

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**  
**COORDENAÇÃO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**IDENTIFICAÇÃO, MENSURAÇÃO E LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE  
DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM BASE  
EM RESULTADOS DE ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

**HUDSON DE PAULA ROMUALDO**

**GOIÂNIA**  
**FEVEREIRO 2014**

**HUDSON DE PAULA ROMUALDO**

**IDENTIFICAÇÃO, MENSURAÇÃO E LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DE  
DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA COM BASE  
EM RESULTADOS DE ENSAIOS DE EMISSÃO ACÚSTICA**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - UFG, como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Área de Concentração: Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito.

Goiânia

2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação na (CIP)  
GPT/BC/UFG**

R767i Romualdo, Hudson de Paula.  
Identificação, mensuração e localização tridimensional de descargas parciais em transformadores de potência com base em resultados de ensaios de emissão acústica [manuscrito] / Hudson de Paula Romualdo. - 2014. 123 f. : il.

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Leonardo da Cunha Brito.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação, 2014.

Bibliografia.  
Inclui lista de figuras, abreviaturas, siglas e tabelas.  
Apêndices.  
1. Transformador de potência 2. Transformador de potência – Descarga elétrica 3. Método de emissão acústica 4. Descargas parciais – Emissão acústica I. Título.

CDU: 621.314



## FOLHA DE APROVAÇÃO

**“Identificação, mensuração e Localização Tridimensional de descargas Parciais em Transformadores de Potência com Base em Resultados de Ensaios de Emissão Acústica”**

**HUDSON DE PAULA ROMUALDO**

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos senhores:

Leonardo da Cunha Brito – Orientador (EMC/UFG)

Leonardo Rodrigues Araújo Xavier de Menezes - UnB

Adson Silva Rocha – IFGoiano

Cacilda de Jesus Ribeiro – EMC/UFG

Goiânia, 27 de fevereiro de 2014

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR AS TESES E DISSERTAÇÕES ELETRÔNICAS (TEDE) NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do material bibliográfico:**       **Dissertação**       **Tese**

**2. Identificação da Tese ou Dissertação**

Autor (a):	Hudson de Paula Romualdo		
E-mail:	hudson.paula@gmail.com		
Seu e-mail pode ser disponibilizado na página?	<input checked="" type="checkbox"/> Sim	<input type="checkbox"/> Não	
Vínculo empregatício do autor			
Agência de fomento:		Sigla:	
País:	UF:	CNPJ:	
Título:	Identificação, mensuração e localização tridimensional de descargas parciais em transformadores de potência com base em resultados de ensaios de emissão acústica		
Palavras-chave:	Descargas Parciais, Emissão Acústica, Identificação, Localização Tridimensional, Mensuração, Transformador de Potência		
Título em outra língua:	Identification, measurement and three-dimensional location of partial discharges in power transformers based on test results of acoustic emission		
Palavras-chave em outra língua:	Partial Discharges, Acoustic Emission, Identification, Three-dimensional Location, Measurement, Power Transformer		
Área de concentração:	Engenharia da Computação		
Data defesa: (dd/mm/aaaa)	27/02/2014		
Programa de Pós-Graduação:	Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e de Computação		
Orientador (a):	Dr. Leonardo da Cunha Brito		
E-mail:	brito@eeec.ufg.br		
Co-orientador (a):*			
E-mail:			

\*Necessita do CPF quando não constar no SisPG

**3. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento  SIM       NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF ou DOC da tese ou dissertação.

O sistema da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações garante aos autores, que os arquivos contendo eletronicamente as teses e ou dissertações, antes de sua disponibilização, receberão procedimentos de segurança, criptografia (para não permitir cópia e extração de conteúdo, permitindo apenas impressão fraca) usando o padrão do Acrobat.

  
Assinatura do (a) autor (a)

Data: 16 / 07 / 2014

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

*Dedico este trabalho à minha família, amigos, à minha namorada Fabiana, pela paciência diante da necessidade da minha dedicação para que esse trabalho fosse concebido e, especialmente aos meus pais, Marlene e Arimar, a quem devo minha formação e caráter.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pela saúde e força necessárias para a conclusão de mais esta etapa da minha vida. Etapa essa que não seria possível transpor sem apoio e colaboração, razões pelas quais se fazem os agradecimentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo da Cunha Brito, pela amizade, paciência, incentivo e por estar sempre disponível e solícito às discussões que fizeram parte da elaboração deste trabalho.

À Superintendência de Engenharia e Manutenção da Transmissão da Celg Distribuição S.A. - CELG D, por consentir a realização da pesquisa relativa a este trabalho.

Ao Programa de Mestrado da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás (UFG), pela oportunidade desta realização profissional.

Aos professores e demais funcionários da Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás pelo aprendizado, disponibilidade e colaboração.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de Goiás (FAPEG) pelo apoio financeiro.

E, finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*“Não sabendo que era impossível, foi lá e fez.”.*

*(Jean Cocteau).*

## RESUMO

A presença de descargas parciais no transformador de potência representa um relevante indicador de falha incipiente. Descargas parciais são descargas elétricas incompletas, rápidas e intermitentes, que em transformadores de potência podem ser detectadas através de alguns métodos, dentre eles, o ensaio de emissão acústica. Atualmente, os algoritmos utilizados pelos equipamentos que processam as informações provenientes de ensaios de emissão acústica são proprietários, não sendo assim, disponibilizados para a comunidade científica. Ainda, normalmente, não é realizada a separação do ruído detectado proveniente de descarga parcial dos demais ruídos nos resultados, e pouca informação sobre a dinâmica da ocorrência dos ruídos é apresentada. Neste trabalho, são apresentados três métodos, identificação, mensuração e localização tridimensional, que fomentam a elaboração de uma solução computacional para o diagnóstico de transformadores utilizando-se dados provenientes dos ensaios de emissão acústica com foco na ocorrência de descargas parciais, fenômeno nocivo ao adequado funcionamento do equipamento. Após uma fundamentação com base na análise bibliográfica dos assuntos abordados ao longo do trabalho, são descritos métodos para identificação dos ruídos provenientes somente de descargas, dentre o ruído total (de toda natureza), e mensuração desses ruídos e seus atributos (já realizado de forma separada). Em seguida, referencia-se o método para a localização tridimensional e, finalmente, expõem-se os resultados da aplicação dos métodos desenvolvidos na forma de um estudo de caso evidenciando os benefícios da aplicação dos métodos aqui descritos. Demonstrando assim a importância de seus resultados no suporte à tomada de decisão e, conseqüentemente, na manutenção da condição operacional de transformadores de potência.

Palavras-chave: Descargas Parciais, Emissão Acústica, Identificação, Localização Tridimensional, Mensuração, Transformador de Potência.

## ABSTRACT

The presence of partial discharges in power transformer represents a relevant indicator of incipient failure. Partial Discharges are lightning quick and incomplete, intermittent, that in power transformers can be detected by means of some methods, among them, the test of acoustic emission. Currently, the algorithms used by equipment that processes the information from testing of acoustic emission are owners, and thus not available for the scientific community. Still, it is usually not performed the separation of noise detected from partial discharge of the other noises in the results, and little information about the dynamics of the occurrence of noise is presented. In this work, are presented three methods, identification, measurement and three-dimensional location, that foster the development of a computational solution for the diagnosis of power transformers using data derived from testing of acoustic emission with focus on the occurrence of partial discharges, phenomenon harmful to the appropriate functioning of the equipment. After a substantiation based on literature review of the issues dealt with in the course of the study, are described methods for identification of noises coming only from partial discharges, among the total noise (of all kinds), and measurement of these noises and their attributes (already done in a separate manner). Then, reference-if the method for three-dimensional location and, finally, expose-if the results of the application of the methods developed in the form of a case study showing the benefits of the application of the methods described here. Thus Demonstrating the importance of their results in supporting the decision-making process and, consequently, in maintaining the operational condition of power transformers.

**Keywords:** Partial Discharges, Acoustic Emission, Identification, Three-dimensional Location, Measurement, Power Transformer.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - ESTRUTURA BÁSICA PARA UM ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	19
FIGURA 2 - RESULTADOS PROVIDOS PELO AEWIn: A) VARIAÇÃO DA ENERGIA COM O TEMPO; E B) LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS FONTES DE RUÍDO.....	20
FIGURA 3 - TRECHO DE ARQUIVO TEXTO PROVENIENTE DO ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA.....	21
FIGURA 4 – TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA .....	24
FIGURA 5 – REPRESENTAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS DO TIPO CORONA (PREDOMINANTEMENTE AZULADAS).....	26
FIGURA 6 - ARBORESCÊNCIA EM PAPEL DEGRADADO. ....	27
FIGURA 7 – ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA REALIZADO, SIMULTANEAMENTE, EM DOIS TRANSFORMADORES. ....	29
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DO SINAL ACÚSTICO CORRELACIONADA COM A TABELA 1 .....	31
FIGURA 9 - ANALOGIA ENTRE O SINAL DO RUÍDO, DADOS DO ARQUIVO PROVENIENTE DO ENSAIO ACÚSTICO E A DEFASAGEM DE $\pm 180^\circ$ . ....	38
FIGURA 10 - HISTOGRAMA DE RUÍDO TOTAL (EM AZUL) E PROVENIENTE SOMENTE DE DESCARGAS PARCIAIS (EM VERMELHO). ....	41
FIGURA 11 - HISTOGRAMA DE RUÍDO TOTAL (AZUL) E PROVENIENTES SOMENTE DE DPS (VERMELHO) SEPARADOS POR CANAL.....	54
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO DA CORRELAÇÃO ENTRE A FONTE DO RUÍDO, A FORMA DE UMA ESFERA E A POSIÇÃO DO SENSOR.....	55
FIGURA 13 – INTERSECÇÃO DE QUATRO (4) ESFERAS.....	56
FIGURA 14 - MONTAGEM DO EQUIPAMENTO DE REGISTRO DE EMISSÕES ACÚSTICAS: DISP .....	68
FIGURA 15 - SENSOR R15I-AST COM PRÉ-AMPLIFICADOR INTEGRADO .....	69
FIGURA 16 – ABRIGO COM PROTEÇÃO CONTRA INTEMPÉRIES .....	69
FIGURA 17 – ATERRAMENTO DOS EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS UTILIZADOS NO ENSAIO .....	70
FIGURA 18 – DISPOSIÇÃO DO SENSOR (CONECTADO AO CANAL Nº 15) PARA REGISTRO DE RUÍDOS DE CHUVA.....	70
FIGURA 19 – A) FIXAÇÃO DE SENSORES NO TRANSFORMADOR; B) APLICAÇÃO DE GRAXA AUTOMOTIVA NO SENSOR. ....	71

FIGURA 20 – VERIFICAÇÃO DE RESPOSTA DOS SENSORES - A) DISPOSITIVO UTILIZADO; B) QUEBRA DE GRAFITE .....	72
FIGURA 21 – A) FERRAMENTA PARA ABALROAMENTO (SEMPRE NA MESMA INTENSIDADE); B) TESTE DE ABRANGÊNCIA. ....	73
FIGURA 22 – TRANSFORMADOR TD03.....	74
FIGURA 23 – CADASTRO DE INFORMAÇÕES SOBRE O TRANSFORMADOR .....	76
FIGURA 24 – CADASTRO DE ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA .....	77
FIGURA 25 – CARGA DO ARQUIVO PROVENIENTE DO ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA .....	78
FIGURA 26 – PLOTAGEM 3D - A) RUÍDO TOTAL (DE TODA NATUREZA) B) RUÍDO PROVENIENTE DE DP. (JUNHO).....	81
FIGURA 27 – HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” DA PERSPECTIVA DE TODO O TRANSFORMADOR. (JUNHO).....	82
FIGURA 28 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO TOTAL). (JUNHO) .....	83
FIGURA 29 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO PROVENIENTE DE DESCARGAS PARCIAIS). (JUNHO).....	84
.FIGURA 30 – DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA PROVENIENTE DO RUÍDO TOTAL DETECTADO. (JUNHO) .....	85
FIGURA 31 – FILTROS-PRENSA UTILIZADOS NA FILTRAGEM DO ÓLEO ISOLANTE. ....	86
FIGURA 32 – EVIDÊNCIA DE CONTAMINANTES NO FILTRO-PRENSA, REMOVIDOS DO ÓLEO ISOLANTE.....	86
FIGURA 33 – FILTRO DA MÁQUINA DE TRATAMENTO. ....	86
FIGURA 34 – PLOTAGEM 3D - A) RUÍDO TOTAL (DE TODA NATUREZA). B) RUÍDO PROVENIENTE DE DP. (OUTUBRO).....	88
FIGURA 35 – HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” DA PERSPECTIVA DE TODO O TRANSFORMADOR. (OUTUBRO).....	89
FIGURA 36 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO TOTAL). (OUTUBRO) .....	90
FIGURA 37 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO PROVENIENTE DE DESCARGAS PARCIAIS). (OUTUBRO) .....	91
FIGURA 38 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE JUNHO E DE OUTUBRO, NO TD03. (OUTUBRO).....	92
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO ENTRE O CARREGAMENTO OBSERVADO NOS ENSAIOS DE JUNHO E DE OUTUBRO, NO TD0000080. ....	93
FIGURA 40 – PLOTAGEM 3D - A) RUÍDO TOTAL (DE TODA NATUREZA). B) RUÍDO PROVENIENTE DE DP. (DEZEMBRO).....	95

FIGURA 41 – HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” DA PERSPECTIVA DE TODO O TRANSFORMADOR. (DEZEMBRO) .....	96
FIGURA 42 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO TOTAL). (DEZEMBRO).....	97
FIGURA 43 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO PROVENIENTE DE DESCARGAS PARCIAIS). (DEZEMBRO) .....	98
FIGURA 44 – A) BOXPLOT REFERENTE AO ENSAIO DE OUTUBRO. B) BOXPLOT REFERENTE AO ENSAIO DE DEZEMBRO. ....	99
FIGURA 45 - COMPARAÇÃO ENTRE O CARREGAMENTO OBSERVADO NOS ENSAIOS DE JUNHO, OUTUBRO E DEZEMBRO, NO TD03. ....	100
FIGURA 46 – PLOTAGEM 3D - A) RUÍDO TOTAL (DE TODA NATUREZA). B) RUÍDO PROVENIENTE DE DP. (ABRIL) .....	103
FIGURA 47 – HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” DA PERSPECTIVA DE TODO O TRANSFORMADOR. (ABRIL) .....	104
FIGURA 48 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO TOTAL). (ABRIL).....	105
FIGURA 49 - HISTOGRAMA “ENERGIA X TEMPO” POR CANAL (RUÍDO PROVENIENTE DE DESCARGAS PARCIAIS). (ABRIL) .....	106
FIGURA 50 – A) BOXPLOT REFERENTE AO ENSAIO DE DEZEMBRO. B) BOXPLOT REFERENTE AO ENSAIO DE ABRIL. ....	107
FIGURA 51 - COMPARAÇÃO ENTRE O CARREGAMENTO OBSERVADO NOS ENSAIOS DE JUNHO, OUTUBRO, DEZEMBRO E ABRIL, NO TD03. ....	107

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ATRIBUTOS DOS SINAIS ACÚSTICOS COLETADOS POR MEIO DOS SENSORES.....	30
TABELA 2 – PADRÕES REFERENTES A DESCARGAS PARCIAIS INTERNAS E SUPERFICIAIS NOS DOMÍNIOS DE FASE E TEMPO .....	36
TABELA 3 - LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES ACOPLADOS NO TRANSFORMADOR TD03 .....	71
TABELA 4 – COMP. ENTRE MÉTRICAS RELACIONADAS À DP OBTIDAS NO ENSAIO ANTERIOR (JUNHO DE 2012) E O ENSAIO ATUAL.....	87
TABELA 5 – COMP. ENTRE MÉTRICAS RELACIONADAS À DP OBTIDAS NO ENSAIO ANTERIOR (OUTUBRO DE 2012) E O ENSAIO ATUAL.....	94
TABELA 6 – COMP. DE MÉTRICAS RELACIONADAS À DP OBTIDAS NO ENSAIO ANTERIOR (DEZEMBRO DE 2012) E O ENSAIO ATUAL.....	101

## LISTA DE ALGORITMOS

ALGORITMO 1 – VERIFICAÇÃO DE INDÍCIO DE DESCARGA PARCIAL .....	38
ALGORITMO 2 - CONTADOR DE REGISTROS .....	42
ALGORITMO 3 - SOMADOR DE ENERGIA .....	43
ALGORITMO 4 - VERIFICADOR DE MÁXIMA DE ENERGIA .....	44
ALGORITMO 5 - VERIFICADOR DE MÉDIA DE ENERGIA.....	45
ALGORITMO 6 - CALCULADOR DA MÁXIMA ENERGIA REFERENTE AO MONTANTE DE RUÍDOS AGrupados por minuto .....	46
ALGORITMO 7 - CALCULADOR DE MÉDIA DA ENERGIA REFERENTE AO MONTANTE DE RUÍDOS AGrupados por minuto .....	49
ALGORITMO 8 - CALCULADOR DE PERCENTUAL DO TEMPO DE ENSAIO COM INCIDÊNCIA DE RUÍDOS .....	51
ALGORITMO 9 - ALGORITMO PARA SELEÇÃO DE QUATRO (04) RUÍDOS CONSECUTIVOS CAPTADOS POR SENSORES DISTINTOS .....	56
ALGORITMO 10 - LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS FONTES DE RUÍDOS .....	60
ALGORITMO 11 - VALIDAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL DAS FONTES DE RUÍDOS .....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGD	Análise de Gases Dissolvidos
CELG	Companhia Energética de Goiás
DP	Descarga Parcial
DPs	Descargas Parciais
EA	Emissão Acústica
NBR	Norma Brasileira
PASA	Physical Acoustics South América

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>1. CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>23</b>
<b>ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>23</b>
1.1. TRANSFORMADOR E SEU SISTEMA DE ISOLAMENTO .....	23
1.2. DESCARGA PARCIAL: CONCEITO E CONSIDERAÇÕES .....	25
1.3. DESCARGA PARCIAL: TIPOS .....	26
1.4. DESCARGA PARCIAL: EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA .....	27
1.5. ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA .....	28
<b>2. CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>32</b>
<b>IDENTIFICAÇÃO, MENSURAÇÃO E LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL .....</b>	<b>32</b>
2.1. DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL .....	33
2.2. IDENTIFICAÇÃO .....	34
2.3. MENSURAÇÃO .....	40
2.4. LOCALIZAÇÃO .....	55
<b>3. CAPÍTULO 3 .....</b>	<b>67</b>
<b>APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO, MENSURAÇÃO E LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL: ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>67</b>
3.1. EQUIPAMENTOS PARA ENSAIO DE EMISSÃO ACÚSTICA .....	68
3.2. PROCEDIMENTO PARA ENSAIO DE EA .....	69
3.3. TRANSFORMADOR DE ESTUDO .....	74
3.4. UTILIZAÇÃO DO <i>SOFTWARE</i> DESENVOLVIDO .....	75
3.5. ESTUDO DE CASO .....	78
3.5.1. ENSAIO DE EA: 11 A 15 DE JUNHO DE 2012 .....	79
3.5.2. ENSAIO DE EA: 01 A 05 DE OUTUBRO DE 2012 .....	85
3.5.3. ENSAIO DE EA: 10 A 13 DE DEZEMBRO DE 2012 .....	94
3.5.4. ENSAIO DE EA: 01 A 04 DE ABRIL DE 2013 .....	101
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	108
<b>4. CONCLUSÕES .....</b>	<b>110</b>
<b>5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>112</b>
<b>6. APÊNDICES .....</b>	<b>115</b>
6.1. APÊNDICE A - DESENHO DO TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA: TD03. ....	116
6.2. APÊNDICE B – APRESENTAÇÃO DETALHADA DO ALGORITMO DE LOCALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL. ....	117

## Introdução

A utilização de equipamentos eletroeletrônicos como televisores, condicionadores de ar, computadores, aparelhos de som, aquecedores, dentre diversos outros está enraizada na rotina do mundo contemporâneo. Desde um contexto recreativo, industrial, de segurança e mesmo de vida, considerando a dependência de pessoas com relação a aparelhos eletroeletrônicos, a energia elétrica pode ser considerada atualmente como item de primeira necessidade.

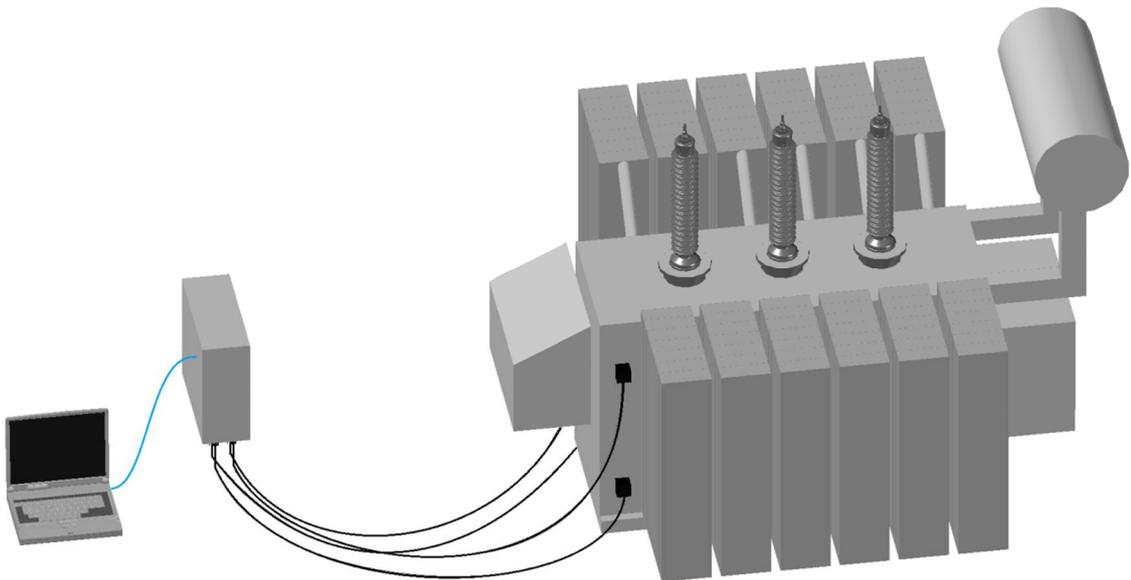
Nesse cenário, falhas ou mesmo anomalias no fornecimento de energia acarretam problemas de tamanho considerável uma vez que implicam em desdobramentos nas mais variadas áreas. Para evitar tais acontecimentos e garantir a qualidade do serviço de energia elétrica, tanto em condições normais de uso quanto em contingências, se faz necessário o acompanhamento constante de todos os equipamentos utilizados na prestação desse serviço, desde os que compõem o conjunto de geração, de transmissão, até os voltados para distribuição. Dentre tais equipamentos, destacam-se os transformadores de potência; equipamentos estratégicos para o sistema elétrico, de alto custo e grande porte (dimensões e pesos).

Um dos fatores que podem levar à falha de transformadores de potência é a ocorrência de descargas parciais em seu interior. A IEC 60270:2000 [1] apresenta uma definição sucinta do termo descrevendo o evento como sendo uma descarga elétrica localizada que atravessa parcialmente um meio isolante entre dois meios condutores, podendo ou não ocorrer próximo a esse meio condutor. Monitorar a ocorrência desse fenômeno nocivo em transformadores de potência é uma forma eficiente de detectar falhas incipientes, tornando possível agir preventivamente para evitar que o seu funcionamento seja comprometido, acarretando sua avaria e, conseqüentemente, a interrupção do fornecimento de energia elétrica [2].

Atualmente, têm-se utilizado alguns métodos para a identificação de descargas parciais: elétrico, químico (em especial, análise de gases dissolvidos, ou AGD) e acústico (ensaio de emissão acústica, ou EA). Os dois últimos se destacam na busca por sinais da existência de descargas parciais; trata-se de métodos que não são interruptivos do fornecimento de energia, ou seja, podem ser aplicados sem a necessidade de desligamentos dos equipamentos para ensaio [3]. Entretanto, a técnica de AGD apresenta baixa sensibilidade à presença de descarga parcial [4] e fornece pouca informação a respeito de sua provável localização. A técnica de ensaio de emissão acústica provê tais informações, sendo assim, abordada nesse trabalho.

O ensaio de emissão acústica é uma técnica preditiva muito eficiente na área de manutenção preventiva, que facilita o monitoramento de fenômenos acusticamente ativos dentro de estruturas de grandes dimensões. Um sistema de emissão acústica "escuta" uma estrutura em funcionamento, como um transformador de potência, podendo detectar fenômenos cuja ocorrência provoca ondas sonoras, tais como, a descarga parcial [5]. A Figura 1 apresenta uma estrutura simples para a realização de um ensaio de emissão acústica, composto basicamente por um computador conectado a uma unidade de *hardware* e *software* que, por sua vez, é conectado ao transformador por meio de cabos coaxiais e sensores piezoelétricos fixados em pontos específicos e estratégicos do equipamento.

Figura 1- Estrutura básica para um ensaio de emissão acústica

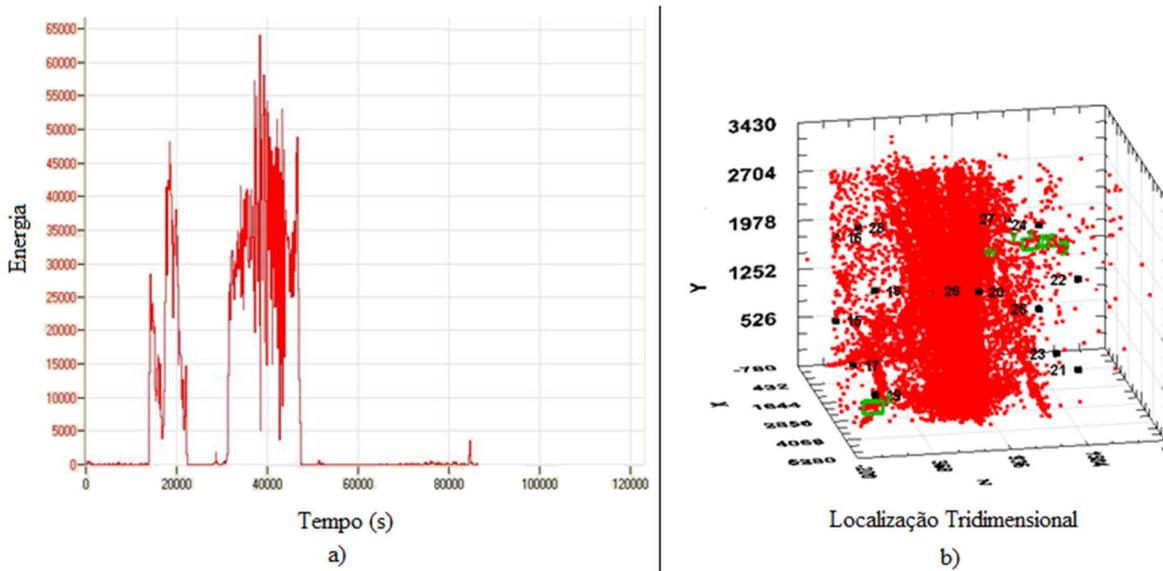


Fonte: elaborado pelo autor.

Como resultado do ensaio, fornecido para esse trabalho pelo sistema DISP [3], tem-se um arquivo, no formato de texto, contemplando os registros dos sinais acústicos detectados, sendo uma linha para cada sinal registrado pelos sensores.

Atualmente, um dos sistemas utilizados para processamento desse arquivo é o software *AEWin* [3] que, dentre os resultados mais relevantes providos pela ferramenta, dois deles são expostos na Figura 2.

Figura 2 - Resultados providos pelo AEWin: a) variação da energia com o tempo; e b) localização tridimensional das fontes de ruído.



Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

O primeiro problema observado nos resultados apresentados na Figura 2 é a não separação entre os sinais provenientes de descargas parciais dos demais ruídos. Além disso, o histograma é apresentado com linhas contínuas, indicando uma atividade continuada sendo que os ruídos, sabidamente, são intermitentes [1].

A localização tridimensional, conforme Figura 2, além de ser apresentada com baixa resolução, realiza a impressão dos ruídos localizados na forma de um cubo, quando na verdade um transformador de potência se assemelha mais a um paralelepípedo retangular.

Os arquivos disponibilizados pelos sistemas DISP [3] contemplam alguns atributos do sinal detectado, como: tempo (instante de detecção do sinal com base no momento de início do ensaio), canal (conectado ao sensor que captou o sinal), energia propagada e amplitude.

Nesse trabalho, três desses atributos são processados, conforme demonstrado na Figura 3.

Figura 3 - Trecho de arquivo texto proveniente do ensaio de emissão acústica.

1	77691.2395882	2	0	46
1	77720.1754630	6	617	78
1	77720.1755297	4	1029	80
1	77720.1759628	8	0	40
1	77720.1784717	5	491	71
1	77720.1791055	7	547	71
1	77720.1802067	3	3	39
1	77720.1818602	12	1	39

Tempo
Canal
Energia

Fonte: elaborado pelo autor.

Com base no processamento dos registros e seus atributos, os métodos descritos nesse trabalho fomentam uma solução computacional completa, apresentando gráficos que contemplam o ruído total (de toda natureza) detectado, e somente aquele proveniente de descargas parciais, incluindo localização tridimensional, assim como histogramas e gráficos *boxplot*, propiciando assim, a visualização da dinâmica de ocorrência dos eventos acústicos durante o período do ensaio. Esse conjunto de resultados, reflete a condição operacional de transformadores de potência, com foco na ocorrência de descargas parciais.

Esta dissertação é composta de três capítulos, além de uma introdução e uma conclusão.

No Capítulo 1, encontra-se uma análise bibliográfica sobre os principais tópicos que envolvem os focos deste estudo. Inicialmente, aborda-se o transformador de potência com enfoque em seu sistema isolante por meio de óleo mineral e a formação de descargas parciais em seu interior. Na sequência, faz-se um enfoque sobre aspectos relacionados à descarga parcial, iniciando pelo seu conceito e aspectos relativos à sua ocorrência em transformadores. Em seguida, o ensaio de emissão acústica é abordado, desde seu conceito, motivo pelo qual este foi selecionado para compor esse trabalho e qual a contribuição do método para a pesquisa aqui descrita. Finalmente, são apresentados os resultados providos pelo *software AEWIn* [3], utilizado atualmente pela concessionária de energia local, parceira nesse projeto de pesquisa, visando destacar algumas lacunas encontradas nos mesmos.

No Capítulo 2, tem-se uma introdução descrevendo o levantamento realizado para a concepção de uma nova solução computacional que, além de suprir as necessidades não contempladas pelo *AEWIn* [3], contemple também requisitos funcionais e não funcionais de *software* que permeiam o contexto da concessionária de energia para a qual a ferramenta foi desenvolvida. Além disso, são apresentados e demonstrados por meio de pseudocódigos e equações, os métodos de identificação de descargas parciais, mensuração dos atributos do ruído e localização tridimensional dos ruídos detectados.

No Capítulo 3, é descrito um estudo de caso, decorrente da aplicação de ensaios de emissão acústica realizados em uma unidade transformadora, cuja solução computacional, que contempla funcionalidades implementadas com os métodos demonstrados no capítulo anterior, foi utilizada para processamento dos resultados do ensaio. Para tanto, são detalhados os parâmetros utilizados na definição do transformador escolhido como alvo do ensaio, informações sobre o instrumento de ensaio de emissão acústica utilizado no estudo de caso, bem como todos os procedimentos preparativos empregados nos ensaios de campo realizados.

De forma resumida, as principais contribuições desta dissertação de mestrado são as seguintes:

- a) O método de identificação separa ruídos comuns daqueles resultantes de descarga parcial, possibilitando o processamento isolado de seus atributos permitindo assim o foco na informação de maior relevância.
- b) O resultado da execução do método de localização proporciona ao engenheiro responsável pelo diagnóstico uma visão tridimensional das fontes de descargas parciais dentro do transformador de potência, tornando possível determinar quais componentes internos estão contribuindo para o surgimento desse evento nocivo.
- c) O resultado fornecido pelo método de mensuração apresenta informações importantes a respeito da dinâmica de ocorrências das descargas parciais e seus atributos, os quais podem ser utilizados para a classificação dos transformadores.
- d) Os resultados providos pela solução computacional como um todo, proporcionam um melhor entendimento da condição operacional de transformadores de potência no que tange a ocorrência de descargas parciais, servido como suporte à tomada de decisão.

# **1. Capítulo 1**

## **Análise bibliográfica**

Os transformadores são equipamentos essenciais para o sistema elétrico. A continuidade do fornecimento de energia depende da durabilidade e a confiabilidade desses equipamentos e ambos os fatores estão diretamente associados à conservação do seu sistema isolante. Uma vez comprometida a qualidade do isolamento, seja pelo seu envelhecimento ou redução de sua vida útil em função de superaquecimentos, contaminação ou instalação inadequada, tem-se um ambiente propício à ocorrência de descargas parciais (DP), fenômeno nocivo ao funcionamento do transformador.

Conseqüentemente, a tarefa de monitorar e controlar a qualidade do sistema isolante desses equipamentos é fundamental. Desta forma, neste capítulo é feita uma análise bibliográfica abordando: transformadores de potência e aspectos referentes ao seu sistema de isolamento, bem como seus fatores degradantes; as descargas parciais; e a técnica de detecção de descargas parciais pelo método de emissão acústica.

### **1.1. Transformador e seu sistema de isolamento**

Conforme [7] um transformador de potência consiste em um equipamento elétrico estático que, por indução eletromagnética, transforma tensão e corrente alternadas entre dois ou mais enrolamentos, sem mudança de frequência.

Os transformadores de potência, vide Figura 4, são equipamentos utilizados na transferência de energia entre dois circuitos. De forma geral, sua função é diminuir as perdas nos condutores durante o processo de transmissão da energia a partir da fonte geradora e, posteriormente, possibilitar o consumo da energia elétrica, hora elevando, hora reduzindo tensões e correntes.

Figura 4 – Transformador de potência



Fonte: Marques, A. P. [6]

O sistema de isolamento de um transformador de potência consiste basicamente de uma isolação s3lida de base celul3sica (papel Kraft, papel3o Kraft, papel manilha e papel3o com fibra de algod3o), madeira laminada e 3leo isolante mineral [8]. O papel Kraft, na forma de finas camadas, 3 utilizado para envolver os enrolamentos e, no formato de espaçadores e tubos de alta densidade, promover o isolamento entre n3veis de tens3o e entre fases [8]. A madeira laminada 3 empregada em locais onde, al3m de isolamento, se requer resist3ncia a solicitaç3es mec4nicas.

