



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

**DIAGNÓSTICO INTELIGENTE DE FALTAS EM TRANSFORMADORES  
BASEADO NA ANÁLISE DE GÁS DISSOLVIDO EM ÓLEO**

OTACÍLIO RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE TUCURUÍ  
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA

## DIAGNÓSTICO INTELIGENTE DE FALTAS EM TRANSFORMADORES BASEADO NA ANÁLISE DE GÁS DISSOLVIDO EM ÓLEO

OTACÍLIO RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em computação aplicada.

**Orientador:** Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira

Tucuruí - PA  
2024

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD**  
**Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará**  
**Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

D278d de Oliveira Filho, Otacílio Rodrigues.  
Diagnóstico inteligente de faltas em transformadores baseado  
na análise de gás dissolvido em óleo / Otacílio Rodrigues de  
Oliveira Filho. — 2024.  
121 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo  
de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia, Programa de Pós-  
Graduação em Computação Aplicada, Tucuruí, 2024.

1. Análise de Gás Dissolvido em Óleo. 2. Aprendizagem  
de Máquina. 3. Transformadores de Potência. I. Título.

CDD 004

---

OTACÍLIO RODRIGUES DE OLIVEIRA FILHO

**DIAGNÓSTICO INTELIGENTE DE FALTAS EM TRANSFORMADORES  
BASEADO NA ANÁLISE DE GÁS DISSOLVIDO EM ÓLEO**

Dissertação apresentada ao Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada do Núcleo de Desenvolvimento Amazônico em Engenharia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em computação aplicada.

Data da defesa: 12 de julho de 2024.

Resultado: Aprovado

**Banca examinadora:**

---

**Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira**

Orientador - UFPA/NDAE/PPCA

---

**Prof. Dr. Cleison Daniel Silva**

Avaliador Interno - UFPA/NDAE/PPCA

---

**Prof. Dr. Davi Carvalho Moreira**

Avaliador Externo - UFPA/NDAE/PEBGA

---

**MSc. Vitor Mendes Vilas Boas**

Avaliador Convidado - IFTO

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as oportunidades concedidas a mim, pela saúde e sabedoria nos momentos de dificuldade ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Otacílio e Maria Helena, aos meus seis irmãos, em especial a Naldene (*in memorian*), pelo amor e apoio em todas as fases da minha vida.

A minha esposa Elisângela e filhas Heloísa e Ana, meus eternos amores, pela presença constante, alegrando-me e incentivando-me a acreditar que posso mais do que imagino.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raphael Barros Teixeira pela confiança, paciência e dedicação durante a orientação deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Cleison Daniel Silva, pela confiança e contribuições técnicas neste trabalho.

Aos colegas de trabalho, Márcio Farias e Francisco Figueiredo, pela amizade e ajuda sempre que necessária.

A Eletrobras Eletronorte pelo apoio logístico e acesso a dados que viabilizaram a realização da pesquisa.

À todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para que este objetivo fosse alcançado.

Ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, que direta ou indiretamente contribuiu com a realização deste trabalho.

# Resumo

O Sistema Interligado Nacional (SIN) de produção e transmissão de energia elétrica brasileiro é um sistema hidro-termo-eólico de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas, cuja representação resulta da congregação de diversos sistemas de geração, por uma malha robusta de linhas de transmissão e inúmeras subestações envolvendo a rede básica de energia a partir da classe de tensão de 230kV. O transformador de potência se apresenta como elo de conexão entre geração e transmissão, possuindo papel essencial nos sistemas de energia elétrica, cuja detecção precoce de falhas é crucial para tais sistemas, devido ao elevado custo de manutenção e ao impacto dos defeitos nesses equipamentos. Neste contexto, diversos métodos, tanto inteligentes quanto convencionais, para a detecção de falhas a partir da análise de gases dissolvidos em óleo isolante (DGA) têm sido desenvolvidos e normatizados. Este trabalho apresenta uma base de dados de DGA composta por amostras reais coletadas de transformadores ao longo de 20 anos de operação, além de dados provenientes de literaturas consolidadas. As mais de 2000 amostras permitem o projeto de classificadores de falhas térmicas e elétricas em transformadores por aprendizado de máquina (AM). O estudo detalha a exploração dos dados e avalia classificadores como Regressão Logística (RL), Máquina de Vetores de Suporte (SVM), Redes Neurais Artificiais (ANN), K-Vizinhos mais Próximos (KNN), além dos métodos convencionais do triângulo de Duval, relações de Rogers, Gás-chave, Doernenburg e IEC 60599. Os resultados indicam que uma arquitetura híbrida, composta pelos classificadores KNN, ANN e o método convencional do triângulo de Duval, possui melhores resultados que o emprego individual dos métodos testados neste trabalho. Onde a classificação das amostras de teste, evidenciaram o desempenho da arquitetura híbrida em 98% no diagnóstico de falhas incipientes em transformadores.

**Palavras-chave:** Transformadores de Potência. Análise de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante. Falhas Incipientes. Aprendizado de Máquina. Classificadores.

# Abstract

The National Interconnected System (SIN) for the production and transmission of electrical energy Sileiro is a large hydro-thermal-wind system, with a predominance of power plants hydroelectric plants, whose representation results from the combination of different generation systems, by a robust network of transmission lines and numerous substations surrounding the network basic energy from the voltage class of 230kV. The power transformer tency presents itself as a connecting link between generation and transmission, playing a essential in electrical power systems, whose early fault detection is crucial for such systems, due to the high maintenance cost and the impact of defects in these equipment. In this context, several methods, both intelligent as well as conventional, for detecting flaws based on the analysis of dissolved gases in insulating oil (DGA) have been developed and standardized. This work presents a DGA database composed of real samples collected from transformers around the world over 20 years of operation, in addition to data from consolidated literature. To the more than 2000 samples allow the design of thermal and electrical fault classifiers in transformers by machine learning (ML). The study details the exploration data and evaluates classifiers such as Logistic Regression (RL), Vector Machine Support System (SVM), Artificial Neural Networks (ANN), K-Nearest Neighbors (KNN), in addition to the conventional methods of Duval's triangle, Rogers relations, Key Gas, Doernenburg and IEC 60599. The results indicate that a hybrid architecture, composed by classifiers KNN, ANN and the conventional Duval triangle method, has better results than the individual use of the methods tested in this work. Where the classification of the test samples, highlighted the performance of the hybrid architecture in 98% in the diagnosis of incipient failures in transformers.

**Key words:** Electrical Power System. Power Transformers. Analysis of Gases Dissolved in Insulating Oil. DGA. Incipient Failures. Machine Learning. Classifiers.

# Lista de figuras

|                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Exemplos de transformadores de potência . . . . .                                                                 | 5  |
| Figura 2 – Principais partes do transformador de potência . . . . .                                                          | 6  |
| Figura 3 – Comutador sob carga . . . . .                                                                                     | 7  |
| Figura 4 – Localização do comutador de tap - OLTC . . . . .                                                                  | 8  |
| Figura 5 – Formação de cera em recipiente com óleo oxidado . . . . .                                                         | 10 |
| Figura 6 – Ilustração de defeito de múltiplas classes . . . . .                                                              | 11 |
| Figura 7 – Concentrações de gases em função do tipo de falha e temperatura . . .                                             | 13 |
| Figura 8 – Triângulo de Duval 1 . . . . .                                                                                    | 17 |
| Figura 9 – Sistema DianE . . . . .                                                                                           | 20 |
| Figura 10 – Variáveis de relaxamento $\zeta_i$ . . . . .                                                                     | 28 |
| Figura 11 – Neurônio artificial . . . . .                                                                                    | 32 |
| Figura 12 – Funções de ativação . . . . .                                                                                    | 32 |
| Figura 13 – Distribuição de dados logaritmizados - <i>boxsplot</i> . . . . .                                                 | 41 |
| Figura 14 – Distribuição de dados logaritmizados - 3D . . . . .                                                              | 41 |
| Figura 15 – Distribuição do acetileno. . . . .                                                                               | 42 |
| Figura 16 – Soma cumulativa das variâncias . . . . .                                                                         | 44 |
| Figura 17 – K vizinho ideal . . . . .                                                                                        | 46 |
| Figura 18 – Gráficos de distribuição comparativo das concentrações dos gases em<br>ppm - dados puros e normalizados. . . . . | 53 |
| Figura 19 – Gráficos de distribuição comparativo das concentrações dos gases em<br>ppm - dados puros e lognormal. . . . .    | 53 |
| Figura 20 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados puros. .                                            | 53 |
| Figura 21 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados norma-<br>lizados. . . . .                          | 54 |
| Figura 22 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados logarit-<br>mizados. . . . .                        | 54 |
| Figura 23 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 3D dados logaritmizados.                                          | 55 |
| Figura 24 – Método do Cotovelo - amostras normais . . . . .                                                                  | 56 |
| Figura 25 – Gráficos de dispersão das amostras - 3D dados logaritmizados. . . . .                                            | 56 |
| Figura 26 – Gráficos de dispersão das amostras normais - 3D dados logaritmizados.                                            | 57 |
| Figura 27 – Gráficos de dispersão das amostras de falha - 2D e 3D dados logarit-<br>mizados. . . . .                         | 57 |
| Figura 28 – Método do Cotovelo - amostras de falhas . . . . .                                                                | 57 |
| Figura 29 – Concentrações de gases em função tipo de falha e temperatura . . . . .                                           | 58 |
| Figura 30 – Concentrações de gases em função tipo de falha e temperatura . . . . .                                           | 58 |
| Figura 31 – Sistema de Diagnóstico Inteligente - SDI. . . . .                                                                | 67 |
| Figura 32 – Conexão frouxa - fonte de aquecimento. . . . .                                                                   | 68 |

|                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------|----|
| Figura 33 – Identificação do local de defeito . . . . .         | 69 |
| Figura 34 – Extração do condutor lide com aquecimento . . . . . | 70 |
| Figura 35 – Condutor lide extraído . . . . .                    | 70 |
| Figura 36 – Régua de contatos móveis. . . . .                   | 71 |
| Figura 37 – Identificação do local de defeito . . . . .         | 71 |

# Lista de tabelas

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Relevância dos gases nos tipos de falhas. . . . .                               | 15 |
| Tabela 2 – Concentração dos gases em ppm - amostras da base de dados IEC TC10. . . . .     | 16 |
| Tabela 3 – Relações de Rogers. . . . .                                                     | 17 |
| Tabela 4 – Método Gás chave. . . . .                                                       | 18 |
| Tabela 5 – Valores de concentrações limite dos gases. . . . .                              | 18 |
| Tabela 6 – Metodologia de Doernenburg. . . . .                                             | 19 |
| Tabela 7 – Método IEC 60599. . . . .                                                       | 19 |
| Tabela 8 – Estratificação de <i>dataset</i> . . . . .                                      | 52 |
| Tabela 9 – Estratificação de <i>dataset</i> normalizado. . . . .                           | 52 |
| Tabela 10 – Estratificação de <i>dataset</i> logaritmizados. . . . .                       | 52 |
| Tabela 11 – Matrizes de confusão - métodos convencionais . . . . .                         | 62 |
| Tabela 12 – Matriz de confusão da ANN. . . . .                                             | 63 |
| Tabela 13 – Matriz de confusão do SVM ( <i>default</i> ). . . . .                          | 63 |
| Tabela 14 – Matriz de confusão do SVM ( <i>GridSearchCV</i> ). . . . .                     | 64 |
| Tabela 15 – Matriz de confusão do RL. . . . .                                              | 64 |
| Tabela 16 – Matriz de confusão do KNN. . . . .                                             | 64 |
| Tabela 17 – Quadro comparativo de desempenho das metodologias. . . . .                     | 65 |
| Tabela 18 – Amostras gascromatográficas . . . . .                                          | 67 |
| Tabela 19 – Amostras gascromatográficas - Transformador 69/13,8 kV . . . . .               | 68 |
| Tabela 20 – Amostras gascromatográficas - Reator de derivação 525/ $\sqrt{3}$ kV . . . . . | 69 |
| Tabela 21 – Amostras gascromatográficas - Transformador 230/69 kV . . . . .                | 71 |
| Tabela 22 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 1 . . . . .               | 82 |
| Tabela 23 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 2 . . . . .               | 83 |
| Tabela 24 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 3 . . . . .               | 84 |
| Tabela 25 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 4 . . . . .               | 85 |
| Tabela 26 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 5 . . . . .               | 86 |
| Tabela 27 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 6 . . . . .               | 87 |
| Tabela 28 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 7 . . . . .               | 88 |
| Tabela 29 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 8 . . . . .               | 89 |
| Tabela 30 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 9 . . . . .               | 90 |
| Tabela 31 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 10 . . . . .              | 91 |
| Tabela 32 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 11 . . . . .              | 92 |
| Tabela 33 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 12 . . . . .              | 93 |
| Tabela 34 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 13 . . . . .              | 94 |
| Tabela 35 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 14 . . . . .              | 95 |
| Tabela 36 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 15 . . . . .              | 96 |
| Tabela 37 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 16 . . . . .              | 97 |

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 38 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 1 . . . | 98  |
| Tabela 39 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 2 . . . | 99  |
| Tabela 40 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 3 . . . | 100 |
| Tabela 41 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 1 . . .  | 101 |
| Tabela 42 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 2 . . .  | 102 |
| Tabela 43 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 3 . . .  | 103 |
| Tabela 44 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 4 . . .  | 104 |
| Tabela 45 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 5 . . .  | 105 |

# Lista de abreviações e siglas

|                               |                                                  |
|-------------------------------|--------------------------------------------------|
| ABNT                          | Associação Brasileira de Normas Técnicas         |
| ANN                           | Artificial Neural Network                        |
| CH <sub>4</sub>               | Metano                                           |
| C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Acetileno                                        |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | Etileno                                          |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | Etano                                            |
| CO                            | Monóxido de Carbono                              |
| CO <sub>2</sub>               | Dióxido de Carbono                               |
| DGA                           | Dissolved Gas Analysis                           |
| DP                            | Descarga parcial                                 |
| D1                            | Descarga de Baixa Energia                        |
| D2                            | Descarga de Alta Energia                         |
| H <sub>2</sub>                | Hidrogênio                                       |
| IEC                           | International Electrotechnical Commission        |
| IEEE                          | Institute of Electrical and Electronic Engineers |
| K                             | Número de vizinhos mais próximos                 |
| K <sub>c</sub>                | Número de grupos (clusters)                      |
| Kv                            | Quilovolt ou 1000 Volts                          |
| KNN                           | K-Nearest Neighborhood                           |
| N <sub>2</sub>                | Nitrogênio                                       |
| O <sub>2</sub>                | Oxigênio                                         |
| PC1                           | Componente principal 1                           |
| PC2                           | Componente principal 2                           |
| PC3                           | Componente principal 3                           |
| R                             | Reações catalíticas                              |

|                |                                                                                    |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| R <sub>1</sub> | Relações de gases 1                                                                |
| R <sub>2</sub> | Relações de gases 2                                                                |
| R <sub>3</sub> | Relações de gases 3                                                                |
| PCA            | Principal Component Analysis                                                       |
| PPM            | Part Per Million                                                                   |
| SVM            | Support Vector Machine                                                             |
| T <sub>1</sub> | Falha térmica em temperatura $T < 300^{\circ}\text{C}$                             |
| T <sub>2</sub> | Falha térmica em temperatura entre $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$ |
| T <sub>3</sub> | Falha térmica em temperatura $T > 700^{\circ}\text{C}$                             |

# Sumário

|                                      |                                                                   |          |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------|
| <b>Agradecimento</b>                 | <b>i</b>                                                          |          |
| <b>Resumo</b>                        | <b>ii</b>                                                         |          |
| <b>Abstract</b>                      | <b>iii</b>                                                        |          |
| <b>Lista de figuras</b>              | <b>iv</b>                                                         |          |
| <b>Lista de tabelas</b>              | <b>vi</b>                                                         |          |
| <b>Lista de abreviações e siglas</b> | <b>viii</b>                                                       |          |
| <b>Sumário</b>                       | <b>x</b>                                                          |          |
| <b>1</b>                             | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                 | <b>1</b> |
| 1.1                                  | Objetivo                                                          | 3        |
| 1.2                                  | Metodologia de pesquisa                                           | 3        |
| 1.3                                  | Organização do trabalho                                           | 4        |
| <b>2</b>                             | <b>CARACTERÍSTICAS DE FALHAS EM TRANSFORMADORES E ANÁLISE DGA</b> | <b>5</b> |
| 2.1                                  | Transformador de potência                                         | 5        |
| 2.1.1                                | Conjunto de isolamento do transformador                           | 7        |
| 2.1.2                                | Papel isolante                                                    | 8        |
| 2.1.3                                | Óleo mineral isolante                                             | 9        |
| 2.1.4                                | Degradação do óleo isolante                                       | 9        |
| 2.1.5                                | Tipos de falha                                                    | 10       |
| 2.2                                  | Análise de gases dissolvidos - DGA                                | 12       |
| 2.2.1                                | Metodologias convencionais                                        | 15       |
| 2.2.1.1                              | Triângulo de Duval                                                | 15       |
| 2.2.1.2                              | Relação de Rogers                                                 | 17       |
| 2.2.1.3                              | Gás chave                                                         | 18       |
| 2.2.1.4                              | Doernenburg                                                       | 18       |
| 2.2.1.5                              | IEC 60599                                                         | 19       |
| 2.2.1.6                              | Sistema de diagnóstico de equipamentos - DianE                    | 19       |
| 2.2.2                                | Metodologias de inteligência artificial                           | 20       |
| 2.2.2.1                              | Redes neurais artificiais                                         | 20       |

