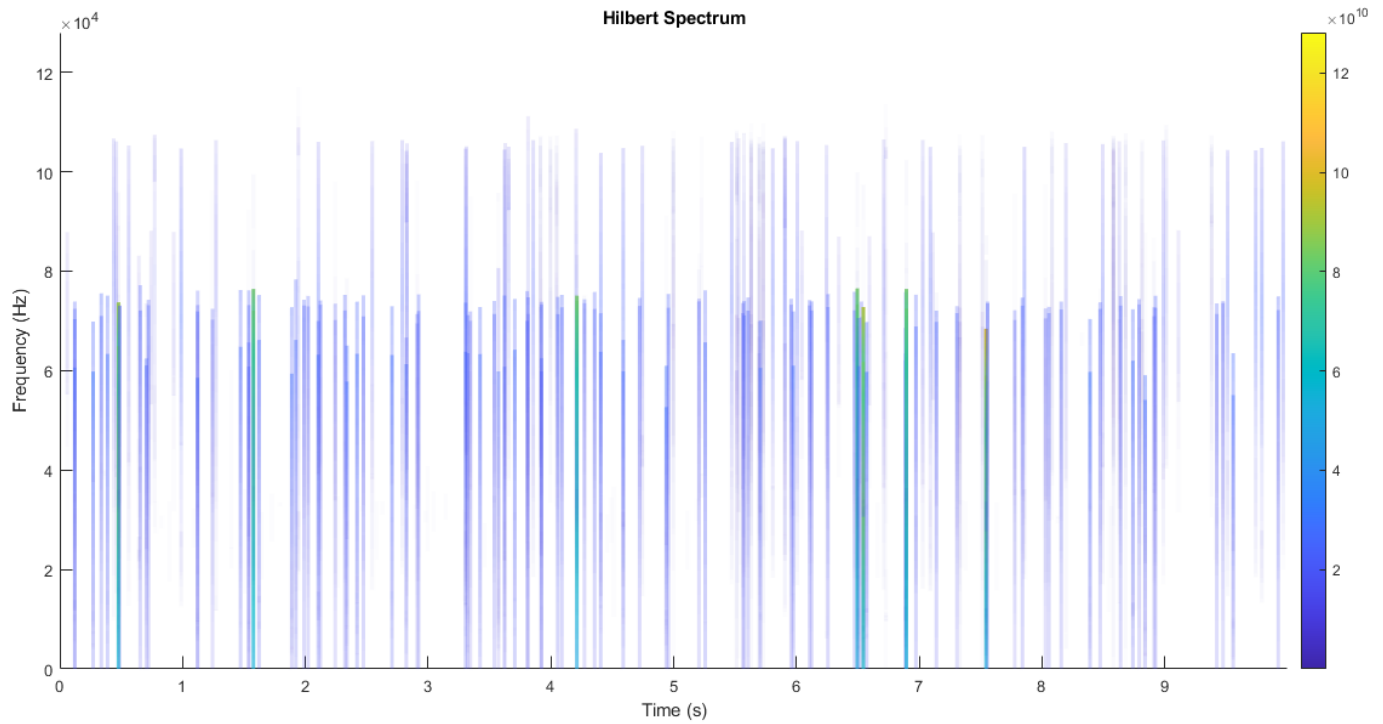
Após encontrar as IMFs do sinal acústico, aplica-se a Transformada Hilbert (HT) para verificar a série temporal no domínio da frequência. O gráfico, indica a distribuição das amplitudes de energia instantânea em um espectro de frequências. Tendo em vista isso, é possível visualizar os picos de energia instantânea para cada IMF extraída. Figura 17 mostra o espectro de Hilbert para o sinal acústico da Figura 15.

Figura 16 - EMD – Sinal Acústico.



Fonte: Autor.

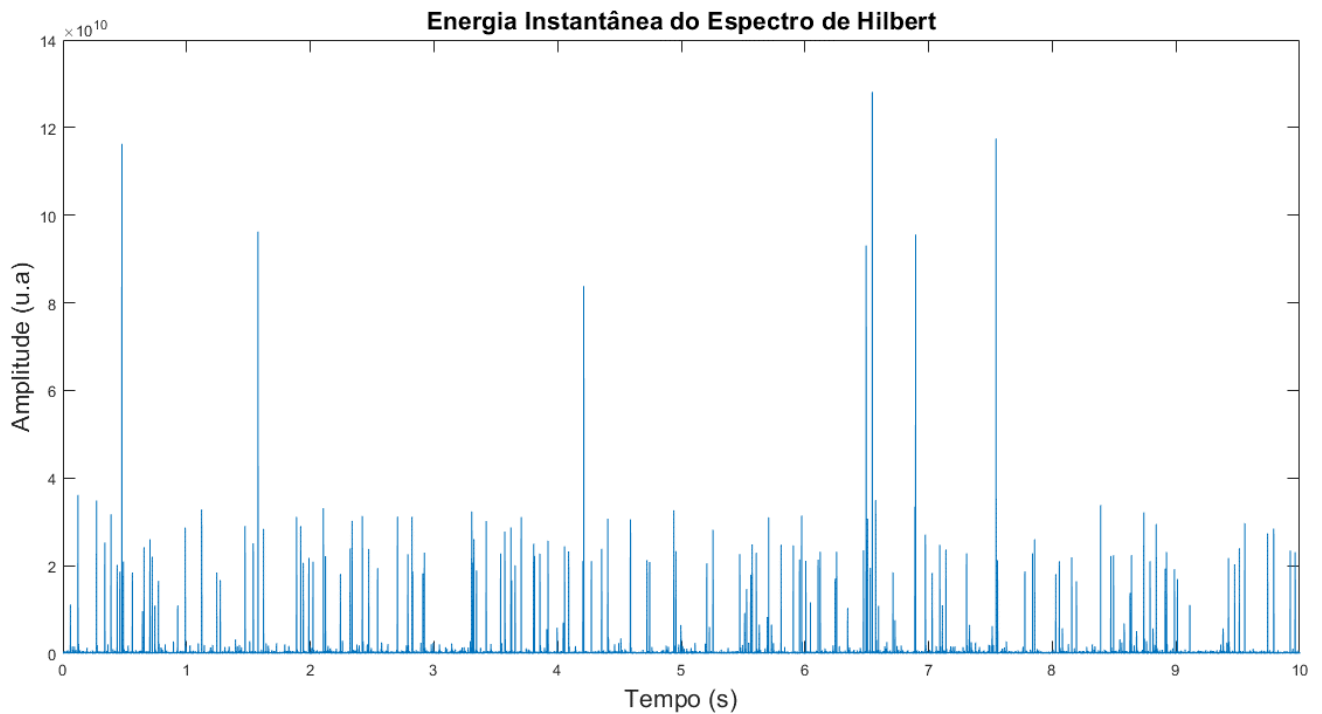
Figura 17 - Espectro de Hilbert do Sinal Acústico.



Fonte: Autor.

Pela figura, nota-se que as maiores amplitudes de energia instantânea estão localizadas na faixa de frequência de 70 a 80 kHz e, através do software MatLab, as amplitudes de energia instantânea do espectro e estendermos no domínio do tempo, obtemos o gráfico da Figura 18.

Figura 18 - Energia Instantânea x Tempo.



Fonte: Autor.

Na Figura 18 é possível visualizar que os picos de energia instantânea são mostrados para faixas de frequência semelhantes e, também coincidem com os picos de amplitude no sinal acústico da Figura 15 levando a análise de que haja um certo padrão de comportamento para esse sinal.

A proposta de apresentar dos gráficos das Figuras Figura 15, Figura 17 e Figura 18 é para que, para um mesmo dado acústico, seja possível a verificação de seu comportamento e assim realizar o processo de reconhecimento de padrões. É mostrado pelos quadrados em vermelho, na Figura 19, o comportamento referente ao sinal acústico utilizado como demonstração nessa seção.

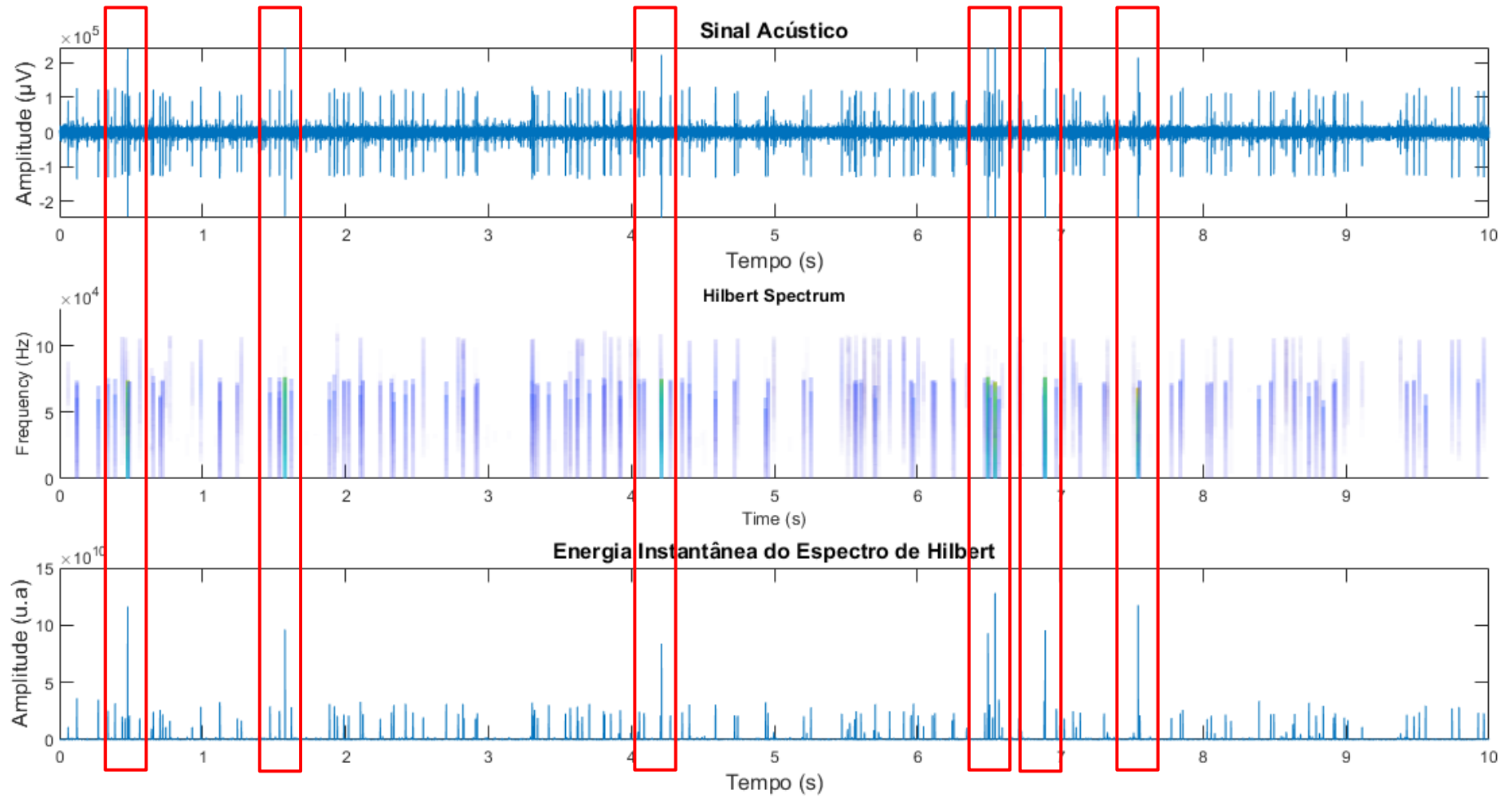
Nota-se que para cada pico de amplitude captada pelo sensor ultrassônico, utilizado para aquisição dos dados acústicos, reflete em um pico de energia instantânea calculado pelo Espectro de Hilbert e também, mostram-se a uma faixa de frequência próximas. A fim de verificar de que esse tipo de comportamento seja um padrão em vários sinais acústicos, aplicou-se o método em um banco de dados com 130 sinais acústicos.