O 3leo isolante mineral, obtido atrav3s da destilaç3o do petr3leo ou de origem vegetal [9] (menos empregado), 3 utilizado devido 3s suas propriedades diel3tricas. Al3m de servir como isolante, o 3leo tamb3m comp3e o sistema de arrefecimento do transformador em funç3o da sua circulaç3o (forç3ada ou natural) atrav3s de espaços no interior dos enrolamentos.

O sistema de isolamento de transformadores de potência 3 submetido a esforç3os que provocam a sua deterioraç3o, os quais podem ser classificados como se segue conforme [10]:

- a) El3tricos, englobando tens3o e frequ3ncia de operaç3o.
- b) T3rmicos, decorrentes de correntes el3tricas que circulam no transformador e da temperatura ambiente.
- c) Mec4nicos, em funç3o de vibraç3es e esforç3os eletrodin4micos.
- d) Ambientais, vinculados 3 contaminaç3o externa.

O óleo isolante sofre uma ação de envelhecimento resultante da sollicitação por temperatura, oxigênio e de materiais presentes na construção (cobre e outros) do transformador [11]. Como consequência, ocorre a deterioração das características isolantes do óleo e os seus produtos promovem o processo de degradação oxidativa do isolamento sólido de base celulósica. Este último também sofre degradação através de outros mecanismos, descritos a seguir [11]:

- a) Envelhecimento térmico - Sob a ação do calor, a molécula da celulose passa por modificações nas suas ligações produzindo moléculas menores que a original.
- b) Envelhecimento hidrolítico - A água e os ácidos afetam a ponte de oxigênio entre os anéis de glicose, causando ruptura da cadeia.

A degradação do sistema de isolamento, aliada à circulação do óleo no interior do transformador, ao aumento de temperatura dos enrolamentos e à diferença de condutividade elétrica entre líquido e sólido isolantes, provoca um fenômeno de movimentação de cargas espaciais (elétrons livres), em volta de bolhas que estejam dissolvidas no óleo isolante [10]. Esse fenômeno, diante do stress causado pelos campos elétricos existentes no interior dos transformadores, constitui um ambiente favorável para o processo de formação de descargas parciais [10], também favorecido em função da quantidade de umidade contida no sistema de isolamento.

## **1.2. Descarga parcial: Conceito e considerações**

Descargas Parciais (DP) são definidas conforme [4] como sendo “descargas elétricas que curto-circuitam parte da isolação entre dois eletrodos. Estas descargas podem ocorrer ou não adjacientemente ao eletrodo, ou a outra parte da isolação”.

De forma geral, como o próprio nome sugere, trata-se de uma descarga elétrica que não percorre todo o isolamento existente entre duas superfícies condutoras; não há formação de um arco voltaico [10].

O fenômeno está associado à descontinuidade no sistema de isolamento podendo ocorrer em espaços vazios no isolamento sólido (papel, polímero, etc.), junto a interfaces de multicamada sólida no sistema de isolamento, em bolhas de gás em líquido isolante ou em torno de um eletrodo em um gás (descarga de corona) [4].

A descarga parcial, independente do meio em que ocorre, é observada quando um campo elétrico aplicado a um dielétrico excede a sua capacidade isolante, o que significa que a tensão

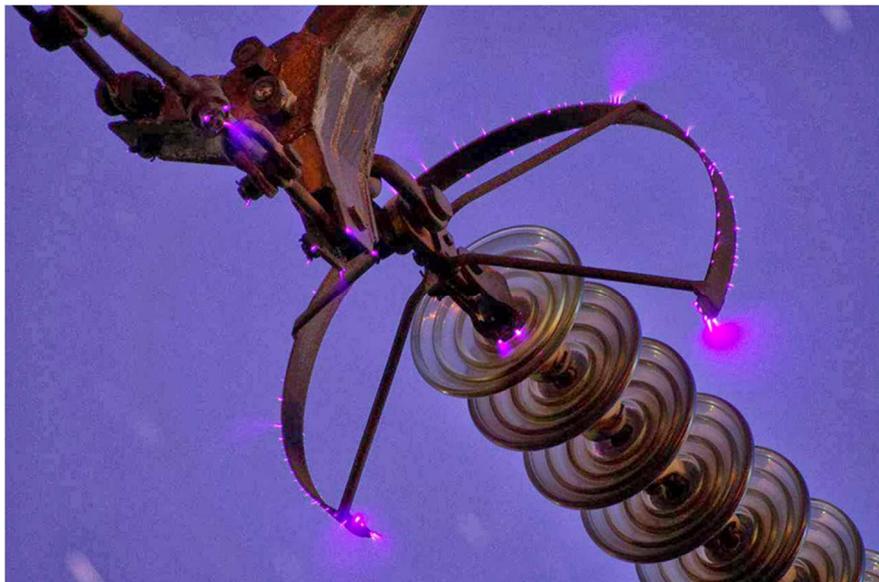
a que esse dielétrico está submetido é maior que o seu nível de tolerância [10]. Pode iniciar em condições normais de funcionamento no equipamento de alta tensão onde o isolamento perdeu sua capacidade dielétrica em função da idade, envelhecimento precoce pelo *stress* térmico ou elétrico, ou devido à instalação/manutenção inadequada.

### 1.3. Descarga parcial: Tipos

Conforme [12], descargas parciais podem ser tipificadas de acordo com a sua localização e o seu mecanismo de formação. Segundo esses critérios, as DPs são tipificadas em descargas superficiais, descargas internas e descargas externas (corona).

Descargas externas ocorrem através da ionização de gases ao redor de um condutor, comumente com pontas agudas, que é eletricamente energizado. Estes pontos com pequenos raios de curvatura, podendo ser observados na Figura 5, formam regiões com campo elétrico elevado nas vizinhanças do condutor, o qual ultrapassa o valor de ruptura do gás, dando origem à ocorrência de descargas parciais. A descarga ocorre quando a força (gradiente de potencial) do campo elétrico ao redor do condutor é alta o suficiente para formar a região condutora, mas não alta o suficiente para causar falhas elétricas ou arcos para objetos próximos. As descargas desse tipo são indesejáveis por causarem o desperdício de energia e a geração de compostos perigosos, tais como o ozônio [13].

Figura 5 – Representação de descargas parciais do tipo corona (predominantemente azuladas)

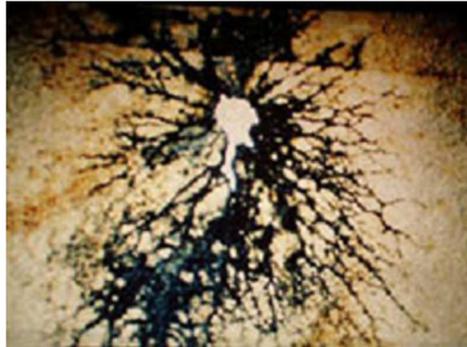


Fonte: internet: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona\\_discharge\\_1.JPG](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Corona_discharge_1.JPG) (acesso em 09/12/2013)

Descargas internas ocorrem em locais de baixa rigidez dielétrica, geralmente espaços vazios preenchidos com gás, presentes em materiais dielétricos sólidos utilizados em sistemas de

isolação de alta tensão [10]. O surgimento de vazios na estrutura desses materiais pode ser devido a causas distintas, dependendo da natureza do material e do processo de fabricação. Um tipo de descarga parcial interna pode ser observado na Figura 6. O tipo é conhecido como arborescência, cuja origem é decorrente de DPs internas contínuas em vazios ou ainda a partir de um eletrodo [10].

Figura 6 - Arborescência em papel degradado.



Fonte: Azevedo C. H, 2009, p. 25 [10]

Descargas tipificadas como superficiais são observadas em gases ou líquidos na superfície de um material dielétrico, comumente partindo do eletrodo para a superfície.

Quando a componente de campo elétrico que tangencia a superfície excede um valor crítico, o processo de descarga superficial é iniciado, ocasionando alterações na superfície do dielétrico, criando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. A ocorrência desse tipo de descarga pode levar à ruptura completa da isolação [13].

Apesar dos três tipos supracitados de descargas parciais estarem presentes no contexto de funcionamento de um transformador de potência, neste trabalho, somente as descargas parciais tipificadas como internas e superficiais, em óleo, são objeto de estudo no que tange a sua identificação, mensuração e localização. Dessa forma, nos itens subsequentes, somente essas são abordadas, sendo referenciadas somente pelo termo “descarga(s) parcial (ais)”.

#### **1.4. Descarga parcial: em transformadores de potência**

A ocorrência de descargas parciais em transformadores de potência é um dos fatores mais importantes para a constatação da degradação do isolamento [14]. Em transformadores, descargas parciais incidem predominantemente em fendas cheias de gás ou espaços vazios no

material de isolamento sólido, bolhas de gás no óleo, ou bolhas dentro das camadas de papel [10] [14].

A atividade causa no transformador um efeito cíclico, onde a degradação do isolamento propicia o surgimento de DPs, que por sua vez, degradam ainda mais o isolamento. No óleo, as descargas parciais aparecem na forma de rajadas de pulso. Com base nesses pulsos são gerados espaços no líquido isolante, preenchidos com gás, formados por uma avalanche de elétrons. Os espaços se expandem propiciando um ambiente ainda mais favorável ao surgimento de mais descargas até que se desfazem em função da queda da sua pressão interna a um nível inferior ao da pressão hidrostática dentro do ambiente dielétrico [15].

Atualmente, nenhum transformador disponível no mercado está imune à ocorrência de DPs [10]; isso se dá em função da dificuldade de se alcançar a perfeição no sistema de isolamento de um equipamento de magnitude considerável (dimensões) além de diversos outros fatores (tempo de uso, *stress*, contaminação, etc.) citados anteriormente.

Entretanto, mesmo havendo ciência de que evitar o surgimento de descargas parciais constitui atualmente uma tarefa difícil de ser realizada, monitorar a ocorrência desses fenômenos em transformadores de potência é uma forma eficiente de conservar a integridade do seu sistema isolante, de forma que se possa agir preventivamente para se evitar possíveis falhas [3].

Para realizar esse monitoramento, têm-se disponíveis alguns métodos para a identificação de descargas parciais, dentre eles: elétrico, químico (em especial, análise de gases dissolvidos, ou AGD) e acústico (ensaio de emissão acústica, ou EA). Os dois últimos se destacam na busca por sinais da existência de descargas parciais; trata-se de métodos que não são interruptivos do fornecimento de energia, ou seja, podem ser aplicados sem a necessidade de desligamentos dos equipamentos para ensaio [16]. Entretanto, a técnica de AGD apresenta baixa sensibilidade à presença de descarga parcial [4] e fornece pouca informação a respeito de sua provável localização. A técnica da análise de emissão acústica provê tais informações, sendo assim, abordada nesse trabalho.

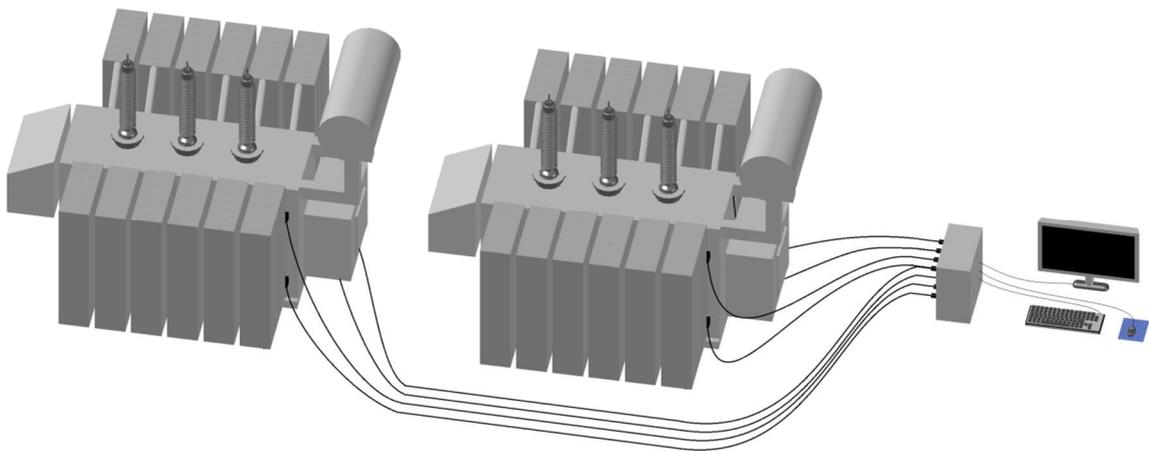
### **1.5. Ensaio de emissão acústica**

A ocorrência de descargas parciais dentro do transformador de potência provoca ondas mecânicas (de natureza sonora) que se propagam dentro do transformador através de seus componentes internos assim como através do seu sistema isolante [5]. Através do óleo isolante,

tais ondas se propagam ao longo do transformador possibilitando assim serem captadas quando se chocam com as paredes do equipamento [2]. Em decorrência desse comportamento, a criação de um método que pudesse "escutar" a estrutura do transformador, além proporcionar uma forma de detecção de ruídos provenientes de algum fenômeno indesejado (dentre eles, a descarga parcial) favoreceria a localização exata da fonte desses ruídos, através de sua triangulação, nos casos onde o mesmo fosse detectado em mais de um ponto no transformador.

A tal método dá-se o nome de emissão acústica (EA); método não destrutivo e não invasivo que facilita o monitoramento de fenômenos acusticamente ativos dentro de grandes estruturas [5]. O método constitui basicamente de uma série de sensores instalados ao longo do tanque principal do transformador, em pontos específicos e estratégicos (levando-se em consideração o projeto) do equipamento, que por sua vez são ligados a uma unidade de *hardware* e *software* através de cabos coaxiais, conforme demonstrado na Figura 7. Como os sensores são instalados na parte externa do transformador, não existe a necessidade de interrupção do funcionamento do mesmo, possibilitando assim a execução do ensaio de emissão acústica com o equipamento interligado à rede elétrica, evitando interrupção no fornecimento de energia.

Figura 7 – Ensaio de emissão acústica realizado, simultaneamente, em dois transformadores.



Fonte: elaborado pelo autor

Os sensores são dispositivos piezoelétricos sendo comumente usados aqueles que operam em frequências entre 20 kHz e 500 kHz [2]. Sendo sensíveis a qualquer onda de pressão dentro da sua faixa de operação, inclusive externas ao transformador (como por exemplo, pingos de chuva), pode ocorrer de determinado ruído detectado não ser proveniente de descarga parcial. Dessa forma, para aplicações em campo, é comum limitar a sensibilidade dos sensores a 150 kHz [2]. Ao fixá-lo, deve-se aplicar uma camada de gel de alta viscosidade (graxa de silicone e gel de glicerina são recomendados) para melhorar a aderência do sensor facilitando a captação do sinal provocado pelo choque da onda sonora com a parede do transformador [2].

Antes da realização do ensaio, um teste operacional deve ser realizado a fim de assegurar a mesma sensibilidade de todos os sensores. Conforme [2] e [18], é recomendada a quebra da ponta de um grafite de 0.3 milímetros de diâmetro (sendo aceitável também o diâmetro de 0.5 mm), na parede do transformador, próximo de cada um dos sensores instalados para o ensaio. A quebra do grafite produzirá uma onda acústica cuja mesma intensidade deve ser observada em cada um dos sensores; assegurando assim que cada um deles esteja devidamente calibrado para a realização do ensaio.

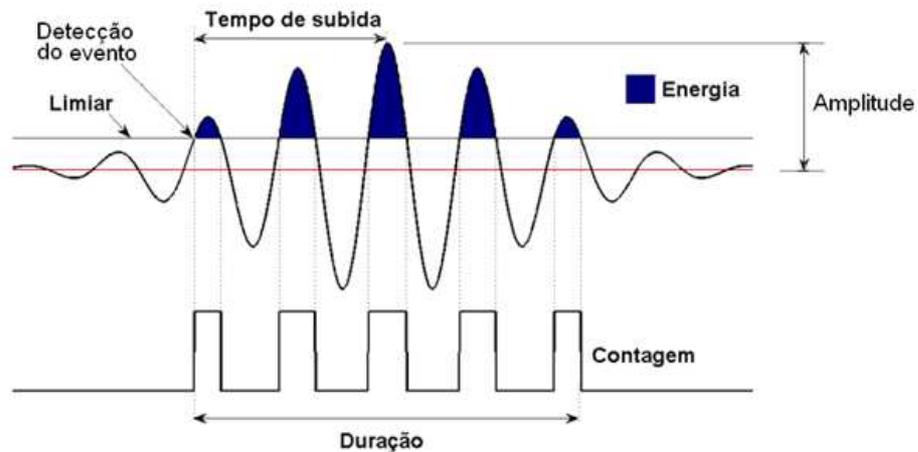
Os cabos coaxiais que interligam os sensores ao equipamento de registro de ruídos devem ser distribuídos com máxima distância possível de fontes de interferência eletromagnética [2]. O aterramento de todo o conjunto do ensaio deve ser devidamente realizado e todas as etapas inerentes ao trabalho executado em campo, ou seja, nas proximidades de um transformador energizado, devem ser rigorosamente cumpridas, exigindo assim experiência e conhecimento em trabalhos envolvendo alta voltagem, dos técnicos e engenheiros envolvidos no ensaio [2].

Os atributos de maior relevância providos pelos equipamentos de ensaio que registram os sinais acústicos provocados por ruídos de toda natureza (dentro da faixa de frequência operacional dos sensores) são apresentados na tabela 1 e esboçados na Figura 8 [19].

Tabela 1 – Atributos dos sinais acústicos coletados por meio dos sensores

<b>Grandeza</b>	<b>Descrição</b>
Tempo (s)	Instante de tempo em que o evento foi detectado pelo sensor
Amplitude (dB)	A amplitude máxima do sinal durante a detecção do evento
Energia	Energia acumulada durante a detecção
Duração (µs)	Duração do evento
Tempo de subida (µs)	Tempo entre o início do evento e o pico da amplitude

Figura 8 - Representação do sinal acústico correlacionada com a Tabela 1



Fonte: Palhares P. H, 2012, p. 29 [19]

Neste trabalho, o equipamento utilizado para a realização de ensaios de emissão acústica cujos resultados serviram de insumo para a elaboração dos métodos de identificação, localização e mensuração de ruídos (com foco em descargas parciais) é denominado DISP. O resultado é composto de um arquivo do tipo texto, onde cada linha representa um ruído detectado, contemplando quatro atributos do sinal, descritos a seguir:

- a) Tempo – instante de detecção do ruído partido de zero (início do ensaio)
- b) Energia – energia acumulada no sinal detectado
- c) Amplitude – amplitude máxima do sinal detectado
- d) Canal – número do sensor ligado à unidade de *hardware* e *software*

Para a elaboração dos métodos de identificação de descarga parcial, mensuração de atributos do sinal e localização tridimensional, somente o tempo, energia e canal são utilizados.

## **2. Capítulo 2**

### **Identificação, mensuração e localização tridimensional**

A Concessionária de Energia Elétrica de Goiás (CELG), parceira no projeto de pesquisa que compõe esse trabalho, realiza ensaios de emissão acústicas há alguns anos processando seus resultados, disponibilizados na forma de arquivos do tipo texto, através do software proprietário *AEMin* [3].

Com base nos resultados providos por essa ferramenta, o engenheiro responsável pela manutenção dos transformadores toma suas decisões com relação a se, e qual procedimento deve ser realizado para que a condição operacional dos equipamentos seja mantida em patamares aceitáveis.

Tais resultados, entretanto, apresentam algumas lacunas do ponto de vista do usuário (normalmente engenheiros), conforme a seguir:

- Não é realizada a separação dos ruídos provenientes somente da descarga parcial;
- Baixa resolução na plotagem da localização tridimensional;
- Visualização da plotagem tridimensional em cubo ao invés de um paralelepípedo retângulo; forma que mais se assemelha ao formato do transformador;
- Pouca informação sobre a dinâmica de ocorrência dos ruídos; e
- Algoritmo proprietário.

## 2.1. Desenvolvimento da solução computacional

Com o intuito de resolver os problemas supracitados observadas nos resultados providos pelo *AEWin* [3], deu-se início então ao levantamento dos requisitos funcionais [20] e não funcionais [21] para a elaboração de uma solução computacional que o substituísse ou agregasse melhores resultados, oferecendo maior suporte à tomada de decisão.

Foram definidas quatro (4) funcionalidades que deveriam ser implementadas nesse novo *software*, contemplando:

- 1) Localização tridimensional de ruídos total (de toda natureza) e proveniente somente por descarga parcial;
- 2) Histograma (Energia X Tempo) de ruídos total e proveniente de descarga parcial do ponto de vista de todo o transformador;
- 3) Histograma (Energia X Tempo) de ruídos total e provenientes de descarga parcial do ponto de vista de cada um dos sensores;
- 4) Distribuição e média de energia emitida pelos ruídos detectados; e
- 5) Métricas dos ruídos e seus atributos para visualização da dinâmica de ocorrências.

Para os três primeiros itens, a necessidade da elaboração de um método para a identificação dos ruídos provenientes somente de descargas parciais ficou evidente. Tal método, elaborado na forma de um algoritmo, é referenciado nesse trabalho como “Identificação”.

Para contemplar as funcionalidades descritas nos itens de 2 a 5, observou-se a necessidade de processamento dos ruídos detectados e alguns de seus atributos. Realizando agrupamentos, operações matemáticas e correlações com valores externos (velocidade de propagação do som no óleo isolante) aos providos pelo arquivo texto que contempla informações do ensaio de emissão acústica. O termo “Mensuração” foi utilizado nesse trabalho para identificar os métodos que realizam essas tarefas.

Por fim, o termo “Localização” foi definido para identificar, nesse trabalho, o método de localização tridimensional das fontes dos ruídos.

Os registros de ruídos são fornecidos pelo sistema *DISP* [3]. Tem-se um arquivo, no formato de texto, contemplando os registros dos sinais acústicos detectados, sendo uma linha para cada sinal registrado pelos sensores. O arquivo contempla alguns atributos do sinal detectado, como:

- Tempo;
- Canal;
- Energia; e
- Amplitude.

Os métodos de “Identificação, Mensuração e Localização” utilizam somente três (3) dos quatro atributos existentes no arquivo; considerando o “Tempo”, “Canal” e “Energia”.

O tempo se refere ao instante de detecção do sinal com base no momento de início do ensaio. O canal representa o número do canal no sistema DISP [3] conectado ao sensor instalado na parede externa do transformador de potência que por sua vez capta a onda de choque provocada por determinado ruído dentro do equipamento. O valor referente à energia dissipada pelo ruído é obtido através da área medida abaixo da envoltória do sinal retificado – MARSE [22], captado pelo sensor e calculado pelo sistema DISP [3].

Com relação aos requisitos não funcionais, observou-se a necessidade de que o sistema fosse concebido contemplando as seguintes características:

- Acesso via *Web*;
- Utilização de tecnologias *open source*; e
- Utilização de bando de dados *free*.

A solução computacional foi então implementada utilizando-se a linguagem Java (JDK 1.7) [23], *framework MVC JSF 1.2* [24], injeção de dependência e controle de transações via *framework Spring 3.0.5* [25] e persistência de dados com *Hibernate 3* [26]; contemplando a exigência de utilização de tecnologias *open source* e implementação de *software* com acesso via *Web*.

O último requisito não funcional foi contemplado com o uso do sistema gerenciador de bando de dados *PostgreSQL 9.1* [27]; que por sua vez é gratuito, de código aberto e mantido por uma comunidade de desenvolvedores, voluntários, espalhados por todo o mundo [27].

## **2.2. Identificação**

O primeiro e maior problema apresentado nos resultados providos pela ferramenta *AEWin* [3], é a não separação dos ruídos providos somente por descargas parciais dos demais ruídos,

originários de defeitos adversos (ex: parafuso sem aperto adequado) ou provenientes do próprio funcionamento do transformador (ex: atuação do comutador de derivação).

A análise do ruído total não deve ser descartada, uma vez que através dela é possível observar agrupamentos de ruídos não derivados de descarga que podem estar associados a algum defeito de fabricação ou manutenção que por sua vez podem levar a falha do transformador de potência. Entretanto, as ocorrências de descargas parciais estão diretamente associadas a problemas no isolamento do transformador, que representam a principal causa da falha desses equipamentos [28]. Assim, a separação dos tipos de fontes de ruído é especialmente importante para a apresentação de resultados que fomentem uma tomada de decisão mais precisa.

As descargas parciais podem ser tipificadas de acordo com a sua localização e o seu mecanismo de formação como: descargas superficiais, descargas internas e descargas externas (corona) [12].

As descargas externas são indesejáveis por causarem o desperdício de energia e a geração de compostos perigosos, tais como o ozônio [13]. Entretanto, não trazem grande preocupação no que diz respeito à sua contribuição para uma possível falha do equipamento. Por isso, descargas parciais externas não são alvo do processo de identificação aqui descrito.

Os tipos de descargas parciais, alvos desse trabalho, são tipicamente de natureza interna, ou seja, cuja ocorrência se dá dentro do transformador, independentemente do local de sua formação e causa.

Analisando-se os domínios da fase e do tempo do sinal acústico, proveniente de descargas parciais internas, é possível classificá-las conforme demonstrado na Tabela 2 [29]. Observando-se as figuras dispostas na Tabela 2, é possível perceber uma característica comum de defasagem de  $\pm 180^\circ$  entre as fases dos sinais de algumas classes de descargas.

Tabela 2 – Padrões referentes a descargas parciais internas e superficiais nos domínios de fase e tempo

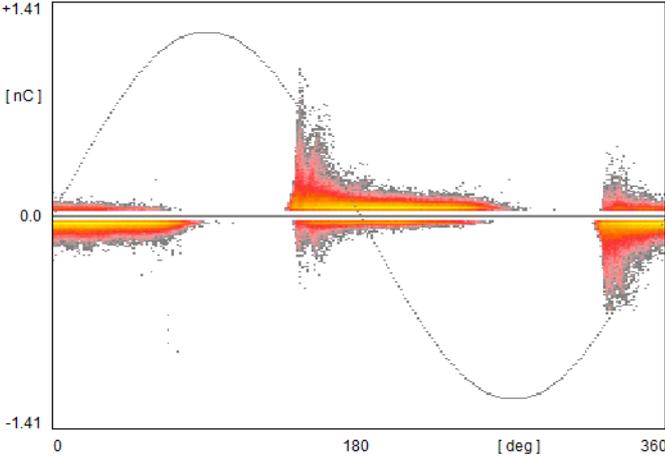
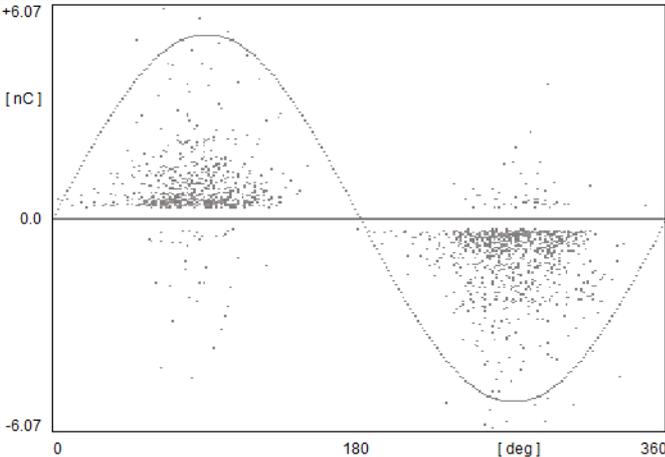
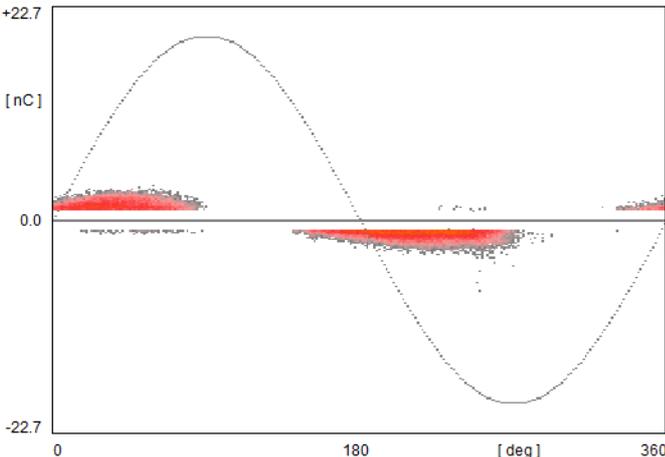
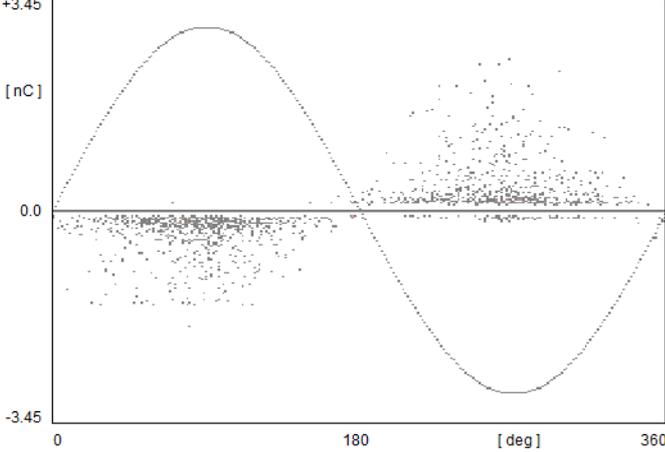
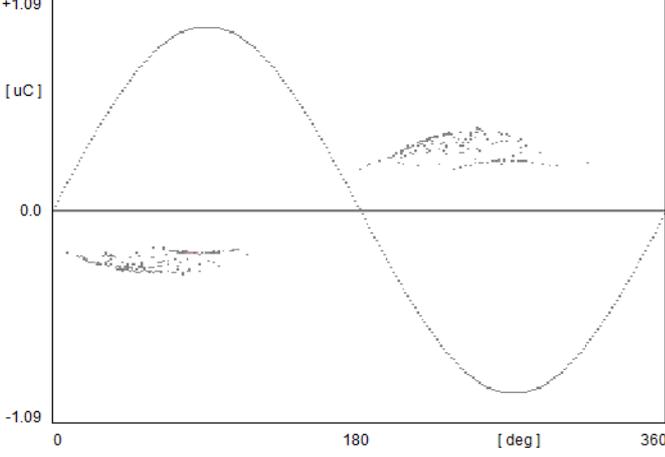
Fonte DP	Padrão característico da DP	Fase
Superficial no óleo.		330-90° e 150-270°.
Bolha de livre movimento no óleo.		Quase em todos os lugares, com concentraçã o em torno picos de tensão senoidal.
Cavidade entre camadas de papel.		330-90° e 150-270°

Tabela 2 (continuação)

Descarga através de partícula metálica no óleo.		Quase todos os lugares de tensão senoidal.
Descarga através de objeto metálico em potencial flutuante.		0-90° e 180-270°.

Fonte: adaptação da tabela extraída de Niasar, M. G. [29].

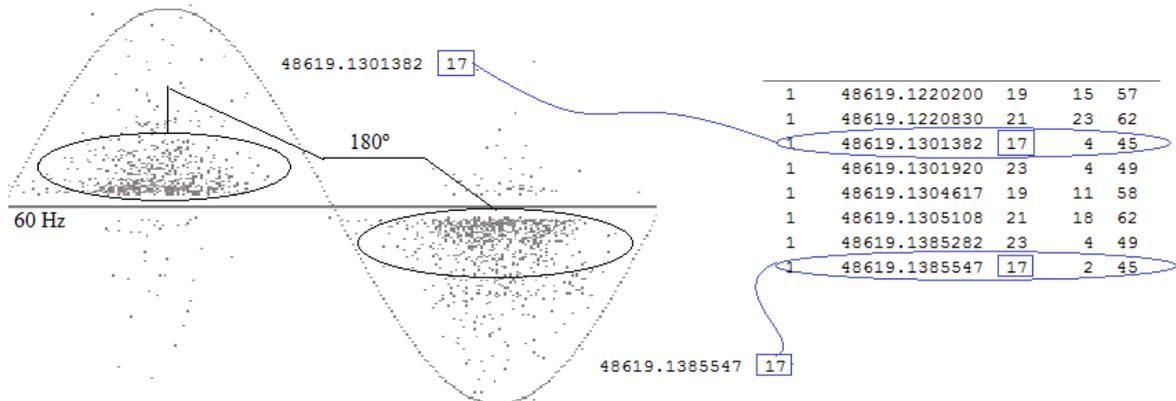
O processo de identificação de ruídos provenientes de descargas parciais, dentre todos os registrados via ensaio de emissão acústica, se inicia pelo processamento do arquivo texto provido pelo sistema DISP [3]. Mais precisamente através do atributo “Tempo” disponível para cada evento registrado no arquivo.

Assim, tendo-se uma tensão alternada, cuja frequência definida para esse trabalho é de 60 Hz, e os instantes de chegada de dois sinais consecutivos detectados por um mesmo sensor, a defasagem angular entre os sinais em função da diferença entre tempos de detecção pode ser deduzida da seguinte forma:

Se  $f = 60\text{Hz}$ , logo  $T = \frac{1}{60}\text{seg.}$ , então, se  $\Delta t(45^\circ \text{ e } 225^\circ) = \frac{1}{120}\text{seg.}$ , tem-se indício de descarga parcial com relação aos sinais processados.

A Figura 9 apresenta a analogia entre um sinal captado pelo sensor, os dados registrados no arquivo proveniente do ensaio de emissão acústica e a defasagem de  $\pm 180^\circ$ . Os pontos em preto representam os lugares dentro da tensão senoidal onde descargas parciais originadas a partir de bolhas livres no óleo isolante ocorrem.

Figura 9 - Analogia entre o sinal do ruído, dados do arquivo proveniente do ensaio acústico e a defasagem de  $\pm 180^\circ$ .



Fonte: elaborado pelo autor.

Como apresentado anteriormente, observa-se que os eventos podem ocorrer com uma diferença angular aproximada de  $180^\circ$  entre si, o que implica na necessidade da definição de uma tolerância, que nesse trabalho é de  $\pm 5^\circ$ .

Dessa forma, assume-se que:

$$180^\circ - 5^\circ \leq (t_j - t_i) \leq 180^\circ + 5^\circ \quad (1)$$

Com base em (1), calcula-se então a diferença angular para cada par de eventos detectados, agrupados por sensor, evidenciando ou não a presença de descargas parciais, permitindo assim a separação de ruídos provenientes de descargas dos demais ruídos.

Considerando (1) o método de identificação então é elaborado, conforme demonstrado no algoritmo 01. Neste trabalho, o Algoritmo 01, assim como todos os demais algoritmos que serão demonstrados, foi elaborado com o intuito de permitir sua interpretação através da ferramenta *VisuAlg* [30], facilitando assim o seu entendimento. Para tal, basta copiar o algoritmo e cola-lo na interface da ferramenta supracitada (removendo-se os números das linhas).