|            |                                                                                   |           |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.2.2.2    | Máquina de vetor suporte - SVM . . . . .                                          | 22        |
| 2.2.2.3    | K vizinhos mais próximos (KNN) . . . . .                                          | 23        |
| 2.2.2.4    | Regressão logística . . . . .                                                     | 23        |
| <b>2.3</b> | <b>Considerações do capítulo . . . . .</b>                                        | <b>23</b> |
| <b>3</b>   | <b>TÉCNICAS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA . . . . .</b>                              | <b>25</b> |
| <b>3.1</b> | <b>Regressão logística (LR) . . . . .</b>                                         | <b>25</b> |
| <b>3.2</b> | <b>Máquina de vetores de suporte (SVM) . . . . .</b>                              | <b>27</b> |
| <b>3.3</b> | <b>K-ésimos vizinhos mais próximos (KNN) . . . . .</b>                            | <b>29</b> |
| <b>3.4</b> | <b>Redes neurais artificiais (ANN) . . . . .</b>                                  | <b>31</b> |
| <b>3.5</b> | <b>Análise de componente principal (PCA) . . . . .</b>                            | <b>33</b> |
| <b>3.6</b> | <b>Aprendizado supervisionado . . . . .</b>                                       | <b>35</b> |
| <b>3.7</b> | <b>Técnicas de pré-processamento . . . . .</b>                                    | <b>37</b> |
| <b>3.8</b> | <b>Considerações do capítulo . . . . .</b>                                        | <b>39</b> |
| <b>4</b>   | <b>METODOLOGIA . . . . .</b>                                                      | <b>40</b> |
| <b>4.1</b> | <b>Amostras da empresa de geração e transmissão . . . . .</b>                     | <b>40</b> |
| <b>4.2</b> | <b>Análise da capacidade do <i>dataset</i> . . . . .</b>                          | <b>42</b> |
| <b>4.3</b> | <b>Aplicação dos métodos convencionais . . . . .</b>                              | <b>43</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Aplicação dos métodos inteligentes . . . . .</b>                               | <b>43</b> |
| 4.4.1      | Regressão Logística - LR . . . . .                                                | 43        |
| 4.4.2      | Máquina de Vetores de Suporte - SVM . . . . .                                     | 43        |
| 4.4.3      | Redes Neurais Artificiais - ANN . . . . .                                         | 44        |
| 4.4.4      | k-ésimos vizinhos mais próximos - KNN . . . . .                                   | 45        |
| 4.4.5      | Avaliação dos classificadores inteligentes e convencionais . . . . .              | 46        |
| 4.4.6      | Metodologia de implementação de arquitetura de análise DGA . . . . .              | 47        |
| <b>5</b>   | <b>CONJUNTO DE DADOS - ANÁLISE E PRÉ-PROCESSAMENTO . . . . .</b>                  | <b>48</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Base de dados para análise DGA . . . . .</b>                                   | <b>49</b> |
| 5.1.1      | Base de dados de empresa de geração e transmissão . . . . .                       | 49        |
| 5.1.1.1    | Seleção e classificação de amostras da empresa de geração e transmissão . . . . . | 49        |
| 5.1.2      | Base de dados IEC TC10:1999 . . . . .                                             | 50        |
| 5.1.3      | Outras bases de dados . . . . .                                                   | 50        |
| <b>5.2</b> | <b>Tratamento da base de dados DGA . . . . .</b>                                  | <b>51</b> |
| 5.2.1      | Pré-processamento e análise gráfica da base de dados DGA . . . . .                | 51        |
| 5.2.1.1    | Normalização e logaritmos . . . . .                                               | 51        |
| 5.2.1.2    | Eliminação de <i>outliers</i> da base de dados DGA . . . . .                      | 54        |
| 5.2.1.3    | Análise das amostras de falha elétrica e térmica . . . . .                        | 56        |
| <b>5.3</b> | <b>Análise gráfica das concentrações dos gases . . . . .</b>                      | <b>58</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Considerações do capítulo . . . . .</b>                                        | <b>59</b> |

|            |                                                                    |           |
|------------|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6</b>   | <b>RESULTADOS E PROPOSTA DE ARQUITETURA HÍBRIDA DE DIAGNÓSTICO</b> | <b>61</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Métodos convencionais</b>                                       | <b>61</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Métodos de aprendizado de máquina</b>                           | <b>63</b> |
| 6.2.1      | Rede neural - ANN                                                  | 63        |
| 6.2.2      | SVM                                                                | 63        |
| 6.2.3      | RL                                                                 | 64        |
| 6.2.4      | KNN                                                                | 64        |
| <b>6.3</b> | <b>Resultados dos métodos convencionais e inteligentes</b>         | <b>65</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Proposta de sistema inteligente de diagnóstico - SDI</b>        | <b>66</b> |
| 6.4.1      | Estudo de caso 1 - aplicação SDI                                   | 67        |
| 6.4.2      | Estudo de caso 2 - aplicação SDI                                   | 69        |
| 6.4.3      | Estudo de caso 3 - aplicação SDI                                   | 70        |
| <b>7</b>   | <b>CONCLUSÃO</b>                                                   | <b>72</b> |
|            | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                 | <b>76</b> |
|            | <b>APÊNDICE - BASE DE DADOS</b>                                    | <b>82</b> |
| <b>A</b>   | <b>BASE DE DADOS</b>                                               | <b>82</b> |
| <b>A.1</b> | <b>Dados com Diagnóstico Normal</b>                                | <b>82</b> |
| <b>A.2</b> | <b>Dados com Diagnóstico de Falha</b>                              | <b>98</b> |

# 1 Introdução

A matriz energética, como fonte de desenvolvimento, especialmente o setor elétrico, depende do estado operacional dos equipamentos. Onde a qualidade e confiabilidade é aferida por meio das manutenções regulamentadas no Brasil pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), sobretudo em transformadores de potência.

A ANEEL, por meio da Resolução Normativa N<sup>o</sup> 906, de 8 de dezembro de 2020, revisou as regras que tratam da execução e do monitoramento dos planos de manutenção de instalações da Rede Básica pelas transmissoras. A norma destaca a responsabilidade das concessionárias de transmissão e estabelece requisitos mínimos e periodicidades a serem observados pelas empresas na gestão de manutenção de seus equipamentos (ANEEL, 2020). Em consonância, a Resolução Normativa ANEEL N<sup>o</sup> 729, de 2016, estabelece os incentivos, através de franquias, que permitem a realização dos requisitos mínimos sem descontos nas receitas das transmissoras. Entretanto, desligamentos não programados ou intempestivos, resultam em deduções econômicas conhecidas como Parcelas Variáveis, que em sua essência, são elevadas multas, que em função da complexidade do equipamento e duração do desligamento, podem chegar a milhões de reais (ANEEL, 2016).

Sobre os transformadores de potência, estes possuem franquias trianual de 20 horas (ANEEL, 2016). Possuem elevada importância no setor elétrico, além do valor agregado pois, são fundamentais no sistema de transmissão (BECHARA, 2010). Tal equipamento ao longo de seu ciclo de vida, sofre a depreciação e desgaste com perda de vida contínua inerente a regimes diferentes de operação, submetidos a ciclo de carga, diário, sazonal, fortuito ou característico em seu processo operacional (ENRIQUEZ et al., 2020).

Estes aspectos têm contribuído para investigações relevantes sobre falhas em transformadores, conduzidas pelo grupo de trabalho Cigré A2.37, que apontam para a proeminência de falhas dielétricas, independente do tipo de aplicação (TENBOHLEN; JAGERS; VAHIDI, 2017). Nos transformadores de subestações se destacam as falhas mecânicas que podem evoluir para defeitos elétricos e nos de geração as falhas térmicas. Por esta razão, o aprimoramento das manutenções preventivas e preditivas que resultem na detecção de defeitos em sua fase inicial têm sido desenvolvidos, e tem o objetivo de reduzir as perdas financeiras e aumento de confiabilidade operativa.

Dentre as técnicas de manutenção, como ensaios elétricos, monitoramento de temperatura, termovisão e etc., estar a análise de gases dissolvidos no óleo isolante (DGA - *Dissolved Gas Analysis*) (PUC-RIO, 2009). Sobre este método, é importante salientar que durante a operação dos transformadores o óleo fica submetido a temperaturas e gradientes de tensão que resultam em reações químicas liberando gases, que por sua vez, são dissolvidos total ou parcialmente em todo o volume. O processo de decomposição do óleo é acentuado na presença de falhas, onde ocorre o aumento de temperatura e concentração gasosa, que é aferida por meio da gascromatografia (BENEDET et al., 2008).

Valores expressos na gascromatografia do óleo possuem correlação com defeitos de natureza térmica e elétrica. O mapeamento entre padrões de concentração gasosa e os diferentes tipos falhas resultam em um problema de classificação não-linear com múltiplas classes, que torna o diagnóstico por esta abordagem um problema não trivial (IKESHOJI, 2020). Apesar da dificuldade técnica, o uso desta abordagem pode representar ganhos significativos na identificação de falhas incipientes e/ou diagnóstico de falhas consumadas.

Ao longo dos anos, as técnicas de análise DGA e avaliação da gravidade dos tipos de falhas estão mais compreendidas (IEC-60599, 2015). Entretanto, as relações entre os tipos de falhas e concentrações dos gases é um processo complexo e tem sido objeto de estudo de diversos autores, pesquisadores, especialistas e órgãos normativos. A norma IEEE C57.104:2019 destaca as relações de Rogers, triângulo de Duval, Doernenburg, Gás chave e outras. Tais metodologias convencionais, apesar da baixa assertividade e resultados ambíguos, são amplamente utilizadas por especialistas nas concessionárias (LIMA et al., 2008). Os inúmeros métodos convencionais evidenciam a relevância do problema e a dificuldade em tratá-lo por abordagens analíticas. Nesse ambiente, se observa o aumento de esforços para projetar técnicas no contexto de aprendizado de máquina (AM) e tem sido suporte para desenvolvimento de metodologias de diagnósticos de falhas incipientes com o objetivo de preencher a lacuna gerada pela baixa acurácia dos métodos convencionais. Esta abordagem é comumente conduzida por algoritmos consagrados de classificação baseados em reconhecimentos de padrões nos dados, tais como: KNN (ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2017; SUTTON, 2012; TRAMONTIN; RIVA, 2022). Para a arquitetura do SVM, cita-se: (ALMEIDA, 2010; BACHA; SOUAHLIA; GOSSA, 2012; GOMATHY; SUMATHI, 2013; SINGH et al., 2016; ZHANG et al., 2017). Na Lógica *Fuzzy*: (LI et al., 2018; NITIN; HELONDE, 2005). Para RL, têm-se: (BOŽIĆ et al., 2013; BAYAGA, 2010; GONÇALVES; GOUVÊA; MANTOVANI, 2013; YANG; HU, 2013). Nas redes neurais, cita-se: (HELL, 2002; LUO et al., 2020; ZAKARIA; JOHARI; MUSIRIN, 2012).

Atualmente, diversas pesquisas apresentam variados métodos de diagnóstico de falhas em transformadores baseado em algoritmos *Deep Belief Networks* (DBN) e comparado seu desempenho com abordagem derivado da Máquina de Vetores de Suporte (SVM), Rede Neural de Retropropagação (BPNN), além disso, métodos de razões foram utilizados por Dai et al. (2017). Mais recentemente, Kirkbas et al. (2020) propuseram a utilizar a metodologia de vetor comum (CVA) aplicada ao diagnóstico de falhas em transformadores e compararam a outras arquiteturas inteligentes e metodologias convencionais. Em Ikeshoji (2020), a análise de tendência da variação das concentrações gasosas dissolvidas em óleo ao longo do ciclo de operação do transformador foi explorada com a utilização da combinação dos algoritmos Floresta de Caminhos Ótimos e K Vizinhos mais Próximos.

Neste sentido, a presente pesquisa visa contribuir para a melhoria da análise DGA propondo uma arquitetura híbrida através da observação do desempenho dos classificadores: ANN, KNN, SVM e RL, além dos métodos convencionais triângulo de Duval, Rogers, Gás-chave, Doernenburg e IEC 60599.

## 1.1 Objetivo

O objetivo principal é desenvolver um método de arquitetura híbrida para apoio ao diagnóstico de falhas em transformadores de potência, baseada em métodos inteligentes e convencional, capaz de identificar falhas térmicas e elétricas a partir da análise de gases dissolvidos. Sobre esta abordagem, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Estudo das incertezas inerentes ao processo de análise DGA;
- Estudar os tipos de falha de natureza térmica e elétrica em transformadores;
- Estudo das principais metodologias convencionais normatizadas de análise DGA;
- Estudar as técnicas e metodologias de aprendizado de máquina mais empregadas no diagnóstico de falha em transformadores de potência, sob a ótica da análise de gases dissolvidos;
- Coletar, analisar e disponibilizar os dados reais de amostras gascromatográficas.

## 1.2 Metodologia de pesquisa

A metodologia de pesquisa consistiu na consulta das seguintes bases de dados:

- *Institute of Electrical and Electronic Engineers – IEEE*;
- Portal Periódicos Capes;
- Acervo técnico Eletrobrás Eletronorte;

Na composição dos descritores de pesquisa, foram utilizadas as seguintes combinações de strings:

- *Neural network OR artificial intelligence*;
- *Dissolved gas analysis OR dga OR insulating mineral oil*;
- *Power transformer OR fault diagnosis*;
- (*“Neural network” OR “artificial intelligence”*) AND (*“dissolved gas analysis” OR dga OR “insulating mineral oil”*) AND (*“power transformer” OR “fault diagnosis”*).

Incluiu-se também na pesquisa títulos a partir da tradução para o português de: *Neural Network, Power Transformer, Dissolved Gas Analysis, Insulating Mineral Oil, Machine Learning, Artificial Intelligence, Intelligent Algorithm, Fault Diagnosis*.

## 1.3 Organização do trabalho

O Capítulo 2 trata da análise DGA, onde são apresentadas algumas especificidades sobre transformadores, abordando o conjunto de dielétricos, papel e óleo e os tipos de falhas; é apresentado o contexto histórico da metodologia de análise de gases dissolvidos, bem como, o processo de coletas de amostras, os ensaios gascromatográficos, além das incertezas inerentes ao processo DGA; é realizada uma revisão bibliográfica das metodologias convencionais; e finalmente são apresentadas as metodologias de aprendizado de máquina para análise DGA.

No Capítulo 3 são apresentadas algumas técnicas de aprendizado de máquina com abordagem matemática destes métodos de interpretação e análise DGA; aprendizado supervisionado; e técnicas de pré-processamento de dados.

No capítulo 4 são apresentadas as metodologias: para análise dos dados; na sintonia dos hiperparâmetros dos algoritmos; na aplicação dos métodos convencionais; para avaliação dos métodos inteligentes e convencionais. E por fim, a metodologia de implementação da arquitetura híbrida de análise DGA.

No Capítulo 5 são apresentadas as fontes de extração de dados: base de dados IEC TC10, amostras de literaturas pesquisadas e base de dados de empresa de geração e transmissão de energia elétrica brasileira; análise e tratamento da base de dados: abordando a complexidade, pré-processamento, análise gráfica, normalização, logaritmos e limpeza de *outliers* com aplicação dos algoritmos de apoio: *K-Means*: método do cotovelo; e Análise de Componente Principal (PCA).

No Capítulo 6 são apresentados os resultados de desempenho por meio da matriz de confusão dos algoritmos implementados; desempenho das metodologias convencionais; apresentação da arquitetura híbrida; e estudo de caso.

No capítulo 7 é apresentada a conclusão e as perspectivas de trabalhos futuros.

## 2 CARACTERÍSTICAS DE FALHAS EM TRANSFORMADORES E ANÁLISE DGA

### 2.1 Transformador de potência

A partir do princípio de indução eletromagnética o transformador de potência converte diferentes níveis de tensão elétrica conforme sua aplicação, que vai desde a utilização em sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos, inseridos em redes de distribuição, transmissão e parques de geração, podendo operar como transformador elevador ou abaixador e possuir isolamento seco, a óleo ou mesmo sem isolamento (VENDRAMETO, 2023). A evolução construtiva destes equipamentos teve seu ápice a partir da década de 1890, com a construção do primeiro transformador trifásico isolado e refrigerado a óleo, bem como, o uso do duplo sistema de isolamento – óleo e papel, que propiciaram a construção de equipamentos em níveis de tensão e potência mais elevados (VISHAL; VIKAS, 2011). O contínuo aperfeiçoamento deste conjunto de isolamento têm contribuído para construção de equipamentos duráveis, que obedecidos os limites de carregamento e cumprido os planos de manutenção podem ultrapassar 40 anos de operação (BENEDET et al., 2008).

Dentre os inúmeros tipos de transformadores, são mostradas nas Figuras-1a e 1b, um autotransformador monofásico abaixador de 500/230kV e um transformador trifásico abaixador de 230/69kV respectivamente, que operam no Sistema Elétrico Interligado (SIN) instalados na subestação Tucuruí-PA.

Figura 1 – Exemplos de transformadores de potência



(a) Autotransformador.

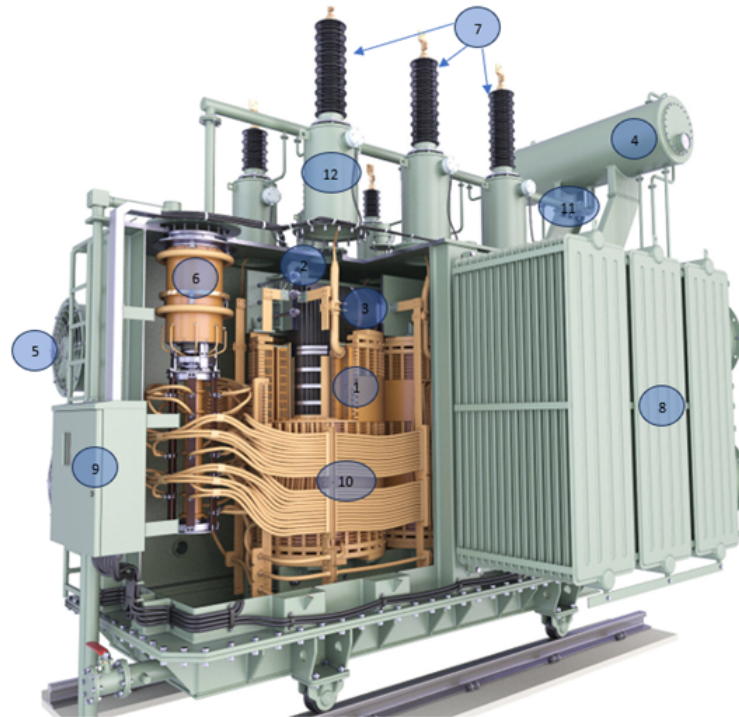


(b) Transformador.

Fonte: Próprio autor

Na Figura-2 são apresentadas as principais estruturas do transformador, constituído basicamente de acessórios externos e de sua parte ativa, composta pelo conglomerado de bobinas, núcleo ferromagnético e comutador de tap, conforme estratificados a seguir:

Figura 2 – Principais partes do transformador de potência



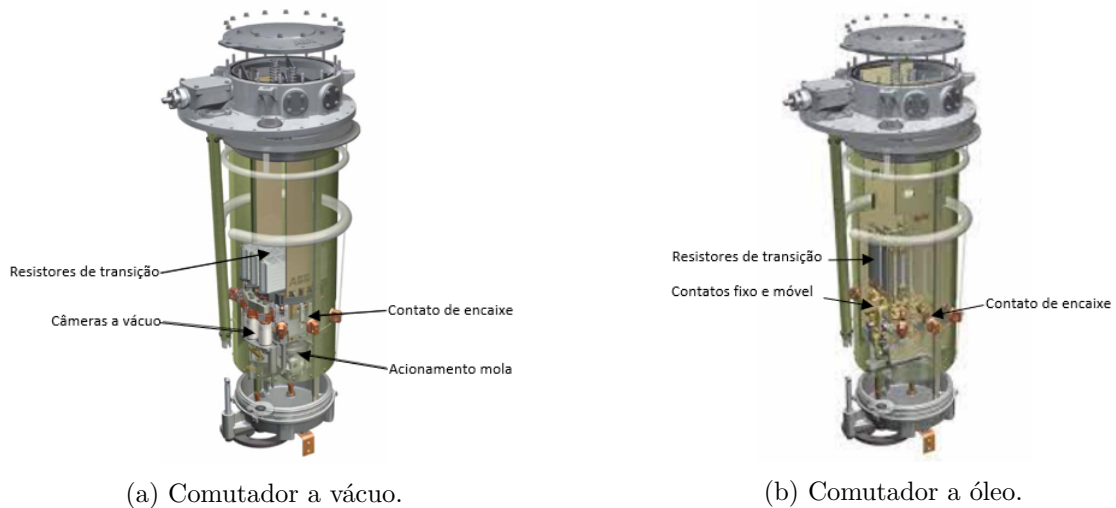
Fonte: Adaptado pelo autor de [Boveri \(2013\)](#)

1. Conjunto de bobinas primárias e secundárias;
2. Cabos de conexões às buchas;
3. Núcleo ferromagnético;
4. Tanque de expansão contendo bolsa de borracha (permite a expansão do óleo sem contato com o meio externo);
5. Moto-ventiladores;
6. Comutador de tap (pode ser fixo ou dinâmico);
7. Buchas primárias;
8. Trocadores de calor;
9. Painel de controle;
10. Conexões das bobinas ao comutador;
11. Relé Bolsholz (relé de gás);
12. Compartimento dos transformadores de corrente interno ao transformador.