Ao analisarmos os 130 sinais coletados, encontrou-se três padrões distintos de comportamento. Quando aplicamos tensões baixas, o sinal acústico apresentou amplitude menor em comparação com o sinal apresentado na Figura 15. Além disso, a distribuição de amplitudes de energia instantânea foi ampla em todo o espectro de frequências de Hilbert, tendo também amplitude menor em comparação a Figura 18. Este padrão de sinal não apresentou característica de uma DP's como observado em VALENCIA FERREIRA DA LUZ; MARKS, 2019.

Dessa forma, como o ar presente em torno do arranjo ponta-plano não teve ionização suficiente para o rompimento do dielétrico dos isoladores, caracterizamos esse padrão com um sinal de ruído de fundo.

Conforme a tensão aplicada vai sendo elevada, entre 40 e 60 kV, começam os primeiros indícios de surgimento de descargas parciais. O próximo padrão encontrado se assemelha a Figura 15, entretanto com amplitude acústica menor e, conseqüentemente, energia instantânea do espectro de Hilbert.

Figura 19 - Sinal Acústico - Espectro de Hilbert e Energia Instantânea.



Fonte: Autor.

O terceiro padrão encontrado durante a análise dos sinais foi ilustrado na Figura 19. Neste caso, observamos que os picos amplitude acústica capturados pelo sensor são frequentes e apresentavam valores maiores. Estes picos elevados de amplitude são refletidos na energia instantânea de Hilbert, em que foi observado módulos elevados de energia.

Os três padrões encontrados serão ilustrados na seção de Resultados Obtidos.

3.4 CÁLCULO ESTATÍSTICO

O presente trabalho utilizou a energia instantânea de Hilbert como principal variável de análise. Para isso, foi utilizado um processamento preliminar para transformar um grande conjunto de dados com variáveis com excesso de informação, em um pequeno conjunto de dados úteis (BEZERRA, 2004).

Para alcançar essa meta, aplicou-se três equações estatísticas para viabilizar uma avaliação: desvio padrão, amplitude média e amplitude máxima da energia instantânea. A finalidade desta abordagem é realizar uma análise comparativa entre os sinais acústicos e atribuir dentro de um classificador automático, monitorando seus como se comporta estatisticamente as DPs, como proposto por (BEZERRA, 2004).

A Tabela 1 – Dados Estatísticos. mostra os valores estatísticos obtidos a partir do cenário utilizado como exemplo nesta seção, para todos os passos de tensão aplicados no arranjo. A Figura 20 ilustra o crescimento do desvio padrão conforme a tensão aumenta.

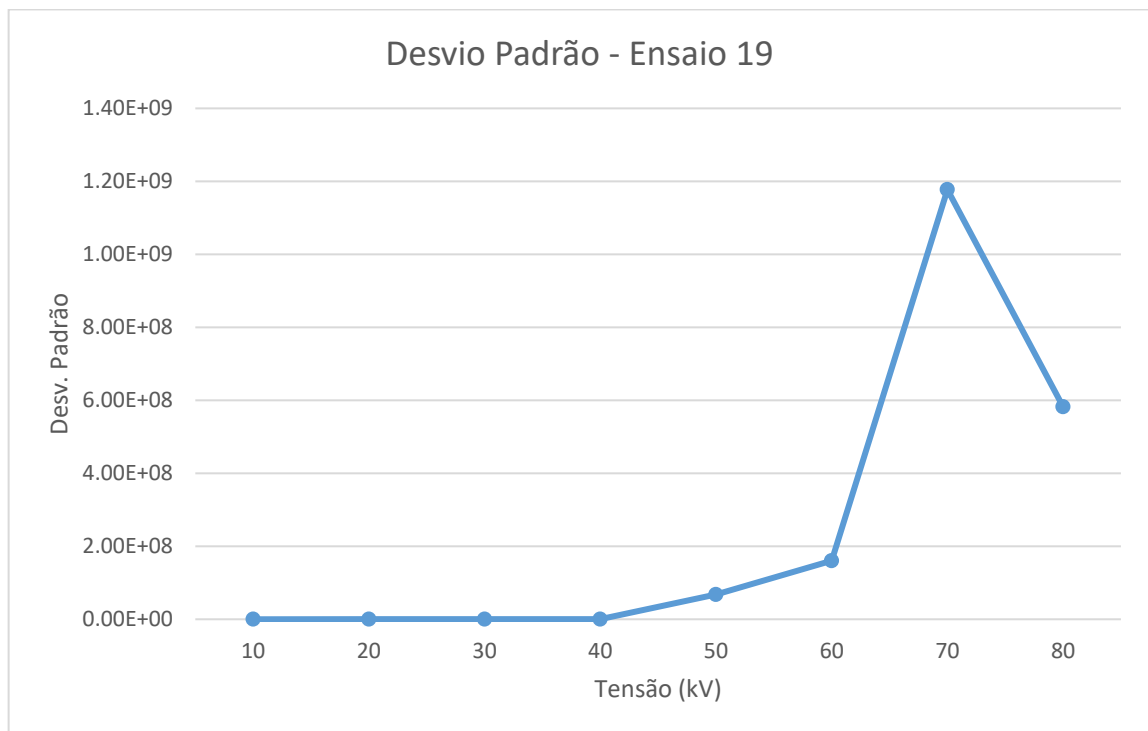
Tabela 1 – Dados Estatísticos.

Ensaio 19			
Tensão (kV)	Desvio Padrão	Amplitude Média	Amplitude Máxima
10	8.35E+03	2.22E+04	1.33E+05
20	1.76E+05	9.55E+04	1.64E+07
30	1.92E+05	4.07E+04	2.62E+07

40	3.35E+05	7.94E+04	8.54E+07
50	6.79E+07	2.35E+07	5.09E+09
60	1.60E+08	3.60E+07	2.78E+10
70	1.18E+09	1.33E+08	1.63E+11
80	5.82E+08	9.69E+07	1.30E+11

Fonte: Autor

Figura 20 – Curva de Desvio Padrão.



Fonte: Autor.

3.5 APLICAÇÃO DA GRNN

Após o cálculo estatístico realizado em cima da energia instantânea do espectro de Hilbert, fez-se necessário a utilização de uma rede neural para classificar os dados extraídos. Como a

GRNN vista em FARIAS, P, 2013; KENJI, 2011 é uma técnica popular muito utilizada para problemas que envolvem um número limitado de dados.

Para realizar a simulação desse método, utilizou-se o comando *newgrnn* do *software* MatLab para realizar a classificação da matriz, de variáveis de entrada. O parâmetro de controle *spread* foi definido em valor 0.25, pois com esse valor a resposta de similaridade entre as variáveis de entrada e de treinamento é satisfatório de acordo com a verificação inicial.

A verificação inicial de GRNN foi realizada da seguinte forma, criou-se uma matriz de treinamento, denominada como P, com 24 vetores contendo as três variáveis estatísticas mencionadas anteriormente. A seguir, criou-se uma segunda matriz, denominada T, com o intuito de mostrar os índices de identificação do fenômeno, ou seja, para cada padrão identificado na HHT, estipulou-se um índice para identificação. O processo de treinamento da GRNN está mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Processo de Treino da GRNN.

Tipo de Fenômeno	Quantidade de Sinais utilizados para Treinamento	Índice de Identificação
Ruído de Fundo	8	1
Descarga Moderada	8	2
Descarga Severa	8	3

Fonte: Autor

O processo inicial é finalizado assim que se usa os sinais de treinamento como sinais de entrada para verificar o funcionamento da GRNN, para isso. Conta-se que a porcentagem de acerto seja 100%.

Para a próxima fase de classificação, usou-se o mesmo processo de classificação, mostrado na Tabela 2 com a arquitetura mostrada na Figura 11. Assim, foram processados 130 sinais do banco de dados para se obter a identificação do fenômeno presente no sinal. O resultado que se espera é um vetor de saída com três valores que vão de zero até um. A Figura 21 mostra um possível resultado.

Figura 21 – Resultado possível para GRNN.

$$Saída = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 0.3 \\ 0.5 \end{bmatrix}$$

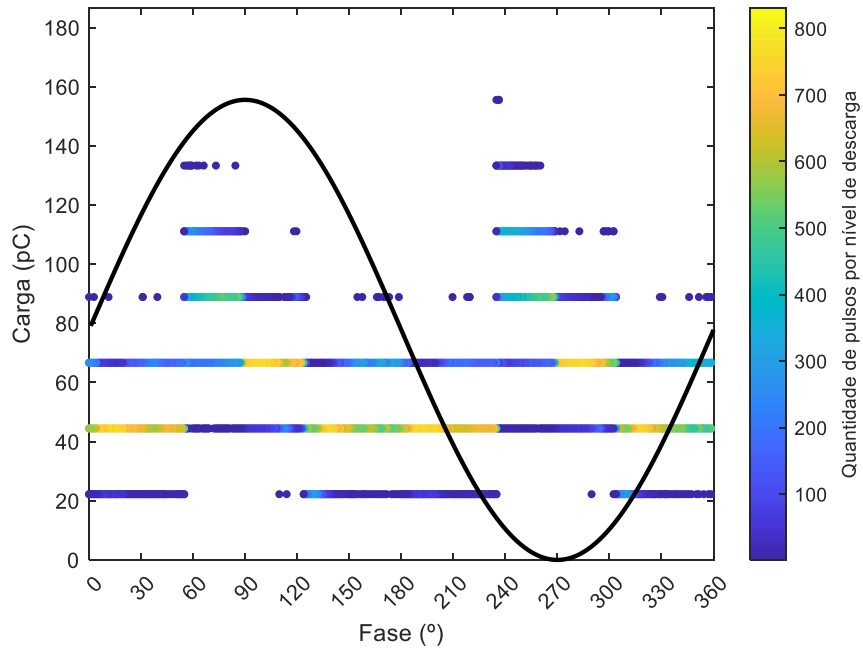
Fonte: Autor.

Nota-se que, no exemplo acima, o somatório dos índices é um. Para ajustar melhor esse valor, é importante ajustar o valor de *spread* para que os resultados sejam mais precisos e converjam a um resultado satisfatório (KENJI, 2011). Para a realização desse trabalho, utilizou-se um *spread* de 0,25 para ajustar a precisão dos resultados.