Algoritmo 1 – Verificação de início de Descarga Parcial

---

```

1: ALGORITMO "Verificando início de DP"
2: VAR
3:   i, j: INTEIRO
4:   difTempo: REAL
5:   tolerancia: REAL
6:   frequencia: REAL
7:   tempo1, tempo2: REAL
8:   ruidos: VETOR [1..10] DE REAL
9:   intervalo_minimo, intervalo_maximo : REAL

```

---

## Algoritmo 1 (continuação)

---

```

10:   difTempo_360, difTempo_180, difTempo_05, difMaxima : REAL
11:   PROCEDIMENTO verificarDescargaParcial(tempo: REAL)
12:   INICIO
13:     SE (tempo >= intervalo_minimo) E (tempo <= intervalo_maximo) ENTAO
14:       ESCREVAL("Indício de DP! -> t2=", tempo2, " | t1=", tempo1)
15:     FIMSE
16:   FIMPROCEDIMENTO
17:   INICIO
18:     //Frequência conhecida do sinal senoidal
19:     frequencia <- 60
20:
21:     //Diferença de tempo máxima (1%) tolerada, funcionando como interruptor do laço
22:     tolerancia <- 1.01
23:
24:     //Tempo necessário para percorrer 360° com base no período (p = 1/f = 360°)
25:     difTempo_360 <- 1 / frequencia
26:
27:     //Tempo necessário para percorrer 180°
28:     difTempo_180 <- difTempo_360 / 2
29:
30:     //Tempo necessário para percorrer 0.5° (tolerância)
31:     difTempo_05 <- difTempo_180 * 0.5 / 180
32:
33:     //Diferença de tempo máxima entre ruídos para início de Descarga Parcial
34:     difMaxima <- tolerancia * difTempo_180
35:
36:     //Menor valor para início de Descarga Parcial
37:     intervalo_minimo <- difTempo_180 - difTempo_05
38:
39:     //Maior valor para início de Descarga Parcial
40:     intervalo_maximo <- difTempo_180 + difTempo_05
41:
42:     //Amostra de ruídos detectados pelo mesmo sensor e ordenados por Tempo
43:     ruidos[1] <- 319.1205190
44:     ruidos[2] <- 319.1288575
45:     ruidos[3] <- 319.1374672
46:     ruidos[4] <- 319.1449285
47:     ruidos[5] <- 319.1526605
48:     ruidos[7] <- 319.1529709
49:     ruidos[8] <- 319.7691969
50:     ruidos[9] <- 319.7692999
51:     ruidos[10] <- 319.7776505
52:     ruidos[11] <- 319.7867175
53:

```

---

## Algoritmo 1 (continuação)

---

```

54:  PARA i DE 1 ATE 9 PASSO 1 FACA
55:      tempo1 <- ruidos[i]
56:
57:  PARA j DE i + 1 ATE 10 PASSO 1 FACA
58:      tempo2 <- ruidos[j]
59:
60:      difTempo <- tempo2 - tempo1
61:
62:      SE (difTempo > difMaxima ) ENTAO
63:          INTERROMPA
64:          FIMSE
65:          verificarDescargaParcial(difTempo)
66:      FIMPARA
67:  FIMPARA
68:  FIMALGORITMO

```

---

Os pares de ruídos cujo método de identificação aplicado indica a possibilidade de existência de descarga parcial, são marcados com sendo provenientes de DP e então gravados em banco de dados para futura utilização nos métodos de Mensuração e Localização que são descritos a seguir.

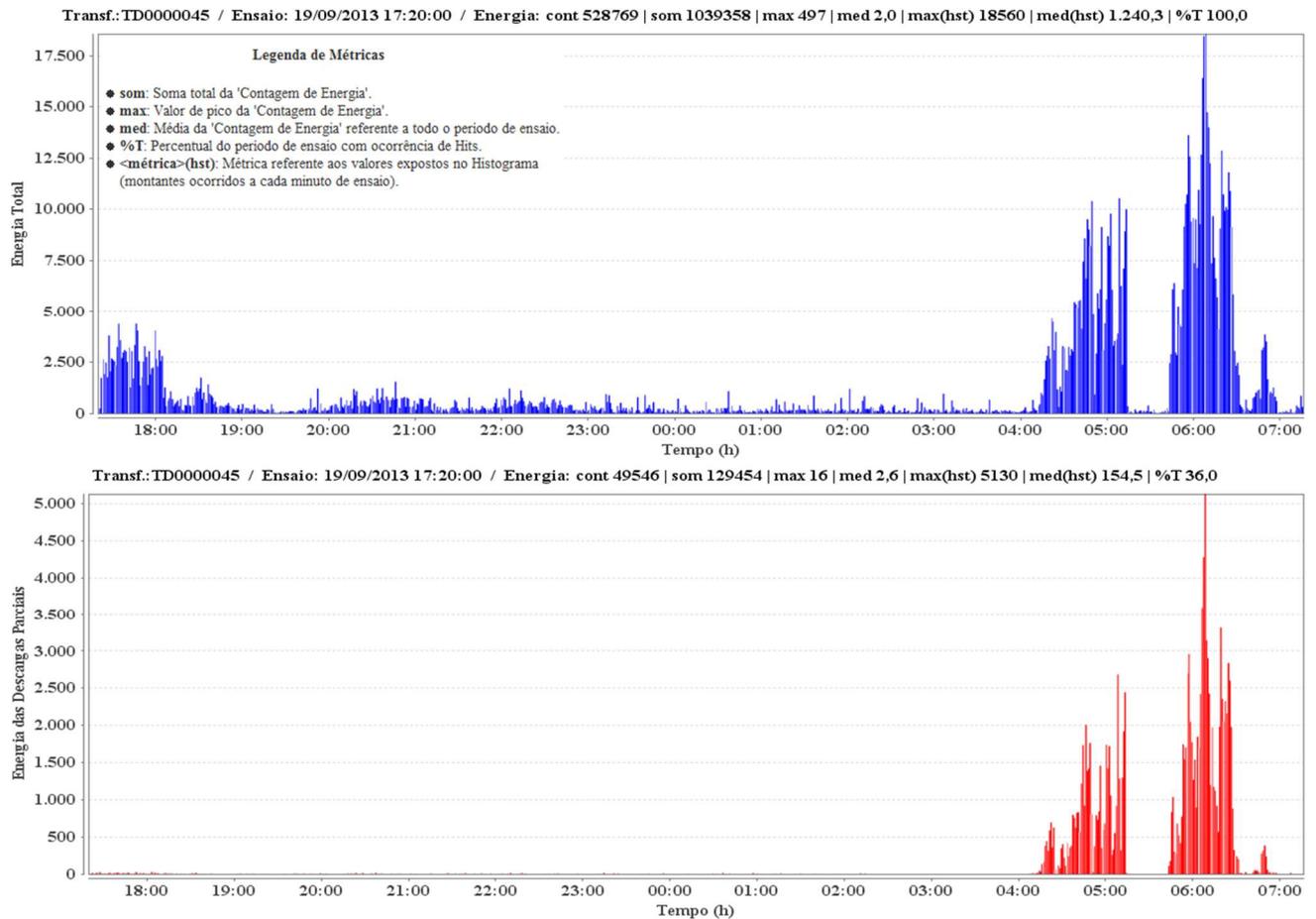
### 2.3. Mensuração

De posse dos resultados provenientes da separação dos ruídos, passa a ser possível a mensuração de seus atributos de forma separada, ruído total (de qualquer natureza) e ruído originado somente por descargas parciais, fornecendo informações sobre a dinâmica de ocorrência dos mesmos assim como demais informações importantes para a tomada de decisão. Tais informações são detalhadas a seguir e apresentadas de forma visual na Figura 10, na forma de histogramas, como se segue:

- 1) “cont”: contagem de ruídos do ensaio;
- 2) “som”: soma total da Contagem de Energia\*;
- 3) “max”: valor de pico da Contagem de Energia\*;
- 4) “med”: média da Contagem de Energia\* referente a todo o período de ensaio;
- 5) “%T”: Percentual do período de ensaio com ocorrência de ruídos; e
- 6) “<métrica> (hst)”: Métrica referente aos valores expostos no Histograma (montantes ocorridos a cada um minuto de ensaio).

\* Energia - área medida abaixo da envoltória do sinal retificado (MARSE [22]) calculada pelo sistema DISP [3] para cada ruído detectado.

Figura 10 - Histograma de ruído total (em azul) e proveniente somente de descargas parciais (em vermelho).



Fonte: elaborado pelo autor.

Os retângulos justapostos que compõem o histograma são originados a partir da soma do atributo “energia” de cada um dos registros de ruído que por sua vez são agrupados por minuto. Ou seja, para melhorar a visualização da dinâmica de ocorrência de ruídos (total e proveniente de DPs) os mesmos são agrupados em períodos de 60 segundos, são somados os seus atributos “energia”, e só então são plotados no histograma. Dessa forma, é fácil observar o momento, dentro do período de ensaio, com maior incidência de descargas parciais.

Sempre respeitando a separação entre ruídos ocasionados devida a ocorrência de descargas parciais, daqueles provenientes de toda natureza (incluindo descargas), a mensuração se inicia pelas simples contagem de ruídos, conforme demonstrado no Algoritmo 02 (cuja interpretação pode ser realizada por meio da ferramenta *VisuAlg* [30]).

Algoritmo 2 - Contador de Registros

---

```

1:  ALGORITMO "Contador de Registros"
2:  VAR
3:    descarga: INTEIRO
4:    ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..1] DE LOGICO
5:  PROCEDIMENTO contadorDeRuido()
6:    VAR
7:      i: INTEIRO
8:      qtdeRuidoTotal: INTEIRO
9:      qtdeRuidoDescarga: INTEIRO
10:   INICIO
11:     PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
12:       SE(ruidosAmostra[i,descarga] = verdadeiro)ENTAO
13:         qtdeRuidoDescarga <- qtdeRuidoDescarga + 1
14:       FIMSE
15:     qtdeRuidoTotal <- qtdeRuidoTotal + 1
16:   FIMPARA
17:
18:   ESCREVAL("Contagem de ruídos provocados por DP ", qtdeRuidoDescarga)
19:
20:   ESCREVAL("Contagem de ruído total (de toda natureza) ", qtdeRuidoTotal)
21: FIMPROCEDIMENTO
22: INICIO
23:   descarga <- 1
24:
25:   ruidosAmostra[1,descarga] <- falso
26:   ruidosAmostra[2,descarga] <- verdadeiro
27:   ruidosAmostra[3,descarga] <- falso
28:   ruidosAmostra[4,descarga] <- verdadeiro
29:   ruidosAmostra[5,descarga] <- falso
30:   ruidosAmostra[6,descarga] <- falso
31:
32:   contadorDeRuido()
33:
34: FIMALGORITMO

```

---

Em seguida, tem-se a soma da energia (MARSE [22]) calculada pelo sistema DISP [3] de todos os ruídos, novamente, respeitando a separação entre ruídos total e proveniente de DP obtida através do método de identificação descrito anteriormente. O Algoritmo 03 apresenta o pseudocódigo que realiza a soma.

Algoritmo 3 - Somador de Energia

---

```

1:  ALGORITMO "Somador de Energia"
2:  VAR
3:    verdade: INTEIRO
4:    descarga, energia: INTEIRO
5:    ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..2] DE INTEIRO
6:  PROCEDIMENTO somadorDeEnergia()
7:    VAR
8:      i: INTEIRO
9:      qtdeEnergiaDP: INTEIRO
10:     qtdeEnergiaTotal: INTEIRO
11:   INICIO
12:     PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FAÇA
13:       SE(ruidosAmostra[i,descarga] = verdade)ENTAO
14:         qtdeEnergiaDP <- qtdeEnergiaDP + ruidosAmostra[i,energia]
15:       FIMSE
16:     qtdeEnergiaTotal <- qtdeEnergiaTotal + ruidosAmostra[i,energia]
17:   FIMPARA
18:
19:   ESCREVAL("Soma de energia de ruídos provocados por DP ", qtdeEnergiaDP)
20:   ESCREVAL("Soma de energia do ruído Total ", qtdeEnergiaTotal)
21: FIMPROCEDIMENTO
22: INICIO
23:   descarga <- 1
24:   energia <- 2
25:   verdade <- 1
26:
27:   ruidosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
28:   ruidosAmostra[1,energia] <- 1
29:   ruidosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
30:   ruidosAmostra[2,energia] <- 32
31:   ruidosAmostra[3,descarga] <- 0
32:   ruidosAmostra[3,energia] <- 2
33:   ruidosAmostra[4,descarga] <- 1
34:   ruidosAmostra[4,energia] <- 45
35:   ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
36:   ruidosAmostra[5,energia] <- 89
37:   ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
38:   ruidosAmostra[6,energia] <- 3
39:
40:   somadorDeEnergia()
41:
42: FIMALGORITMO

```

---

A verificação do valor máximo de energia dissipada pelos registros de ruídos é obtida através do Algoritmo 04 demonstrado abaixo.

Algoritmo 4 - Verificador de máxima de Energia

---

```

1:  ALGORITMO "Verificador de máxima de Energia"
2:  VAR
3:    verdade: INTEIRO
4:    descarga, energia: INTEIRO
5:    ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..2] DE INTEIRO
6:  PROCEDIMENTO verificadorEnergiaMaxima()
7:    VAR
8:      i: INTEIRO
9:      maxEnergiaDP: INTEIRO
10:     maxEnergiaTotal: INTEIRO
11:   INICIO
12:     PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
13:       SE (ruidosAmostra[i,descarga] = verdade) ENTAO
14:         SE (ruidosAmostra[i,energia] > maxEnergiaDP) ENTAO
15:           maxEnergiaDP <- ruidosAmostra[i,energia]
16:         FIMSE
17:       FIMSE
18:
19:       SE (ruidosAmostra[i,energia] > maxEnergiaTotal) ENTAO
20:         maxEnergiaTotal <- ruidosAmostra[i,energia]
21:       FIMSE
22:     FIMPARA
23:
24:     ESCREVAL("Máximo valor de energia de ruído provocado por DP ",
maxEnergiaDP)
25:     ESCREVAL("Máximo valor de energia de ruído Total", maxEnergiaTotal)
26:   FIMPROCEDIMENTO
27:   INICIO
28:     descarga <- 1
29:     energia <- 2
30:     verdade <- 1
31:
32:     ruidosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
33:     ruidosAmostra[1,energia] <- 1
34:     ruidosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
35:     ruidosAmostra[2,energia] <- 32
36:     ruidosAmostra[3,descarga] <- 0
37:     ruidosAmostra[3,energia] <- 2
38:     ruidosAmostra[4,descarga] <- 1
39:     ruidosAmostra[4,energia] <- 45

```

## Algoritmo 4 (continuação)

```

40: ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
41: ruidosAmostra[5,energia] <- 89
42: ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
43: ruidosAmostra[6,energia] <- 3
44:
45: verificadorEnergiaMaxima()
46:
47: FINALGORITMO

```

---

A forma como a média da energia dissipada pelos ruídos Total e proveniente de DPs é apresentada no Algoritmo 05.

## Algoritmo 5 - Verificador de média de Energia

---

```

1: ALGORITMO "Verificador de média de Energia"
2: VAR
3:   verdade: INTEIRO
4:   descarga, energia: INTEIRO
5:   ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..2] DE INTEIRO
6: PROCEDIMENTO verificadorEnergiaMedia()
7:   VAR
8:     energiaDP: INTEIRO
9:     energiaTotal: INTEIRO
10:    i, contDP, contRD: INTEIRO
11:   INICIO
12:     PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
13:       contRD <- contRD + 1
14:       SE(ruidosAmostra[i,descarga] = verdade)ENTAO
15:         contDP <- contDP + 1
16:         energiaDP <- energiaDP + ruidosAmostra[i,energia]
17:       FIMSE
18:       energiaTotal <- energiaTotal + ruidosAmostra[i,energia]
19:     FIMPARA
20:
21:     ESCREVAL("Média de energia de ruído provocado por DP ", energiaDP /
22: contDP)
23:     ESCREVAL("Média de energia de ruído Total", energiaTotal / contRD)
24:   FIMPROCEDIMENTO
25: INICIO
26:   descarga <- 1
27:   energia <- 2
28:   verdade <- 1

```

## Algoritmo 5 (continuação)

```

29: ruidosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
30: ruidosAmostra[1,energia] <- 1
31: ruidosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
32: ruidosAmostra[2,energia] <- 32
33: ruidosAmostra[3,descarga] <- 0
34: ruidosAmostra[3,energia] <- 2
35: ruidosAmostra[4,descarga] <- 1
36: ruidosAmostra[4,energia] <- 45
37: ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
38: ruidosAmostra[5,energia] <- 89
39: ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
40: ruidosAmostra[6,energia] <- 3
41:
42: verificadorEnergiaMedia()
43:
44: FINALGORITMO

```

---

Os valores que compreendem o máximo e média referentes ao montante de ruídos agrupados por minuto, identificados no histograma pela sigla “<métrica>(hst)” são demonstrados respectivamente nos Algoritmos 06 e 07. Nos algoritmos, o trecho que chama a atenção é a parte que realiza a separação dos períodos de 60 segundos (cujo método é denominado “obterPeriodos”) com base no atributo “Tempo” do ultimo registro de ruído processado.

## Algoritmo 6 - Calculador da máxima energia referente ao montante de ruídos agrupados por minuto

---

```

ALGORITMO "Calculador da máxima energia referente ao montante de ruídos
agrupados por minuto"
1:
2: VAR
3:   qtdePeriodo, i: INTEIRO
4:   maxEnergiaTotal, maxEnergiaDP : REAL
5:   periodos: VETOR [1..3, 1..2] DE INTEIRO
6:   ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..3] DE REAL
7:   descarga, energia, tempo: INTEIRO
8: PROCEDIMENTO obterPeriodos()
9: VAR
10:   perInicio, perFinal: INTEIRO
11:   maxTempo, qtdePeriodoTemp: REAL
12: INICIO
13:   //Obtendo valor do atributo "Tempo" do ultimo registro
14:   PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA

```

## Algoritmo 6 (continuação)

```

15:     maxTempo <- ruidosAmostra[i,tempo]
16:     FIMPARA
17:
18:     // Calculando quanto períodos de 60 segundos têm dentro da amostra de ruídos
19:     qtdePeriodoTemp <- maxTempo / 60
20:     SE( Int(qtdePeriodoTemp) < qtdePeriodoTemp ) ENTAO
21:         qtdePeriodo <- Int(qtdePeriodoTemp) + 1
22:     FIMSE
23:
24:     perInicio <- 1
25:     perFinal <- 60
26:
27:     PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FACA
28:         periodos[i, 1] <- perInicio
29:         periodos[i, 2] <- perFinal
30:
31:         perInicio <- perInicio + 60
32:         perFinal <- perFinal + 60
33:     FIMPARA
34:     FIMPROCEDIMENTO
35:
36:     PROCEDIMENTO verificadorEnergiaMaximaHst(inicioIntervalo, finalIntervalo :
37:     INTEIRO)
38:     VAR
39:         maxEnergiaDPTemp, maxEnergiaTotalTemp: REAL
40:     INICIO
41:         PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
42:             SE(ruidosAmostra[i,tempo] >= inicioIntervalo) E (ruidosAmostra[i,tempo]
43:             <= finalIntervalo)ENTAO
44:                 SE (ruidosAmostra[i,descarga] = 1) ENTAO
45:                     maxEnergiaDPTemp <- maxEnergiaDPTemp + ruidosAmostra[i,energia]
46:                 FIMSE
47:                     maxEnergiaTotalTemp <- maxEnergiaTotalTemp +
48:                     ruidosAmostra[i,energia]
49:                 FIMSE
50:             FIMPARA
51:             SE (maxEnergiaDPTemp > maxEnergiaDP) ENTAO
52:                 maxEnergiaDP <- maxEnergiaDPTemp
53:             FIMSE
54:             SE (maxEnergiaTotalTemp > maxEnergiaTotal) ENTAO
55:                 maxEnergiaTotal <- maxEnergiaTotalTemp

```

## Algoritmo 6 (continuação)

```

56:     FIMSE
57:     FIMPROCEDIMENTO
58:     INICIO
59:         //Constantes
60:         descarga <- 1
61:         energia <- 2
62:         tempo <- 3
63:
64:         ruidosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
65:         ruidosAmostra[1,energia] <- 1
66:         ruidosAmostra[1,tempo] <- 50.7283933
67:         ruidosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
68:         ruidosAmostra[2,energia] <- 32
69:         ruidosAmostra[2,tempo] <- 50.7286865
70:         ruidosAmostra[3,descarga] <- 0
71:         ruidosAmostra[3,energia] <- 2
72:         ruidosAmostra[3,tempo] <- 80.7288138
73:         ruidosAmostra[4,descarga] <- 1
74:         ruidosAmostra[4,energia] <- 45
75:         ruidosAmostra[4,tempo] <- 80.7288362
76:         ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
77:         ruidosAmostra[5,energia] <- 89
78:         ruidosAmostra[5,tempo] <- 160.7288362
79:         ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
80:         ruidosAmostra[6,energia] <- 3
81:         ruidosAmostra[6,tempo] <- 160.7288362
82:
83:         obterPeriodos()
84:
85:         PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FAÇA
86:             verificadorEnergiaMaximaHst(periodos[i, 1], periodos[i, 2])
87:         FIMPARA
88:
89:         ESCREVAL("Máximo valor de energia de ruído provocado por DP 'max(hst)' ",
90:             maxEnergiaDP, ".")
91:         ESCREVAL("Máximo valor de energia de ruído Total 'max(hst)' ",
92:             maxEnergiaTotal, ".")

```

---

Algoritmo 7 - Calculador de média da energia referente ao montante de ruídos agrupados por minuto

---

**ALGORITMO** “Calculador de média da energia referente ao montante de ruídos agrupados por minuto”

---

```

1:
2:  VAR
3:    qtdePeriodo, i: INTEIRO
4:    mediaDescarga, mediaTotal: REAL
5:    descarga, energia, tempo: INTEIRO
6:    energias: VETOR [1..3, 1..2] DE REAL
7:    periodos: VETOR [1..3, 1..2] DE INTEIRO
8:    ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..3] DE REAL
9:  PROCEDIMENTO obterPeriodos()
10:  VAR
11:    perInicio, perFinal: INTEIRO
12:    maxTempo, qtdePeriodoTemp: REAL
13:  INICIO
14:    //Obtendo valor do atributo "Tempo" do ultimo registro
15:    PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
16:      maxTempo <- ruidosAmostra[i,tempo]
17:    FIMPARA
18:
19:    // Calculando quanto períodos de 60 segundos têm dentro da amostra de ruídos
20:    qtdePeriodoTemp <- maxTempo / 60
21:
22:    SE( Int(qtdePeriodoTemp) < qtdePeriodoTemp ) ENTAO
23:      qtdePeriodo <- Int(qtdePeriodoTemp) + 1
24:    FIMSE
25:
26:    perInicio <- 1
27:    perFinal <- 60
28:
29:    PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FACA
30:      periodos[i, 1] <- perInicio
31:      periodos[i, 2] <- perFinal
32:
33:      perInicio <- perInicio + 60
34:      perFinal <- perFinal + 60
35:    FIMPARA
36:  FIMPROCEDIMENTO
37:
38:  PROCEDIMENTO verificadorEnergiaMaximaHst(indice, inicioIntervalo,
39:  finalIntervalo : INTEIRO)
40:  VAR
41:    maxEnergiaDP, maxEnergiaTotal: REAL

```

## Algoritmo 7 (continuação)

```

42:
43:     PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FAÇA
44:         SE (ruídosAmostra[i,tempo] >= inícioIntervalo) E (ruídosAmostra[i,tempo]
45:         <= finalIntervalo) ENTAO
46:             SE (ruídosAmostra[i,descarga] = 1) ENTAO
47:                 maxEnergiaDP <- maxEnergiaDP + ruídosAmostra[i,energia]
48:             FIMSE
49:             maxEnergiaTotal <- maxEnergiaTotal + ruídosAmostra[i,energia]
50:             FIMSE
51:         FIMPARA
52:
53:         energias[indice, 1] <- maxEnergiaDP
54:         energias[indice, 2] <- maxEnergiaTotal
55:     FIMPROCEDIMENTO
56:
57:     PROCEDIMENTO calcularMediaEnergiaHst()
58:     INICIO
59:         PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FAÇA
60:             mediaDescarga <- mediaDescarga + energias[i, 1]
61:             mediaTotal <- mediaTotal + energias[i, 2]
62:         FIMPARA
63:
64:         mediaDescarga <- mediaDescarga/qtdePeriodo
65:         mediaTotal <- mediaTotal/qtdePeriodo
66:     FIMPROCEDIMENTO
67:     INICIO
68:         //Constantes
69:         descarga <- 1
70:         energia <- 2
71:         tempo <- 3
72:
73:         ruídosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
74:         ruídosAmostra[1,energia] <- 1
75:         ruídosAmostra[1,tempo] <- 50.7283933
76:         ruídosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
77:         ruídosAmostra[2,energia] <- 32
78:         ruídosAmostra[2,tempo] <- 50.7286865
79:         ruídosAmostra[3,descarga] <- 0
80:         ruídosAmostra[3,energia] <- 2
81:         ruídosAmostra[3,tempo] <- 80.7288138
82:         ruídosAmostra[4,descarga] <- 1
83:         ruídosAmostra[4,energia] <- 45
84:         ruídosAmostra[4,tempo] <- 80.7288362

```

## Algoritmo 7 (continuação)

```

85:   ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
86:   ruidosAmostra[5,energia] <- 89
87:   ruidosAmostra[5,tempo] <- 160.7288362
88:   ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
89:   ruidosAmostra[6,energia] <- 3
90:   ruidosAmostra[6,tempo] <- 160.7288362
91:
92:   obterPeriodos()
93:
94:   PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FAÇA
95:     verificadorEnergiaMaximaHst(i, periodos[i, 1], periodos[i, 2])
96:   FIMPARA
97:
98:   calcularMediaEnergiaHst()
99:
100:  ESCREVAL("Média de energia de ruído provocado por DP 'med(hst)' ",
101:  mediaDescarga , ".")
102:  ESCREVAL("Média de energia de ruído Total 'med(hst)' ", mediaTotal , ".")
102:  FIMALGORITMO

```

---

Por fim, tem-se o Algoritmo 08, que realiza o cálculo do percentual de tempo do ensaio com incidência de ruídos (T%). Novamente, o cálculo é realizado observando-se a separação do ruído total daquele proveniente de descargas parciais.

## Algoritmo 8 - Calculador de percentual do tempo de ensaio com incidência de ruídos

---

```

1:  ALGORITMO "Calculador de percentual do tempo de ensaio com incidência de
2:  ruídos"
3:  VAR
4:    descarga, energia, tempo: INTEIRO
5:    periodos: VETOR [1..3, 1..2] DE INTEIRO
6:    ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..3] DE REAL
7:    qtdePeriodo, qtdePeriodoRuido, qtdePeriodoDP, i: INTEIRO
8:  PROCEDIMENTO obterPeriodos()
9:  VAR
10:   perInicio, perFinal: INTEIRO
11:   maxTempo, qtdePeriodoTemp: REAL
12: INICIO
13:   //Obtendo valor do atributo "Tempo" do ultimo registro
14:   PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FAÇA
15:     maxTempo <- ruidosAmostra[i,tempo]
16:   FIMPARA

```

## Algoritmo 8 (continuação)

```

17: //Calculando quanto períodos de 60 segundos têm dentro da amostra de ruídos
18: qtdePeriodoTemp <- maxTempo / 60
19: SE( Int(qtdePeriodoTemp) < qtdePeriodoTemp ) ENTAO
20:   qtdePeriodo <- Int(qtdePeriodoTemp) + 1
21: FIMSE
22:
23: perInicio <- 1
24: perFinal <- 60
25:
26: PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FACA
27:   periodos[i, 1] <- perInicio
28:   periodos[i, 2] <- perFinal
29:
30:   perInicio <- perInicio + 60
31:   perFinal <- perFinal + 60
32: FIMPARA
33: FIMPROCEDIMENTO
34:
35: PROCEDIMENTO calculadoraPercEnsaioRuido(inicioIntervalo, finalIntervalo :
INTEIRO)
36:   VAR
37:   possuiRuido, possuiDP: LOGICO
38:   INICIO
39:   PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FACA
40:
41:     //Somente ruídos que registraram energia são utilizados no cálculo
42:     SE(ruidosAmostra[i,energia] > 0) ENTAO
43:
44:       SE (ruidosAmostra[i,tempo] >= inicioIntervalo) E (ruidosAmostra[i,tempo]
<= finalIntervalo) ENTAO
45:
46:         SE (ruidosAmostra[i,descarga] = 1) ENTAO
47:           possuiDP <- verdadeiro
48:         FIMSE
49:         possuiRuido <- verdadeiro
50:       FIMSE
51:     FIMSE
52:   FIMPARA
53:
54: SE (possuiDP) ENTAO
55:   qtdePeriodoDP <- qtdePeriodoDP + 1
56: FIMSE
57:
58: SE (possuiRuido) ENTAO

```

## Algoritmo 8 (continuação)

```

59:         qtdePeriodoRuido <- qtdePeriodoRuido + 1
60:         FIMSE
61:         FIMPROCEDIMENTO
62:         INICIO
63:         //Constantes
64:         descarga <- 1
65:         energia <- 2
66:         tempo <- 3
67:
68:         ruidosAmostra[1,descarga] <- 0 //Falso
69:         ruidosAmostra[1,energia] <- 1
70:         ruidosAmostra[1,tempo] <- 50.7283933
71:         ruidosAmostra[2,descarga] <- 1 //Verdadeiro
72:         ruidosAmostra[2,energia] <- 32
73:         ruidosAmostra[2,tempo] <- 50.7286865
74:         ruidosAmostra[3,descarga] <- 0
75:         ruidosAmostra[3,energia] <- 0
76:         ruidosAmostra[3,tempo] <- 80.7288138
77:         ruidosAmostra[4,descarga] <- 1
78:         ruidosAmostra[4,energia] <- 0
79:         ruidosAmostra[4,tempo] <- 80.7288362
80:         ruidosAmostra[5,descarga] <- 0
81:         ruidosAmostra[5,energia] <- 89
82:         ruidosAmostra[5,tempo] <- 160.7288362
83:         ruidosAmostra[6,descarga] <- 0
84:         ruidosAmostra[6,energia] <- 3
85:         ruidosAmostra[6,tempo] <- 160.7288362
86:
87:         obterPeriodos()
88:
89:         PARA i DE 1 ATE qtdePeriodo PASSO 1 FACA
90:             calculadoraPercEnsaioRuido(periodos[i, 1], periodos[i, 2])
91:         FIMPARA
92:
93:         ESCREVAL("Período do ensaio com incidência de DPs (T%) ", (qtdePeriodoDP
           * 100) / qtdePeriodo, ".")
94:         ESCREVAL("Período do ensaio com incidência de ruídos (T%) ",
           (qtdePeriodoRuido * 100) / qtdePeriodo, ".")
95:
96:         FIMALGORITMO

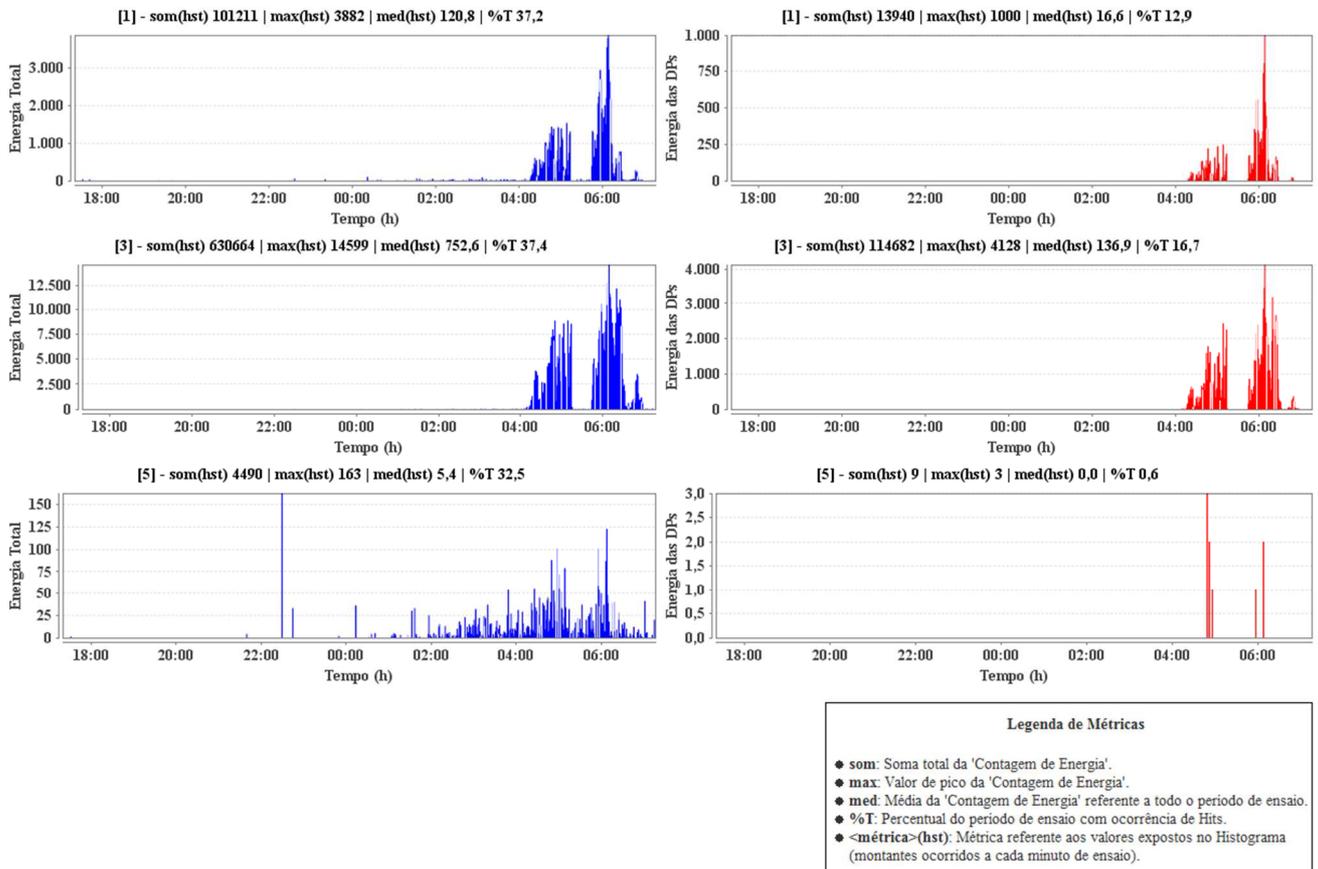
```

---

Os algoritmos de mensuração de ruídos e seus atributos até então demonstrados processam as informações do ponto de vista de todo o transformador. Entretanto, a solução

computacional descrita nesse trabalho também provém algumas métricas do ponto de vista de cada um dos sensores, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Histograma de ruído total (azul) e provenientes somente de DPs (vermelho) separados por canal.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tais métricas, todas também disponíveis nos histogramas gerados com dados obtidos em todo o transformador, inclusive recebendo o mesmo nome, são obtidas através de algoritmos idênticos aos demonstrados anteriormente, mudando somente a amostra de ruído processada, que por sua vez passa a ser agrupada por sensor. São elas:

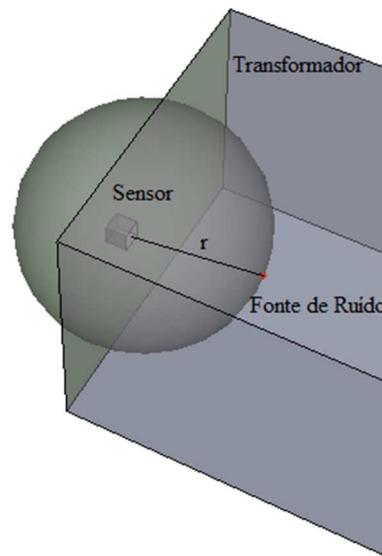
- 1) “som”: soma total da Contagem de Energia;
- 2) “max”: valor de pico da Contagem de Energia;
- 3) “med”: média da Contagem de Energia referente a todo o período de ensaio;
- 4) “%T”: Percentual do período de ensaio com ocorrência de ruídos; e
- 5) “<métrica> (hst)”: Métrica referente aos valores expostos no Histograma (montantes ocorridos a cada um minuto de ensaio).