Os comutadores de *tap*, apresentado na Figura-4, também denominado OLTC (*On-load tap changer*), possuem a função de alterar a relação de espiras e consequentemente o nível de tensão com o transformador energizado e sob carga (PAULA et al., 2021), ou seja, alternar de uma posição de derivação (tap) para outra sem interromper o fluxo de corrente para a carga e sem criar um curto-circuito entre derivações do enrolamento do transformador. Sendo um dos recursos mais eficazes para controle de tensão em sistemas elétricos, cuja atuação simultânea e coordenada dos transformadores com OLTCs permitem aumentar a confiabilidade nos sistemas de transmissão (PAULA et al., 2021). Nas comutações os OLTCs contam com diversos mecanismos de transição entre taps, dentre os quais citam-se: chaves com resistores, reatores de transição, chaves desviadoras e interruptores a vácuo. Normalmente são instalados em tanque individual, cujo volume de óleo não possui contato com o óleo do transformador. Os comutadores dinâmicos, apresentado nas Figuras-3a e 3b, possuem dois tipos de sistema de extinção de arco durante as comutações (DAMIÃO et al., 2021):

- Extinção de arco em de câmaras de vácuo (comutadores a vácuo – não geram gases durante as comutações).
- Extinção de arco por meio de óleo isolante (comutadores a óleo – geram gases durante as comutações);

Figura 3 – Comutador sob carga

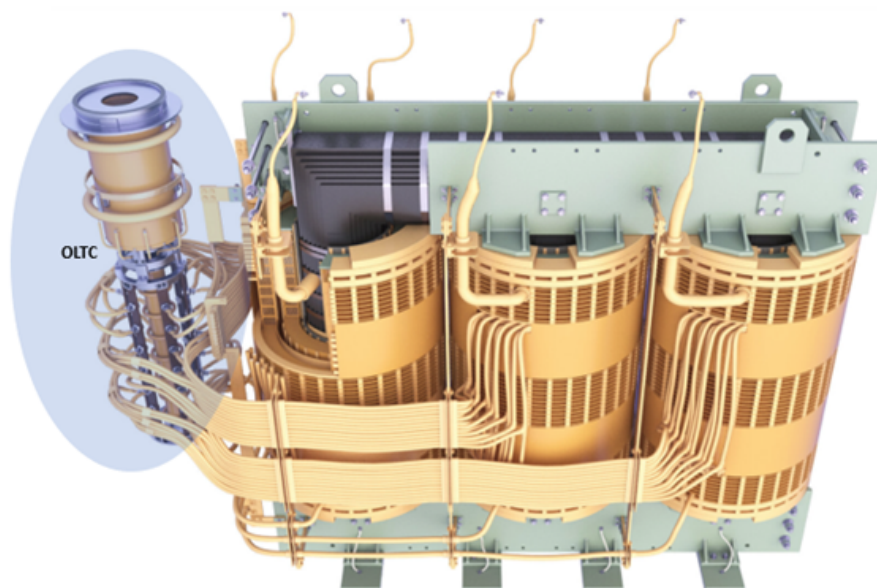


Fonte: Adaptado pelo autor de Boveri (2013)

### 2.1.1 Conjunto de isolamento do transformador

O conjunto de isolamento óleo e papel são responsáveis pelo tripé de vida útil do transformador, atuando na refrigeração, resistência mecânica, além de suportar o campo elétrico resultante da diferença de potencial, minimizando o fluxo de corrente entre condutores.

Figura 4 – Localização do comutador de tap - OLTC



Fonte: Adaptado pelo autor de [Boveri \(2013\)](#)

Enquanto o primeiro permite recuperação e/ou substituição, o segundo, ao apresentar degradação extrema, decreta o fim da vida útil ([ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005](#)).

O papel utilizado na fabricação dos transformadores, envolve seus condutores proporcionando isolamento dielétrico e proteção mecânica. Apesar do desenvolvimento de outros isolantes sólidos, os polímeros sintéticos, como o material Nomex de Dupont, um composto de meta-aramida também estão disponíveis no mercado. Contudo, o papel *Kraft* por seu baixo custo e fácil aquisição têm sido o mais utilizado ([IKESHOJI, 2020](#)). A partir do processo de termo estabilidade estes papéis possuem sua estrutura química modificada aumentando resistência ao processo de oxidação e degradação térmica e consequentemente a vida útil do transformador ([ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005](#)).

### 2.1.2 Papel isolante

O papel isolante formado principalmente por celulose, cujo polímero, possui em sua cadeia química uma sequência de anéis de glicose. Para o papel *Kraft*, o número de anéis de glicose é da ordem de 1000 a 1300 unidades, medidos pelo método viscosimétrico ([SÁ; NEPOMUCENO, 1997](#)), identificando o grau de polimerização (*Degree of Polymerization-DP*). Equipamentos com DP abaixo de 200 indicam fim de vida útil ([MILDEMBERGER et al., 2013](#)). Apesar da alta confiabilidade, este ensaio requer a parada e abertura do transformador para coleta de amostras do papel. Neste contexto, a manutenção preditiva, por meio da análise de características do óleo mineral, que produz, entre outras substâncias, compostos furânicos, em especial o furfuraldeído (2-FAL), pode inferir a degradação do papel isolante ([PORTELLA et al., 2011](#)).

### 2.1.3 Óleo mineral isolante

Fluídos isolantes como o óleo mineral devem possuir a capacidade de isolamento e refrigeração de equipamentos elétricos. A sua composição, a partir do refino do petróleo gerando uma mistura de hidrocarbonetos, possui elevado número de componentes em diferentes quantidades ([LE MOS, 2015](#)). Em função desta particularidade, a caracterização do óleo mineral para utilização como isolante não é feita pela sua composição, mas por parâmetros físico-químicos que são afetados por estas misturas ([ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005](#)). A norma brasileira ABNT 10576:2017, apresenta as diretrizes para supervisão e manutenção do óleo mineral isolante relacionando os limites das características físico-químicas, além dos principais ensaios de análise, a saber: teor de água, densidade, fator de perdas dielétricas, rigidez dielétrica, tensão interfacial, análise de gases dissolvidos e outros.

### 2.1.4 Degradação do óleo isolante

A degradação do conjunto de isolamento, papel e óleo, ao longo do ciclo operativo do transformador, sofre a depreciação e desgaste com perda de vida contínua inerente a regimes diferentes de operação, submetidos a ciclo de carga, diário, sazonal, fortuito ou característico em seu processo operacional, tais peculiaridades dão início ao processo de formação de pequenos defeitos até o surgimento de falhas ([ENRIQUEZ et al., 2020](#)).

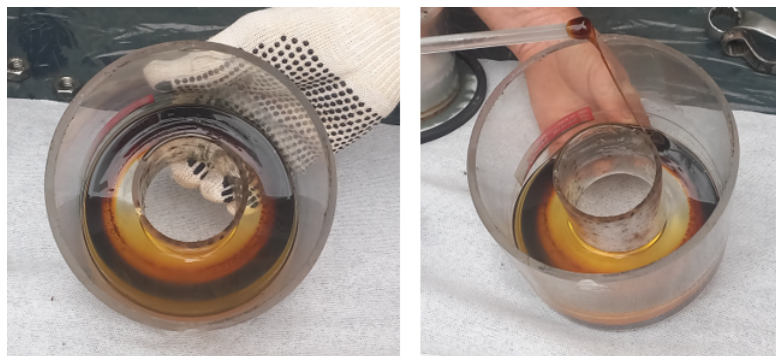
No papel, as ligações glicosídicas são termicamente menos estáveis do que as ligações de hidrocarbonetos em óleo e que se decompõem em temperaturas mais baixas. Taxas significativas de cisão da cadeia polimérica ocorrem em temperaturas superiores a 105°C, com decomposição completa e carbonização acima de 300°C (ocorrência de falha). O monóxido e o dióxido de carbono, assim como a água, são formados e sua presença está associada ao aumento de temperatura, mas também com o teor de oxigênio do óleo e teor de umidade do papel. Embora os gases CO e CO<sub>2</sub> sejam importantes na análise de falhas, a presença de outros gases é imprescindível para análise conclusiva ([IEC-60599, 2015](#)).

No óleo, os principais fatores que contribuem para a degradação são a presença de oxigênio, temperaturas elevadas além do envelhecimento natural ao longo dos anos do transformador em operação, que favorecem o surgimento de fenômenos, tais como reações de oxidação, reações de polimerização, condensação, rupturas de cadeias ([ZIRBES; ROLIM; ZÜRN, 2005](#)).

De acordo com norma ABNT 7274:2012, como resultado da reação catalítica dos metais presentes no transformador, especialmente o cobre, são gerados os radicais livres, que são hidrocarbonetos que perderam um átomo de hidrogênio nesta reação. Em seguida são formados os hidroperóxidos que podem liberar oxigênio e posteriormente surgem os ácidos e outros produtos polares quimicamente ativos, a partir deste ponto desencadeiam os fenômenos de degradação críticos: aumento da tensão interfacial, aumento do fator de dissipação, aumento da capacidade de dissolução da água e posterior redução da rigidez dielétrica. Em sequência ocorre a formação de cera, resultado da polimerização dos pro-

duto do envelhecimento. Estas substâncias resinosas (cera), apresentada na Figura-5, atuam como isolante térmico, podem se depositar nos materiais condutores ou causar a obstrução dos canais de circulação de óleo, dificultando a troca de calor, provocando mais aquecimento e por consequência o surgimento de falhas incipientes. Em decorrência do aumento de temperatura, provocando a quebra da cadeia de hidrocarbonetos, ocorre a produção dos gases combustíveis  $H_2$  (hidrogênio),  $CH_4$  (metano),  $C_2H_2$  (acetileno),  $C_2H_4$  (etileno) e  $C_2H_6$  (etano).

Figura 5 – Formação de cera em recipiente com óleo oxidado



Fonte: Próprio autor

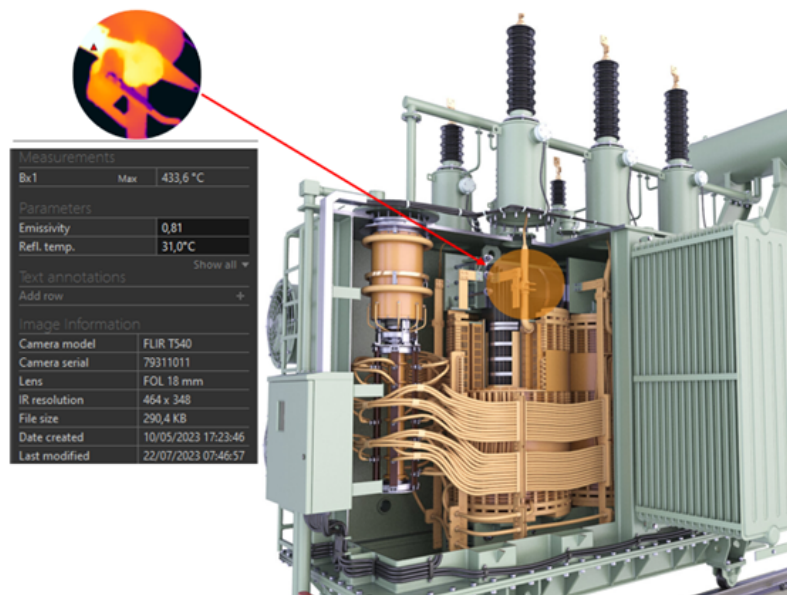
A partir da produção de gases combustíveis, tidos como gases de falha, em concentrações acima dos limites considerados normais, têm-se a formação de falhas incipientes, que é dependente da composição de hidrocarbonetos individuais, da intensidade de energia, temperatura na vizinhança da falha e duração do tempo do evento ([IEEE-C57.104, 2019](#)).

### 2.1.5 Tipos de falha

O processo de surgimento de falhas, na maioria dos casos, está relacionado com o desempenho do óleo mineral, especificamente suas características físico-químicas ([LEMONS, 2015](#)). Assim a ocorrência de sobreaquecimento varia em função do grau de criticidade do evento. Da mesma forma, as descargas parciais (falha em materiais isolantes) podem provocar a ruptura da rigidez dielétrica do óleo que pode ser associada com as altas temperaturas de formação de arco elétrico de acordo a sua intensidade. Desta forma, são estabelecidos gradientes de temperatura para os quais existem a inferência de ocorrer determinado processo de falha, seja de origem elétrica ou térmica. Uma vez estabelecida a correlação entre a temperatura, o processo de falha e sua intensidade, é possível estimar a natureza e faixas de temperatura esperadas em falhas específicas ([MORAIS et al., 2004](#)).

Na análise DGA as concentrações dos gases dissolvidos estão fortemente ligadas ao tipo de falha, que por sua vez, possui correlação com a temperatura, entretanto, casos de falhas incipientes que evoluem para outro tipo de falha costumam serem frequentes, pois, a dissipação de energia no ponto de defeito pode aumentar com tempo ([IEC-60599, 2015](#)). Na Figura-6, é mostrada uma conexão (frouxa) que apresenta ponto quente da ordem de  $400^{\circ}C$ , este equipamento permanecendo em operação, conforme conhecimento empírico,

Figura 6 – Ilustração de defeito de múltiplas classes



Fonte: Adaptado pelo autor de [Boveri \(2013\)](#)

afeta as características de condutibilidade do material, promovendo aumento não-linear da temperatura, podendo incorrer na ruptura da conexão gerando arco elétrico. Neste exemplo, se observa dois tipos de falha de classes diferentes, inicialmente um problema térmico, que originará uma falha elétrica. Percebe-se que dependendo do momento da coleta da amostra, a análise DGA estaria no limiar entre falha térmica e elétrica.

Ao defeito térmico a norma IEEE C57.104:2019, associa ao efeito de perdas nos condutores, além de falha em componentes internos, devido a conexões frouxas, mau contato entre elementos móveis (comutadores de tap) e outros. Enquanto as descargas parciais de baixa e alta intensidade, estão associadas aos defeitos elétricos. As normas IEC 60599:2015, ABNT 7274:2012 e IEEE C57.104:2019, conceituam os seguintes tipos de defeitos:

- Descarga parcial (tipo DP): a ionização, provocada pelo campo elétrico, de uma determinada região do dielétrico pode ficar submetida a tensões não uniformes maiores que sua capacidade de rigidez dielétrica provocando as descargas parciais. Uma descarga elétrica que faz a ligação apenas parcialmente entre os condutores através da isolamento (sólida ou líquida) e pode ocorrer adjacente ao condutor;
- Descarga disruptiva: quando um meio isolante é submetido a um gradiente de tensão maior que sua capacidade de rigidez dielétrica acontece a ruptura ou curto-circuito do dielétrico. Pode ser caracterizada de alta ou baixa intensidade dependendo da quantidade de energia que promove a falha do dielétrico;
- Descarga elétrica de baixa energia (tipo D1): surgem a partir de conexões ruins, pontos frouxos entre terminais de potenciais diferentes e outros fatores que envolvem o projeto e esforços operacionais (térmicos e elétricos). Podem ocorrer tanto em

meio isolante líquido ou sólido, em consequência produzem perfurações carbonizadas através de papel, carbonização da superfície do papel denominados rastreamento;

- Descarga elétrica de alta energia (tipo D2): provocadas por arco elétrico oriundos de curto-circuito entre condutores que desenvolve alta intensidade de energia em óleo mineral e/ou papel isolante, evidenciado por extensa destruição e carbonização do papel, fusão metálica e, em alguns casos, falha do equipamento;
- Falha térmica  $T < 300^{\circ}\text{C}$  (tipo T2): normalmente os transformadores operam com temperatura neste patamar quando em solicitações de carga repentina, bloqueio do fluxo de óleo entre os enrolamentos. Temperatura abaixo de  $300^{\circ}\text{C}$  deixam o papel com tonalidade escurecida;
- Falha térmica  $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$ : podem se originar em conexões que apresentam ponto quente, tais como cabos de aterramento frouxos, conexões dos enrolamentos, grampos, núcleo e outras parte do transformador.
- Falhas térmicas  $T > 700^{\circ}\text{C}$  (tipo T3): se houver fortes evidências de carbonização do óleo, coloração do metal ( $T > 800^{\circ}\text{C}$ ) ou fusão do metal ( $T > 1000^{\circ}\text{C}$ ).

Quanto a origem dos tipos de falha, estas estão associadas a diversos fatores e componentes internos do transformador. E além do envelhecimento normal do óleo, outros processos aceleram sua degradação e são ignitores na formação de falhas e, apresentam como produto a geração de gases combustíveis (IKESHOJI, 2020).

A partir de um defeito interno ou condição operativa adversa, seja sobrecarga, curto-circuito e sobre tensões, podem resultar em solicitações acima das condições de projeto do transformador, resultando na dissipação de energia no sistema de isolamento provocando esforço mecânico em seus enrolamentos e outras estruturas. Tais processos ocorrem continuamente ao longo de toda a vida útil do transformador e geram gases que se dissolvem no líquido isolante (NACARATO et al., 2018).

Neste contexto, a análise da gascromatografia do óleo isolante, se apresenta como excelente técnica de predição de defeitos incipientes em transformadores de potência.

## 2.2 Análise de gases dissolvidos - DGA

A análise DGA é utilizada desde 1960 no diagnóstico do estado operacional dos transformadores de potência e durante esse tempo tem se mostrado eficiente, pois permite o diagnóstico de falhas incipientes sem a necessidade de intervenções invasivas no transformador (ARANTES et al., 2005).