3.6 CORRELAÇÃO COM O MÉTODO ELÉTRICO

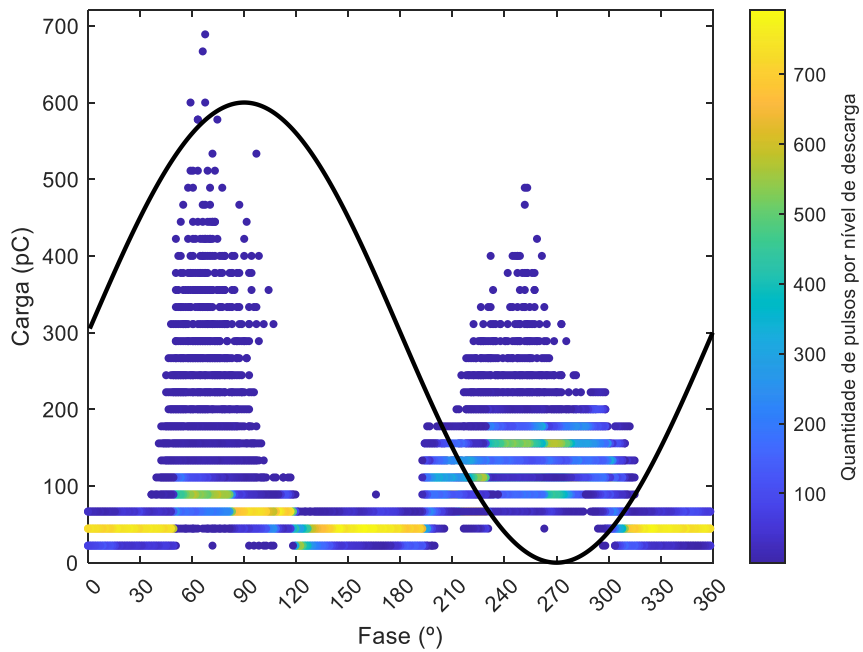
Como ferramenta auxiliar para visualizar o comportamento das DPs, foi utilizado o método elétrico das medições, realizadas também pelo LEAT. Estes ensaios mostram a quantidade de carga, medida em pC (pico Coulombs), para cada fase de tensão aplicada, seja no semiciclo positivo ou negativo (DE MORAIS et al., 2022). As Figuras Figura 22, Figura 23 e Figura 24 ilustram o ensaio elétrico para os três fenômenos descritos na Tabela 2 – Processo de Treino da GRNN.

Figura 22 – Ensaio Elétrico de Ruído de Fundo.



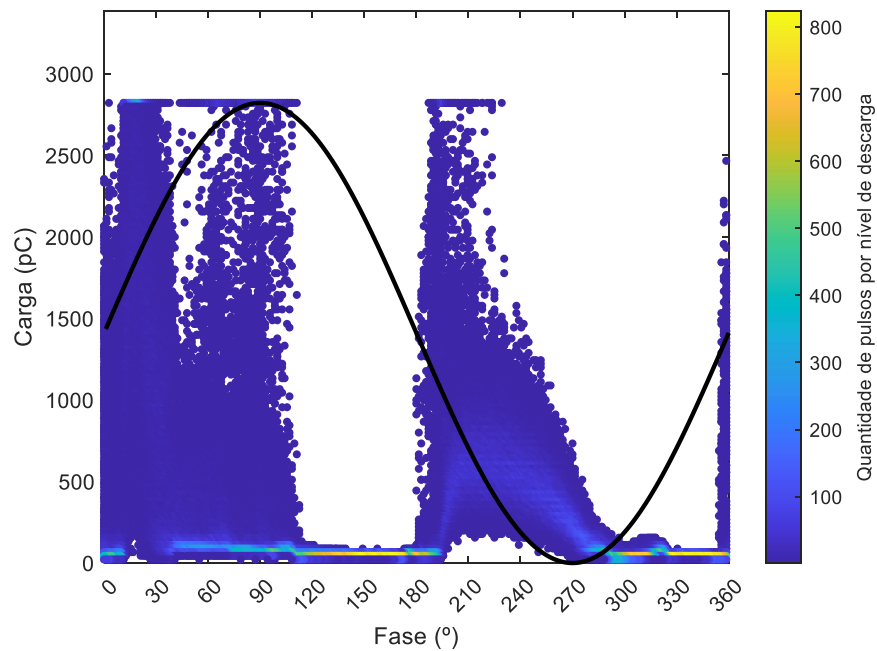
Fonte: Autor.

Figura 23 – Ensaio Elétrico de Descarga Moderada.



Fonte: Autor.

Figura 24 – Ensaio Elétrico para Descarga Severa.



Fonte: Autor.

Nota-se que, a tensão aplicada no arranjo influencia significativamente no método de ensaio elétrico, pois ele apresenta uma maior quantidade de pulsos de carga e também em sua quantidade de pulsos por fase (como pode ser observado pelo gráfico de cores) (DE MORAIS et al., 2022). Para este trabalho, utilizou-se a correlação do método elétrico para confirmar a ocorrência do fenômeno de DPs e atribuir um valor prévio antes de ser processada pela GRNN.

3.7 CONCLUSÕES FINAIS

Nesta seção foi mostrado o procedimento na realização deste trabalho, bem como são implementados de acordo com a revisão bibliográfica da seção 0. Cabe ressaltar que a amplitude de energia instantânea é a chave principal para o reconhecimento de padrões e, através dela, será implementado os outros procedimentos assim, validando sua análise.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA TRANSFORMADA HILBERT-HUANG

A análise dos espectros de frequência em cada sinal acústico foi realizada usando a metodologia descrita na seção 2.6. Nela, primeiramente foi feita a análise visual dos espectros de frequência em cada sinal acústico medido e também, foi possível verificar a amplitude de energia instantânea do espectro. Esta variável foi o principal método utilizado para reconhecimento de padrões e tendências dos sinais acústicos.

Para o banco de dados de 130 sinais acústicos, foram encontrados três padrões de comportamento. O primeiro padrão encontrado foi para baixas tensões aplicadas, na faixa de 10 a 40 kV em média, o sinal apresentou baixa amplitude sonora de acordo com o dispositivo de medição acústica, o espectro de frequências não apresentava um padrão aparente, com disposição de amplitudes de energia instantânea por todas as faixas de frequência de amplitude menor em comparação com o padrão mostrado na Figura 15. O primeiro padrão pode ser mostrado na Figura 26 e não apresenta nenhuma característica de descarga parcial, ou seja, pode ser caracterizado como ruído de fundo.

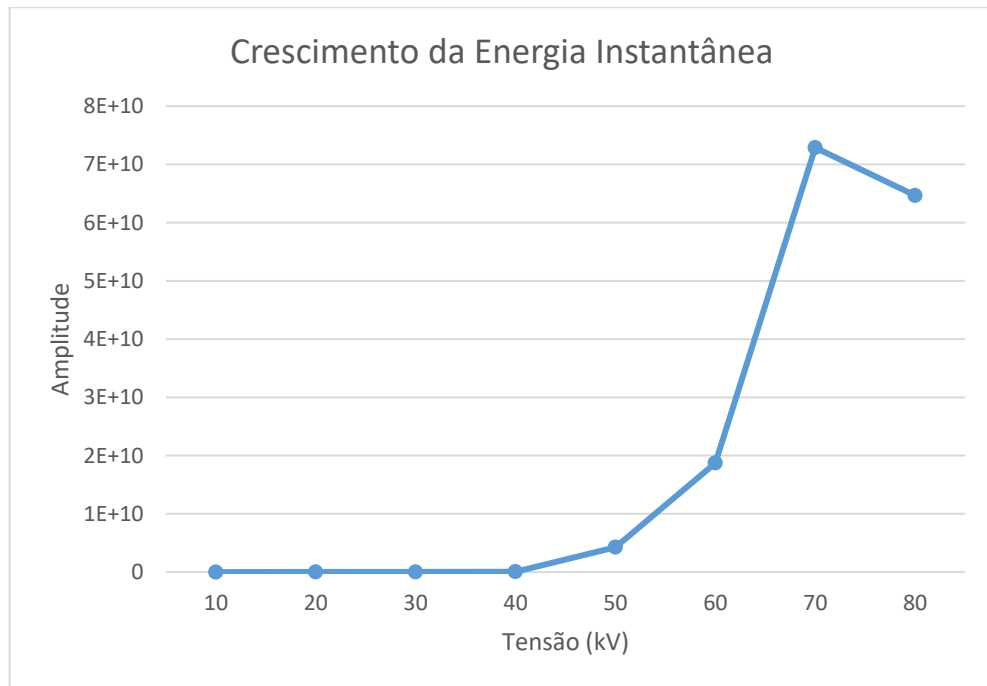
O segundo ocorre em tensões entre 40 e 60 kV e apresenta os primeiros picos de amplitude captadas pelo Sonaphone. O espectro de Hilbert indica que esses picos de amplitude estão concentrados em uma faixa de frequência semelhante, em torno dos 65 a 80 kHz. A energia instantânea do espectro apresenta um módulo maior que o padrão de comportamento anterior, indicando a ocorrência de DPs em momentos iniciais, denominada neste trabalho como descarga moderada, mostrada na Figura 27.

O terceiro padrão encontrado, é para altas tensões que variam de 60 kV até a tensão de ruptura do dispositivo de proteção. Para alguns casos, esse padrão ocorre antes da faixa de tensão especificada devido ao cenário em que está sendo medido, ou seja, se o sistema está sendo medido com poluição salina, as DPs podem ocorrer antes da faixa de tensão aplicada dita anteriormente (DE MORAIS et al., 2022). Como se trata de uma DP, as características da HHT são semelhantes ao segundo padrão, porém diferem em amplitude, como ilustra a Figura 28.

Para ilustrar a dimensão da energia instantânea, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os pontos máximos de energia instantânea para cada valor de tensão

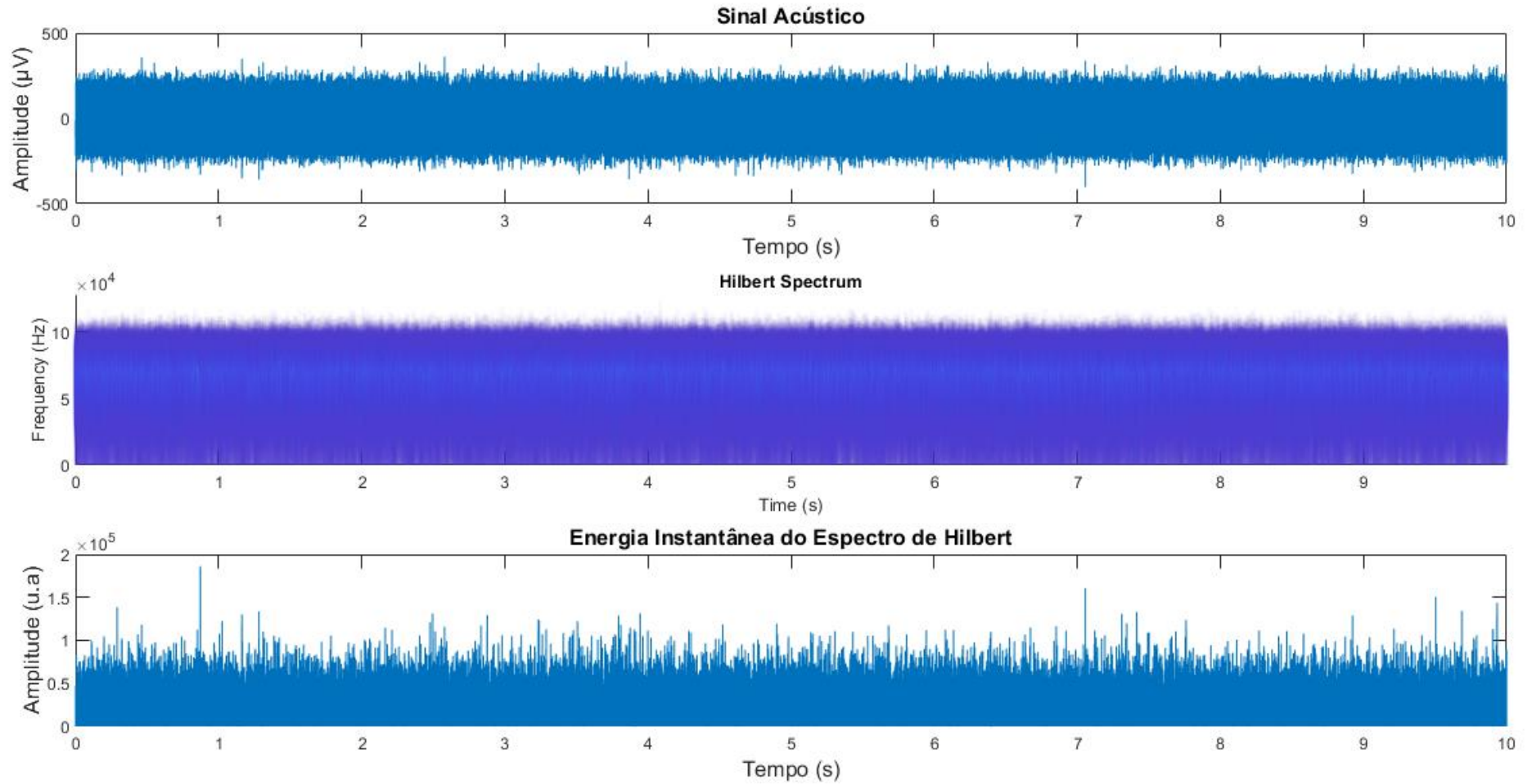
aplicada no arranjo, nota-se que há uma grande diferença quando aplicamos grandes níveis de tensão, ou seja, as descargas parciais se tornam frequentes e cada vez mais severas.