Finalizado o processo de mensuração dos ruídos e seus atributos, os resultados são armazenados em banco de dados, para futura consulta, sempre respeitando a separação das informações provenientes de descarga parcial daquelas originadas de demais fontes de ruído.

## 2.4. Localização

O processo de localização das fontes de ruído, especialmente aqueles provocados por descargas parciais, é realizado neste trabalho com a aplicação do método de localização espacial descrito em [31]. O método emprega a analogia existente entre a forma de uma superfície esférica, correlacionando seu raio, o ponto onde se encontra o sensor que registrou o ruído e a fonte deste, conforme ilustrado na Figura 12.

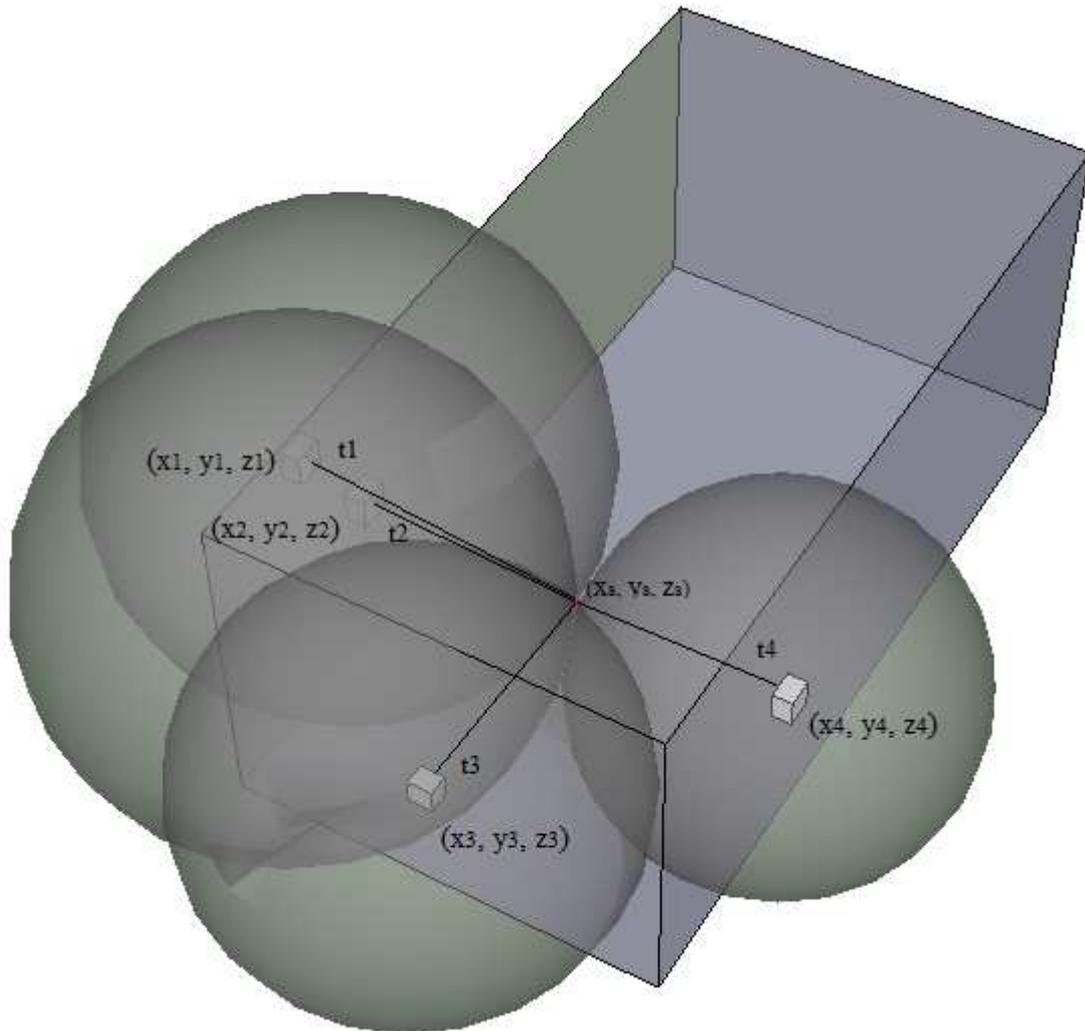
Figura 12 - Representação da correlação entre a fonte do ruído, a forma de uma esfera e a posição do sensor.



Fonte: elaborado pelo autor.

O conjunto de equações demonstrado em [31] realiza a localização tridimensional da fonte de ruído, de forma direta, com base nas posições conhecidas de quatro (4) sensores distintos, que por sua vez tenham detectado o mesmo ruído. A localização tridimensional da fonte do ruído é realizada através da intersecção das quatro esferas conforme visualmente demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – Intersecção de quatro (4) esferas



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a utilização correta do método de localização espacial mencionado, é necessário realizar a adequação dos dados. Como os ruídos detectados pelo ensaio de emissão acústica são registrados de forma sequencial e assíncrona pelos sensores, é preciso destacar quatro eventos consecutivos capturados por diferentes sensores, que provavelmente sejam decorrentes do mesmo ruído no transformador, conforme demonstrado no Algoritmo 09 (cuja interpretação pode ser realizada através da ferramenta *VisuAlg* [30]).

Algoritmo 9 - Algoritmo para seleção de quatro (04) ruídos consecutivos captados por sensores distintos

- 
- ALGORITMO** "Algoritmo para seleção de quatro (04) ruídos consecutivos captados por sensores distintos"
- 
- 1: **VAR**
  - 2: **VAR**
  - 3: **i**, indice: **INTEIRO**
-

## Algoritmo 9 (continuação)

---

```

4:   sensor, tempo: INTEIRO
5:   ruidos: VETOR [1..4, 1..2] DE REAL
6:   ruidosAmostra: VETOR [1..6, 1..2] DE REAL
7:   FUNCAO retornarPosicaoVazia() : INTEIRO
8:   VAR
9:     j : INTEIRO
10:  INICIO
11:    PARA j DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
12:      SE ruidos[j,sensor] = 0 ENTAO
13:        INTERROMPA
14:        FIMSE
15:      FIMPARA
16:
17:    RETORNE j
18:  FIMFUNCAO
19:  PROCEDIMENTO limparListaRuidos()
20:    VAR
21:      k : INTEIRO
22:    INICIO
23:      PARA k DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
24:        ruidos[k, tempo] <- 0
25:        ruidos[k, sensor] <- 0
26:      FIMPARA
27:    FIMPROCEDIMENTO
28:  PROCEDIMENTO reagruparListaRuidos(indice : INTEIRO)
29:    VAR
30:      l, contador : INTEIRO
31:      ruidosAux: VETOR [1..4, 1..2] DE REAL
32:    INICIO
33:      contador <- 1
34:
35:      //Armazenando somente os ruídos que serão processados
36:      PARA l DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
37:        SE l <> indice ENTAO
38:          ruidosAux[contador, tempo] <- ruidos[l, tempo]
39:          ruidosAux[contador, sensor] <- ruidos[l, sensor]
40:
41:          contador <- contador + 1
42:        FIMSE
43:      FIMPARA
44:
45:      limparListaRuidos()
46:
47:      //Atualizando a lista de ruídos com somente aqueles que serão processados

```

---

## Algoritmo 9 (continuação)

---

```

48:     PARA l DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
49:         ruidos[l, tempo] <- ruidosAux[l, tempo]
50:         ruidos[l, sensor] <- ruidosAux[l, sensor]
51:     FIMPARA
52: FIMPROCEDIMENTO
53: FUNCAO validarSelecaoCanal(canalSelecionado :REAL) : INTEIRO
54:     VAR
55:         m : INTEIRO
56:     INICIO
57:         PARA m DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
58:             SE ruidos[m,sensor] = canalSelecionado ENTAO
59:                 reagruparListaRuidos(m)
60:             INTERROMPA
61:         FIMSE
62:     FIMPARA
63:
64:     RETORNE retornarPosicaoVazia()
65: FIMFUNCAO
66: PROCEDIMENTO localizar()
67:     VAR
68:         n : INTEIRO
69:     INICIO
70:         ESCREVAL("Grupo de 4 ruídos selecionados para Localização")
71:
72:         //Ruídos que serão processados pelo algoritmo de Localização Tridimensional
73:         PARA n DE 1 ATE 4 PASSO 1 FACA
74:             ESCREVAL("Sensor ", ruidos[n, sensor], ", tempo = ", ruidos[n, tempo])
75:         FIMPARA
76:     FIMPROCEDIMENTO
77:
78:     INICIO
79:         //Constantes
80:         sensor <- 1
81:         tempo <- 2
82:
83:         //Amostra de ruídos detectados ordenados por tempo (instante de detecção)
84:         ruidosAmostra[1,sensor] <- 20
85:         ruidosAmostra[1,tempo] <- 49974.1136120
86:         ruidosAmostra[2,sensor] <- 20
87:         ruidosAmostra[2,tempo] <- 49974.1548385
88:         ruidosAmostra[3,sensor] <- 17
89:         ruidosAmostra[3,tempo] <- 49974.1630395
90:         ruidosAmostra[4,sensor] <- 18
91:         ruidosAmostra[4,tempo] <- 49974.1633617

```

---

## Algoritmo 9 (continuação)

---

```

92:   ruidosAmostra[5,sensor] <- 20
93:   ruidosAmostra[5,tempo] <- 49974.1637750
94:   ruidosAmostra[6,sensor] <- 19
95:   ruidosAmostra[6,tempo] <- 49974.1639255
96:
97:   PARA i DE 1 ATE 6 PASSO 1 FAÇA
98:
99:       //Caso o sensor do ruído corrente já tenha sido selecionado, utilizamos o ruído
100:      corrente para localização
101:      indice <- validarSelecaoCanal(ruidosAmostra[i, sensor])
102:
103:       //Armazenando o ruído na ordem (através do índice retornado) em que foram
104:      detectados
105:      ruidos[indice, tempo] <- ruidosAmostra[i, tempo]
106:      ruidos[indice, sensor] <- ruidosAmostra[i, sensor]
107:
108:      SE(ruidos[1, sensor] > 0) E (ruidos[2, sensor] > 0) E
109:      (ruidos[3, sensor] > 0) E (ruidos[4, sensor] > 0) ENTAO
110:      localizar()
111:      FIMSE
112:      FIMPARA
113:
114:   FIMALGORITMO

```

---

Conforme descrito em [31], através de quatro sensores (cujas localizações tridimensionais são conhecidas) é possível definir a diferença em distância da fonte de um ruído para um sensor  $i$  e dessa mesma fonte para um sensor  $j$  (no texto, apresentada como  $d_{ij}$ ) em termos da desconhecida distância absoluta dessa fonte, para cada um dos sensores, da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 d_{ij} &= D_i - D_j \quad i, j = 1, 2, 3, 4 \\
 d_{ij} &= -d_{ji} \\
 d_{ij} &= c(t_i - t_j) = c\Delta t \quad (2)
 \end{aligned}$$

Sendo:

- $c$ : a velocidade do som no meio de propagação (1.390 m/s admitidos para o óleo isolante utilizado pelo transformador alvo desse trabalho); e
- $\Delta t$ : a diferença do tempo de chegada do sinal acústico entre os sensores.

Partindo de (2) e relembrando a analogia exibida na Figura 12, a distância entre a fonte do ruído e determinado sensor é obtida através da fórmula para cálculo do raio de uma esfera, como se segue em (3).

$$(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2 = D_i^2 \quad i = 1, 4 \quad (3)$$

Onde  $(x_1, y_1, z_1)$  identifica a posição tridimensional do sensor um (1) (similarmente para os sensores 2 a 4),  $(x_s, y_s, z_s)$  é a posição tridimensional da fonte do ruído, e  $D_1$  a distância do sensor um (1) para essa fonte (novamente, similarmente para os demais sensores).

É realizada a substituição das distâncias calculadas entre os sensores (2) na equação apresentada em (3), obtendo duas novas equações (4) e (5), sendo que, as equações (2) são resolvidas diretamente em função da posição do sensor do último ruído do grupo, ou seja,  $D_1 = d_{14} - D_4$ , e da mesma forma para os demais sensores.

$$x_i^2 - 2x_i x_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_i y_s + y_s^2 + z_i^2 - 2z_i z_s + z_s^2 = (d_{i4} + D_4)^2, \quad i = 1, 3 \quad (4)$$

$$x_4^2 - 2x_4 x_s + x_s^2 + y_4^2 - 2y_4 y_s + y_s^2 + z_4^2 - 2z_4 z_s + z_s^2 = D_4^2 \quad (5)$$

Com base em [31], as equações de diferença de tempo de chegada (detecção) (4) e (5), são resolvidas de forma direta, retornando a provável localização da fonte do ruído detectado.

O Algoritmo 10, que diferentemente dos demais apresentados nesse trabalho não pode ser interpretado pela ferramenta *VisuAlg* [30], demonstra o método de localização tridimensional.

A impossibilidade de interpretação se dá em função da necessidade da realização de cálculos com matrizes, que para melhor entendimento do algoritmo devem ser dispostas em métodos separados. Entretanto, a ferramenta possui a limitação de não permitir a passagem de matrizes (vetores) como parâmetro, seja de procedimento ou função.

Algoritmo 10 - Localização tridimensional das fontes de ruídos

---

```

1:  ALGORITMO "Localização tridimensional das fontes de ruídos"
2:  VAR
3:    x, y, z, sensor, tempo, velPropagacao : INTEIRO
4:    ruido1 : VETOR [1..5] DE REAL
5:    ruido2 : VETOR [1..5] DE REAL
6:    ruido3 : VETOR [1..5] DE REAL
7:    ruido4 : VETOR [1..5] DE REAL
8:    tempo14, tempo24, tempo34 : REAL
9:    dist14, dist24, dist34  : REAL
10:   coord1, coord2, coord3, coord4, coordFonte : VETOR [1..3] DE REAL
11:   R1, R2, R3 : REAL
12:   delta, d : VETOR [1..3,1..1] DE REAL
13:   M : VETOR [1..3,1..3] DE REAL
14:   a, b, c : REAL
15:  INICIO
16:    //Constantes

```

---

## Algoritmo 10 (continuação)

---

```

17:  x  <- 1
18:  y  <- 2
19:  z  <- 3
20:  sensor <- 1
21:  tempo <- 2
22:
23:  velPropagacao <- 1390 //Velocidade (m/s) de propagação do som no óleo isolante
24:
25:  //Ruídos detectados por 4 sensores distintos, previamente selecionados
26:  ruido1[x] <- 0.15 //Posição tridimensional "x" do sensor que detectou o ruído
27:  ruido1[y] <- 0.5  //Posição tridimensional "y" do sensor que detectou o ruído
28:  ruido1[z] <- 1.64 //Posição tridimensional "z" do sensor que detectou o ruído
29:  ruido1[sensor] <- 11
30:  ruido1[tempo] <- 1228.7283933
31:  ruido2[x] <- 1.9
32:  ruido2[y] <- 0.5
33:  ruido2[z] <- 1.64
34:  ruido2[sensor] <- 9
35:  ruido2[tempo] <- 1228.7286865
36:  ruido3[x] <- 0.15
37:  ruido3[y] <- 0.5
38:  ruido3[z] <- 0.0
39:  ruido3[sensor] <- 1
40:  ruido3[tempo] <- 1228.7288138
41:  ruido4[x] <- -0.07
42:  ruido4[y] <- 2.45
43:  ruido4[z] <- 0.29
44:  ruido4[sensor] <- 14
45:  ruido4[tempo] <- 1228.7288362
46:
47:  //Tempo necessário para percorrer as distâncias entre o 3 primeiros sensores e o
último
48:  tempo14 <- ruido1[tempo] - ruido4[tempo]
49:  tempo24 <- ruido2[tempo] - ruido4[tempo]
50:  tempo34 <- ruido3[tempo] - ruido4[tempo]
51:
52:  //Distância percorrida em função do tempo calculado acima
53:  dist14 <- velPropagacao * tempo14
54:  dist24 <- velPropagacao * tempo24
55:  dist34 <- velPropagacao * tempo34
56:
57:  coord1[x] <- ruido1[x]
58:  coord1[y] <- ruido1[y]
59:  coord1[z] <- ruido1[z]

```

---

## Algoritmo 10 (continuação)

---

```

60:   coord2[x] <- ruído2[x]
61:   coord2[y] <- ruído2[y]
62:   coord2[z] <- ruído2[z]
63:   coord3[x] <- ruído3[x]
64:   coord3[y] <- ruído3[y]
65:   coord3[z] <- ruído3[z]
66:   coord4[x] <- ruído4[x]
67:   coord4[y] <- ruído4[y]
68:   coord4[z] <- ruído4[z]
69:
70:   //Subtrai-se as posições dos 3 primeiros sensores pela posição do último
71:   coord1[x] <- coord1[x] - coord4[x]
72:   coord1[y] <- coord1[y] - coord4[y]
73:   coord1[z] <- coord1[z] - coord4[z]
74:
75:   coord2[x] <- coord2[x] - coord4[x]
76:   coord2[y] <- coord2[y] - coord4[y]
77:   coord2[z] <- coord2[z] - coord4[z]
78:
79:   coord3[x] <- coord3[x] - coord4[x]
80:   coord3[y] <- coord3[y] - coord4[y]
81:   coord3[z] <- coord3[z] - coord4[z]
82:
83:   //Coordenada do último sensor momentaneamente considerada a origem (0,0,0)
84:   coord4[x] <- coord4[x] - coord4[x]
85:   coord4[y] <- coord4[y] - coord4[y]
86:   coord4[z] <- coord4[z] - coord4[z]
87:
88:   //Calcula-se a distância entre o último sensor e cada sensor através do cálculo do
89:   //raio de uma esfera ( $R^2 = x^2 + y^2 + z^2$ )
90:   R1 <- raizQ(quad(coord1[x] - coord4[x]) + quad(coord1[y] - coord4[y]) +
91:   quad(coord1[z] - coord4[z]))
92:   R2 <- raizQ(quad(coord2[x] - coord4[x]) + quad(coord2[y] - coord4[y]) +
93:   quad(coord2[z] - coord4[z]))
94:   R3 <- raizQ(quad(coord3[x] - coord4[x]) + quad(coord3[y] - coord4[y]) +
95:   quad(coord3[z] - coord4[z]))
96:
97:   //Mapeando elemento "delta" da equação
98:   delta[1,1] <- quad(R1) - quad(dist14)
99:   delta[2,1] <- quad(R2) - quad(dist24)
100:  delta[3,1] <- quad(R3) - quad(dist34)
101:
102:   //Mapeando elemento "d" da equação
103:   d[1,1] <- dist14
104:   d[2,1] <- dist24

```

---

## Algoritmo 10 (continuação)

---

```

101:   d[3,1] <- dist34
102:
103:   //Mapeando elemento "M" da equação
104:   M[1,1] <- coord1[x]
105:   M[1,2] <- coord1[y]
106:   M[1,3] <- coord1[z]
107:   M[2,1] <- coord2[x]
108:   M[2,2] <- coord2[y]
109:   M[2,3] <- coord2[z]
110:   M[3,1] <- coord3[x]
111:   M[3,2] <- coord3[y]
112:   M[3,3] <- coord3[z]
113:
114:   //Calcula-se o coeficiente do termo que possui a incógnita ao quadrado (Rs^2)
      a <- 4 - 4 * transporMatriz(d) * transporMatriz(inverterMatriz(M)) *
115: inverterMatriz(M) * d
116:
117:   //Calcula-se o coeficiente do termo que possui a incógnita (Rs)
      b <- (2 * transporMatriz(d) * transporMatriz(inverterMatriz(M)) *
118: inverterMatriz(M) * delta) +
          (2 * transporMatriz(delta) * transporMatriz(inverterMatriz(M)) *
119: inverterMatriz(M) * d)
120:   //Calcula-se o coeficiente do termo independente
      c <- -1 * (transporMatriz(delta) * transporMatriz(inverterMatriz(M)) *
121: inverterMatriz(M) * delta)
122:
123:   //Substituem-se os valores acima calculados na fórmula geral de resolução de
      equações de 2º grau
124:   raio <- (-1 * b + raizQ(quad(b) - 4 * a * c)) / (2 * a)
125:
126:   coordFonte <- 0.5 * inverterMatriz(M) * (delta - 2 * raio * d)
127:
128:   //Adiciona-se à provável posição da fonte do ruído a posição do último
129:   //sensor, que para efeito de cálculo, foi considerada (0,0,0)
130:   coordFonte[x] <- fonte[x] + ruido4[x]
131:   coordFonte[y] <- fonte[y] + ruido4[y]
132:   coordFonte[z] <- fonte[z] + ruido4[z]
133:
134:   ESCREVA("Validar localização")
135:
136:   FIMALGORITMO

```

---

Devido à heterogeneidade dos caminhos de propagação e a possibilidade de que os quatro (4) registros de diferentes sensores separados para o cálculo da localização tridimensional não sejam provenientes de um mesmo ruído, se faz necessária a realização algumas validações na posição tridimensional calculada, a fim de validar sua precisão. As validações verificam a precisão da posição calculada e descartam posições tridimensionais localizadas fora da área monitorada do transformador.

A primeira validação consiste em uma verificação simples baseada na posição estimada  $(x_s, y_s, z_s)$  da fonte com relação às mínimas e máximas posições  $(x, y, z)$  dos sensores que, de forma indireta, definem os limites do domínio monitorado, no caso, o volume do transformador contemplado pelo isolamento por óleo. Uma vez que a posição encontrada passe por esse primeiro crivo, uma segunda validação, mais restritiva, é realizada, como demonstrado no Algoritmo 11.

Algoritmo 11 - Validação da localização tridimensional das fontes de ruídos

---

```

1:  ALGORITMO "Validação da localização tridimensional das fontes de ruídos"
2:  VAR
3:    x, y, z, t: INTEIRO
4:    c: INTEIRO
5:    dt2, dt3, dt4: REAL
6:    ruido1, ruido2, ruido3, ruido4, fonte: VETOR [1..4] DE REAL
7:  PROCEDIMENTO validarLocalizacao()
8:    VAR
9:      tf1, tf2, tf3, tf4, dtf2, dtf3, dtf4, erro: REAL
10:  INICIO
11:    dt2 <- ruido2[t] - ruido1[t]
12:    dt3 <- ruido3[t] - ruido1[t]
13:    dt4 <- ruido4[t] - ruido1[t]
14:
15:    tf1 <- raizQ(quad(ruido1[x] - fonte[x]) + quad(ruido1[y] - fonte[y]) +
16:      quad(ruido1[z] - fonte[z])) / c
17:    tf2 <- raizQ(quad(ruido2[x] - fonte[x]) + quad(ruido2[y] - fonte[y]) +
18:      quad(ruido2[z] - fonte[z])) / c
19:    tf3 <- raizQ(quad(ruido3[x] - fonte[x]) + quad(ruido3[y] - fonte[y]) +
20:      quad(ruido3[z] - fonte[z])) / c
21:    tf4 <- raizQ(quad(ruido4[x] - fonte[x]) + quad(ruido4[y] - fonte[y]) +
22:      quad(ruido4[z] - fonte[z])) / c
23:
24:    dtf2 <- tf2 - tf1
25:    dtf3 <- tf3 - tf1
26:    dtf4 <- tf4 - tf1

```

---

## Algoritmo 11 (continuação)

---

```

24:     //Erro quadrático entre as diferenças de tempo calculadas nos passos anteriores
      erro <- raizQ(quad(dt2 - dt1) + quad(dt3 - dt2) + quad(dt4 - dt3)) /
25: raizQ(quad(dt2) + quad(dt3) + quad(dt4))
26:
27:     SE (erro < 0.000001) ENTAO
28:         ESCREVA("Erro quadrático = ", erro, " -> Localização válida!")
29:     SENAO
30:         ESCREVA("Erro quadrático = ", erro, " -> Localização inválida!")
31:     FIMSE
32: FIMPROCEDIMENTO
33: INICIO
34:     x <- 1
35:     y <- 2
36:     z <- 3
37:     t <- 4
38:     c <- 1390 //Velocidade de propagação do som no óleo isolante
39:
40:     //Info. do 1º ruído processado
41:     ruido1[x] <- 0.15 //Posição (x) do sensor que detectou o ruído
42:     ruido1[y] <- 0.5 //Posição (y) do sensor que detectou o ruído
43:     ruido1[z] <- 1.64 //Posição (z) do sensor que detectou o ruído
44:     ruido1[t] <- 1228.7283933 //Instante em que o ruído foi detectado
45:
46:     //Info. do 2º ruído processado
47:     ruido2[x] <- 1.9
48:     ruido2[y] <- 0.5
49:     ruido2[z] <- 1.64
50:     ruido2[t] <- 1228.7286865
51:
52:     //Info. do 3º ruído processado
53:     ruido3[x] <- 0.15
54:     ruido3[y] <- 0.5
55:     ruido3[z] <- 0.0
56:     ruido3[t] <- 1228.7288138
57:
58:     //Info. do 4º ruído processado
59:     ruido4[x] <- -0.07
60:     ruido4[y] <- 2.45
61:     ruido4[z] <- 0.29
62:     ruido4[t] <- 1228.7288362
63:
64:     //Info. da provável fonte do ruído
65:     fonte[x] <- 0.7258967
66:     fonte[y] <- 1.3524004

```

---

## Algoritmo 11 (continuação)

---

```
67:   fonte[z] <- 1.3092703
68:
69:   validarLocalizacao()
70:   FIMALGORITMO
```

---

Uma vez considerada válida a localização tridimensional, a informação é então registrada em banco de dados e marcada como sendo localização tridimensional de um ruído proveniente de descarga parcial ou não, para futura consulta.

Por padrão, as localizações são consideradas não provenientes de descarga. Ao final do processamento de localização, é verificado se algum dos quatro (4) ruídos previamente selecionados foi marcado, através do método de “Identificação” (previamente descrito nesse trabalho), como sendo proveniente de DP. Caso positivo, localização tridimensional também é marcada com sendo a fonte de uma provável descarga parcial.

### 3. Capítulo 3

#### **Aplicação dos métodos de identificação, mensuração e localização tridimensional: estudo de caso**

Este capítulo tem como objetivo demonstrar os resultados provenientes da utilização da solução computacional que contempla os métodos de identificação de descargas parciais, mensuração de atributos de ruídos (total, provenientes de toda fonte e, daqueles provenientes de descarga parcial) e localização tridimensional das fontes de ruído.

Com base em uma série de 4 (quatro) ensaios de emissão acústica, realizados em um transformador de propriedade da concessionária de energia elétrica do Estado de Goiás, CELG, este capítulo descreve desde os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios, os passos necessários para a realização desses, diagnósticos obtidos através da análise dos resultados providos pela solução computacional, tomada de decisão em função de tais resultados, resultados obtidos após a tomada de decisão e, finalmente, a conclusão quanto o benefício da utilização da solução computacional no que tange a conservação da boa condição operacional do transformador de potência, alvo desse estudo de caso.

Esse estudo de caso foi realizado numa subestação de energia elétrica, no transformador identificado nesse trabalho como TD03, de 33,3 MVA, com tensões de 138 kV/13,8 kV, nos seguintes períodos:

- 11 a 15 de junho de 2012
- 01 a 05 de outubro de 2012
- 10 a 13 de dezembro de 2012
- 01 a 04 de abril de 2013

São descritos primeiramente os equipamentos utilizados nos ensaios, os passos elaborados e executados conforme especificado em [33], assim como detalhes a respeito do transformador de potência citado nesse estudo de caso. A seguir, são descritos os resultados e conclusões a respeito de cada ensaio, omitindo as descrições supracitadas por serem as mesmas.

### 3.1. Equipamentos para ensaio de emissão acústica

Para a realização dos ensaios descritos desse estudo de caso foi utilizado uma unidade do equipamento de registro de emissões acústicas, composto de 28 canais, denominado DISP 28 [3], da empresa *Physical Acoustics South América* (PASA) apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Montagem do equipamento de registro de emissões acústicas: DISP



Fonte: Marques, A. P. [6]

Conectados ao DISP foram dispostos 15 (quinze) sensores piezoelétricos do tipo R15I-AST, cujo exemplar pode ser visto na Figura 15, com faixa de frequência de operação entre 70 e 200 kHz e pré-amplificador de 40 dB.

Figura 15 - Sensor R15I-AST com pré-amplificador integrado



Fonte: internet: <http://goo.gl/OckmTT> (acesso em 17/12/2013)

Com o objetivo de proteger técnicos, engenheiros e equipamentos envolvidos nos ensaios de possíveis intempéries, um abrigo portátil foi montado sempre considerando os fatores abaixo, podendo ser observado na Figura 16:

- a) Lado secundário dos transformadores;
- b) Longe dos para-raios;
- c) Próximo ao transformador alvo; e
- d) Fácil acesso de veículos para descarregar os equipamentos.

Figura 16 – Abrigo com proteção contra intempéries



Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

### 3.2. Procedimento para ensaio de EA

Para a realização dos ensaios, primeiramente foram observados o atendimento aos requisitos e condições necessárias para a segurança no trabalho com eletricidade, descritos em [32].

Em seguida, foi realizado o aterramento do sistema DISP ao sistema de aterramento elétrico da subestação, conforme Figura 17.

Figura 17 – Aterramento dos equipamentos eletroeletrônicos utilizados no ensaio



Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

Foram utilizados 15 (quinze) canais dos 28 (vinte e oito) disponíveis no sistema DISP, sendo que, um sensor conectado ao canal de número 15 foi instalado em uma estrutura de aço distante do transformador de potência para fins de registro dos ruídos originados da chuva, para futura filtragem de dados (caso necessário), conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Disposição do sensor (conectado ao canal n° 15) para registro de ruídos de chuva



Fonte: Marques, A. P. [6]

Os catorze sensores de EA restantes foram posicionados no transformador de potência considerando-se: o projeto (cujo desenho encontra-se no Apêndice A); as características de operação; e o histórico do equipamento a ser submetido aos ensaios, conforme especificado em

[33]. Na tabela 3, são apresentadas as coordenadas tridimensionais de localização dos sensores dispostos ao longo do tanque do transformador de potência, sendo que, o ponto de origem (0,0,0) foi adotado como sendo o canto inferior esquerdo do tanque, do lado de entrada de 138 kV.

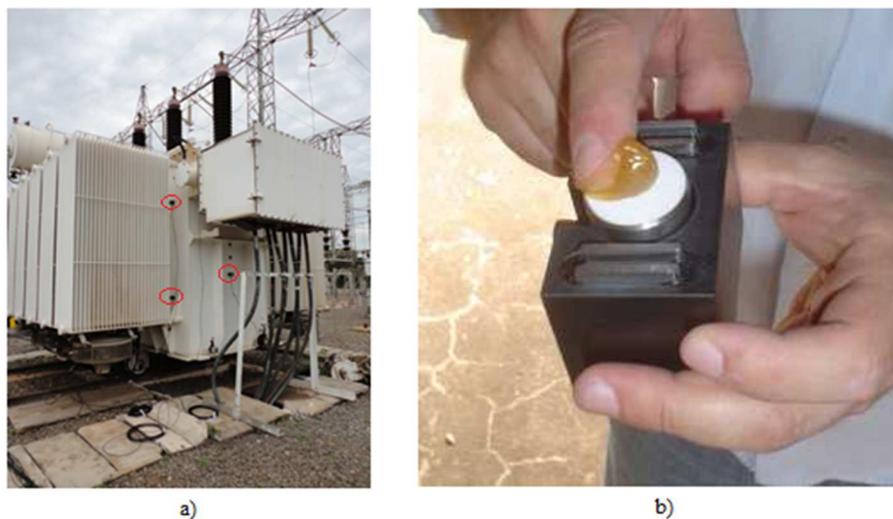
Tabela 3 - Localização dos sensores acoplados no transformador TD03

Nº do Canal	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	300	700	0
2	300	1960	0
3	2135	450	0
4	4311	2060	0
5	4311	500	0
6	4511	2000	750
7	4311	700	1500
8	4311	2060	1500
9	2135	450	1500
10	300	1960	1500
11	300	700	1500
12	0	1000	750
13	- 150	1970	1300
14	- 150	1970	200

Fonte: Marques, A. P. [6]

Os sensores foram fixados na parte externa do tanque do transformador por meio de suporte magnético próprio e empregou-se graxa automotiva para evitar a existência de bolha (espaço vazio) entre o sensor e a parede do tanque [2] [10] como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – a) Fixação de sensores no Transformador; b) Aplicação de graxa automotiva no sensor.