A análise DGA como técnica preditiva de manutenção em transformadores tem por objetivo nortear as tomadas de decisões quando da identificação de falhas incipientes (IKESHOJI, 2020). Seja para realização de ensaios complementares ou programação de parada do equipamento. Nesse contexto, a identificação, medição e interpretação das

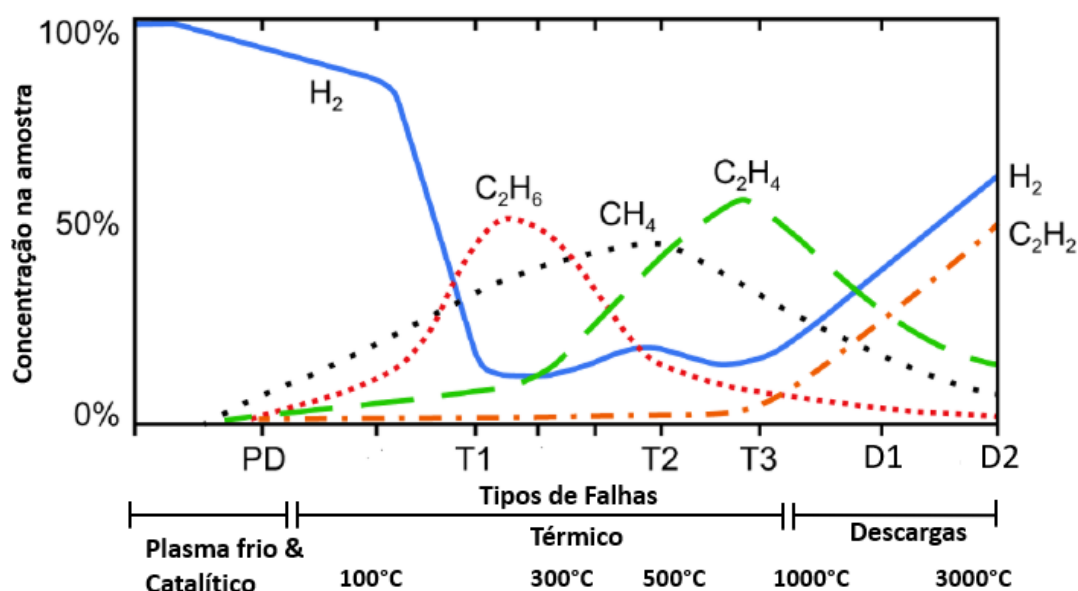
concentrações dos gases dissolvidos no óleo é fundamental para diagnóstico de falhas. O ensaio de gascromatografia é o responsável pela identificação e quantificação das concentrações desses gases. Os principais são: hidrogênio ( $H_2$ ), metano ( $CH_4$ ), etano ( $C_2H_6$ ), etileno ( $C_2H_4$ ), acetileno ( $C_2H_2$ ), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). Oxigênio ( $O_2$ ) e nitrogênio ( $N_2$ ) também são medidos, e usados na interpretação, embora não sejam subprodutos da falha (IEEE-C57.104, 2019).

Sabe-se que transformadores ao longo de sua vida útil, em condições normais de operação, geram pouco ou nenhum gás de falha (CARDOSO et al., 2005). Contudo, devido ao envelhecimento do isolamento celulósico e do óleo em circunstâncias normais, alguns gases, principalmente dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrogênio, são gerados muito lentamente (BENEDET et al., 2008). Por esta razão, a interpretação dos gases dissolvidos em líquido isolante requer conhecimento do processo operacional dos transformadores, bem como, seu histórico DGA (BECHARA, 2010).

Concentrações significativas de gases de hidrogênio e hidrocarbonetos podem ser geradas dentro do óleo mineral em temperaturas normais de serviço, carga nominal ou de interação de material (como apassivadores de metal), mesmo se nenhuma falha esteja presente, este fenômeno é conhecido como “dispersão de gases”(IEEE-C57.104, 2019).

Sobre as análises das concentrações de gases dissolvidos em função da temperatura a norma ABNT 7274:2012 corrobora com o gráfico da Figura-7, extraído da norma IEEE C57.104:2019 e relaciona a temperatura e concentração gasosa ao tipo de falha:

Figura 7 – Concentrações de gases em função do tipo de falha e temperatura



Fonte: Adaptado pelo autor da IEEE C57.104:2019

- Falhas de baixa energia, como as descargas parciais de tipo plasma frio, favorecem a criação de hidrogênio como a principal recombinação gasosa;

- Acetileno requer faixas de 800°C a 1200°C e um rápido decréscimo a temperaturas mais baixas;
- Acetileno ( $C_2H_2$ ) é formado em quantidades significativas, principalmente na ocorrência de arco elétrico, quando um canal condutivo ionizado está a milhares de graus Celsius e a interface com o óleo ao redor necessariamente abaixo de 400°C (na qual o óleo vaporiza completamente), com uma camada de vapor de óleo/gases de decomposição entre elas;
- Não é incomum encontrar níveis elevados de hidrogênio ( $H_2$ ), ou etileno ( $C_2H_4$ ), quando acetileno ( $C_2H_2$ ) é detectado;
- O óleo pode se oxidar com a formação de pequenas quantidades de CO e  $CO_2$ , que só atingem valores significativos se acumulados por grandes períodos;
- Na decomposição térmica do óleo mineral tem-se a predominância do etileno ( $C_2H_4$ ), na decomposição da celulose, têm-se o monóxido de carbono (CO);
- Na descarga de baixa energia o hidrogênio ( $H_2$ ) é o gás predominante e pode ser produzido pela reação do aço com água enquanto o oxigênio está disponível no óleo;
- O etileno ( $C_2H_4$ ) se apresenta como forte marcador de altas temperaturas no óleo,  $T > 700^\circ C$ .

Onde:

- $R$  – Reações catalíticas entre aço galvanizado e água;
- $PD$  – Descargas parciais;
- $S$  – Gases parasitas para temperatura  $T < 200^\circ C$ ;
- $T1$  – Falha térmica em temperatura  $T < 300^\circ C$ ;
- $O$  – Superaquecimento do papel ou óleo;
- $C$  – Possível carbonização do papel;
- $T2$  – Falha térmica em temperatura entre  $300^\circ C < T < 700^\circ C$ ;
- $T3$  – Falha térmica em temperatura  $T > 700^\circ C$ ;
- $D1$  – Descarga de baixa energia;
- $D2$  – Descarga de alta energia.

De acordo com [Ikeshoji \(2020\)](#), a Tabela-1 apresenta a relevância dos gases em relação aos tipos de falhas.

Tabela 1 – Relevância dos gases nos tipos de falhas.

| Causas da geração de gases |          |                           | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | CO | CO <sub>2</sub> |
|----------------------------|----------|---------------------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----|-----------------|
| Falha Elétrica             | Óleo     | DP Corona                 | 1              | 2               |                               |                               |                               |    |                 |
|                            |          | Arco+faísca (DP)          | 1              |                 |                               | 2                             | 1                             |    |                 |
|                            | Celulose |                           |                |                 |                               |                               |                               |    | 2               |
| Falha Térmica              | Óleo     | Temp. Baixa               | 2              | 1               | 1                             |                               |                               |    |                 |
|                            |          | Temp. Média/Alta          | 2              | 2               |                               | 1                             |                               |    |                 |
|                            |          | $T > 700^{\circ}\text{C}$ | 2              |                 |                               | 1                             | 2                             |    |                 |
|                            | Celulose |                           |                |                 |                               |                               |                               | 1  | 2               |
| Envelhecimento             | Óleo     |                           | 2              |                 | 1                             |                               |                               |    |                 |
|                            | Celulose |                           |                |                 |                               |                               |                               | 2  | 1               |

DP - Descarga Parcial, 1 - Alta relevância e 2 - Média relevância.

Fonte: Adaptado pelo autor de [Ikeshoji \(2020\)](#)

Entretanto, a análise a partir de uma única amostra, não é tarefa fácil, pois o comportamento não linear das concentrações gasosas, relacionadas a diversos tipos de falhas envolvendo sobre temperatura, defeitos elétricos, reações químicas e muitas vezes resultante de mais um tipo de falha contribuem para aumentar a complexidade de análise ([IKESHOJI, 2020](#)). Neste contexto, diversas técnicas de análise DGA foram desenvolvidas, algumas delas reconhecidas pelas normas IEEE C57.104:2019 e IEC 60599:2015, e serão abordadas neste capítulo.

## 2.2.1 Metodologias convencionais

De acordo com a norma IEC 60599:2015, o desenvolvimento das metodologias convencionais só foi possível devido ao esforço de inúmeros especialistas, que dispendo das análises gascromatográfica de transformadores em modo de falha, realizaram inspeções internas em milhares de equipamento ao longo dos anos associando o tipo de falha a intensidade das concentrações dos gases. Dentre as quais destacam-se as seguintes metodologias normatizadas:

### 2.2.1.1 Triângulo de Duval

A técnica gráfica do triângulo de Duval emprega os percentuais relativos de três tipos de gases na identificação de falhas elétricas e térmicas, cuja metodologia foi elaborada a partir de uma base de dados de equipamentos com falha, onde os limites do triângulo equilátero são os limites de determinadas falhas, baseada nos dados utilizados para desenvolvimento do método ([DUVAL, 2002](#)), deste modo, é importante salientar que o Triângulo de Duval deve ser utilizado como um método complementar, após identificada uma falha.

Duval implementou cinco Triângulos para análise de dois tipos de óleos ([IEEE-C57.104, 2019](#)). Os Triângulos 1, 2 e 3 empregam os gases metano ( $\text{CH}_4$ ), acetileno ( $\text{C}_2\text{H}_2$ ) e etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ). O Triângulo 1 é utilizado em óleo mineral, é o mais utilizado por se aplicar a transformadores com tanque do OLTC separado do tanque principal. No Triângulo 2, o OLTC possui comunicação com o tanque principal e, em 3 para óleo não mineral.

O Triângulo 4, utiliza os gases hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e o etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), enquanto o Triângulo 5, os gases metano ( $\text{CH}_4$ ), etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) e o etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) atuam de forma complementar ao Triângulo 1 nas falhas térmicas.

No método do Triângulo Duval 1, cada lado representa as porcentagens relativas dos gases em função do aumento de energia e temperatura de falha, conforme demonstrado nas Equações 2.1, 2.2 e 2.3. No Triângulo 1, Duval relaciona o metano a falhas de baixa energia/temperatura, o etileno para alta temperatura e acetileno para falhas de temperatura/energia/arco muito altas.

$$\%CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} 100\% \quad (2.1)$$

$$\%C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} 100\% \quad (2.2)$$

$$\%C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2} 100\% \quad (2.3)$$

Graficamente o triângulo possui regiões que representam os tipos de falhas: descarga parcial (PD), falha elétrica (D1 e D2 - baixa e alta intensidade), falha térmica (T1, T2 e T3) e uma região de falha mista (térmica e elétrica - DT). A partir das concentrações percentuais dos valores relativos dos gases, são traçadas retas obedecendo as inclinações apontadas no triângulo, cujo ponto de interseção correspondem ao tipo de falha.

Serão utilizadas duas amostras DGA contidas na Tabela-2 extraídas da base de dados IEC TC10:1999 ([DUVAL; DEPABLA, 2001](#)) para aplicação prática.

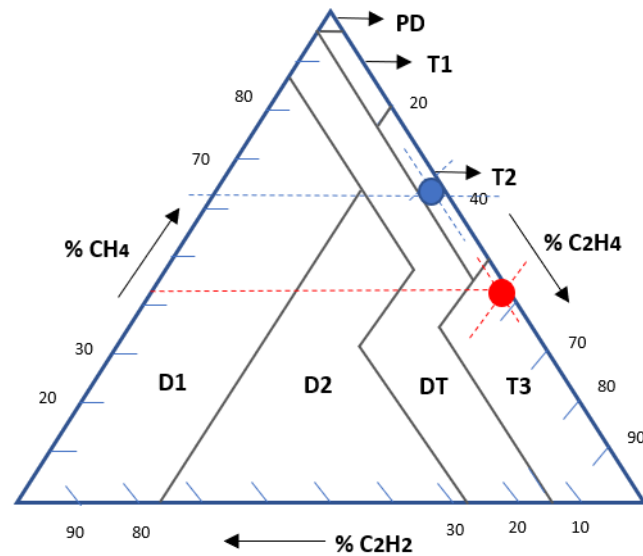
Tabela 2 – Concentração dos gases em ppm - amostras da base de dados IEC TC10.

| Amostra    | $\text{H}_2$ | $\text{CH}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_4$ | $\text{C}_2\text{H}_6$ | $\text{C}_2\text{H}_2$ | CO  |
|------------|--------------|---------------|------------------------|------------------------|------------------------|-----|
| Normal ●   | 95           | 280           | 150                    | 250                    | 10                     | 700 |
| Falha T3 ● | 2500         | 10500         | 13500                  | 4790                   | 6                      | 530 |

Fonte: Próprio autor

Se observa que, mesmo a amostra ser de um equipamento normal, a metodologia não possui região no triângulo para este diagnóstico, neste caso, torna-se imprescindível o conhecimento prévio do especialista sobre os parâmetros de normalidade de concentrações de gases dissolvidos. Enquanto a amostra de falha T3 foi identificada corretamente.

Figura 8 – Triângulo de Duval 1



Fonte: Adaptado pelo autor de IEEE C57.104:2019

### 2.2.1.2 Relação de Rogers

O método de Rogers faz uso de relações e da correlação destas proporções para diagnósticos. No método original, se utilizam quatro relações de gases, contudo a norma IEEE C57.104:2019 com o objetivo de simplificar e aprimorar seu uso recomendou a utilização de apenas três relações, eliminando a relação  $C_2H_6/CH_4$  que inferia a deterioração por temperatura.

Anteriormente este método diagnosticava até doze tipos de falhas, após adaptação, passou a inferir cinco diagnósticos, além da condição normal, conforme Tabela-3.

Uma desvantagem dos métodos de Rogers, Doernenburg e IEC 60599, é que algumas amostras gascromatográficas podem resultar em valores fora das faixas, e como resultado, têm-se um diagnóstico indeterminado (CARRAPATO, 2016). Nas amostras da Tabela-2, o método de Rogers aponta ambos os diagnósticos para falha térmica inferior a 700°C.

Tabela 3 – Relações de Rogers.

|   | $R_1 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $R_2 = \frac{CH_4}{H_2}$ | $R_3 = \frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ | Diagnóstico                        |
|---|-------------------------------|--------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 0 | <0.1                          | 0.1 a 1.0                | <0.1                          | Normal                             |
| 1 | <0.1                          | <0.1                     | <0.1                          | Descarga de baixa energia - *DP    |
| 2 | 0.1 a 3.0                     | 0.1 a 1.0                | >3.0                          | Descarga de alta energia - Arco    |
| 3 | <0.1                          | 0.1 a 1.0                | 0.1 a 3.0                     | Falta térmica de baixa temperatura |
| 4 | <0.1                          | >1.0                     | 0.1 a 3.0                     | Falta térmica $T < 700^\circ C$    |
| 5 | <0.1                          | >1.0                     | >3.0                          | Falta térmica $T > 700^\circ C$    |

\*Existe a tendência de R1 e R3 aumentarem acima de 3 com o desenvolvimento da intensidade da descarga parcial.

Fonte: Adaptado pelo autor de Ikeshoji (2020)

### 2.2.1.3 Gás chave

O método envolve em sua análise quatro tipos de gases primários e outros ditos secundários descritos na Tabela-4. De modo que, o gás principal formado na amostra seja um dos quatro da coluna 1, juntamente com os gases secundários na coluna 3, o tipo de falha é fornecido na coluna 2.

Tabela 4 – Método Gás chave.

| Gás chave      | Tipo de falha        | *Percentuais dos gases         |
|----------------|----------------------|--------------------------------|
| Etileno        | Térmica - óleo       | $C_2H_4$ - 63%, $C_2H_6$ - 20% |
| Hidrogênio     | Baixa energia        | $H_2$ - 85%, $CH_4$ - 13%      |
| Acetileno      | Alta energia         | $H_2$ - 60%, $C_2H_2$ - 30%    |
| Monox. Carbono | Térmico - papel-óleo | Aproximado 90% de CO           |

\*Percentuais dos gases utilizados para classificação de falhas.

Fonte: Adaptado pelo autor de IEEE C57.104:2019

O Gás chave tende a apresentar baixa acurácia quando aplicado de forma automática, por meio de programação (IEEE-C57.104, 2019). Contudo, sua utilização por especialistas apresenta bons resultados de diagnóstico. Nas análises dos dados da Tabela-2 se mostrou bastante conclusivo, inferindo corretamente o diagnóstico das amostras.

### 2.2.1.4 Doernenburg

Neste método é possível identificar três tipos de falhas: descarga parcial, arco elétrico e falha térmica. O método faz uso de quatro relações e possui as mesmas limitações do método das relações de Rogers e é o menos utilizado hoje (IEEE-C57.104, 2019).

O método faz uso de três pré-condições para em seguida submeter as amostras a análise. Na primeira, que no mínimo um dos gases  $H_2$  (hidrogênio),  $CH_4$  (metano),  $C_2H_4$  (etileno),  $C_2H_6$  (etano),  $C_2H_2$  (acetileno) e CO (monóxido de carbono) tenham o dobro do valor da concentração limite dos gases especificados pela norma IEEE C57.104:2019, apresentados na Tabela-5.

Tabela 5 – Valores de concentrações limite dos gases.

| Gases               | $H_2$ | $CH_4$ | $C_2H_4$ | $C_2H_6$ | $C_2H_2$ | CO  |
|---------------------|-------|--------|----------|----------|----------|-----|
| Concentrações (ppm) | 100   | 120    | 50       | 65       | 1        | 350 |

Fonte: Adaptado pelo autor de IEEE C57.104:2019

A segunda pré-condição é que apenas  $C_2H_6$  ou CO exceda o seu valor de concentração limite, mostrado na Tabela-5. Atendida apenas uma ou nenhuma das condições anteriores o transformador é dito como normal. Na terceira e última pré-condição é que ao menos um dos gases de cada relação exceda a concentração limite. Caso contrário, recomenda-se a análise de uma nova amostra ou usar outros meios de investigação complementares. Atendidas as três pré-condições, calcula-se as razões e aplica aos limites apresentados na Tabela-6. Na análise das amostras da Tabela-2, o método obteve falha térmica em ambas as amostras.

Tabela 6 – Metodologia de Doernenburg.

| $R_1 = \frac{CH_4}{H_2}$ | $R_2 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $R_3 = \frac{C_2H_2}{CH_4}$ | $R_4 = \frac{C_2H_6}{C_2H_2}$ | Diagnóstico de falha      |
|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| >1.0                     | <0.75                         | <0.3                        | >0.4                          | Decomposição térmica      |
| <0.1                     | NS                            | <0.3                        | >0.4                          | Descarga de baixa energia |
| >0.1 a <1.0              | >0.75                         | >0.3                        | <0.4                          | Descarga de alta energia  |

Fonte: Adaptado pelo autor de [Ikeshoji \(2020\)](#)

### 2.2.1.5 IEC 60599

O método da IEC 60599:2015 faz uso das mesmas relações do método de Rogers e da ABNT 7274:2012, contudo, apresentam diferenças em alguns valores limites das faixas de análise e diagnóstico, conforme Tabela-7. Algumas recomendações para o cálculo das razões devem ser seguidas:

- Calcular quando pelo menos um dos gases está com concentração e a taxa de crescimento acima dos valores típicos definidos pelo especialista (como por exemplo, valor abaixo de 90% da concentração normal e taxa de crescimento de 10% ao mês);
- Mesmo que os valores analisados estejam abaixo dos valores típicos normais, porém, com concentrações crescentes e anormais, recomenda-se aplicar o cálculo;
- Evitar calcular as razões quando os valores não forem suficientemente representativos ([IEC-60567, 2005](#)).