Figura 25 – Crescimento de Energia Instantânea por nível de tensão.



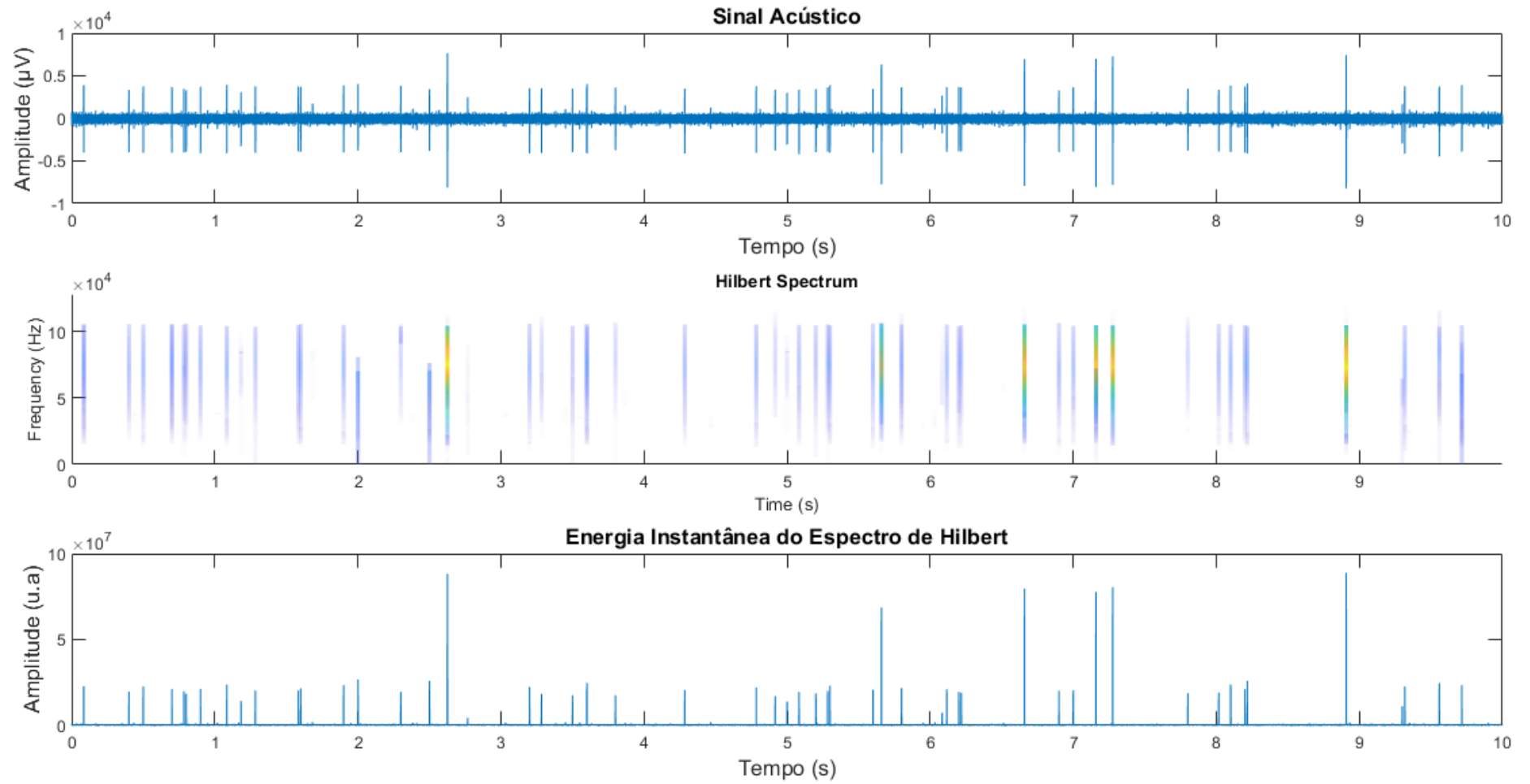
Fonte: Autor.

Figura 26 – Padrão 1: Ruído de Fundo. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea.



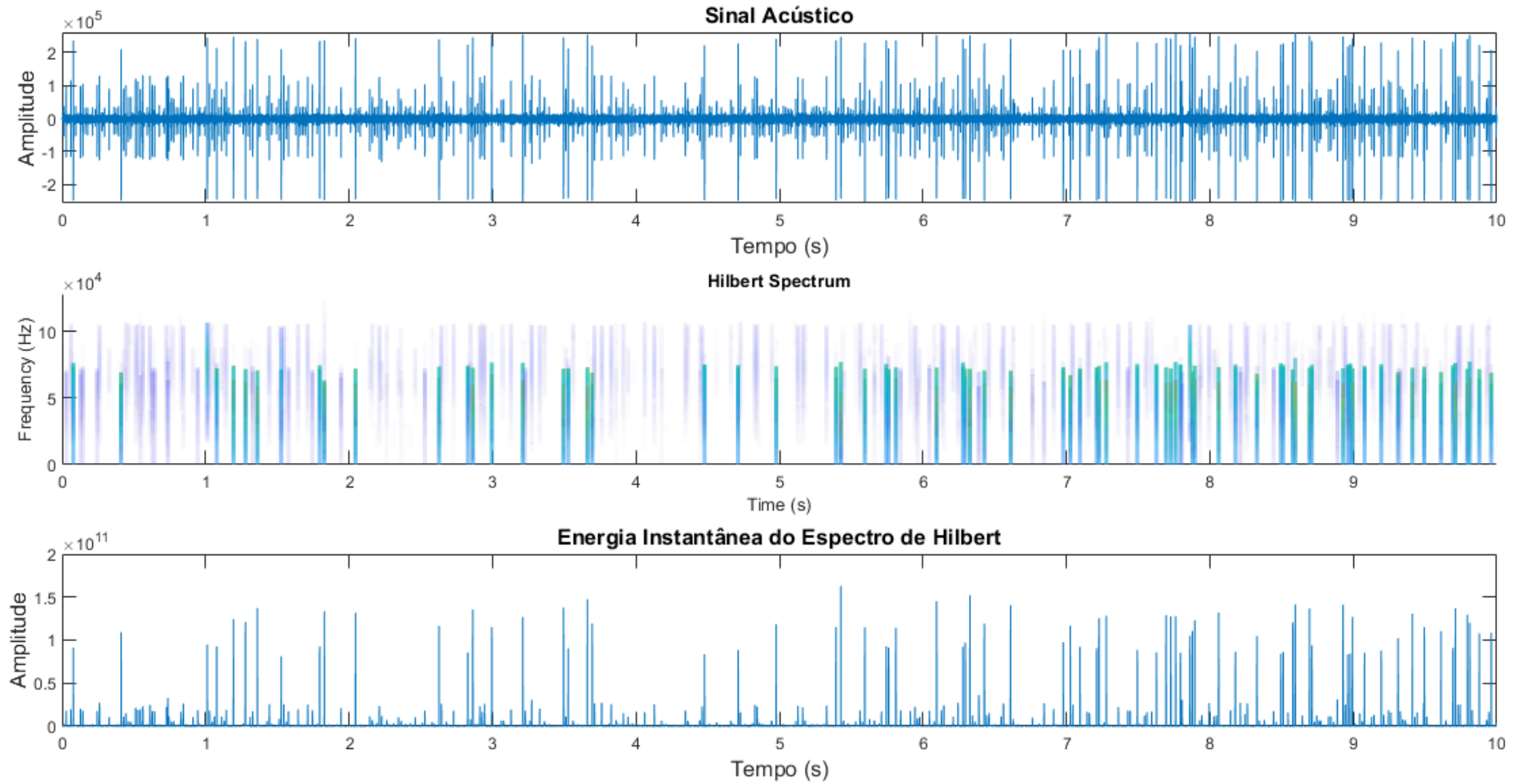
Fonte: Autor.

Figura 27 - Padrão 2: Descarga Moderada. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea.



Fonte: Autor.

Figura 28 - Padrão 3: Descarga Severa. Sinal acústico, Espectro e Energia Instantânea.

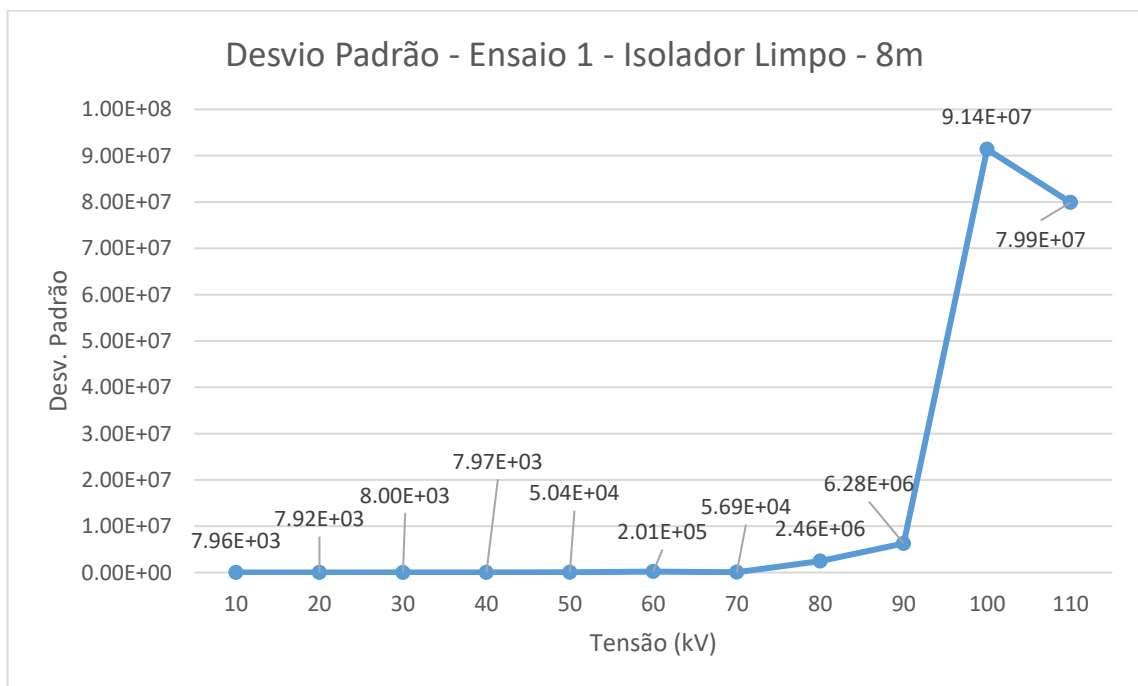


Fonte: Autor.