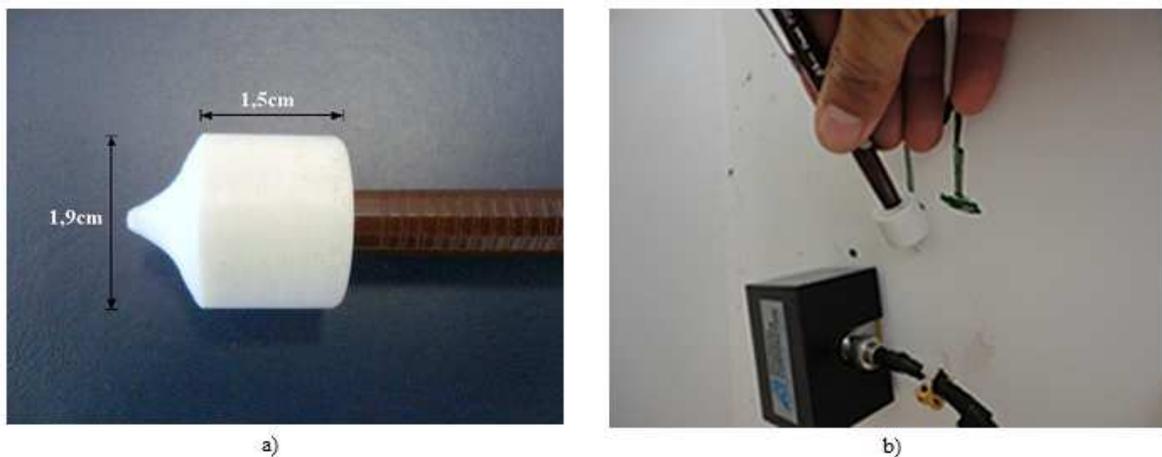
Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

Cabe ressaltar que, os sensores de EA foram distribuídos na superfície externa do tanque dos equipamentos, de forma que todo os volumes internos fossem monitorados, e também, respeitando a distância menor que 3 (três) metros entre os sensores, conforme [33].

Novamente conforme [33], é descrito que após a montagem do equipamento para ensaio acústico, deve ser executada uma verificação do acoplamento dos sensores e da continuidade do circuito. Para tal, uma onda acústica reprodutível deve ser gerada pela quebra de uma ponta de grafite 2H, com 0,3 mm de diâmetro, sobre a parede do tanque, ao lado de cada sensor. Deve ser quebrado sempre o mesmo comprimento de grafite (2 mm é recomendado), em um mesmo ângulo e orientação. A amplitude do pico, detectada a partir desse evento simulado, não deve variar mais do que 3 dB da média de todos os sensores. Esta verificação deve ser repetida imediatamente após os ensaios e sempre que houver indicações da possibilidade de uma mudança na eficiência do acoplamento ou na continuidade do circuito [33].

Para que a quebra do grafite fosse realizada de forma uniforme conforme [33], foi utilizado um dispositivo, confeccionado em tecnil [10], cuja construção e forma de utilização podem se observados na Figura 20.

Figura 20 – Verificação de resposta dos sensores - a) dispositivo utilizado; b) quebra de grafite



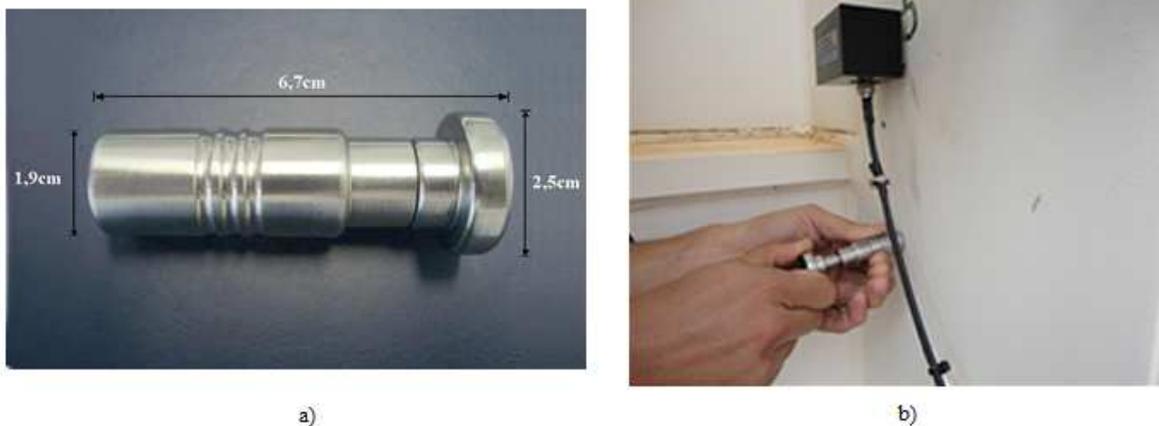
Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

Os resultados deste teste de verificação de acoplamento e continuidade do circuito dos sensores foram satisfatórios em todos os 4 (quatro) ensaios, uma vez que os quatorze sensores responderam adequadamente, com uma diferença entre as médias (individual com a geral) menor que 3,0 dB, valor de referência, conforme [33].

Segundo [33], para assegurar o bom funcionamento dos sensores, uma técnica complementar, que não substitui a anterior (acoplamento e continuidade do circuito), pode ser realizada abalroando-se um objeto metálico contra a face externa do tanque do equipamento, para gerar um sinal acústico que possa ser percebido pelos sensores distribuídos ao longo do transformador. Os sinais registrados pelos sensores devem ser comparados para verificar se não existem grandes diferenças de captação entre eles.

Esse teste de abrangência dos sensores pode ser efetuado com o uso de uma moeda [33], entretanto, nesse estudo de caso, ele foi realizado com a utilização de um dispositivo desenvolvido em aço cujo intuito é garantir a repetibilidade para cada um dos sensores [10], em cada um dos 4 (quatro) ensaios realizados. A Figura 21 apresenta a construção e utilização de tal dispositivo.

Figura 21 – a) Ferramenta para abalroamento (sempre na mesma intensidade); b) Teste de abrangência.



Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

Uma vez concluído todo o procedimento descrito nesse item, iniciam-se os pré-ensaios de emissão acústica no transformador de potência TD03. Tal procedimento foi adotado nesse estudo de caso com o objetivo de garantir a correta configuração do sistema no que diz respeito à sensibilidade dos sensores, de modo a estabelecer um padrão claro de detecção acústica.

Os pré-ensaios, por definição da equipe técnica, são realizados durante um período de 4 (quatro) horas. O período de ensaio propriamente dito depende do histórico e condições operacionais de cada equipamento e deve ser estabelecido caso a caso [33]. Por isso, após a realização do pré-ensaio, com a confirmação do bom desempenho da instalação e da

configuração, iniciam-se os ensaios, com período total de monitoramento de vinte e quatro (24) horas, definido pela concessionária de energia do Estado de Goiás.

### 3.3. Transformador de estudo

Trata-se de um equipamento trifásico de 33,3 MVA, tensões de 138 kV/13,8 kV, do fabricante COEMSA Ansaldo S.A. – ano de 1998, em operação na subestação da CELG.

A Seleção desse transformador de potência para esse estudo de caso, identificado aqui como TD03, apresentado na Figura 22, se deu em função dos resultados obtidos do ensaio de emissão acústica realizado no período entre 11 a 15 de junho de 2012 no qual foi detectado um volume considerável de indícios de descargas parciais localizadas por quase todo o transformador.

Figura 22 – Transformador TD03



Fonte: Marques, A. P. [6]

Com base nesse resultado, a equipe responsável pela manutenção dos transformadores decidiu desenergizar esse transformador para a realização de uma filtragem do óleo isolante com o intuito de reduzir a ocorrência de descargas.

Cabe ressaltar que antes da realização do ensaio supracitado, e antes de todos os outros ensaios descritos nesse trabalho, sempre é coletada uma amostra do óleo isolante do transformador para análise de gases dissolvidos (cromatografia) a ser realizada no laboratório da CELG. Tal técnica, também referenciada como AGD, apesar de fazer parte do cotidiano de manutenção dos transformadores da concessionária não será abordada nesse trabalho, por apresentar baixa sensibilidade à ocorrência de descargas parciais [4].

A partir dos resultados da AGD no óleo isolante do transformador TD03, antes e depois do processo de filtragem, ficou comprovado o aumento da capacidade dielétrica do elemento isolante. Possibilitando assim que esse transformador fosse colocado novamente em operação e passasse a ser monitorado periodicamente, para fins de acompanhamento de seu funcionamento.

O primeiro ensaio de emissão acústica realizado nesse transformador após a filtragem do óleo isolante se deu entre os dias 01 e 05 de outubro de 2012. No item direcionado a esse ensaio em particular, alguns resultados e ilustrações sobre o processo de filtragem serão apresentados.

### **3.4. Utilização do *software* desenvolvido**

Após a realização do ensaio de emissão acústica, um arquivo contemplando os registros de ruídos detectados pelos sensores é disponibilizado pelo sistema DISP. Nesse arquivo, do tipo texto, são registrados os fenômenos acusticamente detectados pelos sensores; sendo gravada uma linha, para cada fenômeno detectado, contemplando atributos do sinal, tais como: tempo (instante de detecção do sinal com base no momento de início do ensaio), canal (associado ao sensor que detectou o sinal), energia propagada e amplitude.

Com base em três (3) desses atributos, mais especificamente, tempo, canal e energia, a solução computacional elaborada nesse trabalho provê a identificação dos ruídos originários unicamente de descargas parciais, mensuração desses atributos possibilitando a visualização da dinâmica de ocorrência dos ruídos e localização tridimensional da fonte desses.

Para a realização desse estudo de caso, composto por quatro (4) ensaios de emissão acústica, as informações a respeito de cada um dos ensaios foram cadastradas no sistema da mesma forma; assim, a representação desse cadastro será apresentada nesse trabalho uma única vez, com foco no primeiro deles.

A primeira etapa para o processamento do arquivo resultante do ensaio de emissão acústica consistiu no cadastro das informações referentes ao transformador, inclusive a posição tridimensional de fixação dos sensores, que sempre parte do número um (1), assim como a velocidade de propagação do som através do óleo isolante, como pode ser observada na Figura 23.

Figura 23 – Cadastro de informações sobre o transformador

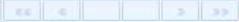
**Transformador**

Id da Celg

Velocidade do Som (m/s)

Coordenadas do Sensor (mm)  x  y  z  

Sensor	Posição X	Posição Y	Posição Z	Excluir
<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="300"/>	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="0"/>	
<input type="text" value="2"/>	<input type="text" value="300"/>	<input type="text" value="1.960"/>	<input type="text" value="0"/>	
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="2.135"/>	<input type="text" value="450"/>	<input type="text" value="0"/>	
<input type="text" value="4"/>	<input type="text" value="4.311"/>	<input type="text" value="2.060"/>	<input type="text" value="0"/>	
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="4.311"/>	<input type="text" value="500"/>	<input type="text" value="0"/>	
<input type="text" value="6"/>	<input type="text" value="4.511"/>	<input type="text" value="2.000"/>	<input type="text" value="750"/>	
<input type="text" value="7"/>	<input type="text" value="4.311"/>	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="1.500"/>	
<input type="text" value="8"/>	<input type="text" value="4.311"/>	<input type="text" value="2.060"/>	<input type="text" value="1.500"/>	
<input type="text" value="9"/>	<input type="text" value="2.135"/>	<input type="text" value="450"/>	<input type="text" value="1.500"/>	
<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="300"/>	<input type="text" value="1.960"/>	<input type="text" value="1.500"/>	
<input type="text" value="11"/>	<input type="text" value="300"/>	<input type="text" value="700"/>	<input type="text" value="1.500"/>	
<input type="text" value="12"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="1.000"/>	<input type="text" value="750"/>	
<input type="text" value="13"/>	<input type="text" value="-150"/>	<input type="text" value="1.970"/>	<input type="text" value="1.300"/>	
<input type="text" value="14"/>	<input type="text" value="-150"/>	<input type="text" value="1.970"/>	<input type="text" value="200"/>	



Fonte: elaborado pelo autor.

Em seguida, foi realizado o cadastro das informações a respeito do ensaio; iniciando pelas datas e horários (contemplando horas e minutos) de início e fim do ensaio, uma descrição para identificação do mesmo e a associação do transformador monitorado no ensaio de emissão acústica proposto, conforme Figura 24.

Figura 24 – Cadastro de ensaio de emissão acústica

### Ensaio

**Dados Gerais**

Data Inicial:  

Data Final:  

Descrição:

Transformador ↕	AGD	Excluir
TD0000080	A 	




Transformador ↕	Série ↕	Fabricante ↕	Projeto ↕	Adicionar
TD0000045		COEMSA	33,3 MVA, 138/198 kV	
TD0000080		COEMSA	33,3 MVA, 138/198 kV	
TD0000104		COEMSA	33,3 MVA, 138/198 kV	

Fonte: elaborado pelo autor

Por fim, o ensaio cadastrado na etapa anterior é selecionado, como apresentado na Figura 25, é informado o intervalo de canais (destacado pela forma em vermelho) que por sua vez está associado aos sensores instalados no transformador e, então, o arquivo proveniente do ensaio é carregado pelo sistema (opção destacada pela forma em verde) fazendo com que os registros de ruídos permaneçam disponíveis em base de dados para futuro processamento.

Figura 25 – Carga do arquivo proveniente do ensaio de emissão acústica

**Arquivo ASCII**  
Escolha o Ensaio para adicionar o arquivo:

Descricao ↕	Data Inicial ↕	Selecionar
SE_ATL_2012 - Junho - trafo [57]	13/06/2012	/
SE_ATL_2012 - Junho - trafo [80]	13/06/2012	/

**SE\_ATL\_2012 - Junho - trafo [80]**

- TD0000080

Transformador: TD0000080

Canal Inicial:

Canal Final:

Nenhum arquivo selecionado

Fonte: elaborado pelo autor.

É necessário informar o intervalo de canais ao qual o transformador está conectado em função da possibilidade de que mais de um transformador esteja sendo monitorado pelo equipamento DISP 28 [3]. Nesse caso, o sistema DISP [3] registra os ruídos detectados nos dois transformadores em um mesmo arquivo. Informando o intervalo de canais utilizado em cada transformador, possibilita ao *software* a separação dos registros de ruído detectados em cada um deles através do atributo “canal”.

A final do processamento da carga do arquivo o sistema automaticamente inicia o processo de identificação de descargas parciais, mensuração de atributos dos ruídos assim como a localização tridimensional de suas fontes.

### 3.5. Estudo de caso

Esse estudo de caso é composto por quatro (4) ensaios de emissão acústica realizados em um transformador trifásico, em operação na subestação da CELG. Os equipamentos, procedimentos, transformador e forma de utilização da solução computacional são idênticos para todos os quatro (4) ensaios e foram descritos nos itens 3.1 a 3.4.

A seguir, são demonstrados e ilustrados os resultados de cada um dos ensaios acústicos realizados assim como as conclusões alcançadas através desses resultados; evidenciando o suporte à tomada de decisão propiciado pelos gráficos gerados com base nos métodos de

identificação, mensuração e localização tridimensional presentes na solução computacional anteriormente descrita.

Para facilitar o entendimento, os ensaios são apresentados separadamente, identificados através do período de sua realização, contemplando sempre uma contextualização sobre o motivo pelo qual o ensaio está sendo realizado, resultados obtidos, e a conclusão alcançada com base nesses resultados.

### **3.5.1. Ensaio de EA: 11 a 15 de junho de 2012**

Com o objetivo de aprimorar a metodologia de manutenção de transformadores de potência implementada pela concessionária de energia do Estado de Goiás, utilizando técnicas preditivas aplicadas com o transformador de potência energizado, foi realizado pela primeira vez, um ensaio de emissão acústica nos transformadores identificados pela concessionária por TD01, TD02 e TD03 – todos de 33,3 MVA, tensões de 138 kV/13,8 kV.

O transformador que causou maior preocupação em função do grande volume de ruídos detectados foi o identificado pela concessionária como TD03. O equipamento foi monitorado durante vinte e quatro (24) horas apresentando volume considerável de ruídos detectados e evidências críticas de descargas parciais localizadas por quase a totalidade do transformador de potência, conforme ilustrado na Figura 26 (ruído de toda natureza em azul e proveniente de descargas parciais em vermelho), onde os cubos numerados são representações tridimensionais dos sensores.

Através do histograma “Energia x Tempo” apresentado na Figura 27, que considera os eventos registrados em todo o transformador, foi possível verificar a dinâmica de ocorrência dos ruídos detectados (novamente ruído de toda natureza em azul e proveniente de descargas parciais em vermelho) ao longo do tempo, além de métricas detalhadas obtidas através de aspectos importantes do ensaio de emissão acústica, conforme a seguir:

- Contagem de hits (ruídos) do ensaio.
- Soma total da Contagem de Energia\*.
- Valor de pico da Contagem de Energia\*.
- Média da Contagem de Energia\* referente a todo o período de ensaio.
- Percentual do período de ensaio com ocorrência de hits (ruídos).

\* Energia - área medida abaixo da envoltória do sinal retificado (MARSE [22]) calculada pelo sistema DISP [3] para cada ruído detectado.

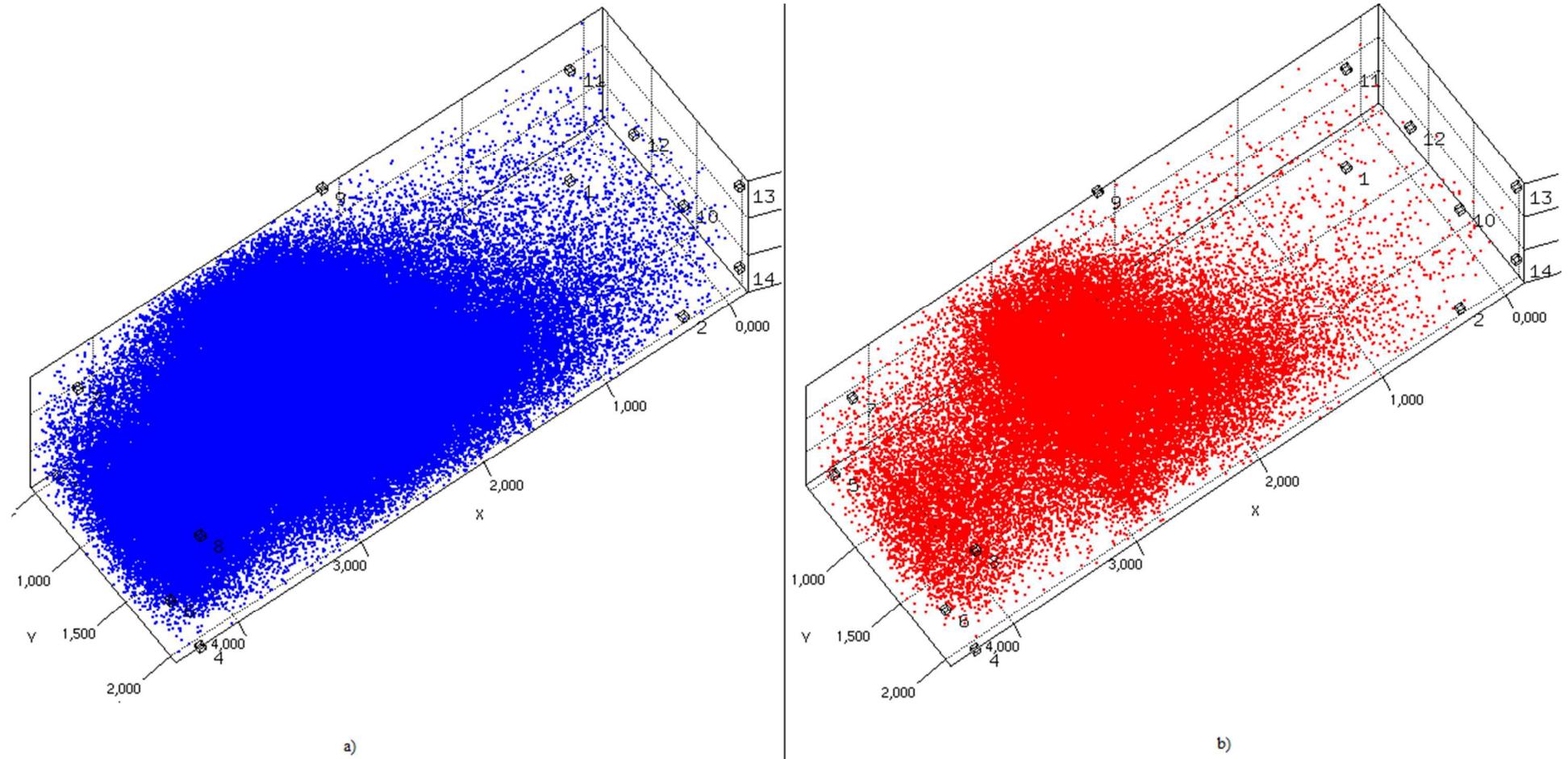
Uma visão ainda mais detalhada da ocorrência de fenômenos acusticamente ativos dentro do transformador, principalmente provenientes de descargas parciais, pôde ser obtida através da análise dos histogramas “Energia x Tempo”, agora da perspectiva de cada um dos canais. Com base no que é demonstrado na Figura 28, foi possível realizar a análise dos histogramas gerados a partir de fontes de ruídos de toda natureza captados por cada canal.

Na Figura 29, a mesma análise pôde ser realizada, porém, com enfoque somente em fenômenos que surgiram em decorrência de descargas parciais, uma vez que é esse o fenômeno nocivo. Através desse conjunto de histogramas, foi possível estimar quais os componentes internos do transformador estavam sendo mais afetados por descargas parciais, uma vez que tal fenômeno foi detectado somente nos canais 17, 18, 19, 20, 21, 22 e 23.

Cabe ressaltar que para uma comparação dos histogramas gerados por canal, com o *plot* de localização tridimensional, é necessário observar que o cadastro dos sensores sempre se inicia em um (1), portanto, nesse estudo de caso, o sensor um (1) está associado ao canal (15).

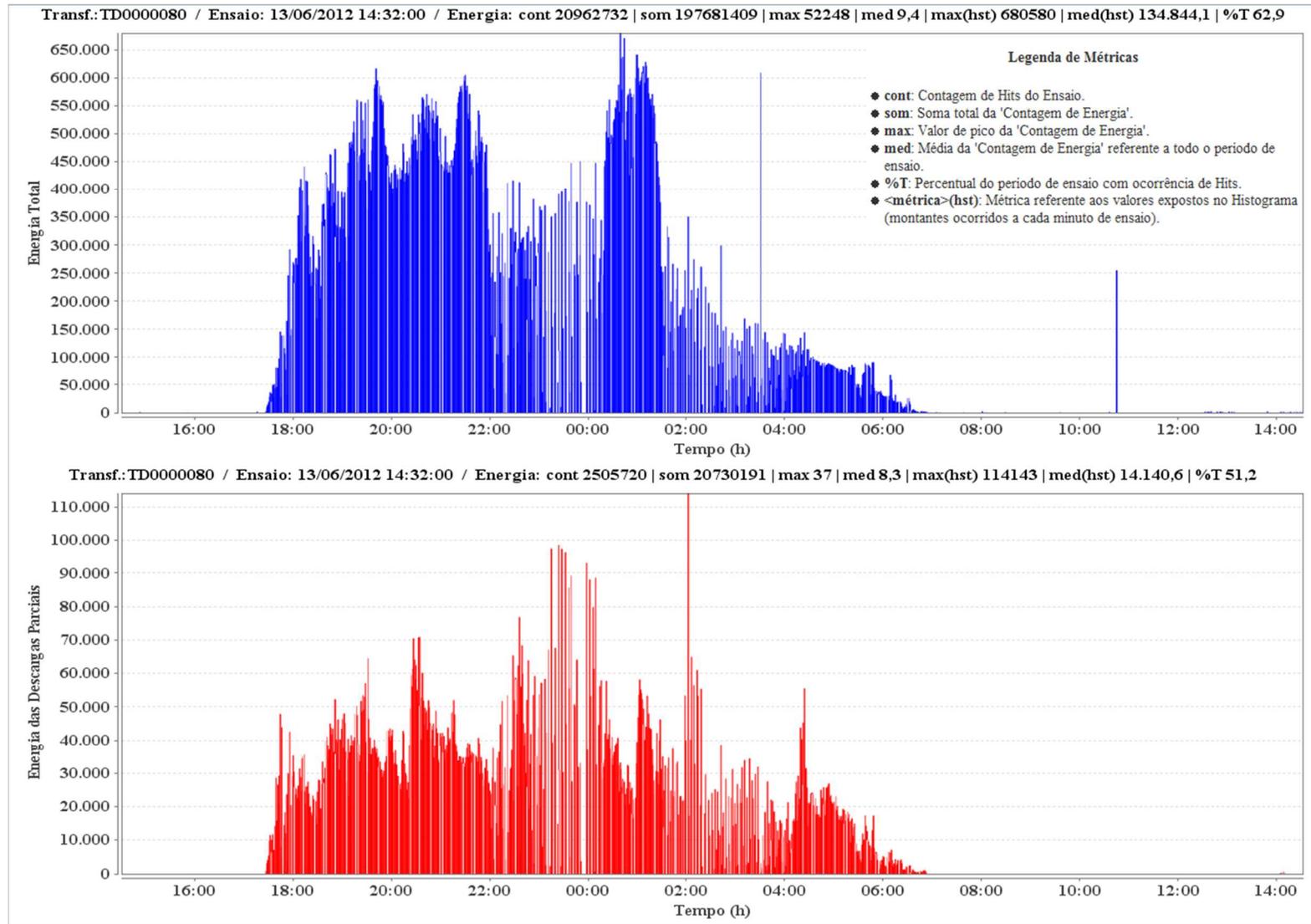
Objetivando apresentar de forma visual a distribuição da energia proveniente de toda fonte de ruído detectado, a solução computacional provém um diagrama do tipo *boxplot* [34], conforme Figura 30, onde, dentre outras informações, pôde ser observada a faixa de energia dissipada (representada pelo retângulo verde) predominante dentro do ensaio de emissão acústica, a mediana (representada pela divisão dentro do retângulo) de energia dentro da faixa predominante, assim como a média de energia (esfera em preto), que por sua vez indicou a média de energia considerando todos os registros de ruídos detectados.

Figura 26 – Plotagem 3D - a) Ruído total (de toda natureza) b) Ruído proveniente de DP. (Junho)



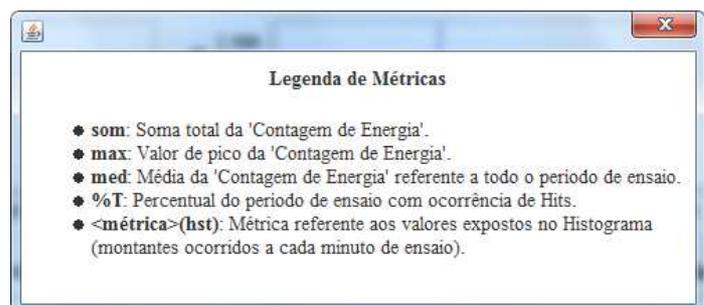
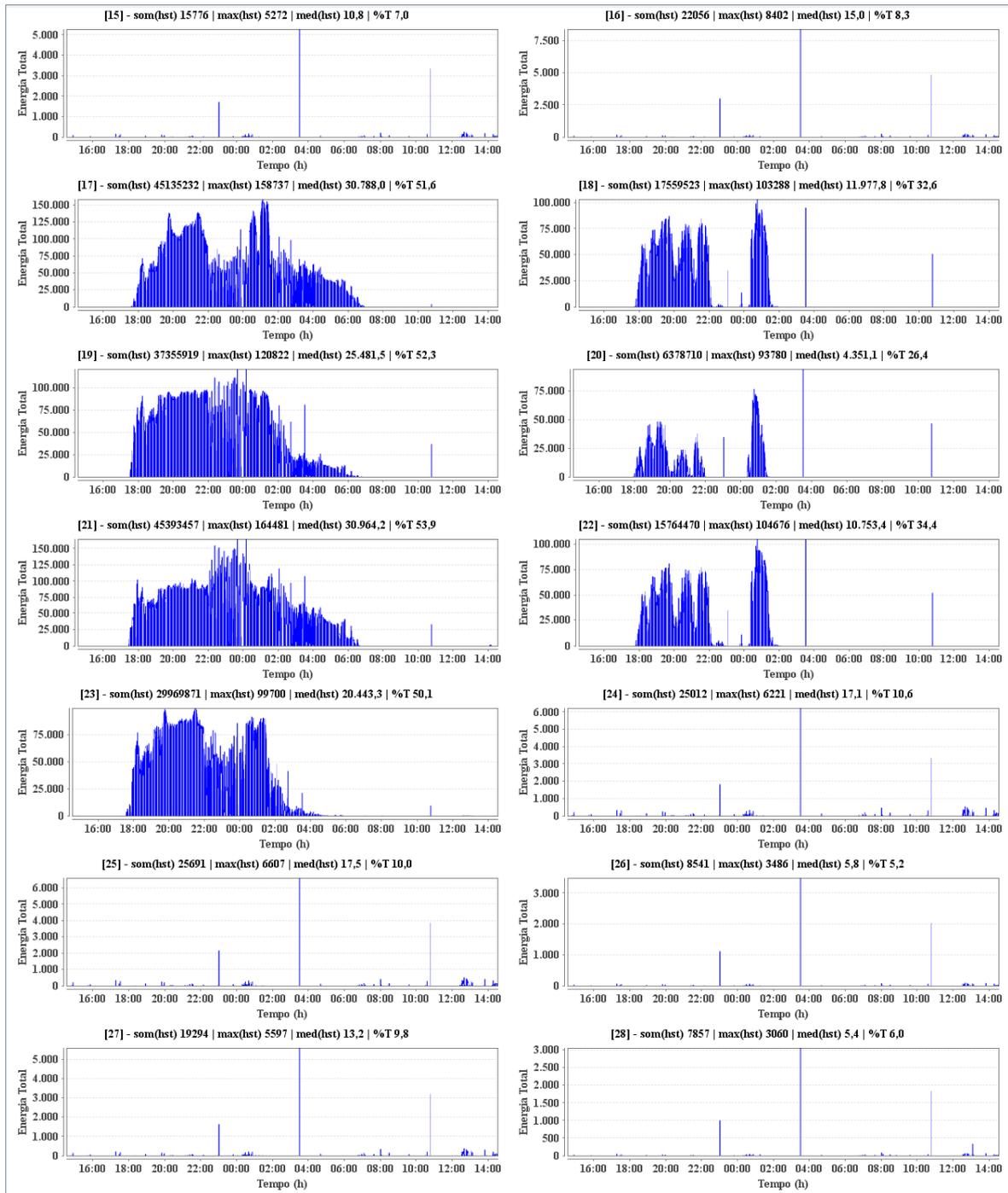
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 27 – Histograma “Energia x Tempo” da perspectiva de todo o transformador. (Junho)



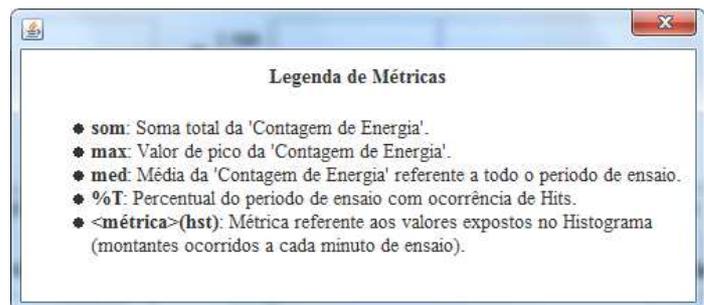
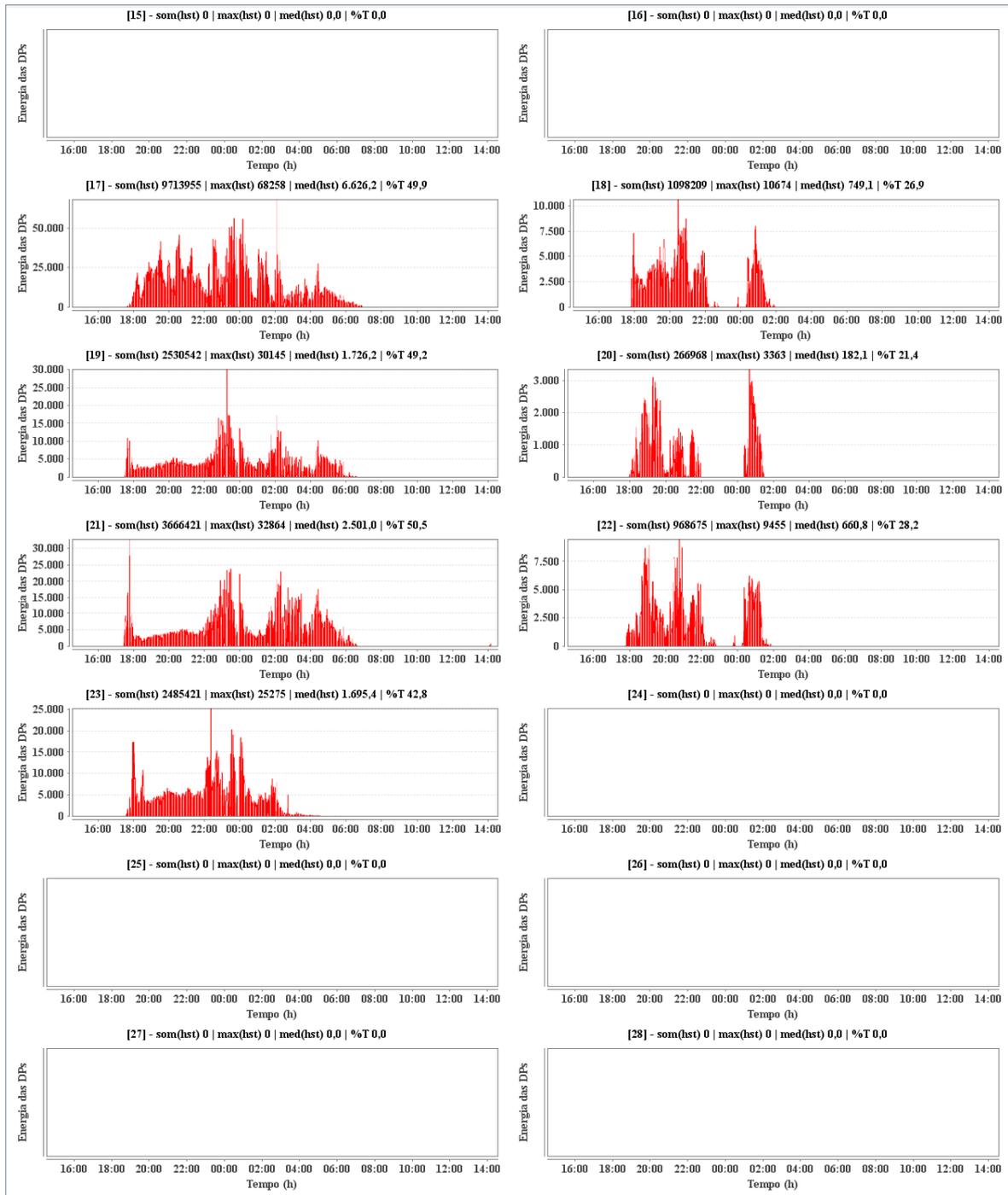
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 28 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído total). (Junho)



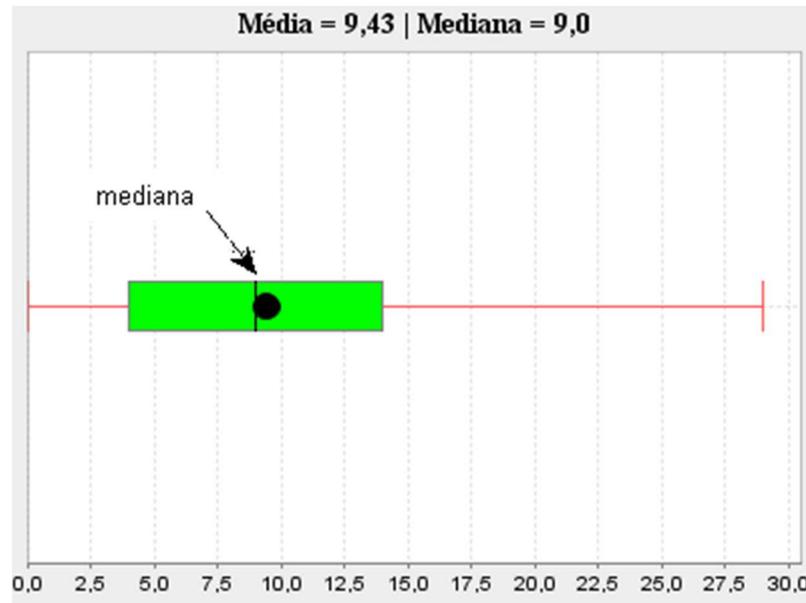
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 29 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído proveniente de descargas parciais). (Junho)



Fonte: elaborado pelo autor.