Tabela 7 – Método IEC 60599.

|    | $\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$ | $\frac{CH_4}{H_2}$ | $\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$ | Diagnóstico      |
|----|-------------------------|--------------------|-------------------------|------------------|
| DP | NS                      | < 0.1              | < 0.2                   | Descarga parcial |
| D1 | > 1.0                   | 0.1 a 0.5          | > 1.0                   | Baixa energia    |
| D2 | 0.6 a 2.5               | 0.1 a 1.0          | > 2.0                   | Alta energia     |
| T1 | NS                      | > 1.0              | < 1,0, mas NS           | Térmica T<300°C  |
| T2 | < 0.1                   | > 1.0              | 1 a 4                   | Térmica T<700°C  |
| T3 | < 0.2                   | > 1.0              | > 4.0                   | Térmica T>700°C  |

NS - Não significativa ou pode ser qualquer valor.

Fonte: Adaptado pelo autor de IEC 60599:2015

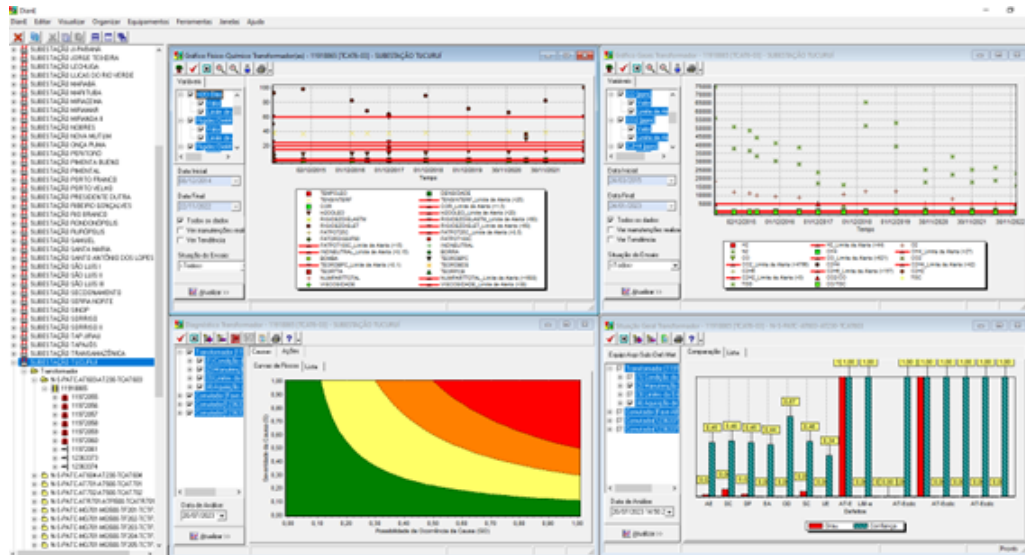
O método da IEC 60599:2015 por não apresentar a condição normal, foi realizado verificação apenas da amostra de falha T3. Esta apresentou falha térmica na ordem de  $300 < T < 700^\circ\text{C}$ .

### 2.2.1.6 Sistema de diagnóstico de equipamentos - DianE

Criado pelo Cepel (Centro de Pesquisas de energia Elétrica) em parceria com a Eletronorte, o sistema DianE foi concebido em 2000 e implantado em duas subestações da Eletronorte como projeto piloto. Dado ao sucesso, iniciou-se o desenvolvimento de um programa para atender a toda as subestações da Eletronorte e futuramente ao Sistema

Eletrobrás. No contexto da análise DGA, o sistema DianE faz uso das metodologias normatizadas apresentadas anteriormente, além de outros métodos convencionais e sobretudo a análise de tendência do aumento das concentrações gasosas, observando o histórico dos equipamentos individualmente, conforme recomenda a IEC 60599:2015. A Figura-9 apresenta algumas interfaces gráficas do sistema DianE.

Figura 9 – Sistema DianE



Fonte: Próprio autor

## 2.2.2 Metodologias de inteligência artificial

A análise DGA teve nos diferentes métodos convencionais sua eficiência comprovada, contudo, a dificuldade na extração de padrões para o problema não-linear é refletida em seus resultados, cujos diagnósticos indeterminados e de baixa assertividade são recorrentes (IKESHOJI, 2020). Por esta razão, o estudo de variadas arquiteturas de aprendizado de máquina (AM), associadas a métodos probabilísticos, estatísticos entre outros, estão cada vez mais proeminentes neste segmento (RUFINO et al., 2011). Neste contexto, a presente pesquisa destaca: Regressão Logística (RL), Máquina de Vetores de Suporte (SVM), Redes Neurais Artificiais (ANN), K-Vizinhos mais Próximos (KNN). Além dos algoritmos de apoio: Análise de Componente Principal (PCA), K-means e Kappa de Cohen.

### 2.2.2.1 Redes neurais artificiais

A aplicação de Redes Neurais consiste em duas etapas, a primeira apresenta-se aos neurônios de entrada, comumente igual aos números de atributos originados da base de dados. Nesta fase, os pesos dos neurônios da rede são ajustados iterativamente para extrair padrões das relações de entrada e saída, nesta última os neurônios são dimensionados conforme o número de classes que se deseja classificar. Desta forma, as entradas são definidas como atributos numéricos, ou seja, os valores e/ou relações das concentrações dos gases, enquanto na saída obtém-se os valores qualitativos, ou seja, a classificação dos

tipos de falhas. Na segunda etapa, é apresentado à rede um conjunto de amostras diferente do treinamento, cujas saídas são calculadas utilizando valores dos pesos memorizados pela rede, como produto obtém-se a classificação das amostras de teste. Muitos trabalhos foram desenvolvidos utilizando Redes Neurais artificiais (RNN), que geralmente apresentam bons resultados em função de sua capacidade intrínseca de aprender as ligações escondidas entre as concentrações de gases dissolvidos e os tipos de falhas.

Em [Hell \(2002\)](#), observou-se a aplicação de três variações de RNN e sistemas de inferência fuzzy, para 777 amostras, aplicadas na classificação de sete tipos de falhas e condição normal das amostras. A primeira, rede neural de múltiplas camadas (MLP - Multilayer Perceptron) com algoritmo de treinamento backpropagation. Na segunda rede, foi utilizada a RNN de função de base radial (RBFN), recebendo as relações de Rogers para entrada da MLP, porém, utilizando mais amostras na fase de treinamento obteve melhores resultados de classificação. Na terceira rede, foi concebida a RNN Kahonen, que a partir de entradas das relações de Rogers fuzificadas obteve melhor desempenho dentre as redes testadas. Em seguida adotou o sistema de inferência fuzzy neuro-adaptativo aplicadas as mesmas relações para entrada de rede neural MLP, os resultados desta arquitetura apresentaram excelente desempenho na classificação das amostras testadas.

[Salami e Pahlevani \(2008\)](#), aplicaram dados normalizados, fazendo uso das relações da norma IEC 60599:2015, mesmas relações de Rogers, na entrada de uma rede MLP, obtendo resultados para classificação para amostras normais, falhas térmicas e arco-voltáico. Da mesma forma [Zakaria, Johari e Musirin \(2012\)](#), utilizaram RNN de múltiplas camadas com as mesmas características de entrada para 305 amostras, cujas classes de diagnóstico, incluindo a condição normal totalizavam sete.

[Yang e Hu \(2013\)](#), propuseram um sistema de diagnóstico de falhas, que combina um modelo de regressão logística multinomial e Redes Neurais de retro propagação (BPN). Nas etapas da arquitetura implementada, primeiramente, o teste de *Kolmogorov-Smirnov* e o teste de *Kruskal-Wallis* são aplicados para determinar se as diferenças nas quantidades dos gases gerados em diferentes falhas são significativas. Em seguida, o modelo de regressão logística multinomial é utilizado para selecionar os gases adequados e suficientes para o diagnóstico do tipo de falha. Depois que as composições e as quantidades dos gases chave são determinadas, sub redes BPN para diferentes tipos de falhas são construídas para diagnóstico do tipo de falha específica, obtiveram 97,7% por cento de acurácia.

[Luo et al. \(2020\)](#), desenvolveram arquitetura híbrida de RNN, cujas redes A LSTM (*Long Short Term Memory*), memória longa a curto prazo, que se trata de uma arquitetura de rede neural recorrente que mantém em sua memória valores em intervalos aleatórios. A LSTM é bem adequada para classificar, processar e prever séries temporais com intervalos de tempo de duração desconhecida. A indiferença relativa ao comprimento do intervalo é o que difere à LSTM em relação a RNN tradicionais e outros métodos de aprendizado de sequências. Usa informações históricas para prever o estado atual, ele melhora as limitações da dependência remota no campo das séries temporais. O SDAE adota o método

de aprendizagem não supervisionado, que pode aprender as características internas dos dados de falha mais profundamente. Foram utilizadas 1723 amostras, na estrutura de rede neural, SDAE-LSTM, com acurácia de 95,86%. Contudo, classificaram apenas aos casos normais e anormais.

Para [Duy \(2020\)](#), o problema de diagnóstico de falha do transformador de potência é semelhante ao problema de mapeamento não linear altamente complexo porque tanto a entrada quanto a saída são multivariadas e não há relação linear conhecida. No entanto, uma rede MLP demonstrou ser capaz de aproximar funções não lineares que atendem a certas condições. Além disso, redes MLP com um algoritmo de treinamento de propagação com monitoramento de erros foram aplicadas com sucesso para resolver vários problemas difíceis. Isso mostra que o MLP pode atender aos requisitos do problema de diagnóstico de falha em transformadores.

#### 2.2.2.2 Máquina de vetor suporte - SVM

De acordo com [Singh et al. \(2016\)](#), o algoritmo de aprendizagem de máquina é utilizado tanto para classificação quanto para regressão. Essencialmente, o SVM busca encontrar, com base em determinados vetores (denominados de suporte) a melhor fronteira de separação entre classes. Dessa forma, o SVM busca encontrar o melhor hiperplano para um dado *dataset* cujas classes são linearmente separáveis. Para [Dhini et al. \(2020\)](#), trata-se de poderoso aprendizado estatístico para o problema prático em tempo real com poucas amostras com dados não lineares e espaço dimensional superior.

[Zhang et al. \(2017\)](#), desenvolveram uma melhoria do SVM aplicando o algoritmo competitivo imperialista (ICA), que se trata de algoritmo de busca, caracterizado como evolutivo, e baseado na ideia da disputa entre impérios pela extensão de seus domínios para além de seus territórios, aplicável à topologias complexas e com soluções não triviais. Na metodologia, o ICA foi aplicado como método estatístico de classificação para melhor desempenho do SVM na etapa de classificação de falhas.

[Gomathy e Sumathi \(2013\)](#), melhoraram o desempenho da função do *kernel* do SVM por meio da otimização mínima sequencial (SMO). Considerando o poder de classificação binária do SVM SMO, foram programados uma cadeia de 3 algoritmos. O primeiro SVM-SMO-1 classifica as amostras normais e de falha e, em seguida, o SVM-SMO-2 é empregado para apresentar a diferença entre o aquecimento térmico e o tipo de falha elétrica, finalmente o classificador SVM-SMO-3 classifica os dados em descargas de baixa e alta energia. Assim, quatro condições operativas de transformadores são identificados extraindo recursos, treinando os classificadores e testando as redes treinadas.

Dentre as inúmeras vantagens do SVM elencadas por [Bacha, Souahlia e Gossa \(2012\)](#), destacam-se: poderosa para o problema com pequenas quantidades de dados de treinamento, não linear e de alta dimensão para grandes quantidades de dados de entrada e possui capacidade de encontrar a melhor fronteira de separação entre duas classes.

### 2.2.2.3 K vizinhos mais próximos (KNN)

O algoritmo KNN considera  $K$  elementos de um determinado grupo mais próximo para atribuir o rótulo. Na classificação do padrão de amostras o classificador considera o número de vizinhos mais próximos, definidos pela menor distância ao centroide estabelecido, para rotular a amostra, ou seja, a classe com maior número de vizinhos mais próximos determina o rótulo, nesse caso, torna-se mais robusto e menos sensível a ruídos e *outliers* (IKESHOJI, 2020).

Islam, Lee e Hettiwatte (2017), propuseram uma metodologia híbrida de arquiteturas de aprendizado de máquina, KNN e *K-means*. Este último, usado para indexar os três clusters mais próximos de um ponto de dados do transformador desconhecido que permite eleger categorias de falhas únicas ou múltiplas. Em seguida o KNN, a partir dos votos cumulativos, foi utilizado para identificar a categoria de falha de um transformador.

Enriquez et al. (2020), utilizou o KNN para ajustes do algoritmo otimização de enxame de partículas binárias (BPSO) para composição das melhores variáveis de agrupamento. Em seguida, entregar a uma rede neural para classificação de falhas.

Tramontin e Riva (2022), destacam a facilidade de implementação e qualidade dos resultados do algoritmo KNN, destacam ainda a alta capacidade de reconhecimento de padrões e classificação. Muito embora, Almeida e Faceroli (2014), destacarem sobre a complexidade computacional no cálculo de distância para todas as amostras e a sensibilidade a ruídos.

### 2.2.2.4 Regressão logística

A Regressão Logística é um algoritmo aplicado principalmente na resolução de problemas de classificação. É um método simples e eficiente que fornece probabilidades explícitas de associação de classe para tarefas de classificação binária (BOŽIĆ et al., 2013).

Com o objetivo de preencher as lacunas das metodologias convencionais na análise de gases dissolvidos (BOŽIĆ et al., 2013), desenvolveram arquitetura de aprendizado de máquina utilizando o algoritmo de Regressão Logística. Buscaram classificar em estado normal, aquecimento térmico, descarga de alta e baixa energia. A arquitetura utiliza três algoritmos de regressão. No primeiro, são separadas as amostras normais das de falha, na segunda separa os defeitos térmicos e elétricos. E na última os defeitos elétricos são classificados em descarga de alta e baixa energia. Embora tenham utilizado pequeno banco de dados, 50 amostras, o classificador apresentou excelente performance.

## 2.3 Considerações do capítulo

O transformador apesar de ser um equipamento robusto, projetado para durar mais de 35 anos, apresenta no conjunto de isolamento seu principal ponto de vulnerabilidade. Pois uma simples falha em uma vedação, pode iniciar o processo de contaminação do óleo isolante, vindo a reduzir de forma permanente sua vida útil. De forma simples e

resumida, sabe-se que a contaminação do óleo acelera o envelhecimento do papel ([ABNT-7274, 2012](#)). Onde a combinação destes fatores ou isoladamente (contaminação do óleo ou papel), podem dar início ao processo de formação de falhas incipientes que geram aquecimento e acelera a degradação do óleo tornando-se um sistema com realimentação natural e contínuo ([IKESHOJI, 2020](#)).

Foi observado no exemplo prático, utilizando vários métodos convencionais, que diagnósticos diferentes foram produzidos com a mesma amostra gascromatográfica de óleo isolante e apesar de serem a principal ferramenta de análise e diagnóstico de falha em transformadores, os métodos convencionais constantemente apresentam resultados diferentes, inconsistentes ou indeterminados. Mesmo os métodos normatizados, dos quais se destacam: Duval, Gás Chave, Doernenburg, entre outros, necessitam de conhecimento empírico de especialistas para não incorrem em erro de diagnóstico, cujas análises, em quase sua totalidade, são realizadas utilizando mais de uma metodologia. Neste contexto, diversas arquiteturas de aprendizado de máquina têm sido propostas na tentativa de suprir as lacunas das metodologias convencionais.

O aprendizado de máquina se apresenta como poderosa de ferramenta de extração de padrões, otimização de recursos matemáticos para escolha das características mais significativas, além do uso de algoritmos de filtragem de ruídos e *outliers*. No próximo capítulo são apresentados os conceitos matemáticos dos algoritmos apresentados, além de alguns métodos de pré-processamento e aprendizado supervisionado.

# 3 TÉCNICAS DE APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

O aprendizado de máquina (AM) é um ramo da Inteligência Artificial, cujo método de análise, automatiza a construção de modelos analíticos e extrai padrões de conhecimento intrínsecos aos dados (SANCHES, 2003). Dentre as técnicas, destacam-se a Classificação e Regressão, ambas utilizadas para prevê uma saída futura, contudo, suas diferenças são significativas, principalmente na características dos dados preditos. Enquanto a Regressão produz uma saída contínua, a Classificação produz uma saída discreta e bastante utilizada para problemas de classificação binária ou de múltiplas classes (OLIVEIRA, 2023).

Os algoritmos de AM quando apresentados a conjunto de dados de treinamento altamente desbalanceados, de alta variância, prevalecendo a desigualdade na distribuição de padrões entre grupos, têm apresentado dificuldade em diferenciar suas classes (CASTRO; BRAGA, 2011). Fato este, que torna o estudo de variadas arquiteturas de aprendizado de máquina, associadas a métodos probabilísticos, estatísticos entre outros, cada vez mais contagiante na esfera da inteligência artificial (RUFINO et al., 2011).

Neste contexto, se observa a análise DGA, cujo número de amostras de gases dissolvidos que apresentam algum tipo de falha é muito menor que as amostras normais. Em problemas dessa natureza, em que os números de amostras entre classes no conjunto de treinamento variam significativamente, tendem a induzir os algoritmos a extrair padrões que favorecem as classes com maior probabilidade de ocorrer, resultando em baixo nível de assertividade para classes minoritárias.

Neste capítulo, são apresentadas o estudo de variadas arquiteturas de aprendizado de máquina (AM), para posterior análise de desempenho e aplicação na arquitetura híbrida de análise DGA. Tais algoritmos estão associados a métodos probabilísticos, estatísticos, redução de dimensionalidade e baseado em distâncias. Além de abordagens sobre o aprendizado supervisionado e técnicas de pré-processamento de dados.

## 3.1 Regressão logística (LR)

A regressão logística é uma técnica de aprendizado de máquina supervisionado, que apresenta relativa robustez para problemas de classificação binária (BOAS VILAS, 2021), permite estimar a probabilidade de ocorrer um determinado evento, face um conjunto de variáveis explanatórias. As variáveis dependentes ou variável resposta, são os atributos que se deseja prever, enquanto os atributos preditores, são denominados de variáveis independentes ou explanatórias (BOŽIĆ et al., 2013).

Em sua essência, a regressão logística, para casos de classificação binária, segue a distribuição de Bernoulli, exceto pelo fato de não conhecer a probabilidade dos atributos a

serem preditos. E tem por objetivo, a partir da combinação linear das variáveis explanatórias, estimar com a máxima verossimilhança a probabilidade da variável dependente ser predita corretamente (GONÇALVES; GOUVÊA; MANTOVANI, 2013).