4.2 RESULTADOS ESTATÍSTICOS

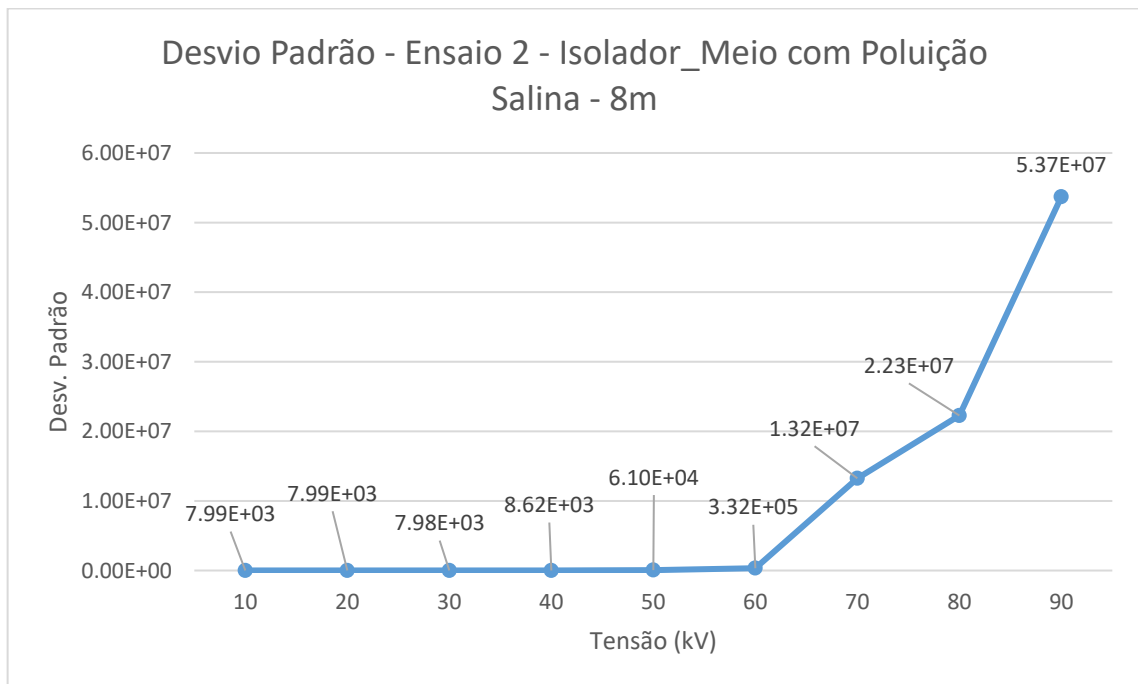
Como dito anteriormente, o intuito do cálculo estatístico seria transformar um grande conjunto de dados em um conjunto de dados menor, a fim de otimizar o processamento computacional. Para isso, usou-se os dados da energia instantânea do espectro de Hilbert como variável de prova para esse processamento. Então, assim como a Figura 20 ilustra, foram realizados os cálculos em todos os ensaios do bando de dados, o quais são mostrados nas Figuras Figura 29 a Figura 43.

Figura 29 – Curva de Desvio Padrão – Ensaio 1.



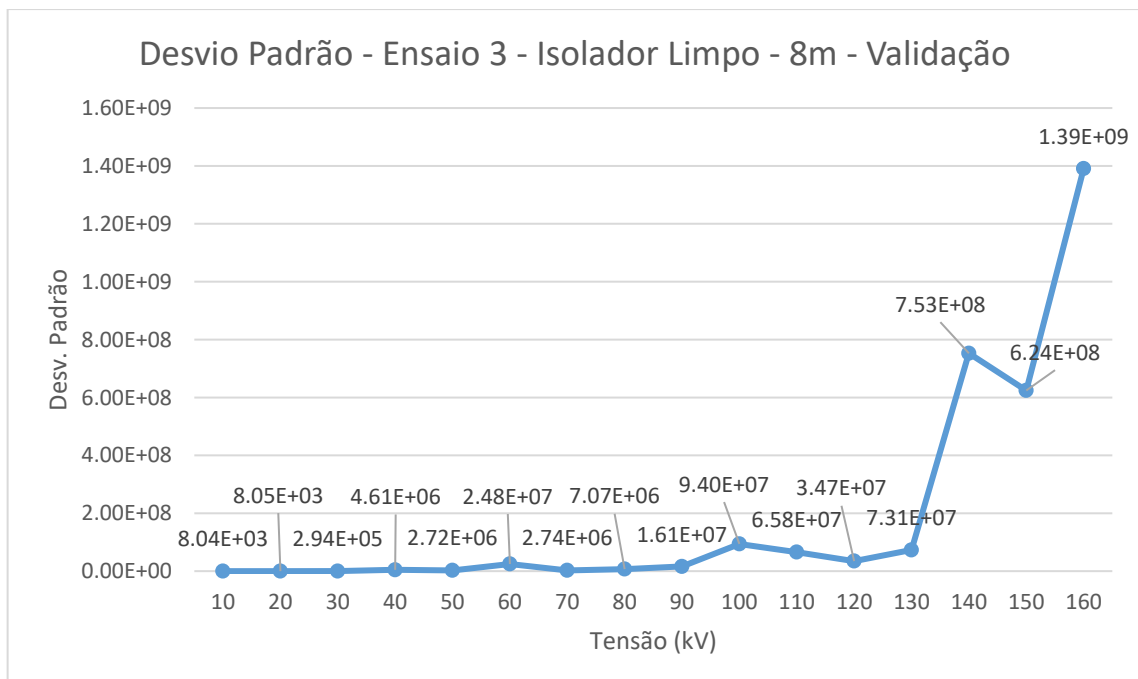
Fonte: Autor.

Figura 30 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 2.



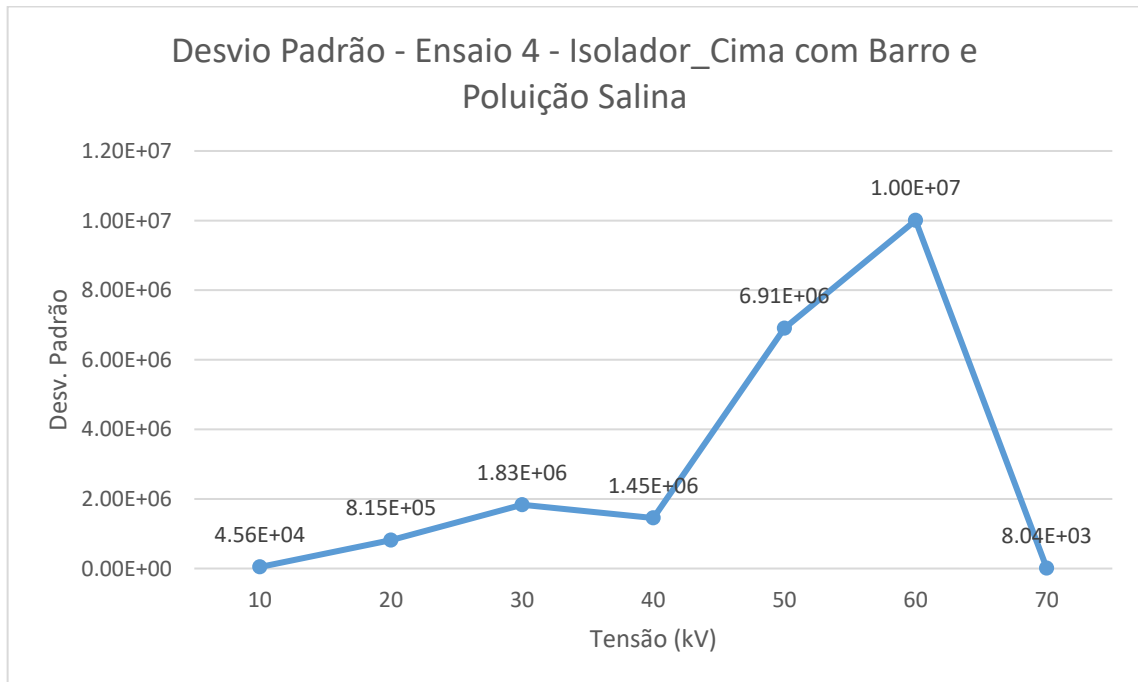
Fonte: Autor.

Figura 31 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 3.



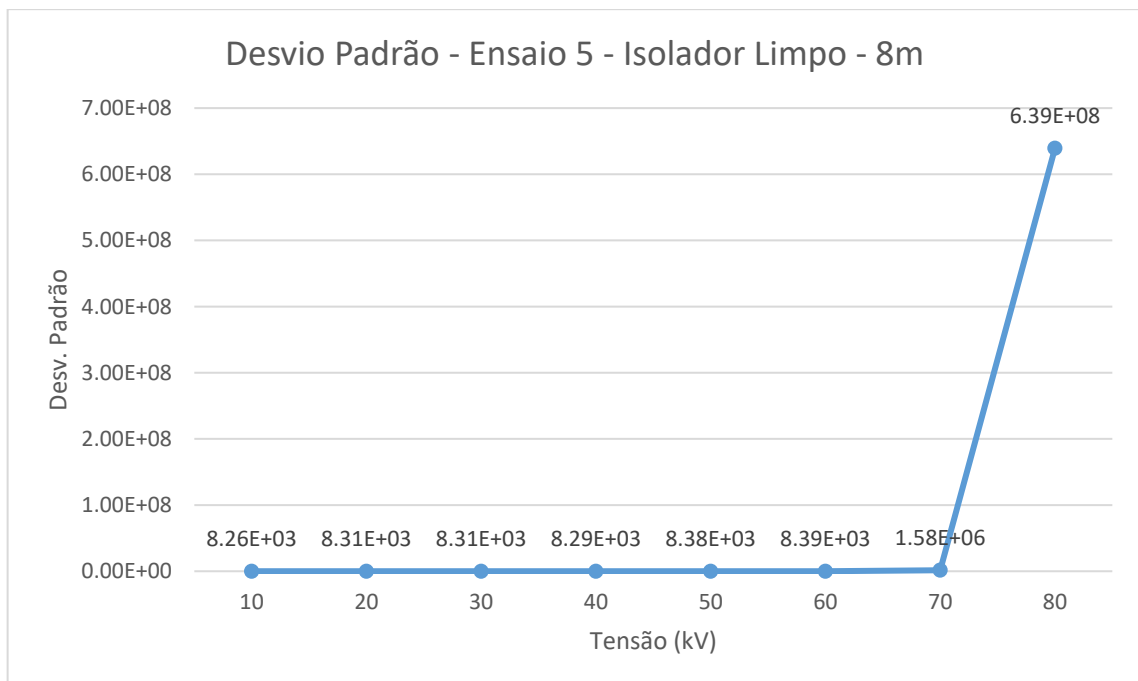
Fonte: Autor.

Figura 32 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 4.