.Figura 30 – Distribuição da energia proveniente do ruído total detectado. (Junho)



Fonte: elaborado pelo autor.

Diante das análises, ficou evidente a presença de atividades de descargas parciais no transformador TD03 em um nível crítico, recomendando-se um acompanhamento rigoroso, de acordo com o cronograma de manutenção preventiva da empresa.

### 3.5.2. Ensaio de EA: 01 a 05 de outubro de 2012

Com base na conclusão observada no ensaio de emissão acústica realizado no período entre os dias 11 e 15 de junho, que detectou nível crítico de descargas parciais no transformador de potência TD03, a equipe técnica responsável pela manutenção desse transformador optou por realizar um procedimento de filtragem de seu óleo isolante.

As Figuras de 31 a 33 ilustram a sujeira depositada no filtro-prensa e no filtro da máquina de tratamento, após o processo de filtragem realizado no transformador.

Figura 31 – Filtros-prensa utilizados na filtragem do óleo isolante.



Fonte: Marques, A. P. [6]

Figura 32 – Evidência de contaminantes no filtro-prensa, removidos do óleo isolante.



Fonte: Marques, A. P. [6]

Figura 33 – Filtro da máquina de tratamento.



Fonte: Marques, A. P. [6]

O processo de filtragem exigiu a remoção do óleo isolante do transformador TD03 para um tanque de filtragem e várias substituições de filtros, sendo que os ilustrados anteriormente foram os primeiros a serem substituídos. Ao longo do processo de filtragem, a sujeira dos filtros e turbidez do óleo isolante, observada antes do início do processo, foram diminuindo até se estabilizarem.

Uma vez concluído o processo de filtragem, o óleo isolante foi retornado para o transformador; o mesmo foi energizado, voltando a compor a rede de distribuição e então, se deu início ao processo de ensaio de emissão acústica realizado com os mesmos equipamentos e procedimentos do ensaio anterior.

Novamente, o equipamento foi monitorado durante vinte e quatro (24) horas e o resultado do ensaio apresentou redução considerável no volume de ruído total (em azul) detectado. Entretanto, houve um aumento superior a 40% na contagem (dentre outras métricas) de ruídos provocados em decorrência de descargas parciais (em vermelho), localizados na primeira metade do transformador, mais precisamente na área monitorada pelos sensores de 3 a 9, conforme ilustrado na Figura 34.

O histograma “Energia x Tempo” apresentado na Figura 35, que considera os eventos registrados em todo o transformador, corroborou o gráfico de localização tridimensional, demonstrando também a ocorrência de descargas parciais, porém, como citado anteriormente, com todas as métricas, salvo valores máximo (Max) e média de energia (Med) proveniente de ruído, superiores aos observados no ensaio de emissão acústica anterior. A tabela 4 demonstra um comparativo entre as métricas.

Tabela 4 – Comp. entre métricas relacionadas à DP obtidas no ensaio anterior (junho de 2012) e o ensaio atual.

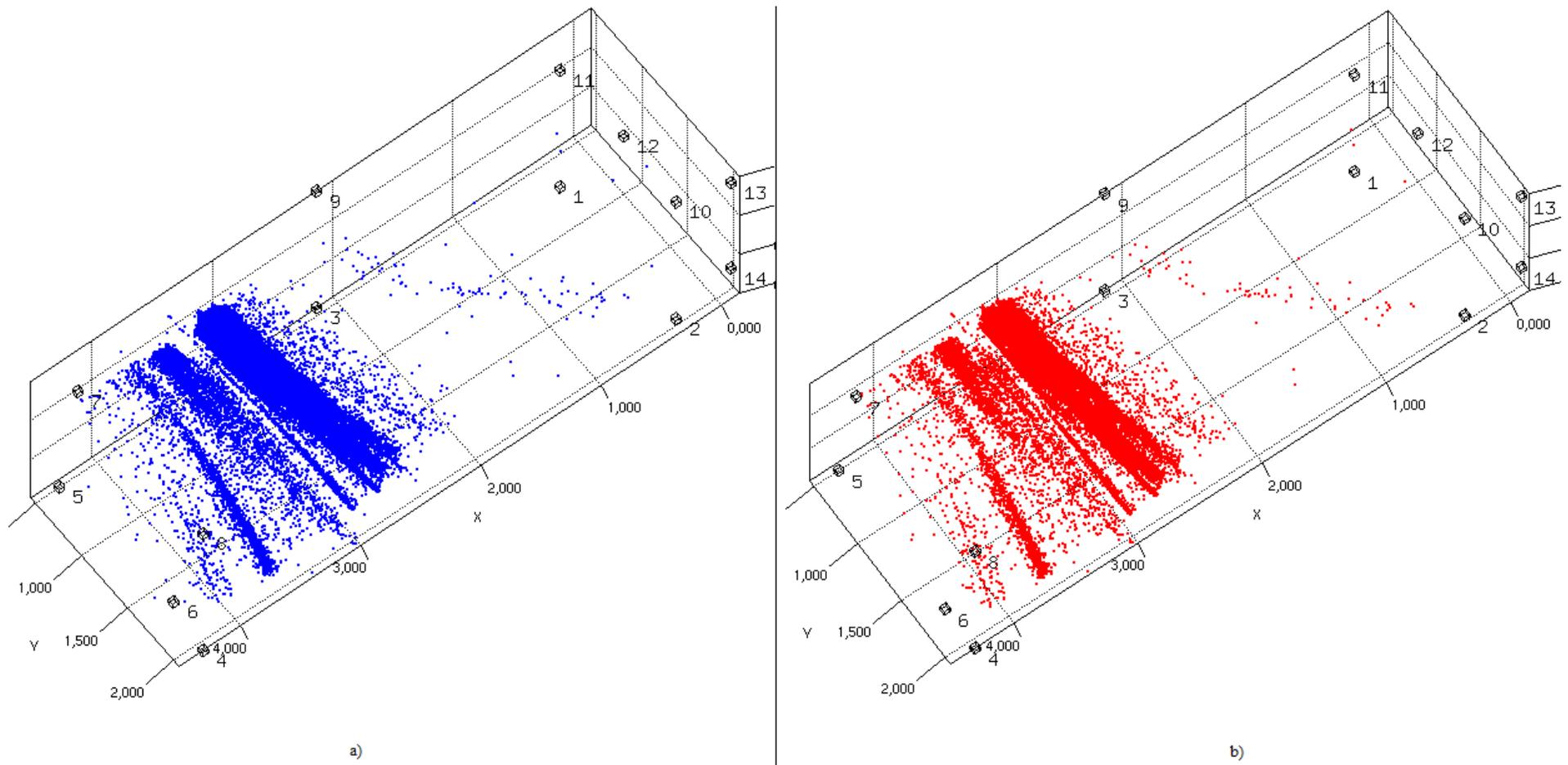
Ensaio	Cont	Som	Max	Med	Max(hst)	Med(hst)	%T
Junho	2.505.720	20.730.191	37	8,3	114.143	14.140,60	51,2
Outubro	6.160.753	21.847.034	28	3,5	145.248	15.161,00	64,5
	Aumento	Aumento	Redução	Redução	Aumento	Aumento	Aumento

Fonte: elaborado pelo autor.

Nos histogramas “Energia x Tempo” da perspectiva de cada um dos canais, demonstrados nas Figuras 36 e 37, demonstraram o mesmo resultado, onde pôde ser observada uma concentração de descargas parciais no local próximo aos canais 17, 19, 21 e 23 que respectivamente correspondem aos sensores 3, 5, 7 e 9 fixados ao longo do transformador.

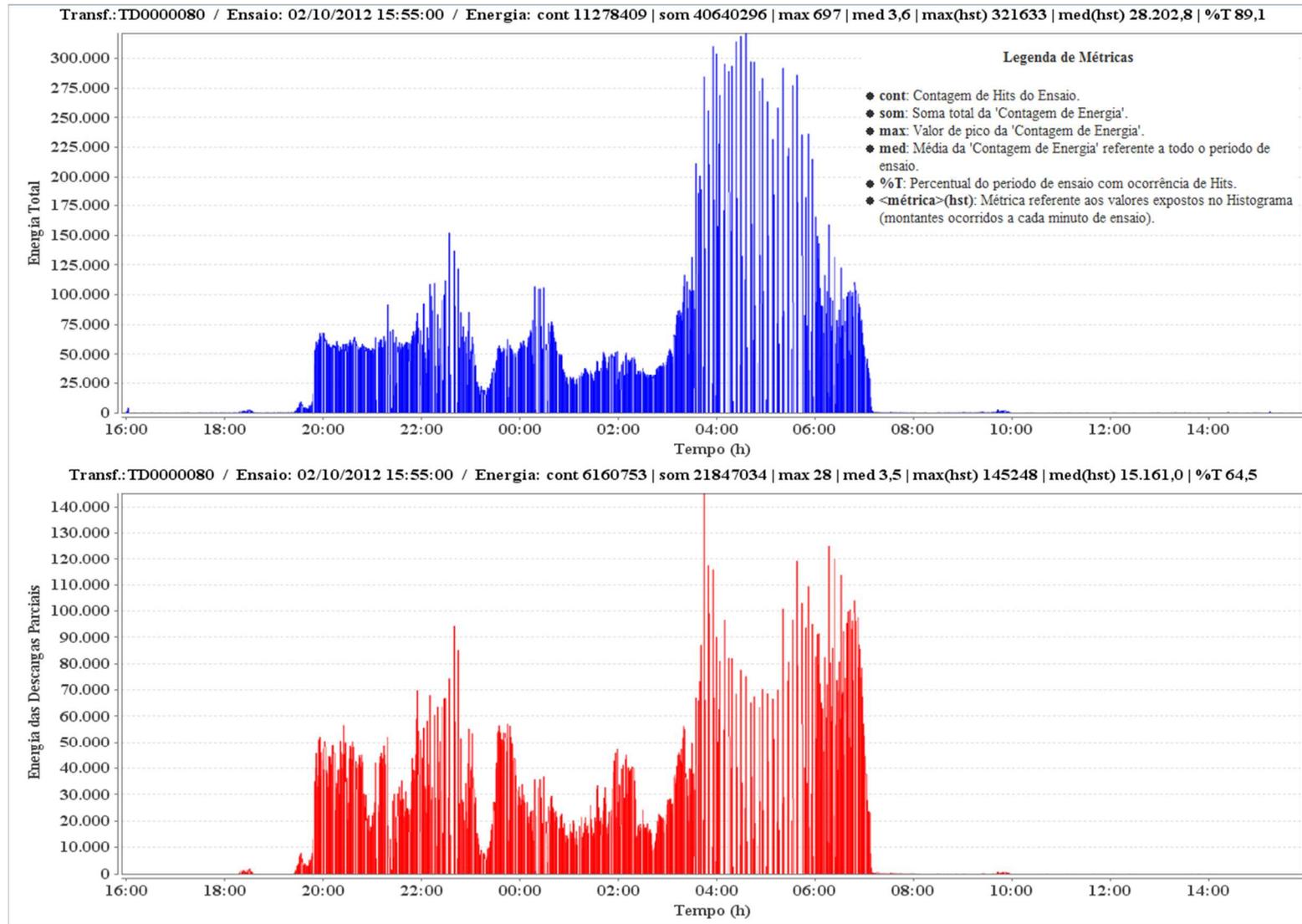
A distribuição da energia considerando todos os registros de ruídos detectados pode ser observada na Figura 38 na forma de um gráfico *boxplot*; que demonstra um comparativo entre os valores de energia registrados no ensaio atual e no anterior.

Figura 34 – Plotagem 3D - a) Ruído total (de toda natureza). b) Ruído proveniente de DP. (Outubro)



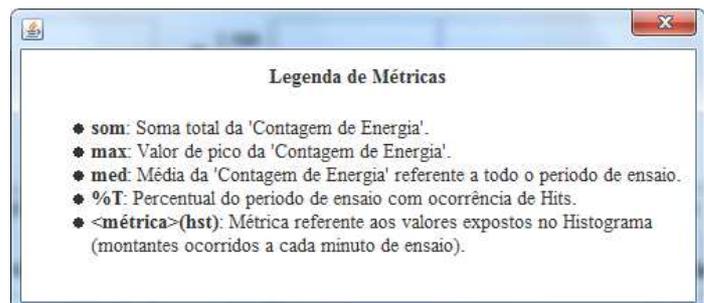
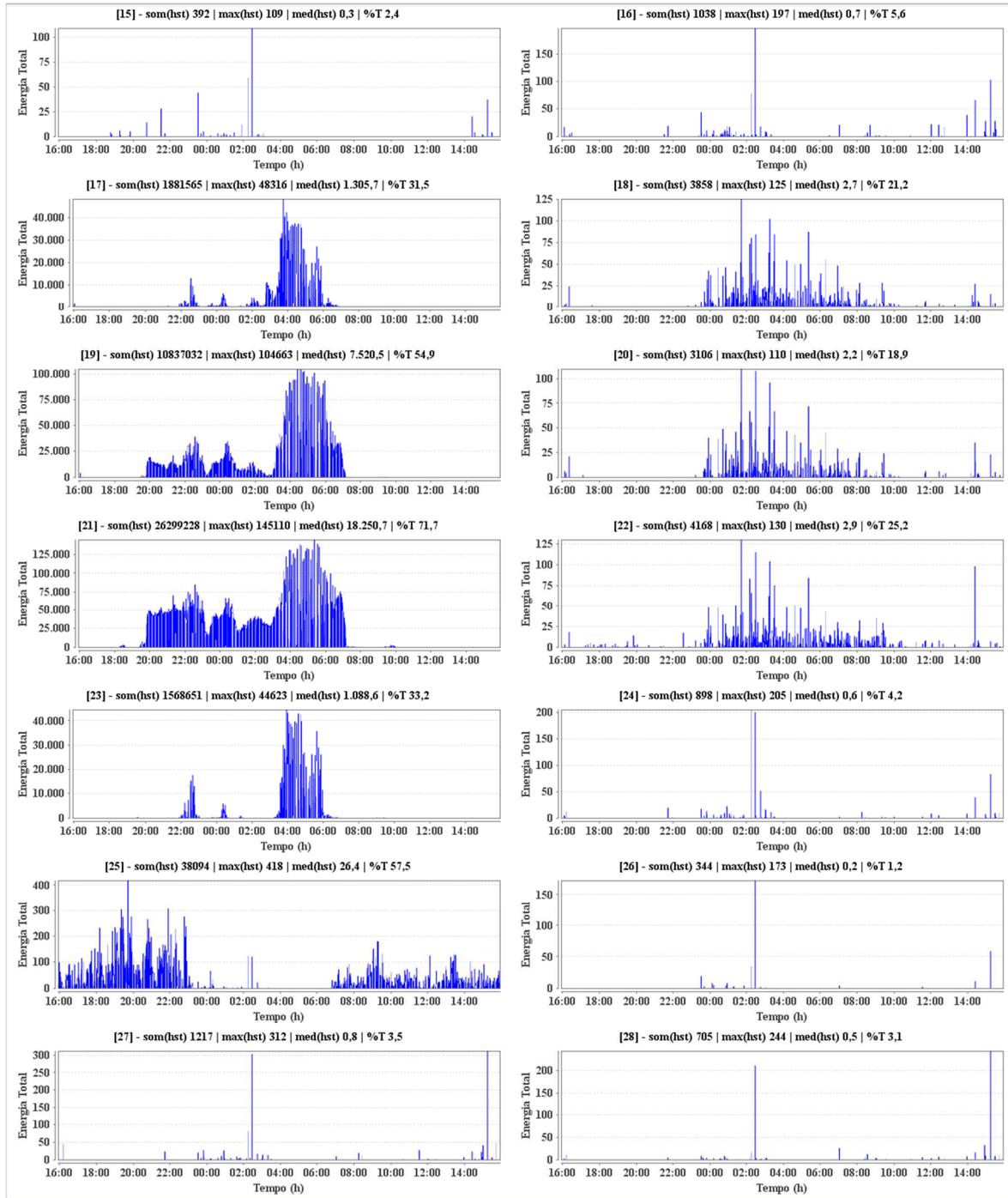
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 35 – Histograma “Energia x Tempo” da perspectiva de todo o transformador. (Outubro)



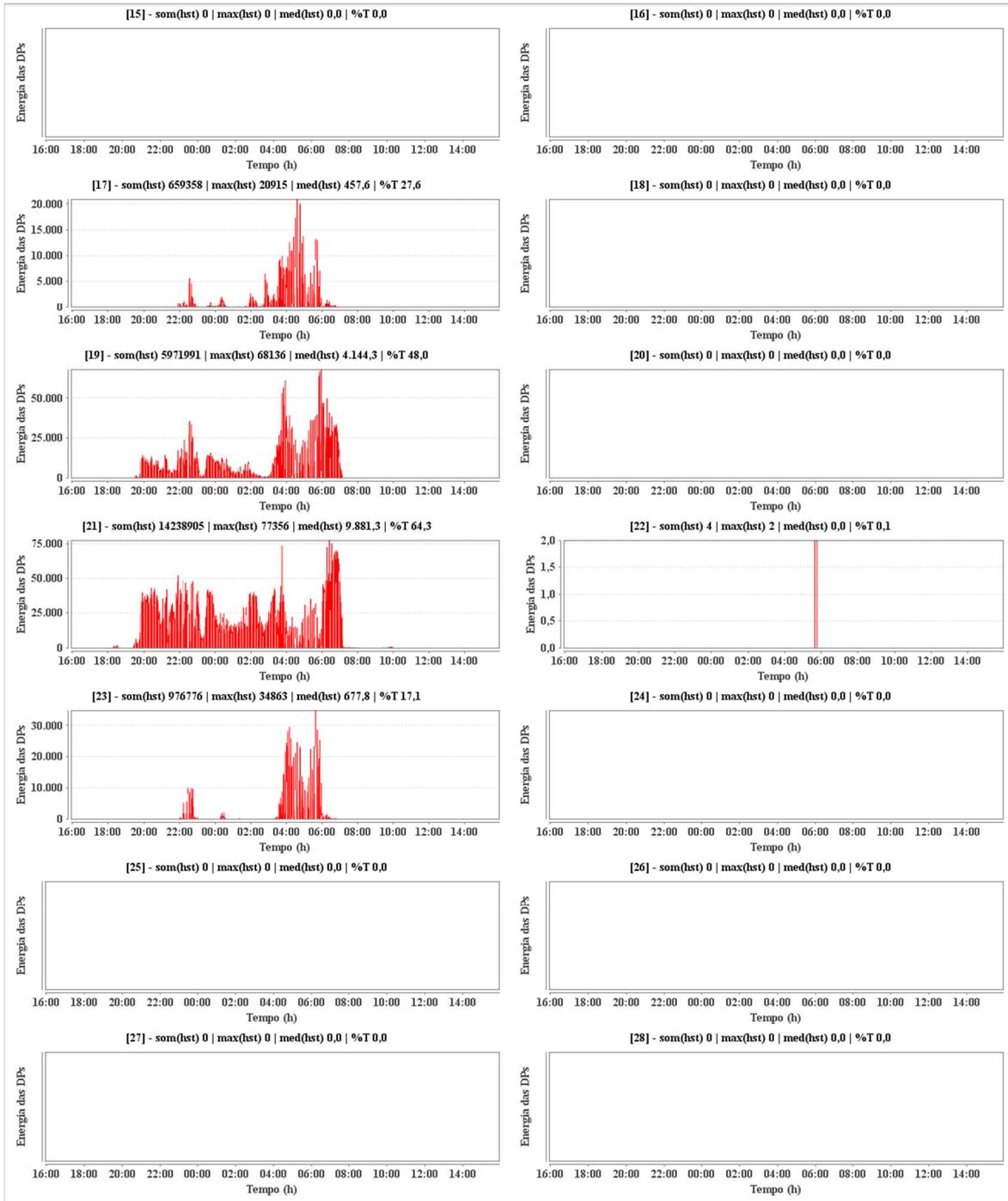
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 36 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído total). (Outubro)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 37 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído proveniente de descargas parciais). (Outubro)

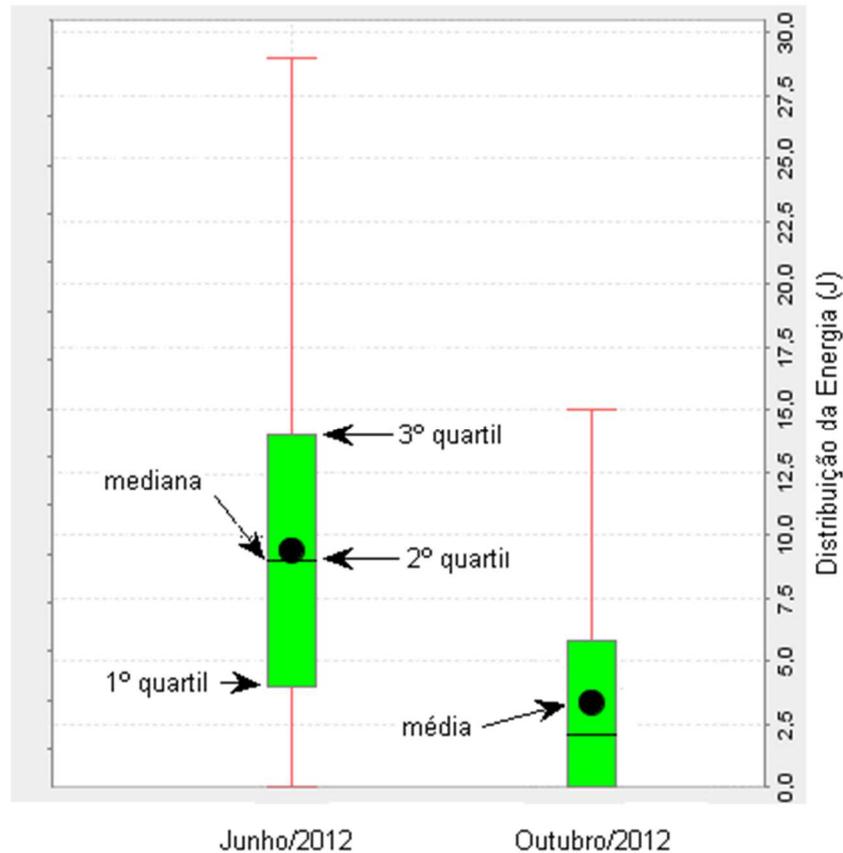


**Legenda de Métricas**

- ◆ **som**: Soma total da 'Contagem de Energia'.
- ◆ **max**: Valor de pico da 'Contagem de Energia'.
- ◆ **med**: Média da 'Contagem de Energia' referente a todo o periodo de ensaio.
- ◆ **%T**: Percentual do periodo de ensaio com ocorrência de Hits.
- ◆ **<métrica>(hst)**: Métrica referente aos valores expostos no Histograma (montantes ocorridos a cada minuto de ensaio).

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 38 - Comparação dos resultados dos ensaios de junho e de outubro, no TD03. (Outubro)



Fonte: elaborado pelo autor.

A energia média das DPs diminuiu de 9,430 para 3,603 por evento de DP detectado, o que corresponde à uma redução de 61,792 %. O valor da mediana da distribuição de energia das DPs diminuiu de 9,000 para 2,000 por evento de DP detectado, o que corresponde à uma redução de 77,778%.

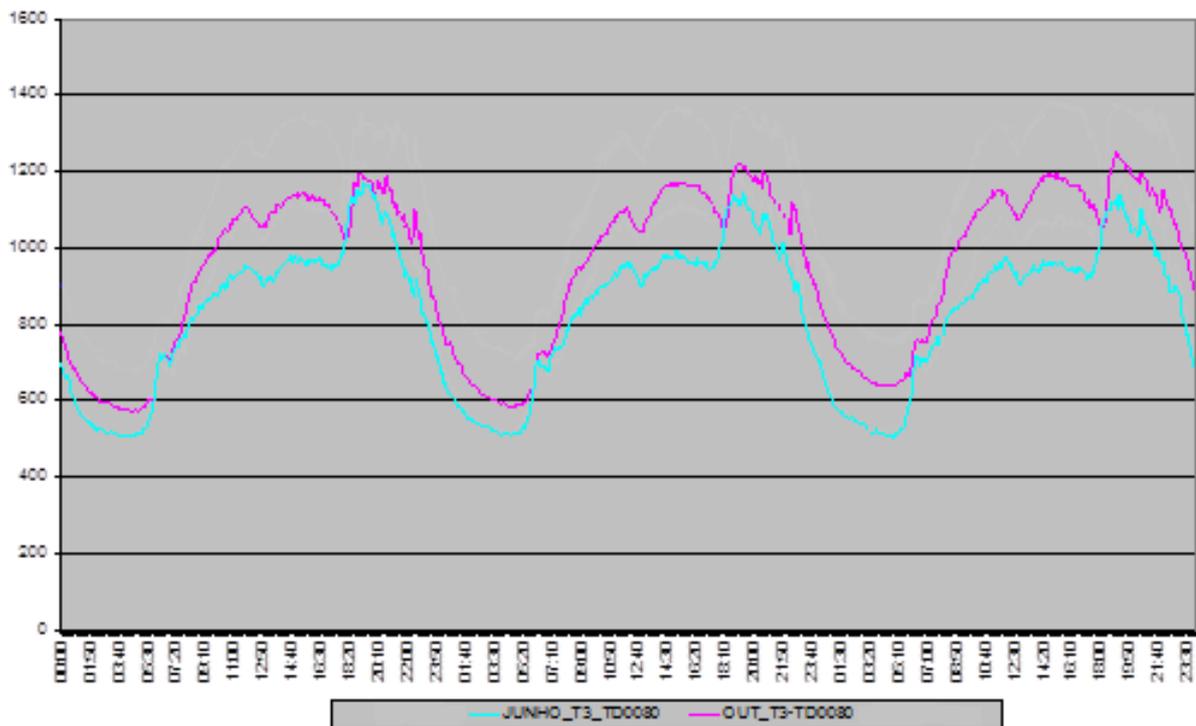
Com a realização do processo de filtragem, houve uma redução considerável no número e intensidade (energia) de descargas parciais dentro do transformador de potência. Entretanto, em função do volume ainda considerável de DPs demonstrado pelos resultados, localizados principalmente na área próxima aos sensores 17, 19, 21, 22 e 23 (sendo que o canal 22 captou significativamente somente durante uma hora) recomendou-se novamente um acompanhamento rigoroso do transformador, de acordo com o cronograma de manutenção preventiva da empresa.

De acordo com o projeto do transformador TD03, a região bem definida com evidências de descargas parciais se encontra próxima ao enrolamento e ao comutador de derivação em carga.

Ao investigar o motivo pelo qual várias métricas referentes à ocorrência de descargas parcial observadas nesse ensaio foram superiores a valores de métricas obtidas no ensaio anterior, concluiu-se que o aumento se deu em função do carregamento do transformador, por ser esse o único fator considerado relevante, no que tange o favorecimento da ocorrência de descargas parciais, que difere entre os ensaios.

A Figura 39, obtida por meio do *software* CTransf [35], próprio para cálculo de carregamentos elétricos de transformadores, demonstra graficamente o comparativo de carregamento do transformador TD03 verificado nesse ensaio e no ensaio anterior, realizado no mês de junho.

Figura 39 - Comparação entre o carregamento observado nos ensaios de junho e de outubro, no TD0000080.



Fonte: adaptação de Marques, A. P. [6]

### 3.5.3. Ensaio de EA: 10 a 13 de dezembro de 2012

Seguindo a recomendação de acompanhamento rigoroso do transformador TD03 realizou-se um novo ensaio de emissão acústica no período entre os dias 10 e 13 de dezembro de 2012. No ensaio anterior, foi detectada uma área com concentração significativa de descargas parciais durante 64,5% do tempo de ensaio, localizada nas proximidades dos sensores 17, 19, 21, 22 e 23, próxima ao enrolamento e ao comutador de derivação em carga.

O equipamento foi monitorado durante vinte e quatro (24) horas e novamente apresentou redução no volume de ruído total (em azul) e no volume de ruídos provocados por descarga parcial (em vermelho), como pode ser observado na Figura 40.

Os histogramas “Energia x Tempo” apresentado nas Figuras 41, 42 e 43, que consideram respectivamente os eventos registrados em todo o transformador e em seguida da perspectiva de cada canal, corroboraram o gráfico de localização tridimensional, demonstrando também redução de todas as métricas relacionadas à ruídos total e proveniente de descarga parcial, detectados durante o ensaio de emissão acústica. A tabela 5 apresenta um comparativo entre as métricas.

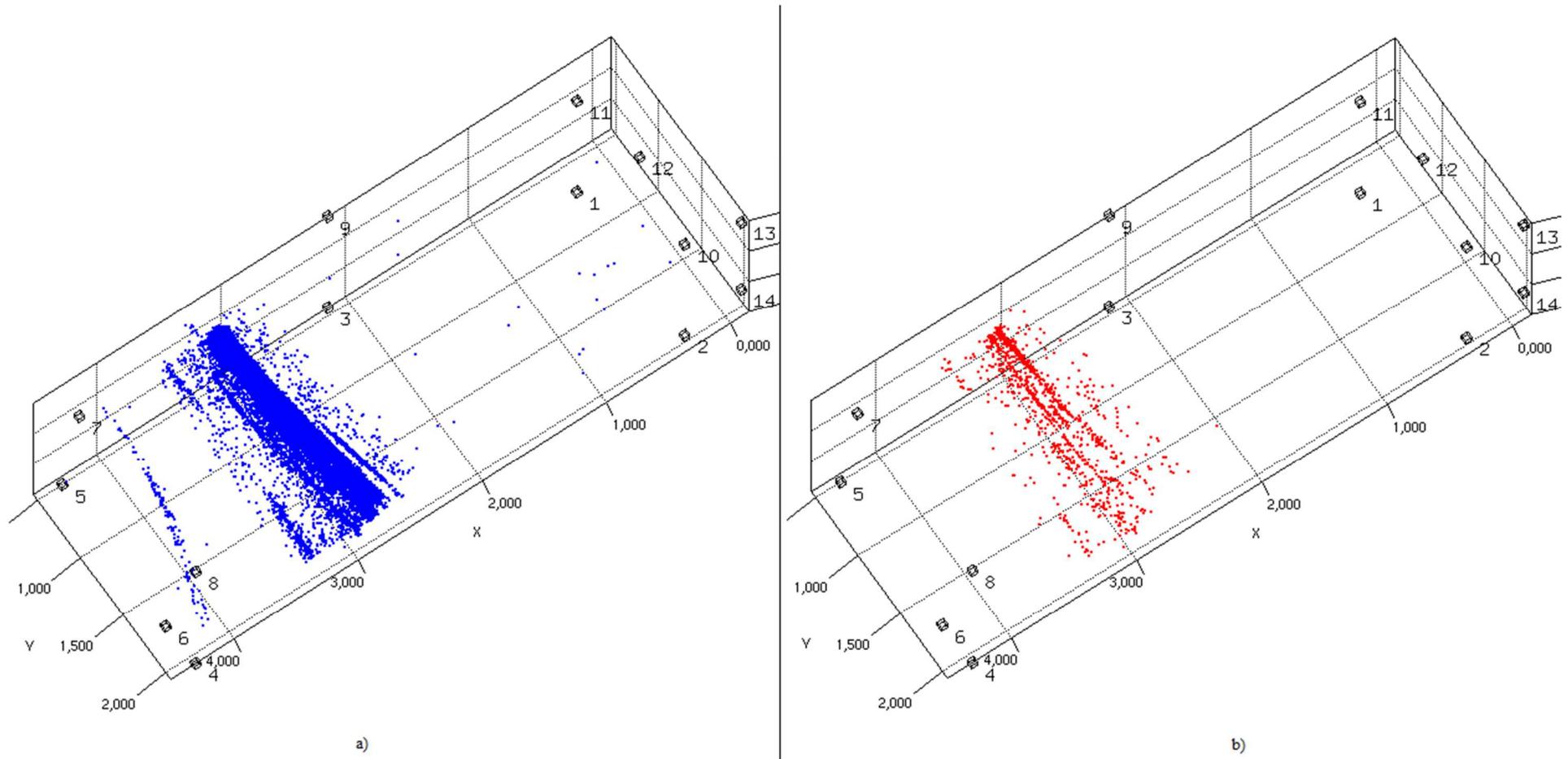
Tabela 5 – Comp. entre métricas relacionadas à DP obtidas no ensaio anterior (outubro de 2012) e o ensaio atual.

Ensaio	Cont	Som	Max	Med	Max(hst)	Med(hst)	%T
Outubro	6.160.753	21.847.034	28	3,5	145.248	15.161,0	64,5
Dezembro	100.420	385.352	22	3,8	32.178	265,4	35,9
	Redução	Redução	Redução	Aumento	Redução	Redução	Redução

Fonte: elaborado pelo autor.