A regressão logística caracterizada por descrever a relação entre a variável dependente qualitativa binária, associada ao conjunto de variáveis independentes qualitativas ou métricas conseguiu um grande avanço a partir dos trabalhos de Hosmer, Jovanovic e Lemeshow (1989). Embora voltada inicialmente para dados da área médica, o desempenho da técnica viabilizou sua aplicação em diversas outras áreas do conhecimento (MINUSSI; DAMACENA; JR, 2002).

Na regressão logística (LR), embora possuam conceitos diferentes, a probabilidade e chance (do inglês *odds*), são utilizados para descrever o mesmo fenômeno. Por definição, probabilidade é o risco de determinado evento acontecer, chance é a razão entre a probabilidade de determinado evento acontecer e a probabilidade desse evento não acontecer (MESQUITA, 2014).

Para explicar a ideia da LR como um modelo probabilístico no caso binário, dada a probabilidade de o evento  $y$  acontecer, sabendo que o evento  $x$  ocorreu, ou seja,  $\mathbf{P}(y|x)$  sendo a probabilidade condicional de um vetor de características  $x$  em particular corresponder à classe  $y$ , e considerando a distribuição de *Bernoulli*, é necessário conectar as variáveis independentes à distribuição presente nas variáveis dependentes, cujo logaritmo para representar a razão de chances de que o evento  $\mathbf{P}(y|x)$  ocorra é realizada pela função *logit* apresentada na Equação 3.1.

$$\text{logit}(\mathbf{P}(y | x)) = \log \left( \frac{\mathbf{P}(y | x)}{1 - \mathbf{P}(y | x)} \right) . \quad (3.1)$$

Os valores na saída da Equação 3.1 quando muito baixos, próximos de zero, inferem a condição de baixa probabilidade do evento  $\mathbf{P}(y|x)$  ocorrer, o inverso acontece para saídas muito altas. A componente linear da função *logit* pode ser representada entre os padrões da variável independente,  $x$ , e os parâmetros de regressão de tal forma que:

$$\text{logit}(\mathbf{P}(y | x)) = \log \left( \frac{\mathbf{P}(y | x)}{1 - \mathbf{P}(y | x)} \right) = \beta_0 + \beta_1 x . \quad (3.2)$$

Entretanto, considerando o sentido probabilístico de se prever o  $\log(\text{odds})$  de um evento dada uma determinada variável preditora, as saídas da Equação 3.2 não são adequadas. Neste sentido, uma função tipicamente utilizada é a função logística, cuja forma corresponde à inversa da função *logit* e é definida por:

$$f(x, \bar{\beta}) = \mathbf{P}(y | x) = \left( \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 x}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 x}} \right) . \quad (3.3)$$

Enquanto a função a Equação 3.2 permite a aplicação de um modelo linear para estimar a chance de um vetor de características pertencer a uma classe específica, a Equação 3.3 permite a conversão dos valores em escala *logit*, que varia de  $-\infty$  a  $+\infty$  para valores de probabilidade que variam entre 0 e 1. Logo a Equação 3.3 pode ser interpretada como a

probabilidade do vetor de entrada  $x$ , ajustada, pelo método da máxima verossimilhança, os pesos em  $\bar{\beta}$  pertencer à classe rotulada por  $y$ .

Na LR, a classificação a partir de uma probabilidade prevista se estabelece um limiar de decisão (*threshold*), definido por:

$$y = \begin{cases} -1 & \text{se } f(x, \bar{\beta}) \geq 0,5 \\ 1 & \text{se } f(x, \bar{\beta}) \leq 0,5 \end{cases}, \quad (3.4)$$

onde os registros cuja probabilidade ultrapasse esse limiar são classificados como sendo da classe 1, caso contrário, serão considerados da classe 0. Sendo assim, a regressão logística não só é capaz de classificar instâncias, mas também de informar a certeza ou incerteza associada com a classificação através do valor de probabilidade calculada.

Dito isso, frente ao problema de múltiplas classes da análise de gases dissolvidos (DGA) apresentado ao aprendizado na LR, foi utilizada a regressão multinomial, para determinação de casos normais, falhas térmicas e elétricas.

A estatística de referência normalmente utilizada para ajustes dos coeficientes é a função de verossimilhança definida como a probabilidade de obter os resultados da amostra, dadas as estimativas dos parâmetros do modelo logístico. Maiores informações sobre o detalhamento matemático e aplicações da regressão logística são encontrados em (BOAS VILAS, 2021; DEMARIS, 1995; GONÇALVES; GOUVÊA; MANTOVANI, 2013; MESQUITA, 2014; MINUSSI; DAMACENA; JR, 2002).

## 3.2 Máquina de vetores de suporte (SVM)

O SVM é uma técnica de aprendizado de máquina fundamentada na Teoria de Aprendizado Estatístico, que visa estabelecer condições matemáticas que permitem escolher um classificador, com bom desempenho, para o conjunto de dados disponíveis para treinamento e teste, desenvolvida por Vapnik em 1995 (DOSCIATTI; FERREIRA; PARAISO, 2013). Originalmente desenvolvida para classificação binária, busca a construção de um hiperplano como superfície de decisão entre duas classes, de tal forma que a margem de separação entre exemplos seja máxima (GONÇALVES, 2010).

Embora a ideia de hiperplano remonte a problemas de classificação linear, o SVM possui a capacidade de generalizar problemas de alta dimensionalidade e distribuições não-lineares, fazendo uso das funções *Kernel* realiza a mudança de dimensionalidade, retornando a um problema linear (GONÇALVES, 2010).

As SVMs lineares aplicadas a problemas de classes cujos padrões de classificação são linearmente separáveis, onde o classificador dar origem a um hiperplano, é possível mostrar que a qualidade da generalização tem a ver com a ideia de margem (LORENA; CARVALHO, 2003).

O conceito de hiperplano definido na função  $f(x) = (\beta \cdot x) + b$ , sendo  $\beta$  os parâmetros que descrevem o hiperplano e  $x$  um vetor de características que atende à condição (BOAS

VILAS, 2021), pode-se definir como margem como a menor distância entre os dados do conjunto de treinamento e o hiperplano utilizado para separação de classes. A margem determina quão bem duas classes podem ser separadas (LORENA; CARVALHO, 2003).

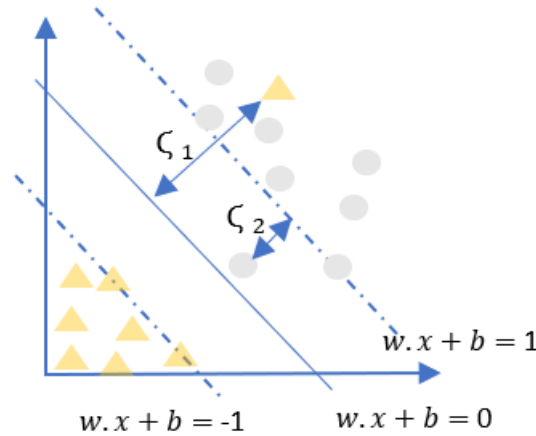
As margens nas SVMs lineares são classificadas como rígidas ou suaves. A diferença entre elas se dar através da suavização das restrições impostas na determinação do hiperplano ótimo, por meio da introdução de uma variável de relaxamento  $\zeta$ , desta forma, permite a ocorrência de alguns erros de classificação.

$$\text{Para } y_i = +1 \quad \zeta_i(\mathbf{w}, b) \begin{cases} 0 & \text{se } \mathbf{w}x_i + b \geq 1 \\ 1 - \mathbf{w}x_i + b & \text{se } \mathbf{w}x_i + b < 1 \end{cases}, \quad (3.5)$$

$$\text{Para } y_i = -1 \quad \zeta_i(\mathbf{w}, b) \begin{cases} 0 & \text{se } \mathbf{w}x_i + b \leq -1 \\ 1 + \mathbf{w}x_i + b & \text{se } \mathbf{w}x_i + b > -1 \end{cases}, \quad (3.6)$$

as variáveis  $\zeta_i$  medem onde se encontram as amostras  $(x_i, y_i)$  em relação aos hiperplanos  $\beta$ .  $x + b = \pm 1$ . Se seu valor for 0, a amostra é classificada corretamente, pois está fora da região entre estes hiperplanos. E se for positivo, mede a distância do padrão em relação aos mesmos. Para os casos de  $\zeta_i$  maior que 1, o dado é classificado erroneamente.

Figura 10 – Variáveis de relaxamento  $\zeta_i$



Fonte: Adaptado pelo autor de Lorena e Carvalho (2003)

A inclusão de variáveis de relaxamento, conhecida como técnica de margens suaves, permite a SVM performar melhor o ajuste o hiperplano evitando os ruídos nos dados (LORENA; CARVALHO, 2003).

De modo a minimizar o erro no treinamento as variáveis de relaxamento  $\zeta$  devem ter valor mínimo para todo o conjunto de treinamento. Enquanto para maximizar a margem de separação entre classes os parâmetros  $\|\beta\|$  devem ser minimizados.

$$\epsilon(\mathbf{w}, x) = \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \zeta_i(\mathbf{w}, b), \quad (3.7)$$

onde  $C$  é uma constante de ajuste empírico, que representa um hiperparâmetro do modelo, utilizado para penalizar a minimização dos erros nos dados de treinamento em função da minimização da complexidade do modelo (BOAS VILAS, 2021).

Para os casos de problemas reais, a exemplo da análise DGA, a característica de padrões linearmente separáveis é raramente encontrada. Para estender a SVM linear a resolução de problemas não-lineares foi introduzida funções reais não-lineares, que mapeiam o conjunto de treinamento em um novo espaço linearmente separável, denominado espaço de características. Fazendo uso das funções *Kernel* realiza a mudança de dimensionalidade, retornando a um problema linear de alta dimensionalidade (ALMEIDA, 2010).

Uma função *Kernel* recebe dois dados de entrada  $x_i$  e  $x_j$  e calcula o produto interno destes dados no espaço de características.

$$K(x_i, x_j) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x_j) . \quad (3.8)$$

Gonçalves (2010), elenca as funções *Kernel* mais utilizadas: funções polinomiais, as funções Gaussiano (RBF de base radial) e as funções sigmóides. Boas Vilas (2021), fazem referência a definição do *Kernel*,  $K$ , assim como do parâmetro de regularização,  $C$ , representam hiperparâmetros na SVM e, portanto, devem ser definidos previamente à construção do modelo. Mais detalhes do escopo matemático e aplicações estão descritas em (ALMEIDA, 2010; BACHA; SOUAHLIA; GOSSA, 2012; DOSCIATTI; FERREIRA; PARAISO, 2013; GONÇALVES, 2010; LORENA; CARVALHO, 2003; KIRKBAS et al., 2020).

Dentre as vantagens da SVM está a capacidade de classificação além de problemas binários como o de múltiplas classes (ALMEIDA, 2010). Apresenta bom desempenho em problemas de alta dimensionalidade, a exemplo de aplicação de visão computacional, no caso de extração de informações a partir de imagens (GONÇALVES, 2010; LORENA; CARVALHO, 2003).

Apresenta vantagem sobre outras arquiteturas de aprendizado de máquina em relação otimização de uma função quadrática, que possui apenas um mínimo global, a exemplo das Redes Neurais que apresenta mínimos locais na função objeto a ser minimizada (LORENA; CARVALHO, 2003). No entanto, apresentam algumas desvantagens como a sensibilidade às definições dos hiperparâmetros (regularização  $C$  e *Kernel*). Além do baixo desempenho frente a outras técnicas quando o número de amostras de treinamento é limitado (BOAS VILAS, 2021).

### 3.3 K-ésimos vizinhos mais próximos (KNN)

Embora problemas de classificação operem com dados rotulados para treinamento, é comum em casos reais encontrar problemas que não apresentam uma distribuição uniforme, cuja densidade de probabilidade não é totalmente conhecida em suas amostras e não atendem as propriedades de uma distribuição condicional para cada classe, nesses ca-

sos uma alternativa é classificar cada nova amostra conforme a evidência de classificação dos exemplos mais próximos obtidos no treinamento (BOAS VILAS, 2021).

No contexto de classificação de amostras que são representadas como pontos definidos em um espaço de recursos, o método *K-ésimos vizinhos mais próximos* (KNN), baseado em distâncias, se apresenta como uma das arquiteturas de aprendizado de máquina mais diretas. Apesar da simplicidade do KNN, o desempenho que ele alcança em várias tarefas de reconhecimento de padrões indica que ele permanece competitivo como método de classificação (MANOCHA; GIROLAMI, 2007).

De metodologia simples, o algoritmo do KNN considera a hipótese de que dados de mesma classe tendem a se concentrar em uma mesma região, para então atribuir uma classe a uma nova instância,  $q$ , de acordo com a classe preponderante, formada pelo número de vizinhos de mesma classe entre os  $K$  vizinhos mais próximos do conjunto de treinamento (ALMEIDA, 2010; BOAS VILAS, 2021; MANOCHA; GIROLAMI, 2007; SUTTON, 2012). Deste modo, as distâncias são uma medida da similaridade entre as características das amostras de teste e as características do conjunto de treinamento associados à cada classe (BOAS VILAS, 2021).

O KNN possui dois hiperparâmetros, o número de vizinhos  $K$  e a medida de similaridade usada para encontrar os vizinhos mais próximos (BOAS VILAS, 2021). A distância Euclidiana é a medida mais amplamente usada para determinar os vizinhos (ALMEIDA, 2010; MANOCHA; GIROLAMI, 2007; SUTTON, 2012), consiste na medida em linha reta entre dois pontos e é definida por:

$$d(p, q) = \sqrt{\sum_{i=0}^n (p_i - q_i)^2}. \quad (3.9)$$

Outra métrica de distância é a de Manhattan, que corresponde a distância entre dois pontos atravessados por uma única direção de cada vez.

$$d(p, q) = \sum_{i=0}^n |p_i - q_i|. \quad (3.10)$$

Em relação ao parâmetro  $K$ , valores muito pequenos podem estar sujeitos a ruídos e valores muito altos podem diminuir a capacidade de previsão, visto que podem englobar classes muito distantes e por consequência, não tão semelhantes. A escolha do valor apropriado de  $K$  sofre forte influência da dispersão e sobreposição de dados (BOAS VILAS, 2021). Deste modo, várias alternativas para determinar o valor mais adequado para predição podem ser empregadas. Uma delas é avaliar o algoritmo KNN no conjunto de validação, adotando diferentes valores para  $K$ . O valor de  $K$  que alcançar a melhor precisão será escolhido para classificar todas as instâncias de teste (OLIVEIRA, 2010).

Face ao problema de classificação de dados em regiões homogêneas, cuja posição do ponto  $q$  e a maioria de seus vizinhos apresentar distância relativamente grande, induzindo o algoritmo a classificações errôneas, (ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2017; SUTTON, 2012) consideraram o uso de vizinhos mais próximos ponderados. Desta forma, em vez de

cada um dos KNN contar igualmente, sem considerar suas distâncias de  $q$ , cada um dos vizinhos mais próximos recebe um voto ponderado, com um peso que diminui à medida que aumenta a distância entre o vizinho e a consulta, com a distância ao  $(K+1)$  o vizinho mais próximo determinando a distância na qual o peso é 0. Cujas decisões de classificação é tomada com base na maior soma de pesos entre os  $K$  vizinhos mais próximos.

Uma das vantagens do KNN, é que a partir de uma base de dados suficientemente grande e com valor de  $K$  adequado, o KNN tem potencial para resolver problemas não lineares.

No entanto, sua baixa popularidade pode estar atribuída a alguns fatores, primeiro pela ausência da semântica probabilística que permita que probabilidades preditivas posteriores sejam empregadas, por exemplo, na atribuição de perdas variáveis de maneira consistente (MANOCHA; GIROLAMI, 2007) e ausência de um modelo matemático explícito, em seguida quando a classificação é realizada em um espaço de recursos de alta dimensão, os vizinhos mais próximos de um ponto podem estar muito distantes, causando viés e degradando o desempenho (BOAS VILAS, 2021). Porém, duas técnicas gerais que podem ser usadas na tentativa de combater a presença de variáveis de ruído e a chamada maldição da dimensionalidade são: (1) o uso de vizinhanças localmente adaptativas e (2) a redução da dimensão global (SUTTON, 2012).

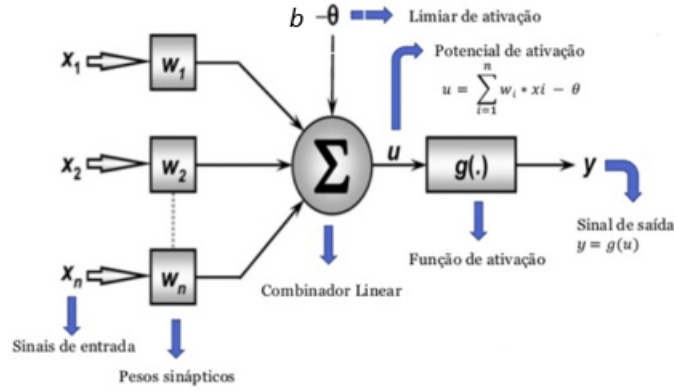
## 3.4 Redes neurais artificiais (ANN)

Uma ANN é um método de inteligência artificial inspirado em Redes Neurais biológicas. As ANNs criam um sistema adaptativo, similar ao processamento de informações nas interações sinápticas entre os neurônios e o cérebro, que o aprendizado de máquina (computadores) utiliza para aprender com os erros e se aprimorar continuamente (BOAS VILAS, 2021; IKESHOJI, 2020).

O cérebro humano é a inspiração por trás da arquitetura da rede neural. As células do cérebro humano, chamadas de neurônios, formam uma rede altamente interconectada e enviam sinais elétricos entre si para ajudar os seres humanos a processar informações. Da mesma forma, uma rede neural é composta de neurônios artificiais, chamados *perceptrons*, que por meio dos sinais de entrada, trabalham juntos para resolver um problema, fornecendo sinais de saída únicos, estes, por sua vez, podem estar conectados a outras camadas de neurônios (BOAS VILAS, 2021; SALAMI; PAHLEVANI, 2008).

O neurônio de camada simples é representado na Figura-11, onde os sinais de entrada estão associados aos pesos sinápticos, que expressam a importância de cada entrada. A soma ponderada realizada no combinador linear está submetida a uma constante  $b$ , denominada *bias*. *Bias* é um neurônio cuja função de ativação é permanentemente definida como 1 (TISSOT; CAMARGO; POZO, 2012), responsável por manter a contribuição dos pesos induzidos pelas instâncias, na prática, ele nivela o processo de treinamento, fazendo com que as alterações nos pesos, induzidos pelos dados, sejam mais pontuais, menos

Figura 11 – Neurônio artificial

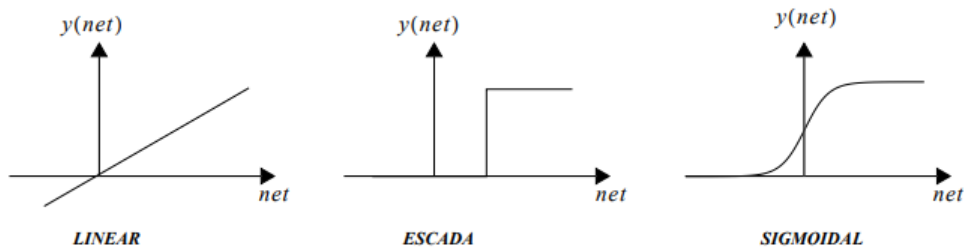


Fonte: Adaptada pelo autor de Tissot, Camargo e Pozo (2012)

dramáticas. O resultado da somatória das entradas ponderadas será somado ao limiar de ativação  $\theta$  e então repassado como argumento da função de ativação  $g(\cdot)$ , a qual, terá como resultado um intervalo finito. O treinamento assim é mais estável e tem impacto positivo na convergência à solução ideal (KOPILER et al., 2019).