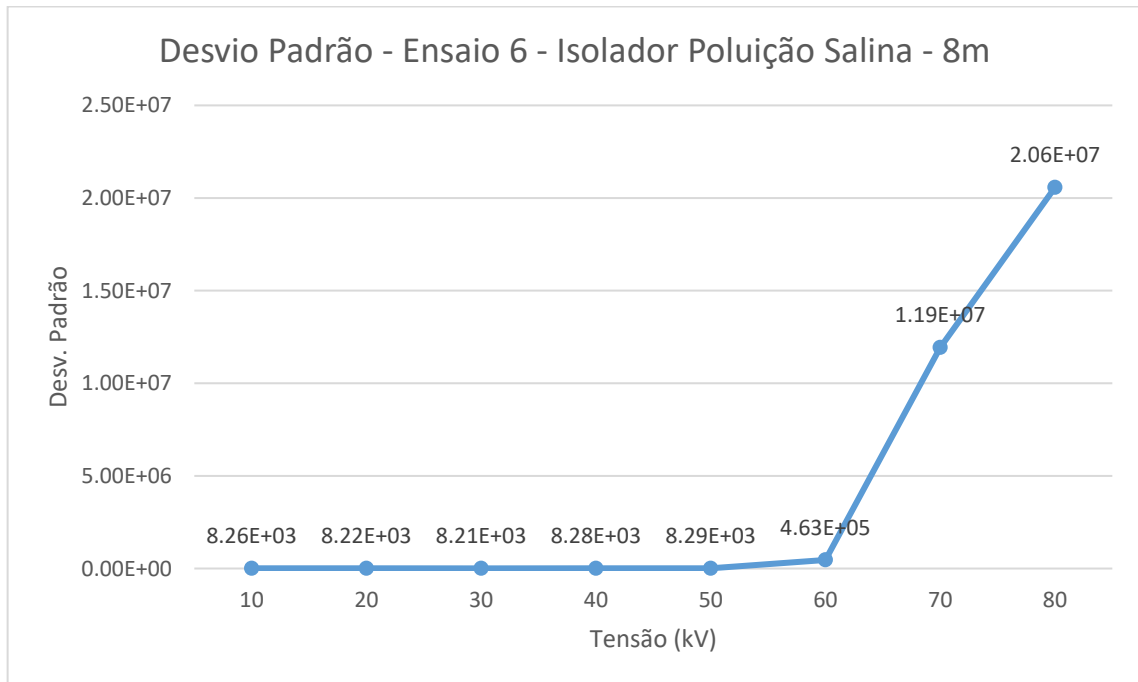
Fonte: Autor.

Figura 33 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 5.



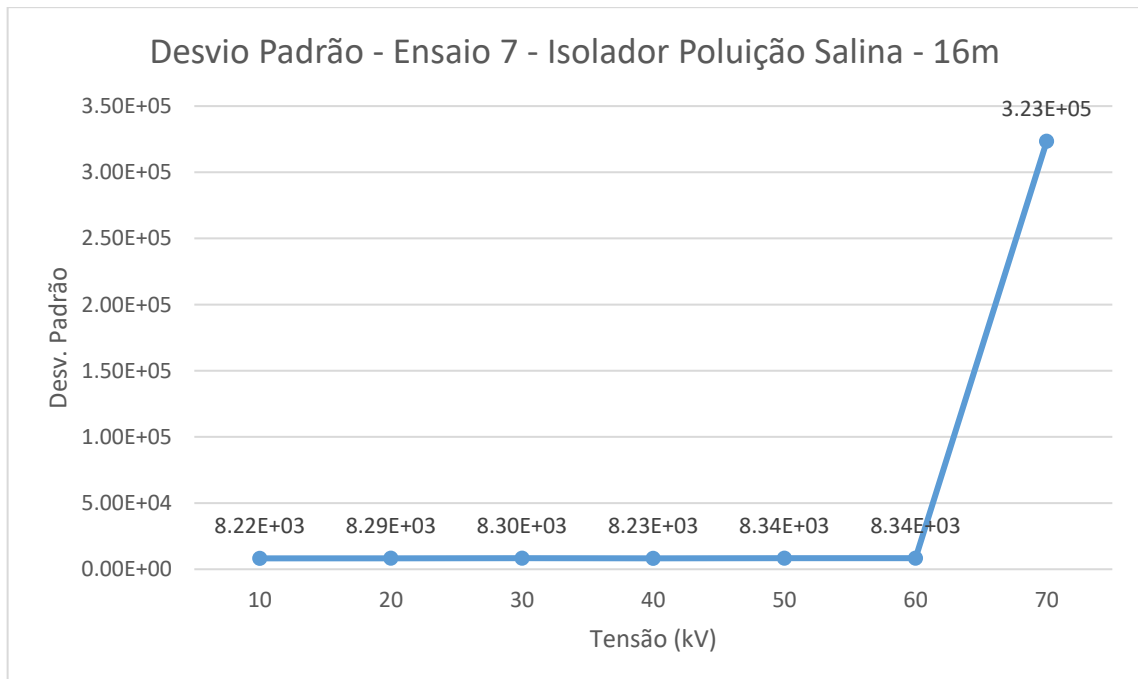
Fonte: Autor.

Figura 34 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 6.



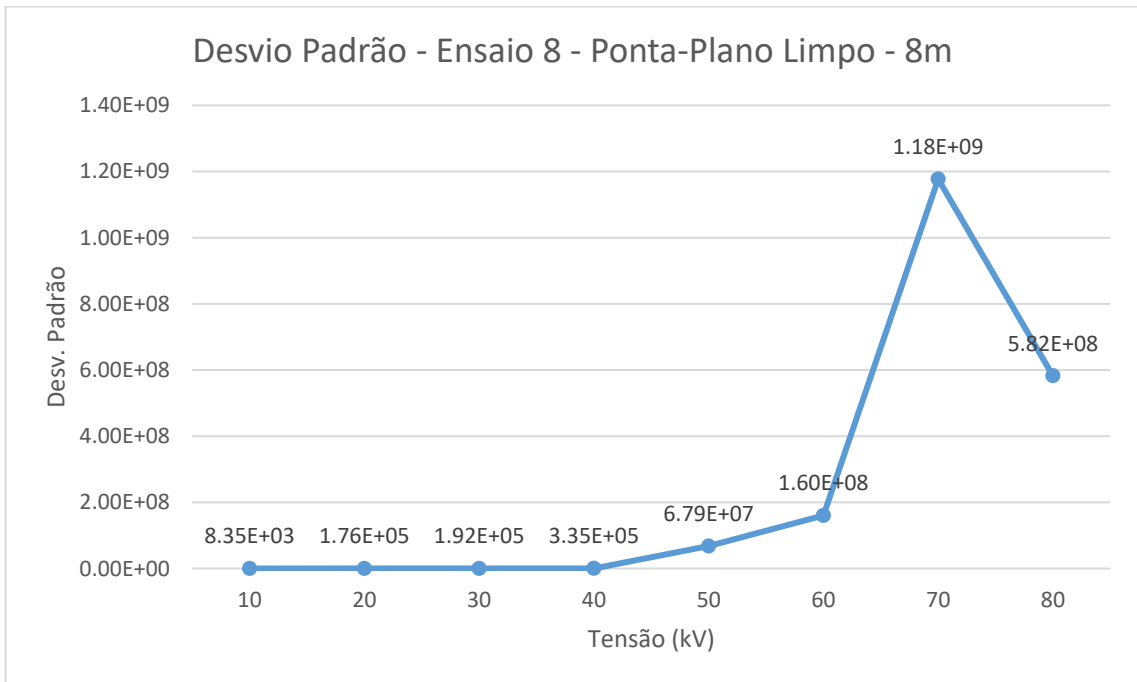
Fonte: Autor.

Figura 35 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 7.



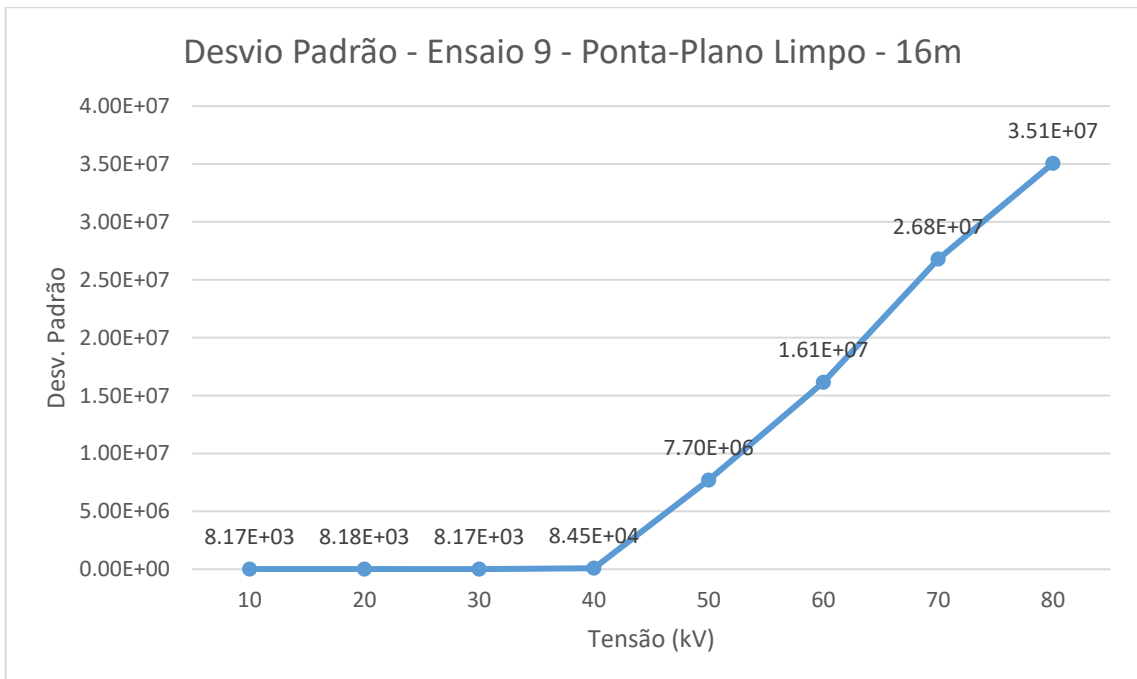
Fonte: Autor.

Figura 36 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 8.



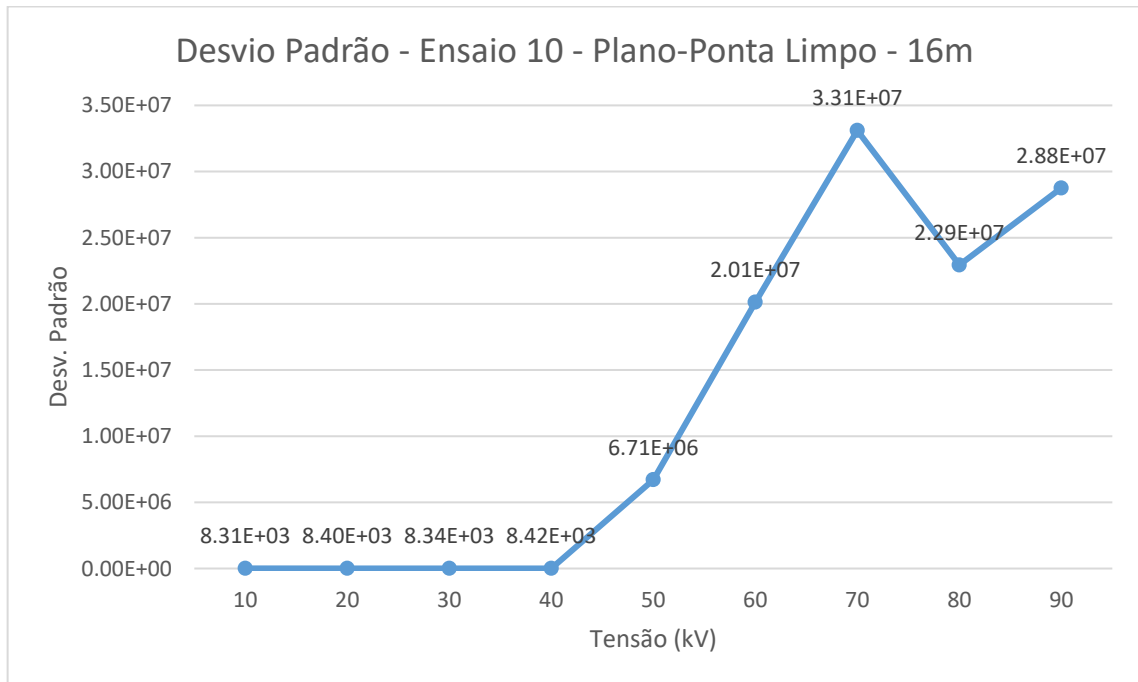
Fonte: Autor.