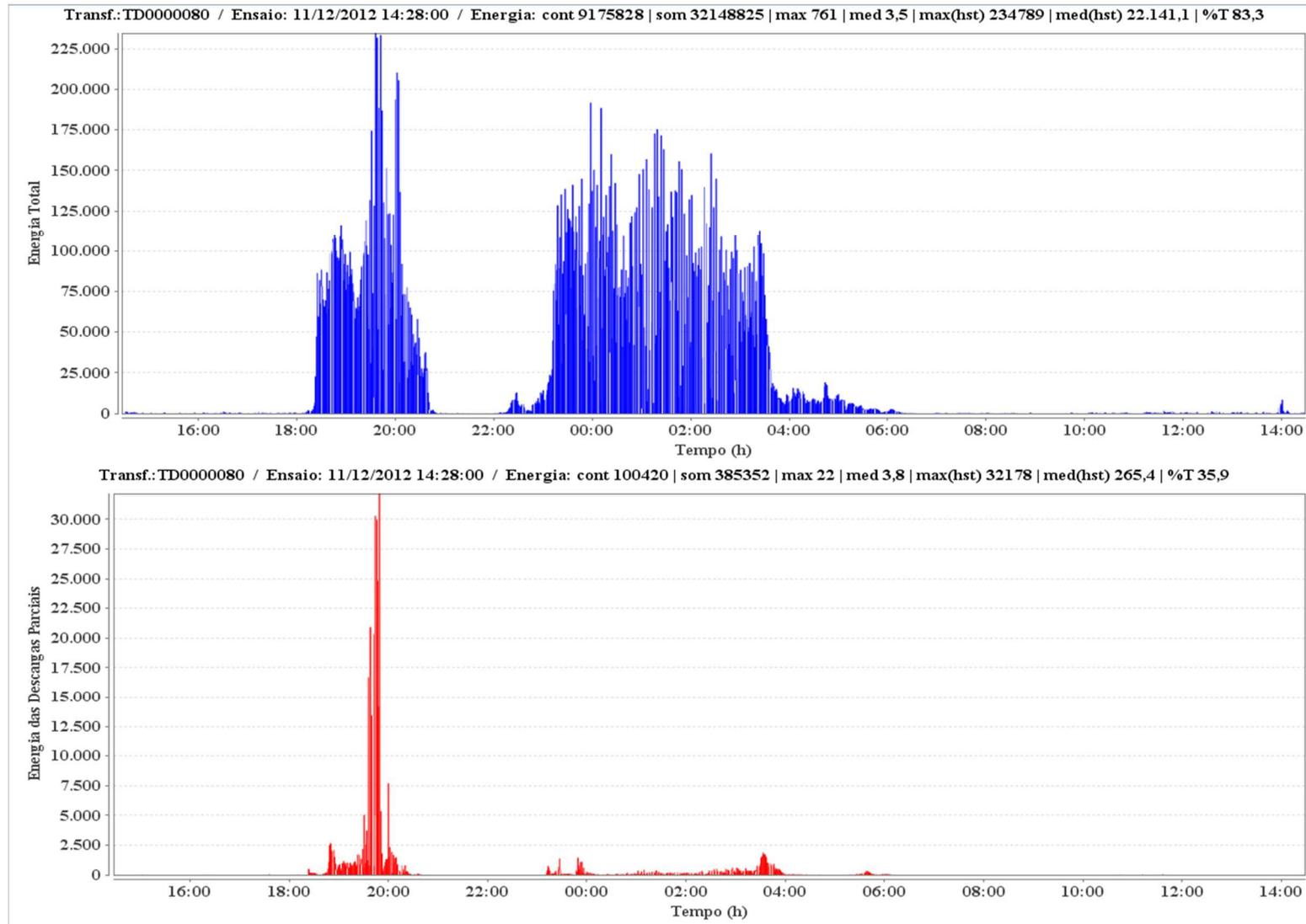
Na Figura 44 são apresentados gráficos do tipo *boxplot* objetivando a realização de um comparativo entre a distribuição da energia de todos os registros de ruídos detectados considerando o ensaio atual e o anterior.

Figura 40 – Plotagem 3D - a) Ruído total (de toda natureza). b) Ruído proveniente de DP. (Dezembro)



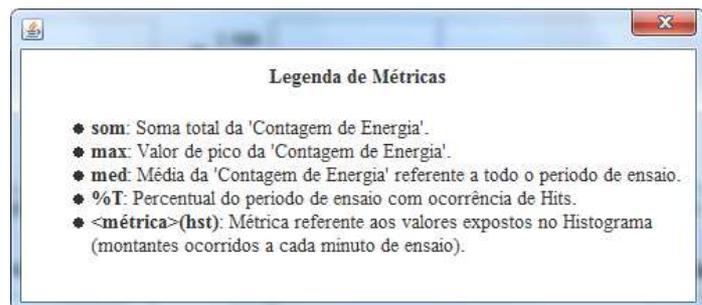
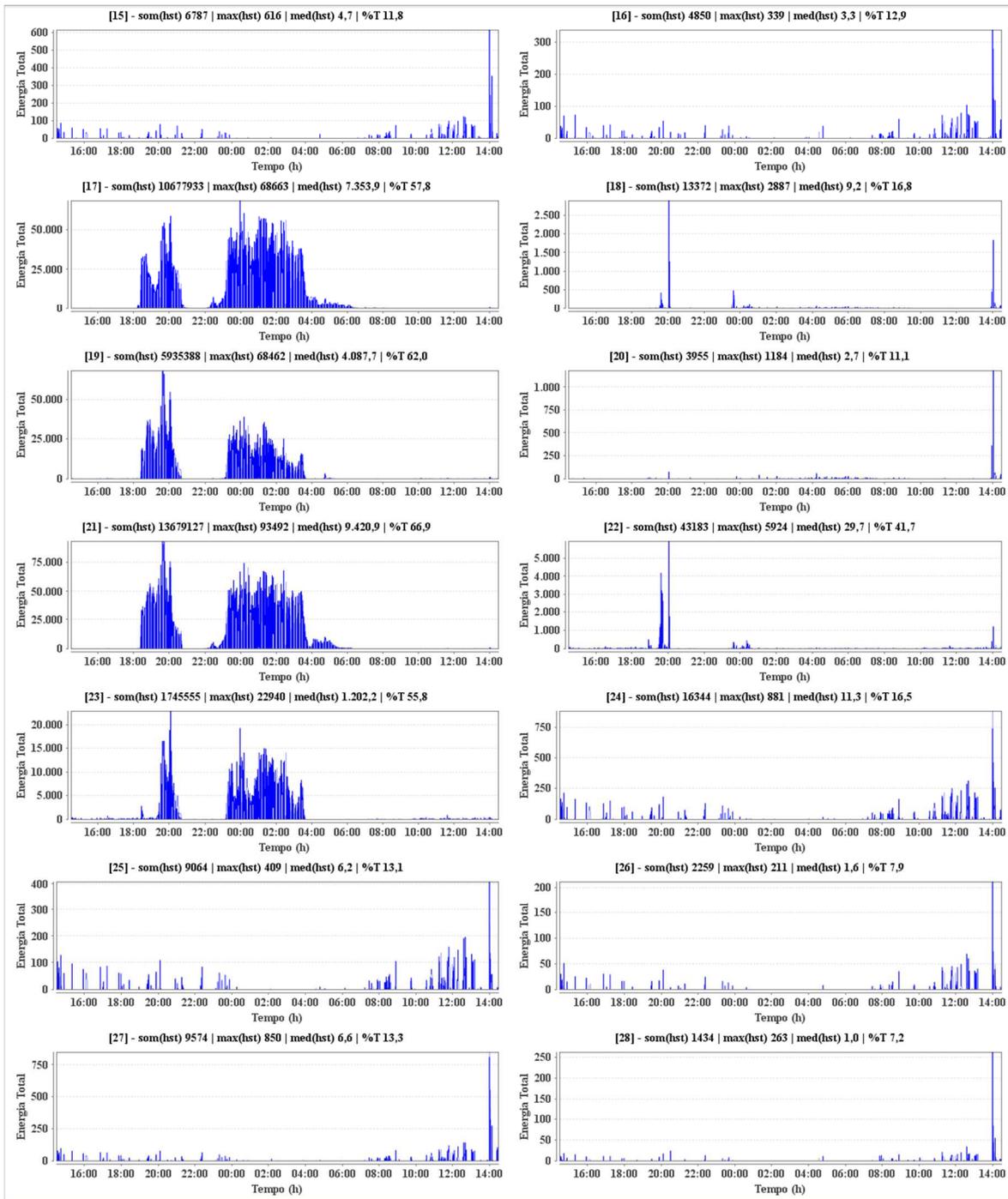
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 41 – Histograma “Energia x Tempo” da perspectiva de todo o transformador. (Dezembro)



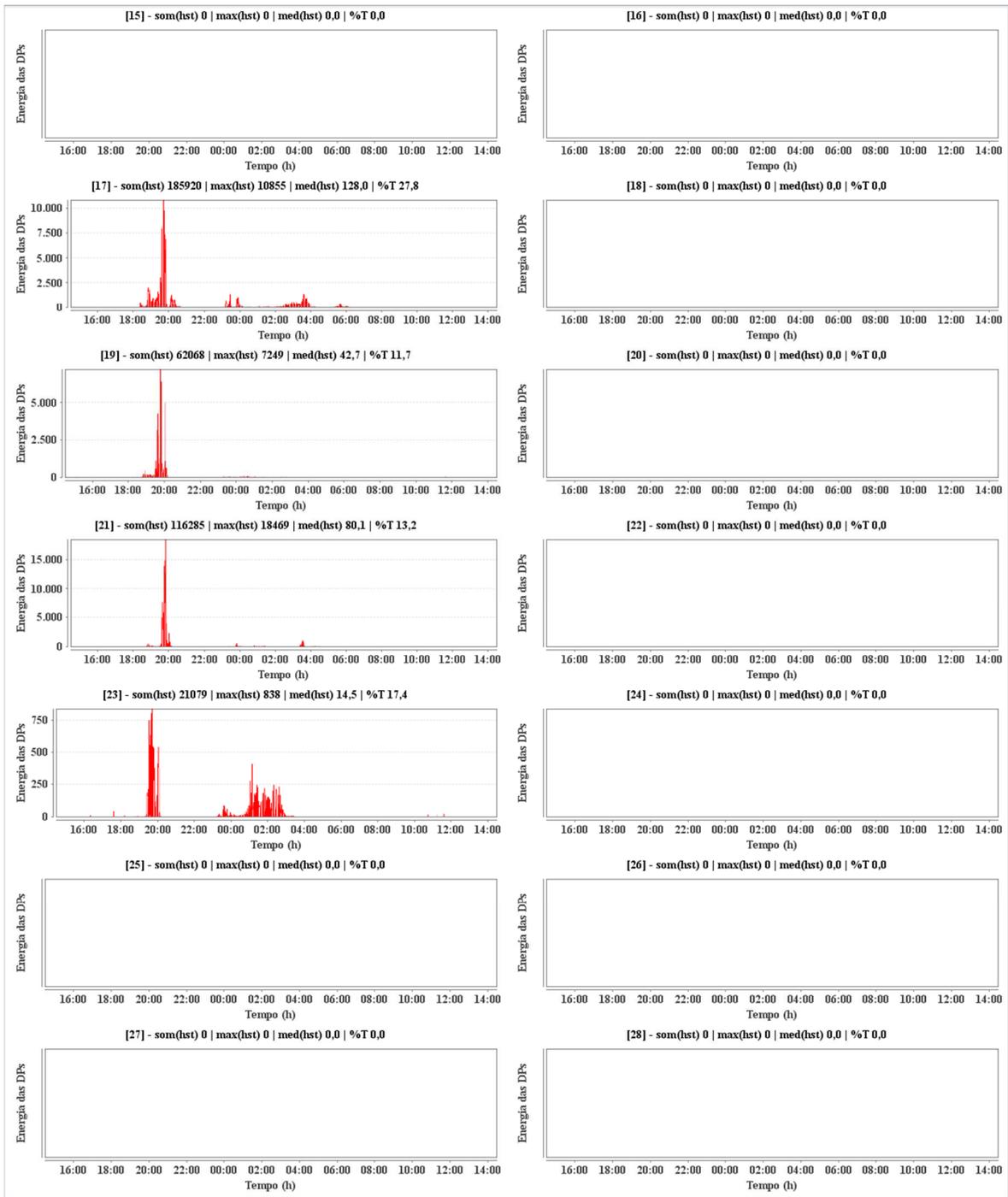
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 42 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído total). (Dezembro)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 43 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído proveniente de descargas parciais). (Dezembro)

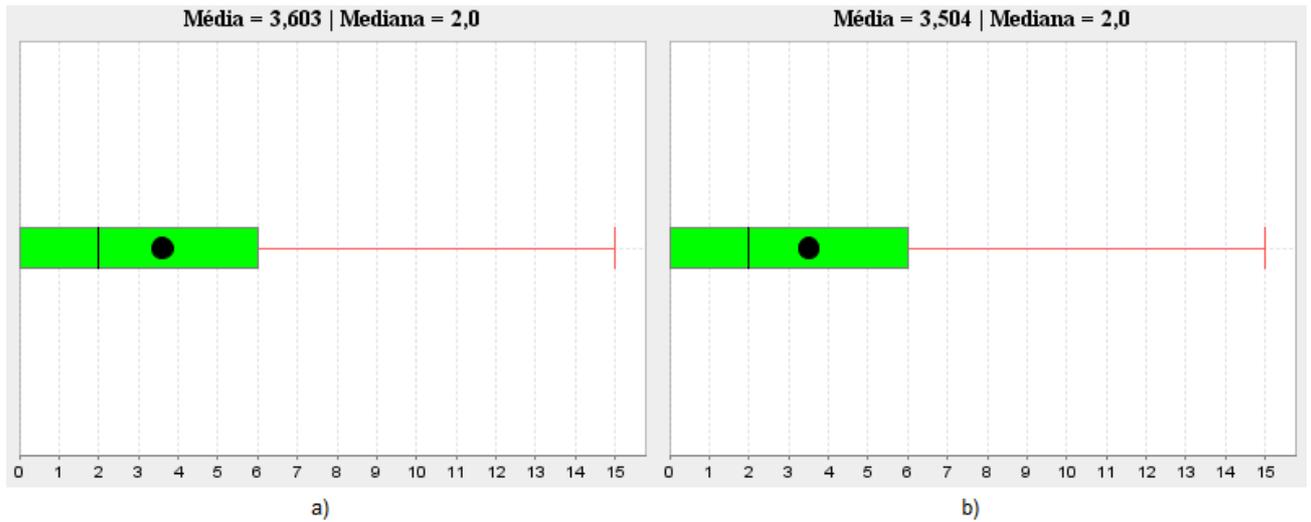


**Legenda de Métricas**

- **som**: Soma total da 'Contagem de Energia'.
- **max**: Valor de pico da 'Contagem de Energia'.
- **med**: Média da 'Contagem de Energia' referente a todo o periodo de ensaio.
- **%T**: Percentual do periodo de ensaio com ocorrência de Hits.
- **<métrica>(hst)**: Métrica referente aos valores expostos no Histograma (montantes ocorridos a cada minuto de ensaio).

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 44 – a) Boxplot referente ao ensaio de outubro. b) Boxplot referente ao ensaio de dezembro.

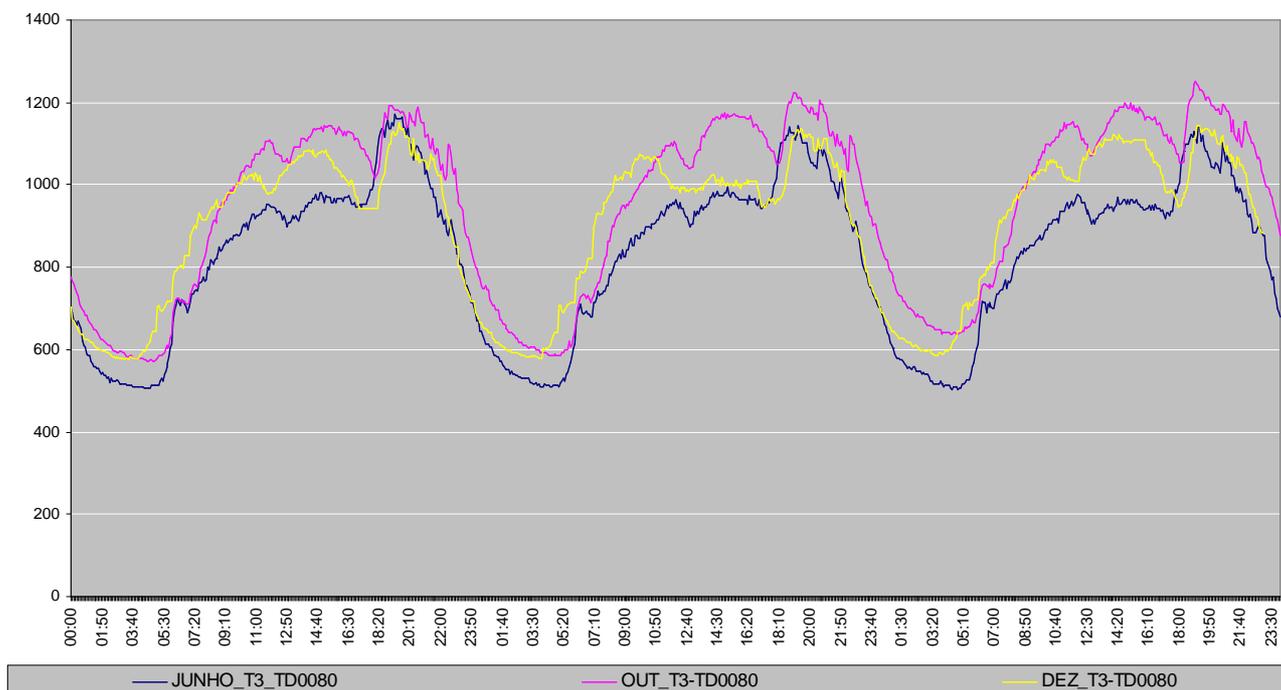


Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados causaram estranheza em um primeiro momento uma vez que houve uma redução considerável de ruídos provenientes de descargas parciais sem que nenhum tipo de manutenção tivesse sido realizado no transformador TD03 no período entre esse ensaio, realizado no mês de dezembro e o anterior, realizado em meados de outubro.

Novamente, recorreu-se à análise do carregamento do transformador, agora nos períodos de junho, outubro e dezembro, a fim de se determinar o motivo da redução até então inexplicada do volume de descargas parciais com relação ao ensaio anterior. O resultado, apresentado na Figura 45, sinaliza para a redução do carregamento no transformador TD03 como sendo a provável causa dessa diminuição e corrobora a suspeita do efeito inverso, ou seja, aumento no volume de DP, observado nos resultados do ensaio anterior (outubro).

Figura 45 - Comparação entre o carregamento observado nos ensaios de junho, outubro e dezembro, no TD03.



Fonte: Marques, A. P. [6].

Concluiu-se que o transformador TD03 ainda necessita de acompanhamento uma vez que os resultados da análise de emissão acústica apresentaram evidências consideráveis de DPs numa região bem definida (no formato de uma coluna) próxima ao enrolamento e ao comutador de derivação em carga, e somente em um período curto do ciclo de carga, no horário de pico (em torno das 19 horas), estando associadas ao nível de carregamento do equipamento.

Com relação às métricas relacionadas aos ruídos detectados, as seguintes comparações podem ser realizadas levando-se em consideração o ensaio atual e o anterior.

- a) Diminuiu a quantidade de tempo de evidências, de 64,5% para 35,9%. Como também diminuiram todos os parâmetros analisados em relação à DPs, salvo a média de energia das descargas apresentadas no histograma da Figura 41, mas que por ser uma média realizada em cima de uma redução acentuada de ruídos, não trouxe preocupação;
- b) O nível de ruído total, apesar de ter apresentado valores menores, permaneceu alto, cabendo investigar sua causa (ruído não relacionado à DPs);

- c) Permaneceu a mesma a quantidade de canais que detectaram DPs em relação ao mês de outubro: canais 17, 19, 21 e 23, que respectivamente correspondem aos sensores 3, 5, 7 e 9;
- d) A ENERGIA MÉDIA das DPs permaneceu praticamente a mesma (de 3,603 para 3,504) por ruído de DP detectado; e
- e) O valor da MEDIANA da distribuição de energia das DPs manteve-se em 2,0 por ruído de DP detectado, conforme apresenta a Figura 46.

#### 3.5.4. Ensaio de EA: 01 a 04 de abril de 2013

Um novo ensaio de emissão acústica foi realizado no transformador TD03 objetivando o acompanhamento sugerido através dos resultados do ensaio anterior, realizando em dezembro de 2012. Este novo ensaio de emissão acústica foi realizado no período entre os dias 01 e 04 de abril de 2013.

Novamente, o equipamento foi monitorado durante vinte e quatro (24) horas e apresentou aumento no volume de ruído total (em azul) e no volume de ruídos provocados por descarga parcial (em vermelho), como pode ser observado na Figura 46.

Os histogramas “Energia x Tempo” apresentado nas Figuras 47, 48 e 49, que consideram respectivamente os eventos registrados em todo o transformador e em seguida da perspectiva de cada canal, demonstram que apesar do aumento em ambos os tipos de ruído, os registros foram detectados por tempo inferior a todos os ensaios realizados anteriormente; entre os períodos de junho a dezembro de 2012.

Entretanto, houve um aumento de quase todas as outras métricas, salvo a contagem de ruídos detectados onde houve uma redução, não expressiva, da ordem de 0.82 %. A tabela 6 apresenta um comparativo entre as métricas obtidas através do ensaio atual e o realizado anteriormente.

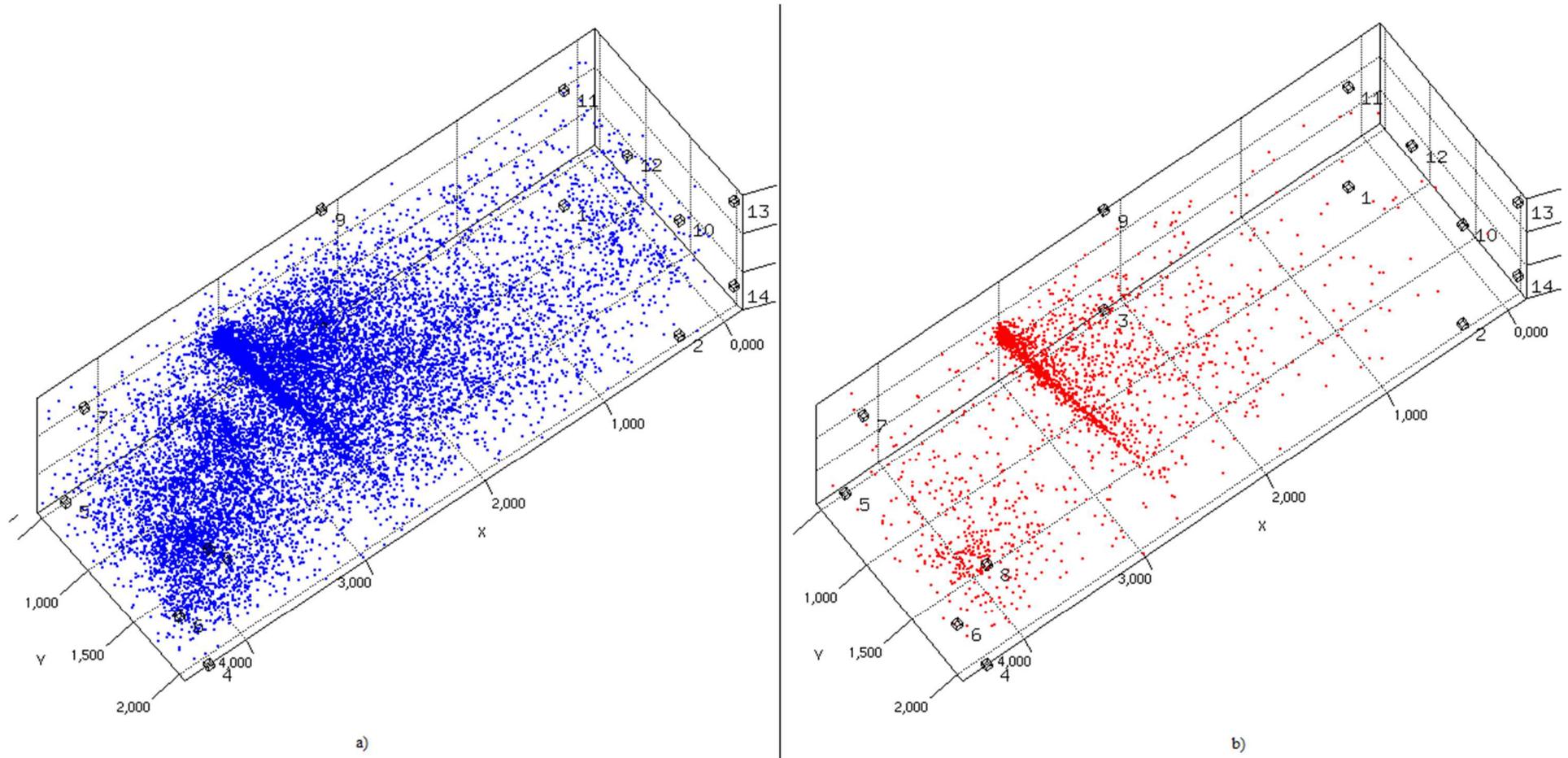
Tabela 6 – Comp. de métricas relacionadas à DP obtidas no ensaio anterior (dezembro de 2012) e o ensaio atual.

Ensaio	Cont	Som	Max	Med	Max(hst)	Med(hst)	%T
Dezembro	100.420	385.352	22	3,8	32.178	265,4	35,9
Abril	99.597	1.109.210	37	11,1	36.804	767,6	6,8
	Redução	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Aumento	Redução

Fonte: elaborado pelo autor.

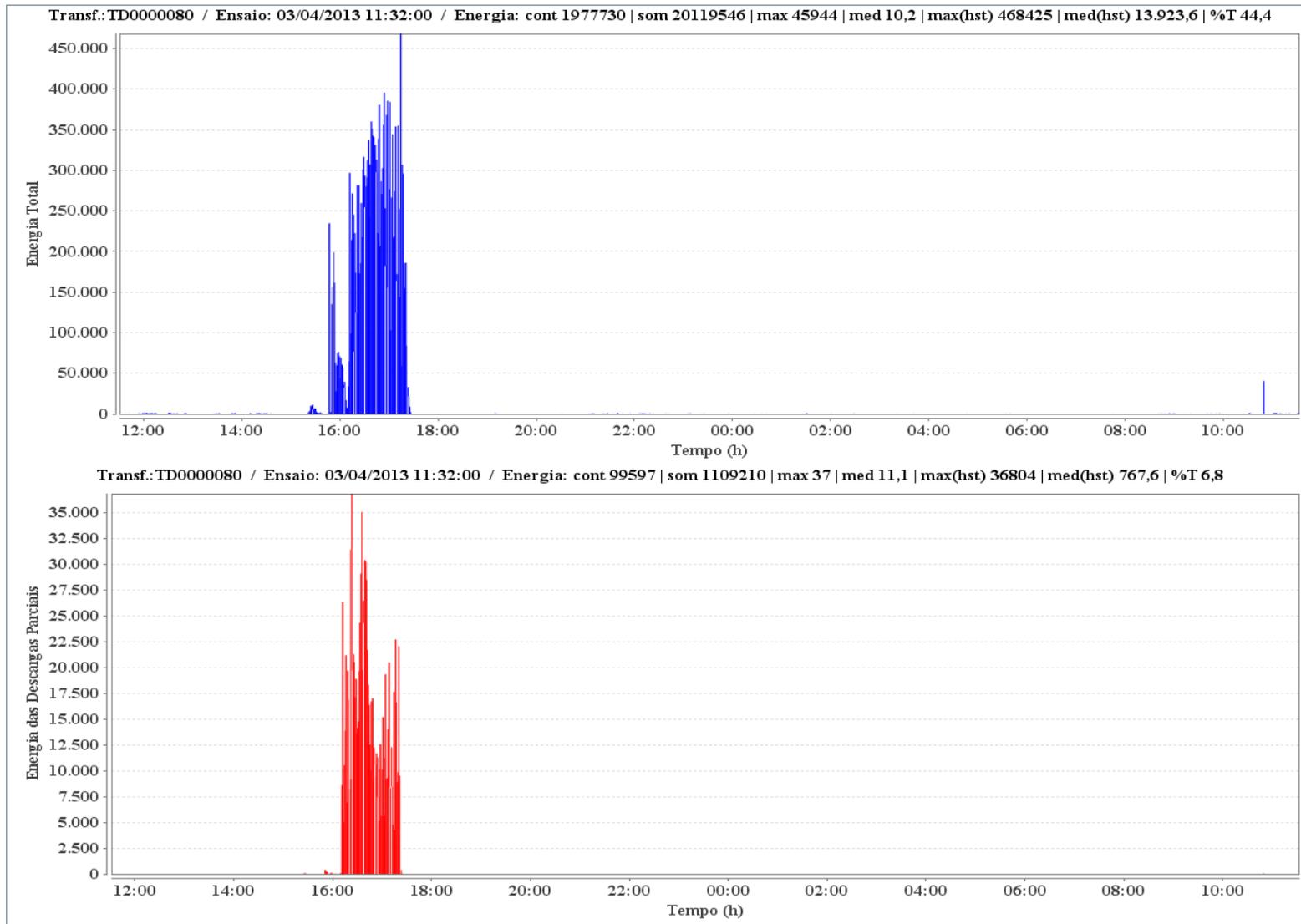
Para a realização de um comparativo da distribuição da energia considerando todos os registros de ruídos detectados entre o ensaio atual e o anterior, a Figura 50 apresenta tal distribuição na forma de um gráfico *boxplot*.

Figura 46 – Plotagem 3D - a) Ruído total (de toda natureza). b) Ruído proveniente de DP. (Abril)



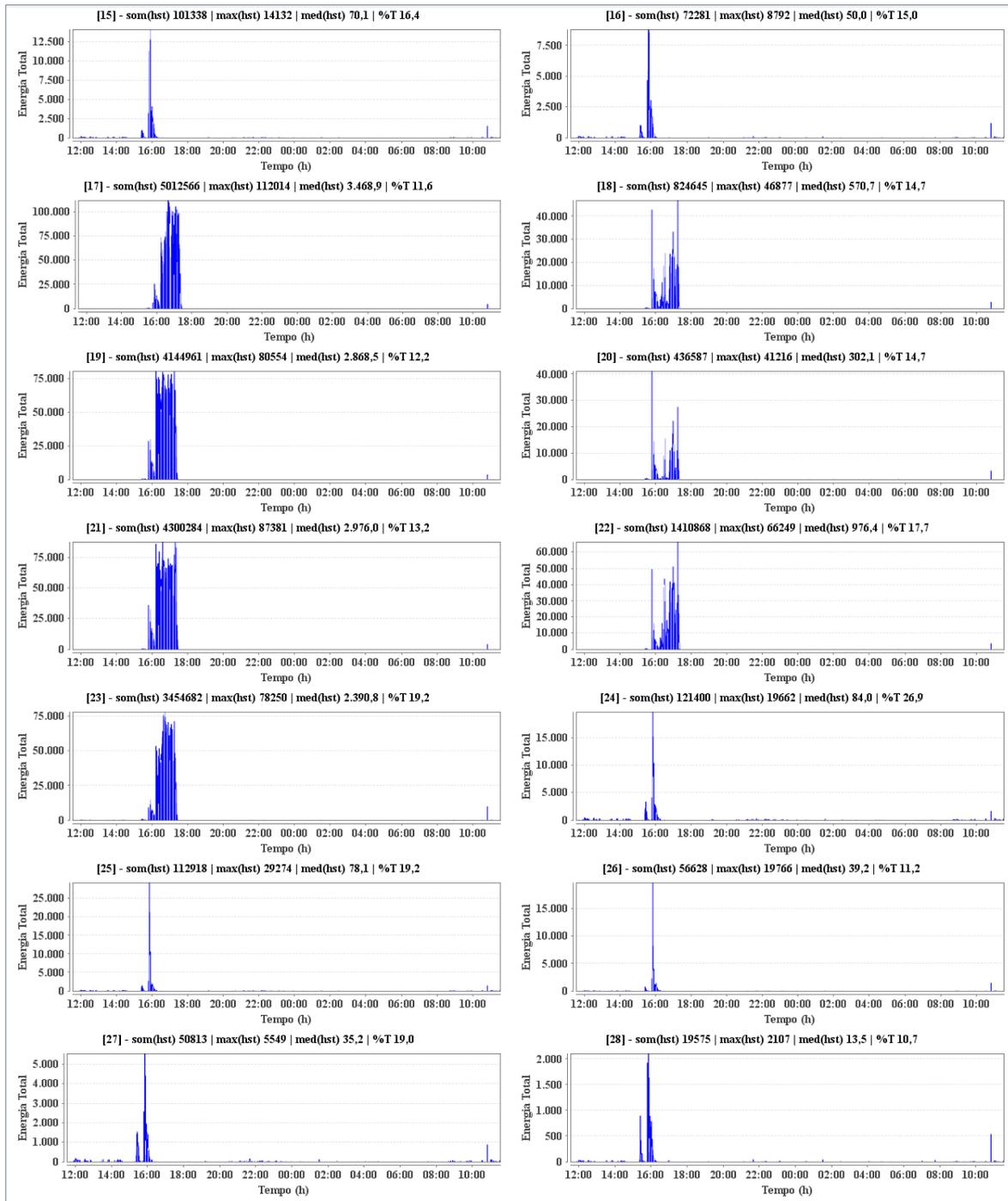
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 47 – Histograma “Energia x Tempo” da perspectiva de todo o transformador. (Abril)



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 48 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído total). (Abril)

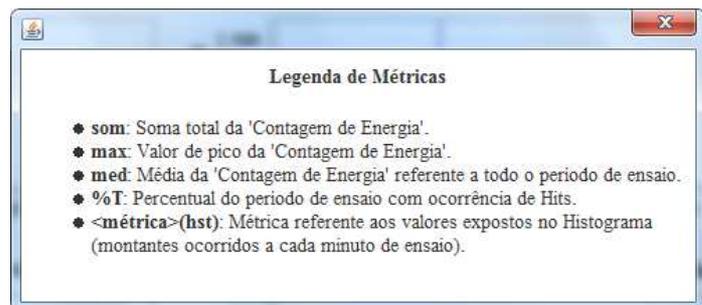
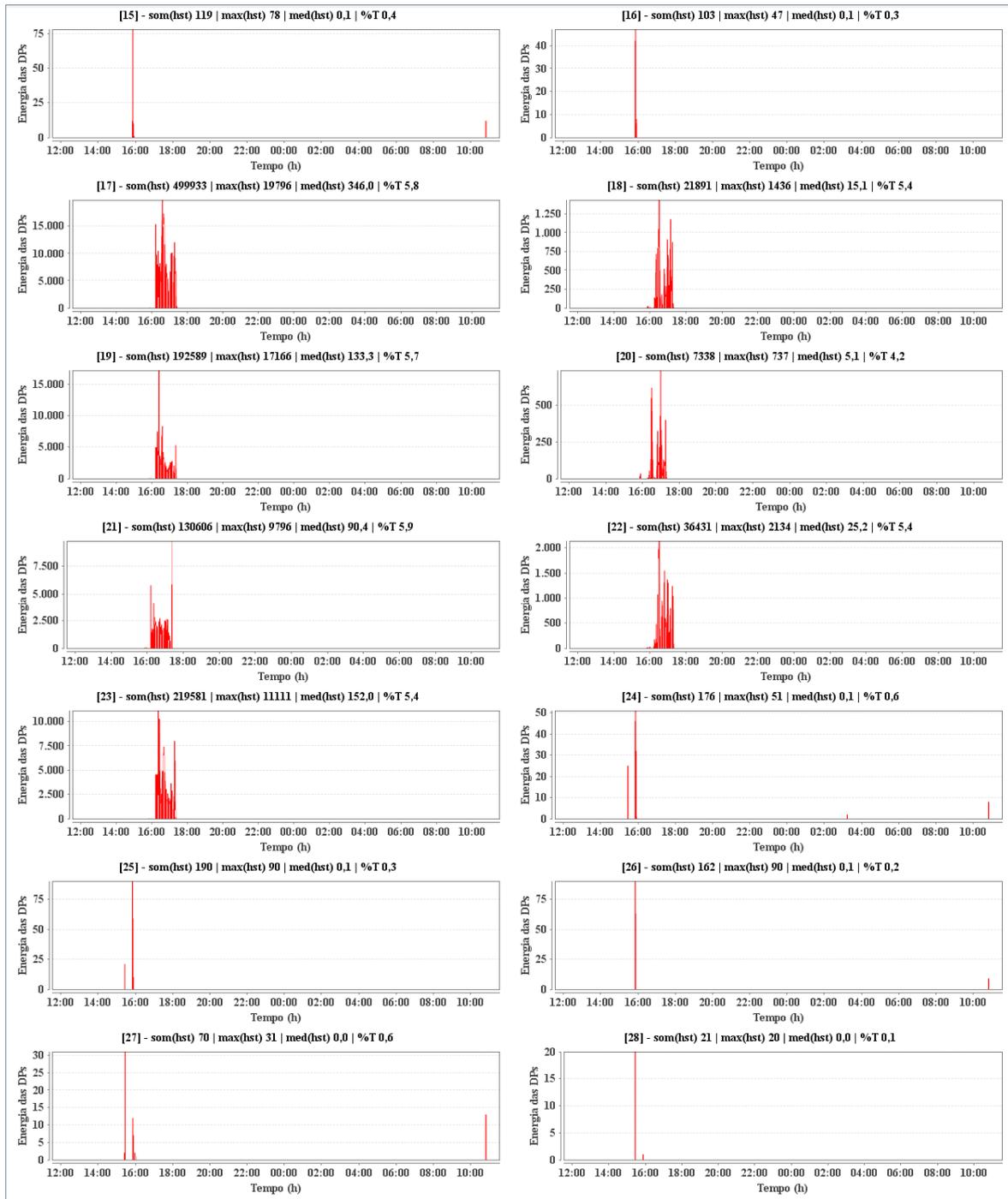


**Legenda de Métricas**

- ◆ **som**: Soma total da 'Contagem de Energia'.
- ◆ **max**: Valor de pico da 'Contagem de Energia'.
- ◆ **med**: Média da 'Contagem de Energia' referente a todo o periodo de ensaio.
- ◆ **%T**: Percentual do periodo de ensaio com ocorrência de Hits.
- ◆ **<métrica>(hst)**: Métrica referente aos valores expostos no Histograma (montantes ocorridos a cada minuto de ensaio).