Diferentes tipos de função de ativação são utilizadas conforme a característica do problema sob análise. A Figura-12 mostra alguns exemplos: funções lineares que produz uma saída linear contínua, a função de escada, uma saída binária (não-linear discreta) e a função *sigmoidal*, uma saída não-linear contínua.

Figura 12 – Funções de ativação



Fonte: Rauber (2005)

As funções *sigmoide*, comumente as mais adotadas para classificação, tem um conjunto de propriedades muito úteis nos cálculos relacionados à aprendizagem dos pesos e ao mapeamento padrões realizado pela ANN, dentre as quais destacam-se: não linearidade, contínua e diferenciável em todo o domínio de  $\mathbb{R}$ , em termos do domínio dos valores  $y$  calculados distingue-se basicamente entre saídas binárias com  $y \in \{0, 1\}$  ou  $y \in \{-1, 1\}$  e saídas contínuas com  $y \in \mathbb{R}$  (RAUBER, 2005).

Na classificação, uma ANN produz o mapeamento do conjunto de dados, extraindo correlações e padrões a partir das informações das características e propriedades do problema exposto. Como produto, são gerados novos espaços de características de  $m$ -dimensões, cujas classes são separadas por hiperplanos e a classificação de novas amostras são realizadas conforme a localização das regiões no novo espaço de atributos (IKESHOJI, 2020).

No contexto de aprendizado supervisionado, o *perceptron* apresentado na Figura-11, é capaz de classificar problemas lineares, enquanto para casos não lineares, a exemplo da análise DGA, é necessário a inserção de camadas de neurônios sobrepostas e interconectadas, conhecidas como *perceptron* de múltiplas camadas (do inglês, *Multi Layer Perceptron* - *MLP*). Apesar das inúmeras variações de arquiteturas das ANNs o método de aprendizado consiste na determinação de pesos sinápticos por meio de processos iterativos (RAUBER, 2005). De forma geral o aprendizado ocorre quando a rede neural atinge a máxima capacidade de generalização para solução de um problema (FLECK et al., 2016). Em síntese, treinar uma rede consiste em minimizar uma função custo considerando as classes obtidas nas saídas dos dados de treinamento (BOAS VILAS, 2021).

Dentre os métodos de aprendizado, o algoritmo de retropropagação (do inglês, *back-propagation*) é o mais popular nas ANNs (YANG; HU, 2013). No qual, o método do gradiente descendente é utilizado para encontrar os pesos que minimize o erro médio quadrático que faz a rede aproximar da melhor maneira possível o mapeamento entre todos os exemplos, considerando as classes de treinamento e as classes de saída produzidas à cada iteração (RAUBER, 2005).

Dentre as vantagens da ANN está a capacidade de aprender e generalizar, ou seja, produzir saídas adequadas para entradas inexistentes durante o processo de aprendizagem (FLECK et al., 2016; IKESHOJI, 2020), além de serem estimadores universais, ou seja, podem mapear qualquer sistema não linear e de apresentar tolerância a falhas (BOAS VILAS, 2021; IKESHOJI, 2020).

As vantagens das Redes Neurais, permitem que sejam amplamente empregadas na classificação de amostras gascromatográfica para análise de falhas em transformadores de potência (NACARATO et al., 2018). Em casos específicos para classificação binária de falhas (YANG; HU, 2013). Combinadas com outras arquiteturas de aprendizado de máquina (LUO et al., 2020). Variações das ANNs, como *autoencoder*, *Kanohen*, e outros (FLECK et al., 2016; LUO et al., 2020; RAUBER, 2005).

### 3.5 Análise de componente principal (PCA)

Dado um vetor de dados aleatórios, o objetivo da análise de componente principal é estratificar a estrutura de variância e covariância, através de combinações lineares das variáveis originais. Tais combinações lineares são chamadas de componentes principais (HONGYU; SANDANIELO; JUNIOR, 2016). É um modelo fatorial no qual os fatores são baseados na variância total, o que contribui para ser um dos métodos multivariáveis mais simples (ARAÚJO; COELHO, 2009).

Neste método, são tomadas  $p$  variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_p$ , cujo objetivo é encontrar combinações  $y_1, y_2, \dots, y_p$  que não sejam correlacionados na ordem de importância e que melhor performem a variação dos dados. De modo que a ordem  $\text{Var}(y_1) \geq \text{Var}(y_2) \geq \dots, \geq \text{Var}(y_p)$  onde  $\text{Var}(y_1)$  representa a variância de  $y_1$ . Os índices  $y$  são ditos as com-

ponentes principais (ARAÚJO; COELHO, 2009). De forma geral, dado o conjunto  $p$  de variáveis com correlações substanciais entre si, então as primeiras componentes principais apresentaram a maior parte da variação das variáveis originais (SILVA, 2008).

Para Silva (2008), o aumento do interesse pela PCA ocorre na década de 1960, com a publicação dos artigos: Anderson (1963) que discute a parte mais teórica relacionada ao método de distribuição das variâncias e componentes principais, Rao (1964) propõe inúmeras ideias de aplicações e implementações no método, Gower (1966) apresenta o método no contexto da estatística e Jeffers (1967) apresenta dois estudos de casos, que evidencia a aplicabilidade do método de redução de dimensionalidade. O fator comum destes artigos é o fato que a PCA apresenta melhor performance para um grande número de variáveis  $p$ . Cuja padronização das medidas dos dados assegura que todas as variáveis possuem o mesmo peso na análise para determinação das componentes principais.

Em termos matemáticos as componentes principais do PCA podem ser definidas como:

$$Z = X^* \cdot A \quad , \quad (3.11)$$

onde  $A$  representa os autovetores da matriz de correlação, e  $X^*$  representa a matriz de dados  $X$  normalizados. A normalização de  $X$  é dada na equação:

$$X_k^* = (X_k - \bar{X}_k) / \sigma_k, \quad \text{para } K = 1, 2, \dots, p \quad , \quad (3.12)$$

em que  $X_k$  é o vetor de  $n$  amostras da  $k$ -ésima coluna de  $X$ ,  $\bar{X}_k$  é a média de  $X_k$  e  $\sigma_k$  é a variância de  $X_k$ . Em resumo, se os dados são normalizados pela sua média e variância, a matriz de covariância de  $X^*$  é igual a matriz de correlação de  $X$ , consequentemente as componentes principais de  $X^*$  são definidas na equação.

Contudo, mesmo  $X^*$  sendo uma transformação de  $X$ , as componentes principais de ambas as matrizes, correlação e covariância, não fornecem informações equivalentes e não podem ser derivadas uma da outra (LYRA et al., 2010).

Em PCA, a utilização de matrizes de correlação ou covariância se dar em função das características do problema em análise. A primeira, comumente empregada para dados de  $X$  com diferentes unidades ou grandezas. Enquanto a segunda, apresenta alta sensibilidade para grandezas com alta variância (SILVA, 2008).

No contexto da DGA, apesar das grandezas associadas possuírem a mesma unidade de medida (partes por milhão - ppm) as concentrações se referem a diferentes tipos de gases, os quais tendem a apresentar alta variância. Fato este que corrobora com a necessidade normalização dos dados.

A aplicação do PCA tem evoluído ao longo dos anos e utilizado em diversas áreas como: setor elétrico, indústria agroquímica, farmacêutica, indústrias em geral, entre outras.

Silva (2008), aplicou a métrica de *Mahalanobis* aos dados reescritos em um novo conjunto de eixos ortogonais gerados pela análise de componente principal a partir de dados coletados de sensores expostos a amostras de óleo isolante com diferentes tipos de falhas associadas em transformadores de potência.

Na indústria agroquímica, [Natalino \(2006\)](#), buscou determinar as correlações entre dois tipos de açúcares comestíveis. Os dados foram obtidos a partir de técnicas de infravermelho, espectrofotômetro de absorção atômica e cromatografia líquida. O pré-processamento dos dados espectrais e concentração dos metais, inerentes ao processo em estudo, foram aplicadas as metodologias de pré-processamento centradas na média e auto escalonamento. A análise de componente principal apresentou percentual de variância dos dados em 93,6% e 56,24% para a primeira componente principal para dados espectrais e concentração dos metais respectivamente, nas quais evidenciaram graficamente a existência de separação entre os tipos de açúcares.

Na indústria farmacêutica, o algoritmo do PCA tem sido utilizado para identificação e discriminação de medicamentos com o objetivo de garantir autenticidade e qualidade dos produtos. [Sabin, Ferrão e Furtado \(2004\)](#), coletaram os espectros no infravermelho de amostras contendo diferentes concentrações dos princípios ativos cloridrato de amitriptilina e cloridrato de imipramina. Para classificação, o algoritmo SIMCA (do inglês, *Soft Independent Modeling by Class Analogy*) foi utilizado, similar ao KNN, porém utiliza as distâncias entre classes mais próximas para classificação da nova entrada de dados. É construído a partir de modelos baseados em componentes principais. Um número ótimo de componentes principais é determinado para cada classe. O processo de classificação consiste em definir fronteiras entre classes, cujo rótulo da nova amostra é definido para a respectiva classe em todas as projeções obtidas. Contudo, apresenta baixo desempenho para sobreposição de classes.

Mais detalhes do escopo matemático e aplicações estão descritas em ([HONGYU; SANDIELO; JUNIOR, 2016](#); [LYRA et al., 2010](#); [NATALINO, 2006](#); [SABIN; FERRÃO; FURTADO, 2004](#); [SILVA, 2008](#); [SOUZA; POPPI, 2012](#)).

## 3.6 Aprendizado supervisionado

Um sistema com habilidades de aprendizado é aquele que se ajusta as instâncias de classes do mesmo domínio de conhecimento, desempenhando as mesmas tarefas de forma cada vez mais eficiente ([TAVARES; MEIRA; AMARAL, 2020](#)).

O aprendizado interativo permite a formulação de conceitos, a partir da observação de coletâneas de dados, incluindo a generalização do conhecimento. Este processo é desenvolvido pelo aprendizado indutivo. Que permite, a partir da inferência lógica, obter conclusões generalistas sobre um determinado problema. O aprendizado por indução pode ser dividido em supervisionado e não supervisionado ([SANCHES, 2003](#)).

O aprendizado supervisionado utiliza banco de dados rotulados para treinar um algoritmo para prever novas situações, enquanto no aprendizado não supervisionado faz uso de dados não rotulados, analisados sem treinamento prévio, usado para detectar novos padrões, formando agrupamento de amostras com características similares ([BATISTA et al., 2003](#)).

No aprendizado supervisionado, as amostras possuem uma classe associada e são descritas pelas suas características, dadas como um conjunto de atributos. A classe, por sua vez, possui um atributo especial, no qual descreve a instância do fenômeno de interesse. De modo que, as amostras rotuladas (classe atribuída) formam o conjunto de treinamento para extração de conhecimento por meio de generalizações, de modo que, o aprendizado adquirido via indução, seja capaz de prever a classe de novas amostras. Desta forma, o conhecimento induzido acompanha o conceito de classificador (SANCHES, 2003).

Uma característica em problemas práticos de classificação é a desigualdade na distribuição de padrões entre classes, que dificultam a generalização e extração de correlações do problema proposto, cujo número de amostras entre classes no conjunto de treinamento é altamente discrepante (CASTRO; BRAGA, 2011), a exemplo da análise DGA. Nestes casos, os algoritmos possuem a tendência de favorecerem as classes com maior probabilidade de ocorrência, o que resulta em baixas taxas de assertividade para classes com menor representatividade de amostras (RUFINO et al., 2011).

As bases de dados desbalanceadas surgem como um problema em algoritmos de classificação. Por serem projetados para maximizar a precisão e supondo uma distribuição relativamente equilibrada, os algoritmos assumem diferentes erros como igualmente importantes. Fato que contribui para altas taxas de acurácia, contudo, tendem a prejudicar a correta classificação para classes de interesse, ou seja, as classes minoritárias.

No contexto de custos iguais para diferentes erros de classificação, a regra de decisão ótima buscada pelos algoritmos de classificação pode ser descrita em função das verossimilhanças  $p(x|y=k)$ , definida por:

$$f^*(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } \frac{p(x|y=1)}{p(x|y=0)} > \frac{P(y=0)}{P(y=1)} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (3.13)$$

nota-se que o algoritmo dotado desta regra de decisão está diretamente influenciado pela razão entre as probabilidades de ocorrências das classes (CASTRO; BRAGA, 2011). Observa-se que a classificação de uma amostra arbitrária à classe positiva (em DGA, caso de falha) depende desta probabilidade. Deste modo, em análise DGA, em que o número de amostras de casos normais,  $p(y=0)$ , é muito maior que as amostras de casos de falha,  $p(y=1)$ , a solução ótima buscada pelas máquinas de aprendizado, tendem a favorecer aos casos normais.

A busca por metodologias que melhorem o desempenho dos classificadores para dados desbalanceados permanece em constante evolução e, vários métodos têm sido desenvolvidos. A estratégia que mais tem sido utilizada é considerar a divisão global do erro entre classes, e atribuir funções de penalidade distinta a diferentes tipos de classificação (RUFINO et al., 2011). Além de outras soluções, que alteram o critério de decisão dos algoritmos e trazem especificidades distintas na construção do novo espaço de características, induzindo o deslocamento de hiperplanos ou aumento do espaço de características das classes minoritárias (CASTRO; BRAGA, 2011).

O desequilíbrio nas distribuições das amostras não é o único problema, ressaltando-se ainda o nível de incertezas (ruído), causados por sobreposições e *outliers* inerentes ao problema, cujo viés causado pela classe dominante está mais associada a complexidade dos dados. Contudo, domínios linearmente separáveis são praticamente insensíveis ao desbalanceamento (CASTRO; BRAGA, 2011; RUFINO et al., 2011).

Neste contexto, técnicas de pré-processamento aplicadas a base de dados, com a finalidade de obterem grupos que representem *clusters* bem definidos e separáveis no espaço de entrada, tendem a minimizar a influência do desbalanceamento, em geral, permitem o aumento da taxa de assertividade no reconhecimento da classe positiva.

Na próxima seção está apresentada uma abordagem generalista sobre as técnicas de pré-processamento.

### 3.7 Técnicas de pré-processamento

Na atualidade, a quantidade de informações produzidas e armazenadas diariamente propiciam o cenário perfeito para o aprendizado de máquina. A capacidade de extração de conhecimento das arquiteturas de Inteligência Artificial a partir da análise de banco de dados tem evoluído constantemente. Neste contexto, técnicas para tratamento de dados, conhecidas como pré-processamento, são essenciais para um melhor desempenho destes algoritmos.

O pré-processamento consiste em aprimorar a qualidade dos dados. Seja no balanceamento de classes, eliminação de ruídos (classificações incorretas) ou atributos com baixo valor preditivo. Nesta fase, o conhecimento do domínio do problema é essencial para garantir que os dados pré-processados e disponibilizados aos algoritmos de aprendizado sejam completos e consistentes (BATISTA et al., 2003).

Silva (2021), a etapa de pré-processamento é composta das seguintes fases: limpeza, integração, transformação e redução de dimensionalidade dos dados.

A limpeza dos dados consiste no tratamento de dados incompletos ou nulos, duplicados, incorretos (ruídos), que normalmente ocorrem durante a criação do dataset ou através de regras de validação (SILVA, 2021). Dentre várias alternativas, pode-se ignorar os registros, substituir por uma constante, ou por uma média. As mesmas técnicas podem ser usadas para *outliers*, além de métodos de clusterização para identificação destas amostras. Os *outliers*, são dados que se distanciam das amostras em análise, ditos como valor atípico (SCHMITT et al., 2005).

A integração dos dados é importante para garantir a maior generalização do problema, pois diferentes bases de dados contemplam um maior número de casos possíveis, além impedir erros de validação, inconsistências e redundâncias dos atributos do *dataset* (BATISTA et al., 2003; SCHMITT et al., 2005; SILVA, 2021).

A transformação dos dados converte a representação destes a um formato que visa superar as limitações existentes nos algoritmos com o objetivo de otimizar sua performance

(BATISTA et al., 2003). Normalmente são dados que apresentam alta assimetria na distribuição de frequência e consequente alta variabilidade que dificultam o desempenho dos algoritmos de aprendizagem (PINTO; ROCHA; RAMOS, 2021). Dentre os tipos de transformação pode-se citar a normalização, clusterização e categorização (SCHMITT et al., 2005; SILVA, 2021). Neste trabalho, além das técnicas citadas, a exemplo de Pinto, Rocha e Ramos (2021), será empregada transformação logarítmica dos dados.

A redução de dimensionalidade torna-se fundamental na análise de dados com grande número de variáveis, pois além de reduzir o custo computacional, facilita a classificação, a visualização e a compressão dos dados (SIQUEIRA et al., 2019). Outro aspecto importante, é remoção de ruído e a redundância entre atributos (SILVA, 2021). A redução de dimensionalidade consiste em obter um espaço amostral de menor dimensão, que seja capaz de corresponder à dimensionalidade intrínseca dos dados originais (SIQUEIRA et al., 2019). Dentre as técnicas de redução de dimensionalidade, cita-se os autoencoders (BANK; KOENIGSTEIN; GIRYES, 2020; SIQUEIRA et al., 2019) e análise PCA (LYRA et al., 2010). Contudo, deve-se ter atenção para ao número mínimo de componentes necessários para explicar as propriedades dos dados (SCHMITT et al., 2005).

Para problemas de classes desbalanceadas pode-se aplicar técnicas de subamostragem para dados majoritários e superamostragem (dados sintéticos) para dados de interesse (minoritários) (IKESHOJI, 2020). Contudo, apesar destas técnicas possuírem o mesmo propósito, elas podem introduzir diferentes características ao novo conjunto de dados de treinamento, que por sua vez, pode não representar integralmente o problema original, dificultando o aprendizado (CASTRO; BRAGA, 2011).

O caso da análise DGA, tema deste trabalho, se enquadra no problema de classes desbalanceadas, cujas amostras de interesse são minoritárias. O processo de amostragem dos dados é realizado pelos valores expressos na gascromatografia do óleo e possuem correlação com defeitos de natureza térmica e elétrica.

Há de se considerar a correta classificação do tipo de defeito após a falha, que depende de inspeção interna no transformador realizada por uma equipe de especialistas. Fato que contribui para número reduzido de amostras. Neste contexto, surgem as metodologias convencionais, já apresentadas no Capítulo 2, que auxiliam na classificação das amostras, possibilitando a obtenção de uma base de dados menos desbalanceada, muito embora, a classe majoritária continue sendo de casos normais.