Figura 37 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 9.



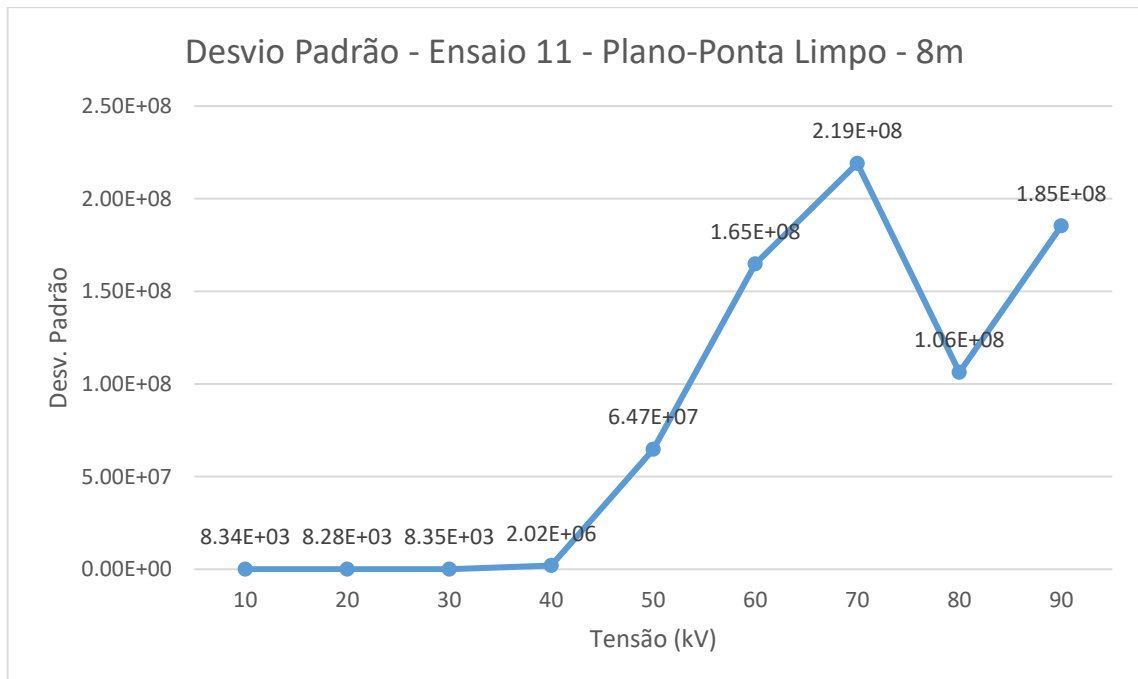
Fonte: Autor.

Figura 38 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 10.



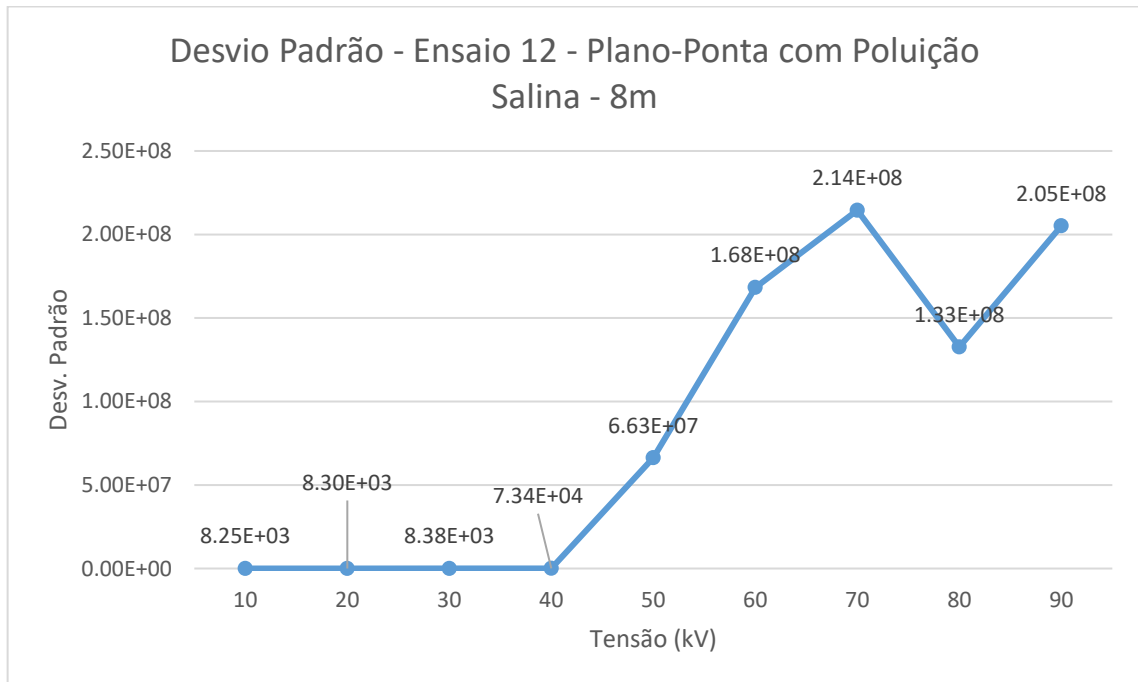
Fonte: Autor.

Figura 39 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 11.



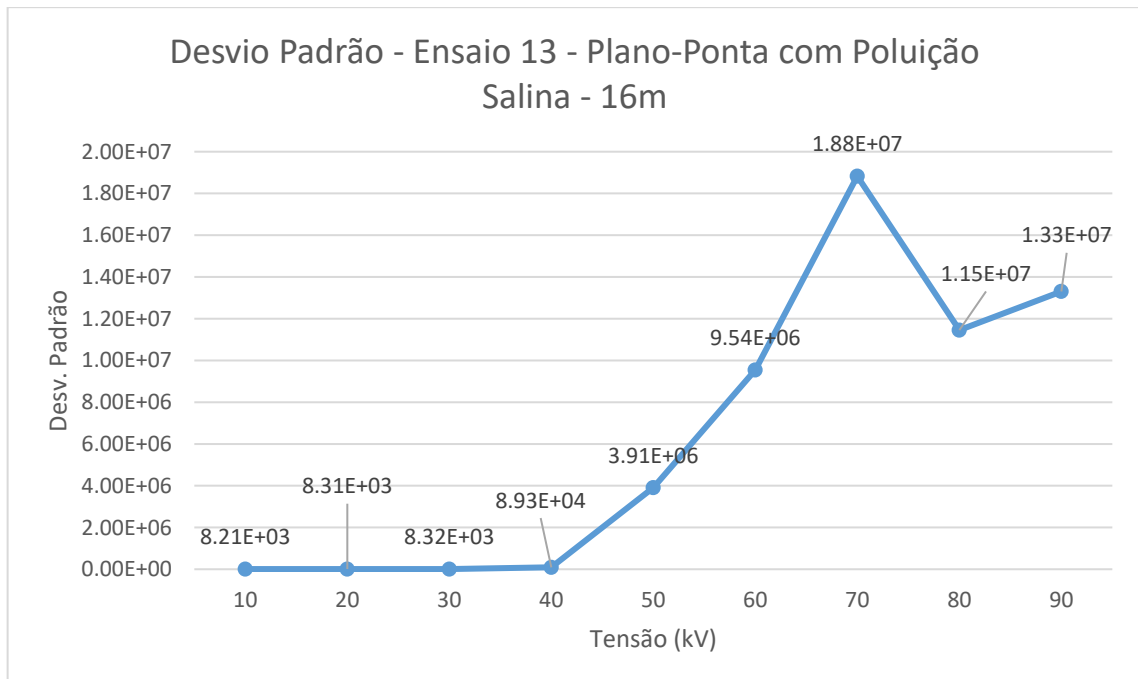
Fonte: Autor.

Figura 40 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 11.



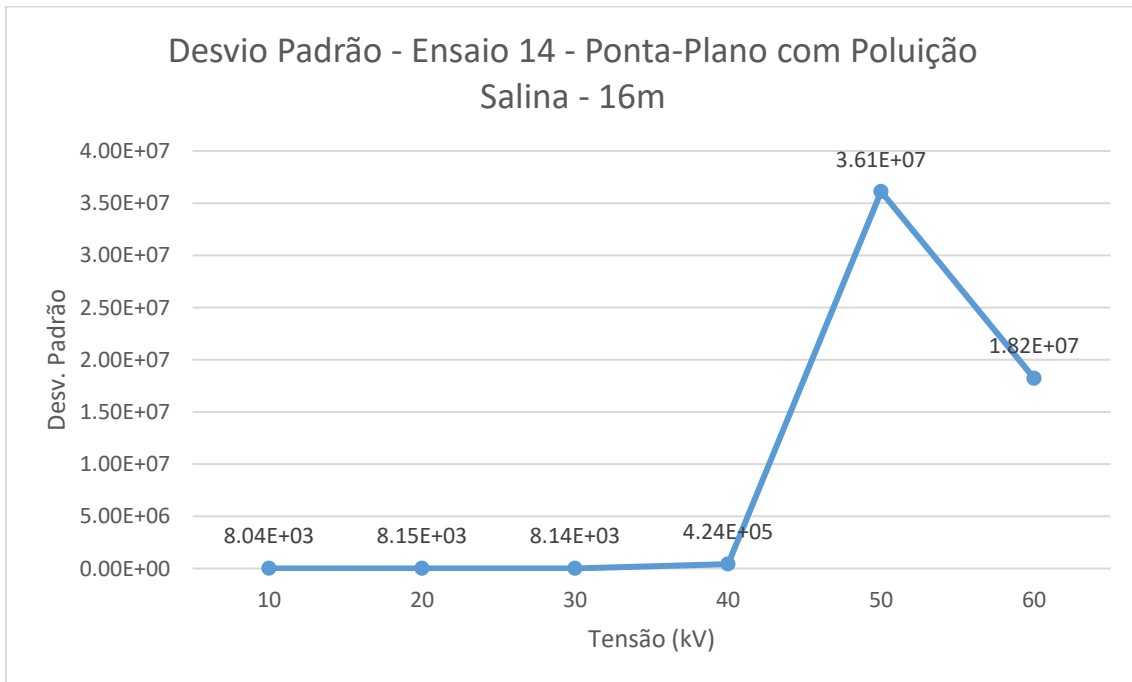
Fonte: Autor.

Figura 41 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 13.