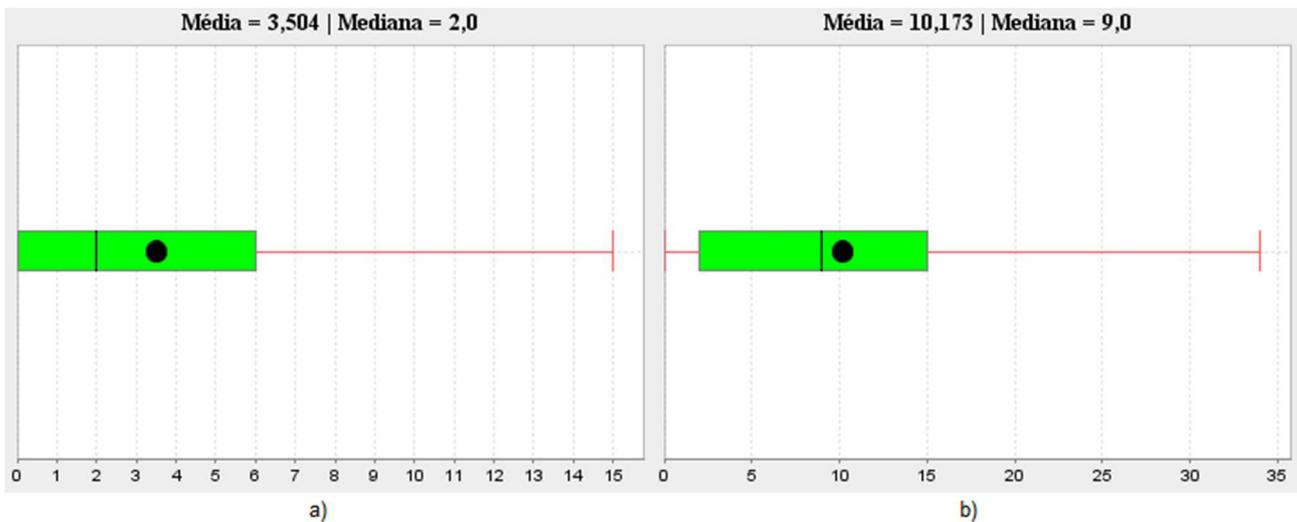
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 49 - Histograma “Energia x Tempo” por canal (ruído proveniente de descargas parciais). (Abril)



Fonte: elaborado pelo autor.

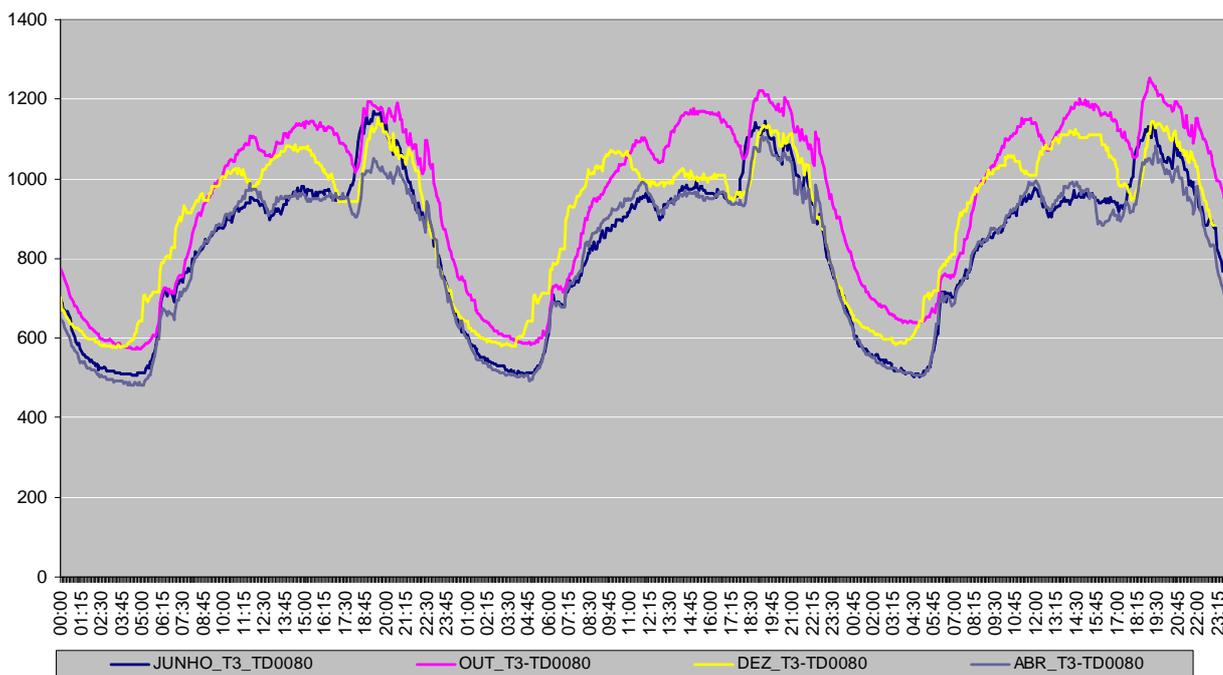
Figura 50 – a) Boxplot referente ao ensaio de dezembro. b) Boxplot referente ao ensaio de abril.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com base nos resultados, concluiu-se que o transformador TD03 ainda apresenta evidências consideráveis de DPs, com um agrupamento bem definido (no formato de uma coluna) próxima ao enrolamento e ao comutador de derivação em carga, e somente em um período curto do ciclo de carga, no horário de aproximadamente 17 (dezesete) horas (cinco horas após o início do ensaio que ocorreu às 11:32h do dia 03 de abril de 2013), estando associadas ao nível de carregamento do equipamento demonstrado na Figura 51.

Figura 51 - Comparação entre o carregamento observado nos ensaios de junho, outubro, dezembro e abril, no TD03.



Fonte: Marques, A. P. [6]

Comparando os resultados do ensaio de abril de 2013 com o anterior (de dezembro de 2012), constata-se no TD03 que:

- a) Diminuiu a quantidade de tempo de evidências, de 35,9% para 6,8%;
- b) O nível de ruído total apresentou valor menor de 83,3% para 44,4%;
- c) Permaneceu a região de grande concentração de DPs, próximos aos canais 17, 19, 21 e 23, que respectivamente correspondem aos sensores 3, 5, 7 e 9; e
- d) Verifica-se uma correlação entre as intensidades e quantidades de DPs com o nível de carregamento.

Concluiu-se que o transformador TD03 apresentou redução significativa de ruídos total e provocados por descargas parciais, principalmente quando os resultados desse ensaio, realizado em abril de 2013, são comparados aos resultados oriundos do primeiro ensaio, realizado em junho de 2012.

O equipamento ainda necessita ser acompanhado periodicamente, entretanto, a realização do processo de filtragem realizado com base nos resultados do primeiro ensaio comprovadamente melhorou a condição operacional do transformador, contribuindo para evitar uma falha e conseqüentemente a interrupção do fornecimento de energia.

### **3.6. Considerações finais**

A utilização da solução computacional denominada DPTrafo 2.0, descrita nesse trabalho, foi de grande utilidade para a tomada de decisão com relação à condição operacional do transformador TD03, alvo desse estudo de caso.

Através dos resultados providos pelo DPTrafo 2.0, o engenheiro responsável pela garantia do adequado funcionamento do transformador obteve análises suficientes para solicitar a interrupção do funcionamento do mesmo e a realização de um processo de filtragem do óleo isolante.

Comparando os resultados provenientes do primeiro ensaio (junho de 2012) de emissão acústica, Figuras de 26 a 30, e os resultados obtidos através do último ensaio (abril de 2013), Figuras 46 a 50, é visível a melhora na condição operacional do transformador no que diz respeito à diminuição das ocorrências de descargas parciais.

Ao longo desse estudo do caso, foi verificada uma correlação entre o nível de carregamento dos transformadores e o aumento/redução do volume de descargas parciais. Basicamente, constatou-se que um mesmo transformador, quando monitorado via ensaio de emissão acústica, apresenta diferentes resultados quanto ao nível de ruído detectado conforme seu nível de carregamento. Os resultados demonstraram que quanto maior o carregamento, maior a incidência de DPs e vice versa.

Com base nessa afirmação e observando a Figura 51, obtida por meio do *software* CTransf [35], é possível observar grande semelhança entre o carregamento observados nos ensaios supracitados, realizados em junho de 2012 e abril de 2013. Tivemos no primeiro ensaio realizado, evidências de descargas parciais espalhadas ao longo de todo o transformador; enquanto que, no ensaio realizado no mês de abril de 2013, sobre condições bastante semelhantes de carregamento, um nível muito inferior de ruído total e provenientes de DPs foi detectado.

## 4. Conclusões

O transformador de potência é um equipamento de custo elevado e representa um papel fundamental nos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Monitorar a ocorrência de descargas parciais nesses equipamentos é uma forma eficiente de detectar falhas incipientes, tornando possível agir preventivamente para evitar que o seu funcionamento seja comprometido, acarretando sua avaria e, conseqüentemente, a interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Atualmente, têm-se utilizado alguns métodos para a identificação de descargas parciais: elétrico, químico (em especial, análise de gases dissolvidos, ou AGD) e acústico (ensaio de emissão acústica, ou EA). O ensaio de emissão acústica, abordado nesse trabalho, além de se apresentar como técnica não invasiva e não exigir a interrupção do funcionamento do equipamento se destaca na detecção de descargas parciais, provendo inclusive informações que possibilitam sua localização tridimensional dentro do transformador.

Os métodos desenvolvidos neste trabalho, todos tendo como insumo os resultados providos por ensaios de emissão acústica, compõem uma solução computacional completa dirigida ao diagnóstico de transformadores de potência.

O método de identificação separa ruídos comuns daqueles resultantes de descarga parcial, possibilitando o processamento isolado de seus atributos permitindo o foco na informação de maior relevância. O resultado da execução do método de localização proporciona ao analista responsável pelo diagnóstico uma visão tridimensional das fontes de descargas parciais dentro do transformador de potência, tornando possível determinar quais componentes internos estão contribuindo para o surgimento desse evento nocivo.

Os resultados providos pelo método de mensuração apresentam informações importantes a respeito da dinâmica de ocorrências das descargas parciais e seus atributos, as quais são utilizadas para a classificação dos transformadores. Tal classificação é realizada com base nos valores obtidos a partir da mensuração dos ruídos e seus atributos que por sua vez permitem traçar perfis de condição operacional dos transformadores, possibilitando assim, que a própria solução computacional enquadre um transformador em determinado perfil.

Portanto, conclui-se que os resultados providos pelos métodos de identificação, mensuração e localização tridimensional de descargas parciais contribuem para a tomada de

decisão por parte do engenheiro, que passa a contar com informações mais consistentes sobre a condição operacional do transformador de potência.

## 5. Referências

1. IEC 60270:2000 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements, third edition (2000).
2. IEEE Guide for the Detection and Location of Acoustic Emissions From Partial Discharges in Oil-Immersed Power Transformers and Reactors, IEEE Std C57.127-2007 (Revision of IEEE Std C57.127-2000), 31 August 2007.
3. P. MARQUES, C. J. RIBEIRO, C. H. AZEVEDO, H. P. ROMUALDO, J. A. L. SANTOS, L. C. BRITO, Ensaios de descargas parciais em transformadores de potência associados aos ensaios físico-químicos do óleo – um estudo de caso, apresentado no XXII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Brasília, DF, Brasil, 2013.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 6940: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – medição de descargas parciais. (Rio de Janeiro, 1981).
5. ELEFATHERION, P.M.; Partial discharge. XXI. Acoustic emission based PD source location in transformers, Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.11, no.6, pp.22-26, Nov.-Dec. 1995.
6. MARQUES, A.P. et al, Relatório Técnico: Ensaios de detecção de DPs pelo método acústico em transformador de potência. Relatório interno – Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento P&D263 – CELG D., Goiânia, 2013.
7. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 5356-1:2007: Transformadores de Potência Parte 1: Generalidades.
8. MILASH, M. Manutenção de transformadores em líquido isolante. Edgard Blücher Ltda. 1984. 354 p
9. RAPP, K.J.; MCSHANE, C.P.; LUKSICH, J., Interaction mechanisms of natural ester dielectric fluid and Kraft paper, Dielectric Liquids, 2005. ICDL 2005. 2005 IEEE International Conference on , vol., no., pp.393,396, 26 June-1 July 2005
10. AZEVEDO C. H. Metodologia para a eficácia da detecção de descargas parciais por emissão acústica como técnica preditiva de manutenção em transformadores de potência imersos em óleo isolante. 2009. 20 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2009.
11. LIPSTEIN, R. A.; SHAKNOVICH, M. I. Transformer oil. 2. Ed. Jerusalem, Israel program for, Scientific translations, 1970. 275p.

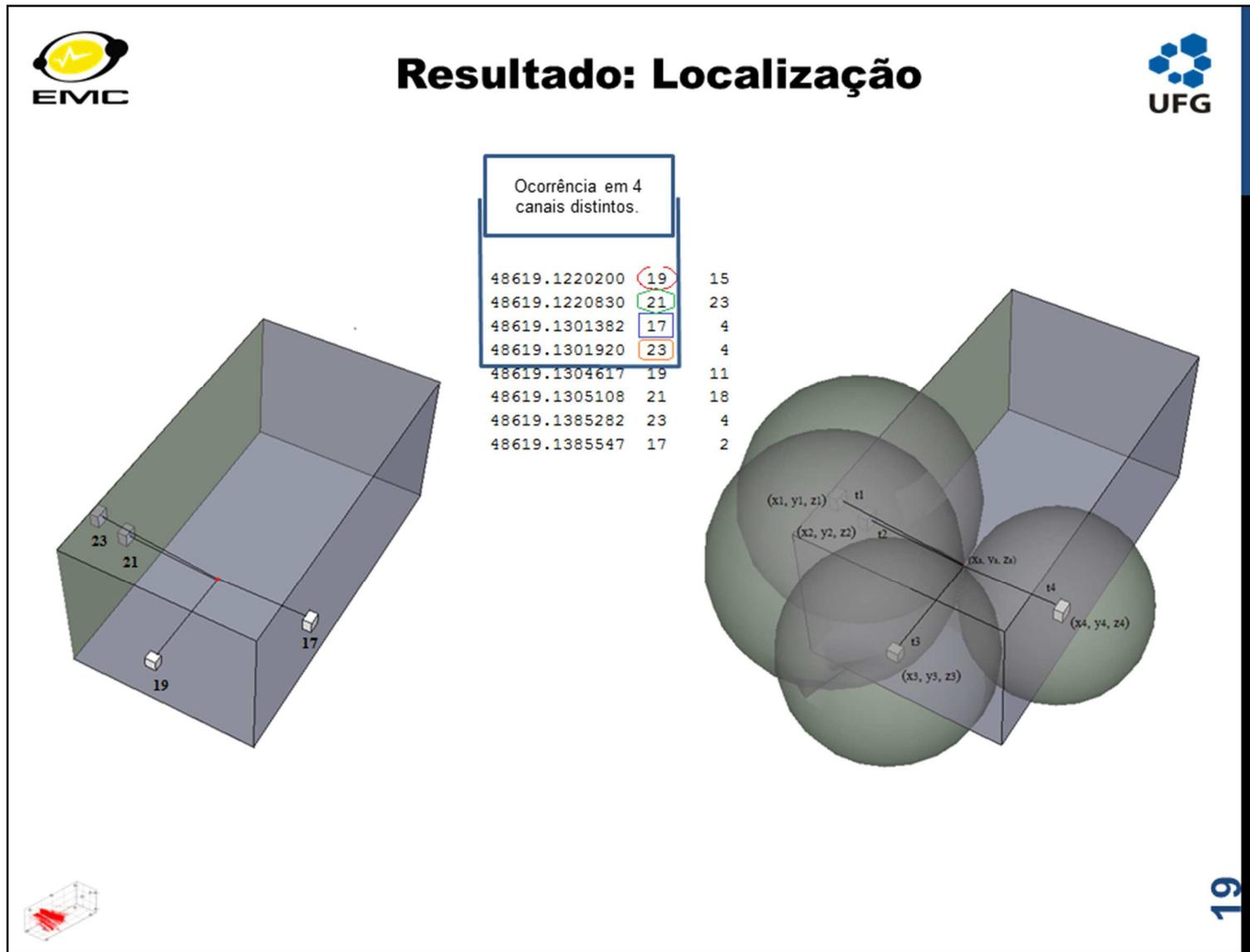
12. MASON, H. M. Enhancing the Significance of PD Measurements. IEEE TDEI, v. 2, n. 5, p.876-888, Oct. 1995.
13. SILVA, G. C. Descargas parciais estimuladas por raio X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças. 2005. 165 f. Tese 86 (Doutorado) Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
14. GROSS, D.W.; SOLLER, M., Partial discharge diagnosis on large power transformers, Electrical Insulation, 2004. Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on, vol., no., pp.186, 191, 19-22 Sept. 2004
15. POMPILI, M.; MAZZETTI, C.; BARTNIKAS, R., Partial discharge pulse sequence patterns and cavity development times in transformer oils under AC conditions, Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol.12, no.2, pp.395, 403, April 2005
16. C. J. RIBEIRO, C. H. AZEVEDO, A. P. MARQUES. Aplicação de uma nova metodologia para detecção de descargas parciais em transformadores de potência, apresentado no VI Workspot- International Workshop on Power Transformers, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2010.
17. ELEFATHERION, P.M.; Partial discharge. XXI. Acoustic emission based PD source location in transformers, Electrical Insulation Magazine, IEEE , vol.11, no.6, pp.22-26, Nov.-Dec. 1995.
18. ASTM E976-10: Standard guide for determining the reproducibility of acoustic emission sensor response. Current edition approved June 1, 2010. Originally approved in 1984.
19. P. H. S. PALHARES, Rede Bayesiana para Estimção de Falhas Incipientes em Transformadores de Potência utilizando Dados de Ensaio de Detecção de Descargas Parciais por Emissão Acústica, Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, 2012.
20. Wikipédia - [http://pt.wikipedia.org/wiki/Requisito\\_funcional](http://pt.wikipedia.org/wiki/Requisito_funcional) - acesso em 17/03/2014
21. Wikipédia - [http://pt.wikipedia.org/wiki/Requisito\\_n%C3%A3o-funcional](http://pt.wikipedia.org/wiki/Requisito_n%C3%A3o-funcional) - acesso em 17/03/2014
22. JACQUES, RICARDO CALLEGARI, Avaliação de parâmetros de emissão acústica para monitoramento de risers flexíveis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais, pp.34, Porto Alegre, RS, 2009.

23. Wikipédia - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Jdk> - acesso em 17/03/2014
24. Wikipédia - <http://pt.wikipedia.org/wiki/JSF> - acesso em 17/03/2014
25. Wikipédia - [http://pt.wikipedia.org/wiki/Spring\\_Framework](http://pt.wikipedia.org/wiki/Spring_Framework) - acesso em 17/03/2014
26. Wikipédia - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Hibernate> - acesso em 17/03/2014
27. Wikipédia - <http://pt.wikipedia.org/wiki/PostgreSQL> - acesso em 10/01/2014.
28. H. WILLIAM, P. E. BARTLEY, Analysis of Transformer Failures, International Association of Engineering Insurers 36th Annual Conference – Stockholm, 2003.
29. NIASAR, MOHAMAD GHAFARIAN, Partial discharge signatures of defects in insulation systems consisting of oil and oil-impregnated paper, Royal Institute of Technology (KTH), pp. 30-35, Stockholm, Sweden, 2012.
30. Wikipédia - <http://pt.wikipedia.org/wiki/Visualg> - acesso em 14/01/2014 - Download em <http://www.baixaki.com.br/download/visualg.htm>
31. SCHAU, H.; ROBINSON, A.; Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences, Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on , vol.35, no.8, pp. 1223- 1225, Aug 1987.
32. Ministério do Trabalho e Emprego - MTe. Norma Regulamentadora NR 10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Disponível em: <[www.mte.gov.br](http://www.mte.gov.br)>. Acesso em: 01 out. 2012.
33. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. NBR 15633 - Ensaio não destrutivo - Emissão acústica - Detecção e localização de descargas parciais e anomalias térmicas e mecânicas (DPATM) em transformadores de potência e reatores isolados a óleo. Rio de Janeiro, 2008.
34. FARIAS, A.M. L. O Boxplot. Instituto de Matemática da Universidade Federal Fluminense. Disponível em: <<http://www.uff.br/cdme/conheceboxplot/conheceboxplot-html/boxplot.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2012.
35. MARQUES, A.P.; MARQUES, F.P. Software CTransf: carregamento de transformadores, modelagem térmica, versão 2.5, Goiânia, 2001.

## **6. Apêndices**



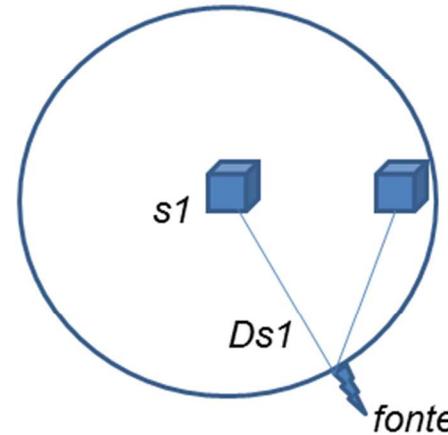
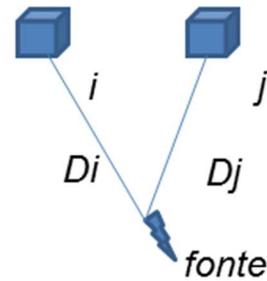
## 6.2. Apêndice B – Apresentação detalhada do algoritmo de localização tridimensional.



Fonte: elaborado pelo autor.



## Resultado: Localização



$$d_{ij} = D_i - D_j$$

$$d_{ij} = c * t_i - c * t_j$$

Equação para calculo do raio de uma esfera.

$$r^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2$$

Onde:

- f = fonte do ruído
- s1 = posição tridimensional do Sensor 1

$$D_{s1}^2 = (x_{s1} - x_f)^2 + (y_{s1} - y_f)^2 + (z_{s1} - z_f)^2$$





## Resultado: Localização



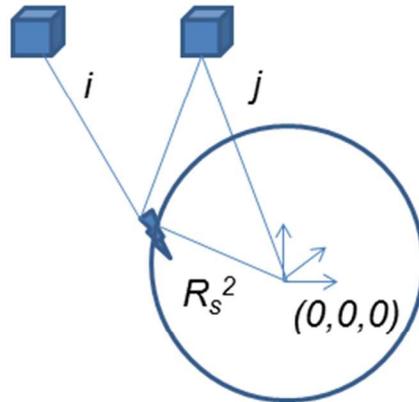
Similarmente para os 4 sensores, temos:

$$D_i^2 = (x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2 + (z_i - z_f)^2 \rightarrow i = 1,4$$

Resolvendo em função do sensor 4, temos:

$$(d_{i4} + D_4)^2 = x_i^2 - 2x_i x_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_i y_s + y_s^2 + z_i^2 - 2z_i z_s + z_s^2 \rightarrow i = 1,3$$

$$D_4^2 = x_4^2 - 2x_4 x_s + x_s^2 + y_4^2 - 2y_4 y_s + y_s^2 + z_4^2 - 2z_4 z_s + z_s^2 \rightarrow i = 4$$



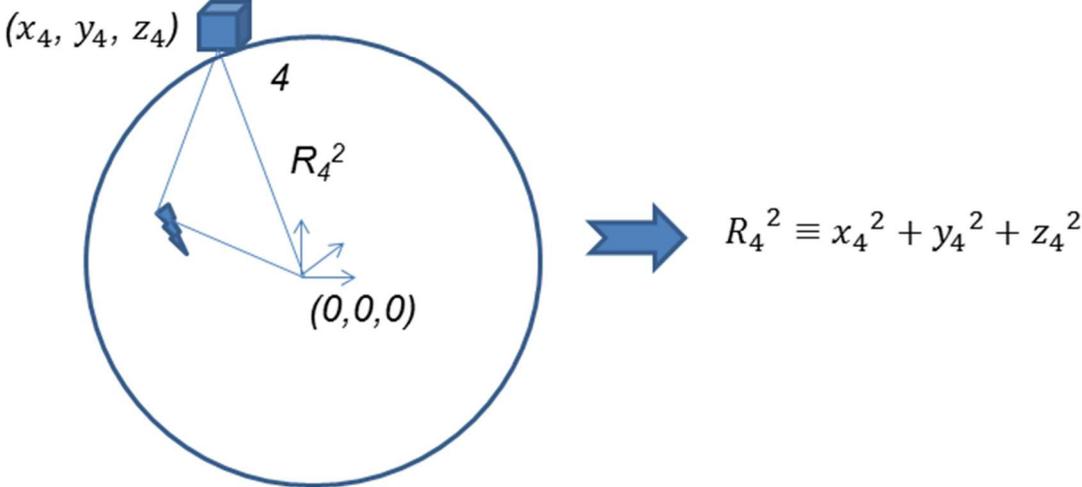
$$R_s^2 \equiv x_s^2 + y_s^2 + z_s^2$$





## Resultado: Localização





$R_4^2 \equiv x_4^2 + y_4^2 + z_4^2$

Voltando à equação do raio com relação ao sensor 4, agora envolvendo a distância entre a origem e a fonte do ruído  $R_4^2$ :

$$D_4^2 = R_4^2 + x_4^2 - 2x_4x_s + y_4^2 - 2y_4y_s + z_4^2 - 2z_4z_s \rightarrow i = 4$$

Reorganizamos a equação.

$$R_4^2 = -(x_4^2 + y_4^2 + z_4^2) + D_4^2 + 2x_4x_s + 2y_4y_s + 2z_4z_s$$

$$R_4^2 = -R_4^2 + D_4^2 + 2x_4x_s + 2y_4y_s + 2z_4z_s$$


22

## Apêndice B (continuação)



## Resultado: Localização



Relembrando a equação de cálculo do raio entre a fonte e cada um dos sensores sendo resolvida com base na posição último sensor (4º sensor), temos:

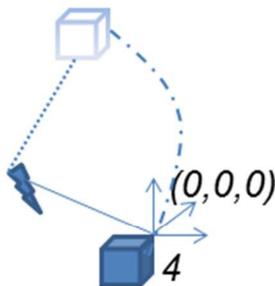
$$(d_{i4} + D_4)^2 = x_i^2 - 2x_i x_s + x_s^2 + y_i^2 - 2y_i y_s + y_s^2 + z_i^2 - 2z_i z_s + z_s^2 \rightarrow i = 1,3$$

Considerando a mesma analogia entre o raio de uma esfera com centro na origem (0,0,0) e a posição de cada um dos sensores podemos fazer a substituição.

$$(d_{i4} + D_4)^2 = R_i^2 + R_s^2 - 2x_i x_s - 2y_i y_s - 2z_i z_s \rightarrow i = 1,3$$

Substituindo o valor encontrando para  $R_s^2$  temos:

$$R_i^2 - (d_{i4} + D_4)^2 - R_4^2 + D_4^2 = 2x_i x_s + 2y_i y_s + 2z_i z_s^2 - 2x_4 x_s - 2y_4 y_s - 2z_4 z_s \rightarrow i = 1,3$$



Momentaneamente consideramos que a posição do último sensor (4) como sendo a origem, dessa forma:

$$R_4 = 0 \quad \text{e} \quad R_s^2 = D_4^2$$





## Resultado: Localização



$$\text{Como: } R_4 = 0$$

$$R_i^2 - (d_{i4} + D_4)^2 + D_4^2 = 2(x_i x_s + y_i y_s + z_i z_s - x_4 x_s - y_4 y_s - z_4 z_s) \rightarrow i = 1,3$$

$$\text{E: } R_s^2 = D_4^2$$

$$R_i^2 - d_{i4}^2 - 2d_{i4}R_s = 2(x_i x_s + y_i y_s + z_i z_s - x_4 x_s - y_4 y_s - z_4 z_s) \rightarrow i = 1,3$$

Nesse ponto, ainda existem incógnitas dos dois lados da equação:

- $R_s, e$
- $x$

Podendo ser escrita da seguinte forma:

$$\Delta - 2R_s d = 2\mu x$$

Onde:

$$\Delta = \begin{bmatrix} R_1^2 - d_{14}^2 \\ R_2^2 - d_{24}^2 \\ R_3^2 - d_{34}^2 \end{bmatrix}$$

$$d = \begin{bmatrix} d_{14} \\ d_{24} \\ d_{34} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix}$$

$$\mu = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ x_3 & y_3 & z_3 \end{bmatrix}$$





## Resultado: Localização



A equação é colocada em função de  $x$ .

$$x = \frac{1}{2} \mu^{-1} (\Delta - 2R_s d)$$

E relembrando que:

$$R_s = (x^T x)^{1/2}$$

Podemos fazer a substituição que após a expansão resulta em:

$$R_s^2 [4 - 4d^T (\mu^{-1})^T \mu^{-1} d] + R_s [2d^T (\mu^{-1})^T \mu^{-1} \Delta + 2\Delta^T (\mu^{-1})^T \mu^{-1} d] - [\Delta^T (\mu^{-1})^T \mu^{-1} \Delta] = 0$$

Temos duas (2) incógnitas onde o maior expoente entre elas é 2.

Coefficientes da equação.

Temos uma equação do 2º grau.





## Resultado: Localização



$$R_s = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}; R_s \geq 0$$

Onde:

$$a = [4 - 4d^T(\mu^{-1})^T\mu^{-1}d]$$

$$b = [2d^T(\mu^{-1})^T\mu^{-1}\Delta + 2\Delta^T(\mu^{-1})^T\mu^{-1}d]$$

$$c = [\Delta^T(\mu^{-1})^T\mu^{-1}\Delta]$$

Resolvendo-se a equação, o valor de  $R_s$  pode ser substituído na equação abaixo (apresentada anteriormente), provendo, após soma da posição tridimensional do último sensor (4º) a localização tridimensional da fonte do ruído.

$$x = \frac{1}{2}\mu^{-1}(\Delta - 2R_s d)$$

Mas a  
localização é  
válida?





## Resultado: Localização



Considerando a posição tridimensional dos sensores, a localização só é considerada válida, caso seus valores de  $(x, y, z)$  se enquadrem nos seus mínimos e máximos de  $(x, y, z)$ .

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_n & y_n & z_n \end{bmatrix}$$

Diferença de tempo de chegada  
(conhecida) entre sensores.

Erro médio quadrático  $(\Delta t_{\text{fonte}} \text{ e } \Delta t_{\text{sensores}}) < 1e^{-6}$   $\rightarrow$  **Localização válida!**

Diferença de tempo de chegada  
calculada através da (agora) conhecida  
fonte do ruído.