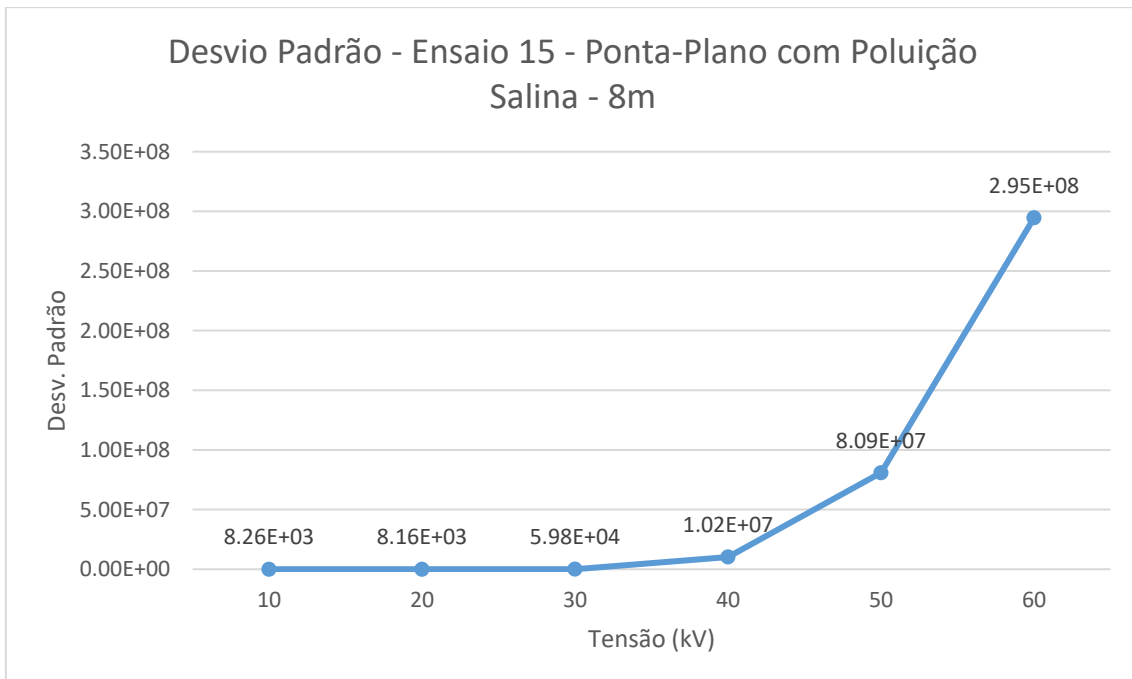
Fonte: Autor.

Figura 42 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 14.



Fonte: Autor.

Figura 43 - Curva de Desvio Padrão – Ensaio 15.



Fonte: Autor.

Com base nas curvas apresentadas, notamos que há um padrão de comportamento conforme a tensão aplicada no arranjo aumenta. A curva característica de crescimento de energia instantânea do Espectro de Hilbert mostrada na Figura 25 é refletida na curva de desvio padrão, uma vez que conforme as DPs produzem picos de energia instantânea, ou estatisticamente falando, distam valores do valor médio, o desvio padrão daquele sinal será maior. Sendo assim, cria-se um banco de dados com padrões e tendências que se equiparam aos padrões vistos pela HHT, agregando mais valor ao processo de reconhecimento de padrões tendo ainda mais duas variáveis estatísticas que complementam essa análise.

4.3 CLASSIFICAÇÕES OBTIDAS

Primeiramente, foi feito a validação da GRNN através do *software* MatLab com o intuito de verificar se as variáveis de treino estavam corretas para a generalização. Primeiramente, escolheu-se 24 variáveis de maneira aleatória do banco de dados mencionado até então, como mostra a Tabela 2 – Processo de Treino da GRNN.

Colocando as mesmas variáveis de treino como variáveis de entrada, a GRNN deve ter 100% de acerto para essa fase inicial, como foi averiguado. Após esse primeiro teste, realizou-se o teste padrão com as mesmas 24 variáveis de treino adotando o valor de *spread* de 0.25. Os resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados obtidos da GRNN.

Sinais de treino	Sinais totais	Acertos	Percentual de acertos (%)
24	130	128	98,48

Fonte: Autor

Nota-se que a GRNN apresentou resultados mais do que satisfatórios, mostrando que a precisão da GRNN para a verificação de padrões em descargas parciais é uma ótima ferramenta de análise. Tendo os padrões de comportamento evidentes com a HHT, a tabela 4 mostra a porcentagem de acerto da GRNN por condição de padrão.

Tabela 4 – Acertos para cada padrão encontrado.

Índice Identificador	Sinais totais	Acertos	%
1	49	49	100
2	32	32	100
3	49	47	95,92

Fonte: Autor

4.4 CONCLUSÕES FINAIS

Nesta seção foi mostrado os resultados obtidos desse trabalho, em como foram analisados cada evento de medição e quais variáveis foram utilizadas para análise e classificação do evento que está ocorrendo no sinal acústico. A HHT se mostrou uma ótima ferramenta como análise de sinais não lineares e não estacionários, que junto com a GRNN mostraram ser ótimas medidas para detecção de descargas parciais, pois seus padrões de comportamento e tendência são bem distintos.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou assuntos que dizem respeito ao estudo da degradação da isolação de equipamentos isoladores, como os próprios isoladores, para-raios, entre outros. A perfeita condição de operação desses equipamentos é vital para o funcionamento do sistema elétrico como um todo, evitando rompimentos de serviço.

As técnicas abordadas nesse trabalho visam detectar o fenômeno de descargas parciais através da medição acústica, para isso, foi desenvolvido um sistema de arranjo ponta-plano pelo Laboratório de Alta e Extra-Alta tensão (LEAT) para simular o evento e garantir que tenhamos uma base de dados suficiente para ser desenvolvido um método eficiente para a detecção e classificação na prática.

O uso da HHT aplicado a metodologia acústica foi uma ótima ferramenta para reconhecimento de padrões uma vez que são dados não-lineares e não-estacionários, como mostrado em WANG et al., 2006. A análise da energia instantânea e faixas de frequência mostraram que era evidente a forma que os sinais de descargas parciais se comportavam em tempo e frequência, tornando o método válido para melhores análises.

O uso da GRNN através do cálculo estatístico mostrou um resultado satisfatório para o experimento, com uma alta taxa de acerto para os dados acústicos, evidenciando também a distinção dos eventos.

Ademais, os bons resultados obtidos através da elaboração deste trabalho mostram uma forte ferramenta para o problema da degradação da isolação dos equipamentos elétricos, em que a medição acústica combinada com uma boa análise computacional pode garantir uma manutenção preditiva do equipamento sob análise.

REFERÊNCIAS

ANTONY, D.; PUNEKAR, G. S. **Noniterative Method for Combined Acoustic-Electrical Partial Discharge Source Localization**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 33, n. 4, p. 1679–1688, 1 ago. 2018.

ATTOH-OKINE, N. O.; HUANG, N. E. **The Hilbert-Huang transform in engineering**. [s.l.] Taylor & Francis, 2005.

BESHARATIFARD, H. et al. **Detection and Analysis of Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers Using Low-Cost Acoustic Sensors**. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 12, n. 6, 1 mar. 2022.

BEZERRA, J. M. D. B. **Caracterização de Atributos de Sinais para Utilização de Técnicas de Reconhecimento de Padrões na Avaliação do Isolamento de Instalações e de Equipamentos Elétricos**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, 2004.

CAMPBELL, S. R. et al. **Practical on-line partial discharge tests for turbine generators and motors**. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, v. 9, n. 2, p. 281–287, 1994.

CUENCA, W. M. H. **Caracterização dos Sinais de Descargas Parciais em Equipamentos de Alta Tensão a Partir de Modelos Experimentais**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

FARIAS, P. E. **Deteção e classificação de transitórios em redes de distribuição para identificação de faltas de alta impedância**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

DE MORAIS, A. M. et al. **Medição de Emissões Acústicas Provenientes de Descargas Parciais em Sistema Ponta-Plano e Correlação com o Método Elétrico**. [S.l.]. 2022.

FLORENTINO, M. T. B. **Caracterização das condições operacionais de isoladores poliméricos usando atributos das descargas corona**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, 2019

GAO, C. et al. **Partial discharge localization inside transformer windings via fiber-optic acoustic sensor array**. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 34, n. 4, p. 1251–1260, 1 ago. 2019.

HAQUE, S. K. M. et al. **Application and suitability of polymeric materials as insulators in electrical equipment.** *Energies* MDPI AG, 2 maio 2021.

HAUSMANN, V. **Interpretação gráfica de descargas parciais através da análise de sinais de ultrassom.** [s.l: s.n.].

HUANG, N. E. et al. **The empirical mode decomposition and the Hubert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis.** *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 454, n. 1971, p. 903–995, 1998.

HUANG, N. E. **Hilbert-Huang Transform an its Application.** 2. ed. [s.l.] World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2014.

KENJI. **Previsão de Carga Multinodal Utilizando Redes Neurais de Regressão Generalizada.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual Paulista, 2011.

MACÊDO, E. **Metodologia Para a Classificação de Descargas Parciais Utilizando Redes Neurais Artificiais.** Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, 2014.

MACHADO, R. P.; KOWALSKI, E. L. **Metodologia para a inspeção instrumentalizada de isoladores de pino de redes de distribuição por RFI e ultrassom.** 2011.

MARKALOUS, S. M.; TENBOHLEN, S.; FESER, K. **Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers Detection and Location of Partial Discharges in Power Transformers using Acoustic and Electromagnetic Signals.** [s.l: s.n.].

PALITÓ, T. **Detecção acústica de descargas parciais com transdutor piezoelétrico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, 2015.

PEIXOTO, W. **Análise do Efeito Corona para Diagnóstico de Isoladores Poliméricos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, 2011.

RATHOD, V. B.; KUMBHAR, G. B.; BHALJA, B. R. **Partial Discharge Detection and Localization in Power Transformers based on Acoustic Emission: Theory, Methods, and Recent Trends.** *IETE Technical Review (Institution of Electronics and Telecommunication Engineers, India)* Taylor and Francis Ltd., 2022.

SANTOS, V. V. DOS et al. **An Application of Wavelet Analysis to Assess Partial Discharge Evolution by Acoustic Emission Sensor. Engineering Proceedings**, v. 2, n. 1, 2020a.

SANTOS, F. L. et al. **Aplicação da Transformada de Hilbert-Huang em um Sistema Inteligente de Classificação de Sinais de Ensaio Não Destrutivo por Ultrassom. Associação Brasileira de Inteligência Computacional - ABRICOM**, 16 ago. 2020b.

SANTOS, L. **Classificação e Modelagem de Fatores de Influência sobre Inspeções Termográficas em Ambientes Desabrigados. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá**, 2012.

TANG, Y.-W.; TAI, C.-C.; SU, C.-C. **Data Analysis Using Hilbert-Huang Transform for Partial Discharge in Low Voltage Motors. 2007.**

THOMAZINI, D. **Universidade de são paulo escola de engenharia de são carlos departamento de engenharia elétrica. Tese (Doutorado e Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo**, 2009.

THUNGSUK, N. et al. **The Investigation of Detect Position of Partial Discharge in Cast-Resin Transformer Using High-Frequency Current Transformer Sensor and Acoustic Emission Sensor. Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 3, 1 fev. 2022.

WANG, X. et al. **Analysis of partial discharge signal using the Hilbert-Huang Transform. IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 21, n. 3, p. 1063–1067, jul. 2006.

NUP: 23081.019674/2023-25

Prioridade: Normal

Homologação de ata de defesa de TCC e estágio de graduação
125.322 - Bancas examinadoras de TCC: indicação e atuação

COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
8	Ata de defesa de trabalho de conclusão de curso (TCC) (125.322)	TCC_ARTUR_DALA_NORA_FINAL.pdf

Assinaturas

28/02/2023 15:46:17

AÉCIO DE LIMA OLIVEIRA (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)
07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP

01/03/2023 15:05:32

DIEGO BERLEZI RAMOS (PROFESSOR DO MAGISTÉRIO SUPERIOR)
07.37.00.00.0.0 - DEPARTAMENTO DE ELETROMECÂNICA E SISTEMAS DE POTÊNCIA - DESP

1960



Código Verificador: 2417975

Código CRC: d50b0fbf

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