Os métodos de pré-processamento aplicados a base de dados DGA estão abordadas no Capítulo 4.

## 3.8 Considerações do capítulo

O estudo apresentado neste capítulo buscou por algoritmos de aprendizado de máquina que utilizassem diferentes abordagens para o problema de classificação. Desde os métodos com abordagem probabilística (RL), aprendizado estatístico (SVM), baseado em distâncias (KNN), redução de dimensionalidade (PCA) e redes neurais (ANN).

Frente ao problema de análise DGA, de classes desbalanceadas e com características não lineares, buscou-se o entendimento de aprendizado supervisionado e técnicas de pré-processamento que pudessem propor alternativas para melhorar o desempenho dos algoritmos estudados.

A RL multinomial se apresenta como excelente opção para classificação, muito embora, o uso da função de verossimilhança possa prejudicar o seu desempenho frente a dados desbalanceados, favorecendo a classe majoritária (GONÇALVES; GOUVÊA; MANTOVANI, 2013). Os classificadores baseados na função de verossimilhança podem apresentar excelente acurácia global, entretanto, baixa assertividade para os dados de interesse (classes minoritárias) (CASTRO; BRAGA, 2011).

No espaço dos métodos estatísticos, o SVM se apresenta como poderoso classificador binário, além de poder ser usado para múltiplas classes, possui capacidade generalizar problemas de alta dimensionalidade e não lineares (BOAS VILAS, 2021). Possui bom desempenho para base de dados menores e melhor desempenho que a RL para *datasets* desbalanceados devido o uso das funções de *kernel* (CASTRO; BRAGA, 2011).

No contexto de classificação de amostras que são representadas como pontos definidos em um espaço de recursos, o método *K-ésimos* vizinhos mais próximos (KNN), baseado em distâncias, se apresenta como uma das arquiteturas de aprendizado de máquina mais diretas (OLIVEIRA, 2010). Dentre as vantagens do KNN, cita-se que a partir uma base de dados suficientemente grande e com valor de K adequado, o KNN tem potencial para resolver problemas não lineares (BOAS VILAS, 2021).

As ANNs, um clássico na literatura de aprendizado de máquina não poderia deixar de ser estudado. Enquanto o PCA, será utilizado para visualização gráfica das principais componentes e no apoio ao pré-processamento dos dados.

No próximo capítulo serão apresentadas as metodologias aplicadas no pré-processamento de dados, na aplicação dos métodos convencionais, dos métodos de aprendizado de máquina e avaliação dos métodos de classificação, além de apresentar a proposta de arquitetura híbrida de análise DGA.

## 4 METODOLOGIA

Uma característica típica no processo DGA, são *datasets* desbalanceados e relativamente pequenos, que associados as incertezas da gascromatografia podem resultar em erro de classificação e comprometer a capacidade dos dados de representar os tipos de falhas (IKESHOJI, 2020). Neste sentido, a presente pesquisa visa contribuir apresentando uma base de dados que possui boa capacidade de representação do problema intrínseco.

A base de dados composta inicialmente com 2585 amostras, sendo 80% de dados reais coletados de transformadores ao longo de 20 anos de operação da empresa brasileira de geração e transmissão e de literaturas consolidadas, a exemplo da IEC TC10:1999, além dos dados contidos em (ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2017; FILHO, 2012; LI, 2019; KIRKBAS et al., 2020).

Nas seções seguintes, será apresentada a metodologia para a seleção e classificação das amostras da empresa brasileira de geração e transmissão. O método de análise para aferição da capacidade do *dataset* representar o problema proposto, além dos métodos para implementação dos classificadores inteligentes e convencionais.

Nesta dissertação, buscou-se avaliar três classes para as amostras da base de dados: falha elétrica, térmica e casos normais.

### 4.1 Amostras da empresa de geração e transmissão

Os dados da empresa brasileira de geração e transmissão foram classificados a partir do diagnóstico do sistema DianE e aplicação das metodologias convencionais apresentadas anteriormente, seguindo os critérios abaixo:

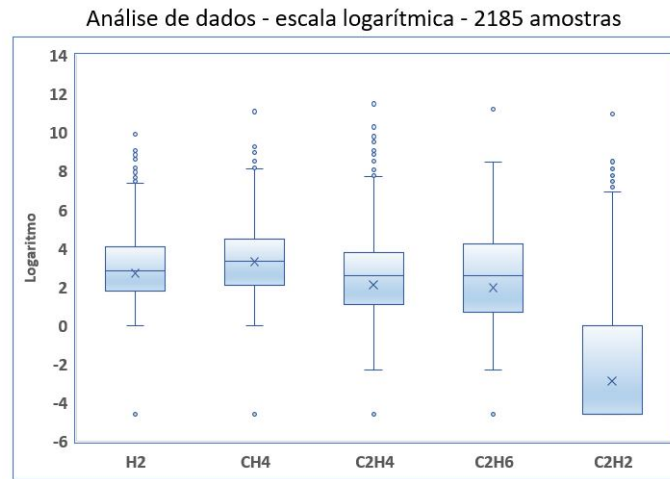
- Amostras que não apresentavam aumento de concentração no histórico do equipamento, considerados valores típicos (amostras normais), foram classificadas normais;
- Amostras que apresentavam valores nulos (zero) de concentração, foram atribuídos valores 0.01 para fins matemáticos de aplicação dos métodos;
- Amostras que apresentavam resultados inconclusivos para três ou mais metodologias convencionais foram excluídas da base de dados.

Deste modo, foram excluídas 400 amostras e deu-se início a análise gráfica a partir da logarithmização dos dados em função de sua alta variância.

Na Figura-13 apresenta-se a distribuição dos gases, observa-se a maior quantidade de amostras na região de 2 a 4, que se refere a baixas concentrações gasosas, em função do maior número de casos normais, exceto o  $C_2H_2$ , que normalmente possui zero de concentração para diagnósticos normais. Neste caso, é importante ressaltar que as amostras com valores nulos (zero) foram atribuídos 0.01 em função da logarithmização do *dataset*.

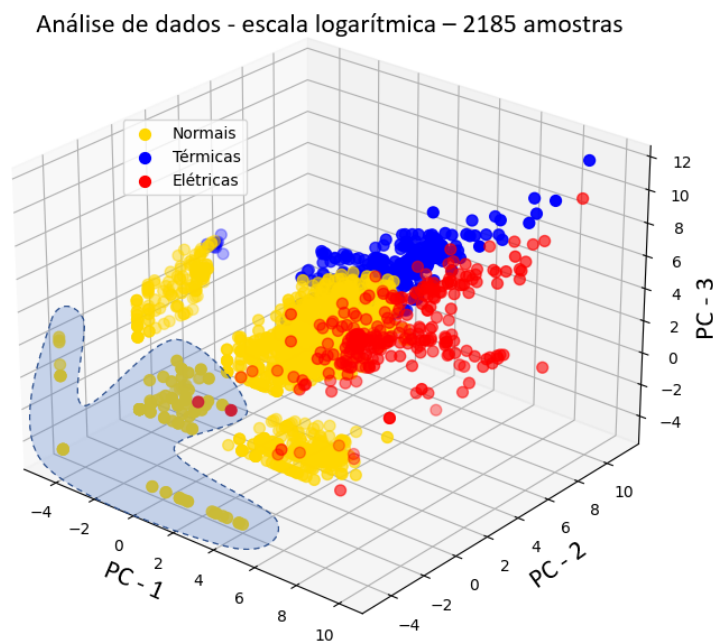
As amostras discrepantes na região superior do gráfico *boxplot*, são casos de falhas, que apresentam altas concentrações em função do tipo de defeito presente. Enquanto as inferiores podem estar relacionadas a casos de *outliers* e serão melhor analisadas a seguir.

Figura 13 – Distribuição de dados logaritmizados - *boxplot*



Fonte: Próprio autor

Figura 14 – Distribuição de dados logaritmizados - 3D



Fonte: Próprio autor

O gráfico de dispersão da Figura-14 exibe a distribuição espacial do *dataset*, representado pelas suas componentes principais PC1, PC2 e PC3. No qual, é possível observar a interação entre dados e a existência de um padrão de separabilidade, embora possua regiões com forte sobreposição de classes. Além disso, a análise permite inferir a presença de dados sensíveis ao processo de AM na região destacada do gráfico. Observa-se também que nem todas as amostras nulas (zero de concentração) são de fato *outliers*, uma vez que, se percebe a existência de grupos maiores nesta condição.

Sobre amostras com baixa concentração existem levantamentos estatísticos que apontam para incertezas do processo DGA, conforme relata a IEC 60599:2015:

- Relaciona as incertezas nas medições típicas dos gases entre  $\pm 15\%$ , podendo chegar a  $\pm 30\%$  para baixos valores de concentrações ( $< 5$  vezes a medição analítica);

Deste modo, justificado pela abordagem da IEC-60599:2015 sobre o problema de análise DGA, e considerando que todas as amostras de casos normais são inéditas, um pequeno grupo de dados desta classe foram considerados *outliers*.

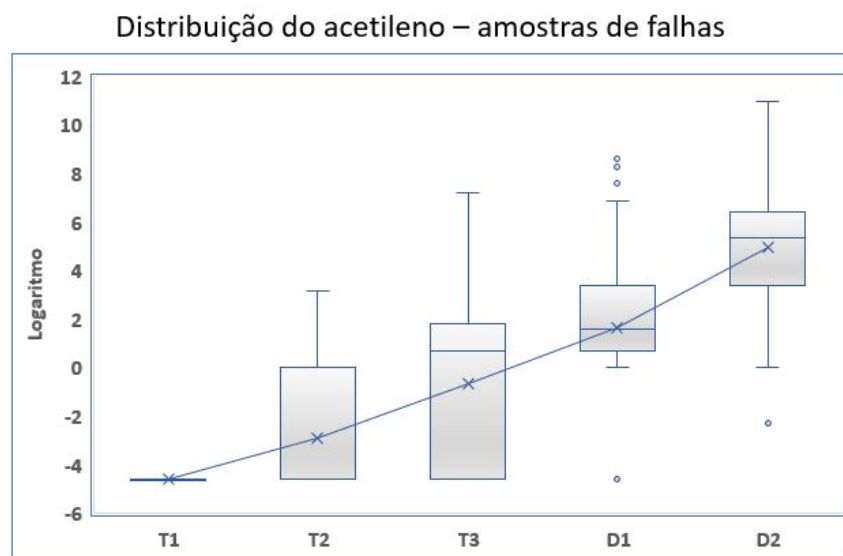
Desta forma, a partir das componentes principais observadas na Figura-14, realizou-se a aplicação do *K-means*, para *K* igual a 16 e aplicação do método do cotovelo, cuja área destacada formou três *clusters* com menor quantidade de amostras, totalizando 181, cerca de 12% das amostras de casos normais, as quais, foram identificadas e excluídas.

Na prática, o *K-means* utiliza uma técnica iterativa que particiona o conjunto de dados, buscando minimizar a soma do quadrado da distância euclidiana de cada *cluster*. Inicialmente, escolhe o número de *k* centroides para o agrupamento pré-estabelecido, em seguida associa cada amostra da base de dados ao centro mais próximo. Este processo é repetido em diversas interações até que o centroide de cada agrupamento não mude.

## 4.2 Análise da capacidade do *dataset*

Na análise da capacidade do *dataset* para generalizar o problema proposto, foram traçadas as linhas médias por tipo de falha. A Figura-15 apresenta a distribuição do  $C_2H_2$ , onde observa-se a evolução da concentração em função das falhas (T1/2/3 e D1/2), cujo comportamento da curva é típico para este gás.

Figura 15 – Distribuição do acetileno.



Fonte: Próprio autor

De modo similar, aplicou-se a curva de tendência ao percentual de concentração de cada gás da mesma amostra em todo o *dataset*, cuja equação de modelagem é uma função polinomial de sexta ordem e o gráfico resultante possui formas semelhantes aos da norma IEEE C57.104:2019. Estas curvas auxiliam na identificação de padrões, tendências e na comparação de medidas. Porém, quanto maior a ordem da função polinomial, maior a complexidade para a explicação, cujas extremidades tendem a sofrer influência dos dados sob análise e podem apresentar tendência discrepante ao fenômeno analisado (JAKOB; YOUNG, 2006).

### 4.3 Aplicação dos métodos convencionais

Os métodos convencionais foram implementados em *Python* conforme limiares contidos nas Tabelas-3, 4, 6 e 7, além da Figura-8. Dentre os aspectos relevantes citam-se: o triângulo de Duval sempre aponta algum tipo de falha, mesmo para amostras normais. O método da IEC 60599:2015 não possui diagnóstico normal, enquanto Rogers apresentou desempenho extremamente baixo para esta classe. Por este motivo, somente os casos de falhas foram apresentadas a estes métodos. Para o Gás chave e Doernenburg foram considerados o desempenho de todas as classes.

### 4.4 Aplicação dos métodos inteligentes

Nesta aplicação, a base de dados foi normalizada a partir da média e desvio padrão para entrada de todos os algoritmos testados e particionada em treinamento (67%) e teste (33%). Exceto a ANN, que teve a base de dados dividida em 70% para treinamento e 30% para teste.

#### 4.4.1 Regressão Logística - LR

Na implementação do algoritmo RL, foi utilizado método multinomial, cuja função de perda é definida pela aplicação de entropia cruzada. Para o hiperparâmetro *class weight* foi definido que todas as classes possuem o mesmo peso. O otimizador *lbfgs* foi o que melhor performou, os demais parâmetros foram os *default* do *Sklearn*.

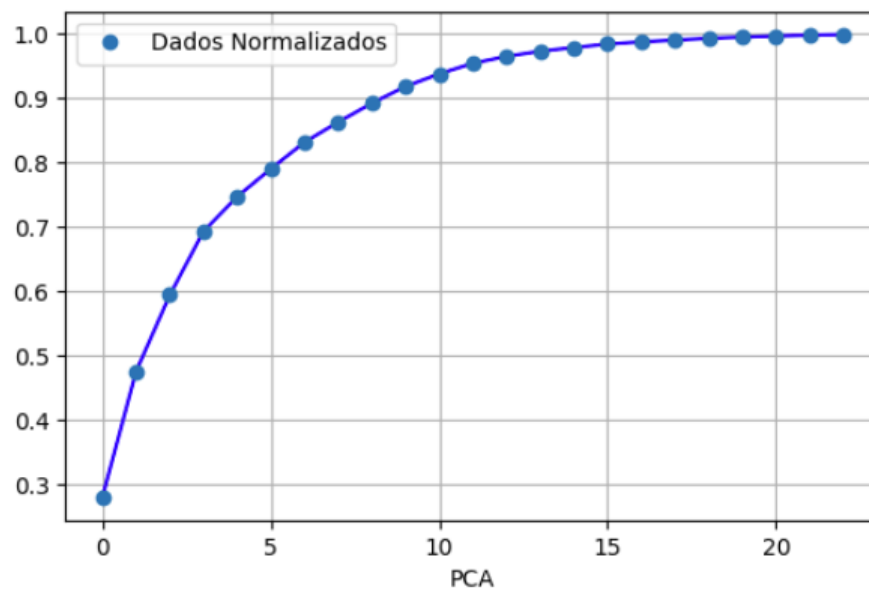
#### 4.4.2 Máquina de Vetores de Suporte - SVM

Inicialmente foi implementado algoritmo PCA, onde o vetor de entrada foi ampliado de 5 (gases DGA) para 31 dimensões. Das quais, 8 dimensões foram criadas pelos métodos estatísticos de análise exploratória de dados: *Kurtosis*, *Skewness*, *Crest Factor*, *Shape Factor*, *Impulse Factor*, *Margin Factor*, *Max log e Sqrt*. Outras 20 dimensões, a partir dos dados normalizados, logaritmizados, *sqrtnmed* e amostras originais. Além de 3 dimensões criadas pelas relações de Rogers.

O SVM possui poucos parâmetros de ajuste, dentre os quais destacam-se o parâmetro  $C$ , que é uma constante que atua como uma função de penalidade e prevenindo que *outliers* afetem o hiperplano ótimo. O parâmetro *gamma* atua no comportamento da função *gaussiana*, cujo aumento desse valor, tende a considerar amostras mais distantes do hiperplano de separação (hiperplano ótimo). Além do *kernel*, utilizado para transformar o conjunto de dados de treinamento de forma que uma superfície de decisão não linear seja capaz de se transformar em uma equação linear em um número maior de espaços dimensionais, dentre os quais destacam-se: *linear*, *rbf*, *poly* e *sigmoid*.

Para o SVM, foram utilizadas as dez primeiras componentes principais que representam cerca de 93%, Figura-16, das características originais do *dataset*. A sintonia do SVM foi realizada a partir da escolha automática dos parâmetros que se deseja atribuir, para tanto, foi criada uma variável contendo um dicionário dos hiperparâmetros já citados e utilizada a ferramenta *GridSearchCV*. O processo de busca dos melhores parâmetros fora certificado através de validação cruzada ( $CV=5$ ). Os melhores parâmetros foram definidos com  $C=100$ ,  $gamma=0.01$  e *kernel rbf*.

Figura 16 – Soma cumulativa das variâncias



Fonte: Próprio autor

#### 4.4.3 Redes Neurais Artificiais - ANN

Na implementação da ANN algumas variações dos hiperparâmetros foram testadas, a exemplo do otimizador, função de custo, *kernel*, função de ativação e outros. Sobre o número de camadas ocultas e o número de neurônios por camada também foram testadas diferentes configurações. As variações de arquitetura e hiperparâmetros foram testadas utilizando a base de dados normalizada e logaritmizada e implementadas através de ferramenta de auto ajuste do *Keras*.

Sobre o pré-processamento da base de dados, observou-se melhor performance do algoritmo quando a normalização era aplicada ao *dataset* logaritmizado.

Para atualização dos pesos nas interações sinápticas foi utilizado o método de descida do gradiente estocástico, cujo pacote de amostras (*batch size*) que melhor performou foi igual a 10, enquanto o número de interações foi de 100 épocas. O otimizador *adam* obteve melhor desempenho que o tradicional *sgd*, o que era esperado uma vez que o primeiro é uma melhoria do segundo. Auxiliado por uma taxa de aprendizagem igual 0.01, e de decaimento 0.001, além do *clipvalue* igual 0.5, parâmetro que auxilia o otimizador evitando que valores próximos ao domínio da função fiquem dispersos no gradiente.

Sobre as camadas ocultas de neurônios, a ANN densa implementada, foi testada com diferentes de número de camadas e de neurônios por camada, além das funções de ativação *relu* e *selu*. Dentre as combinações testadas, a arquitetura 12-12-8-6, nas camadas ocultas e ativadas pela função *selu* e inicializador (*kernel*) normal, apresentaram excelente desempenho nas fases de treinamento e teste. Na camada de saída optou-se por três neurônios, número de classes desejada (normal, falha térmica e falha elétrica) e função de ativação *softmax* que retorna probabilidades e indicada para problemas de múltiplas classes e a função de custo *categorical crossentropy*.

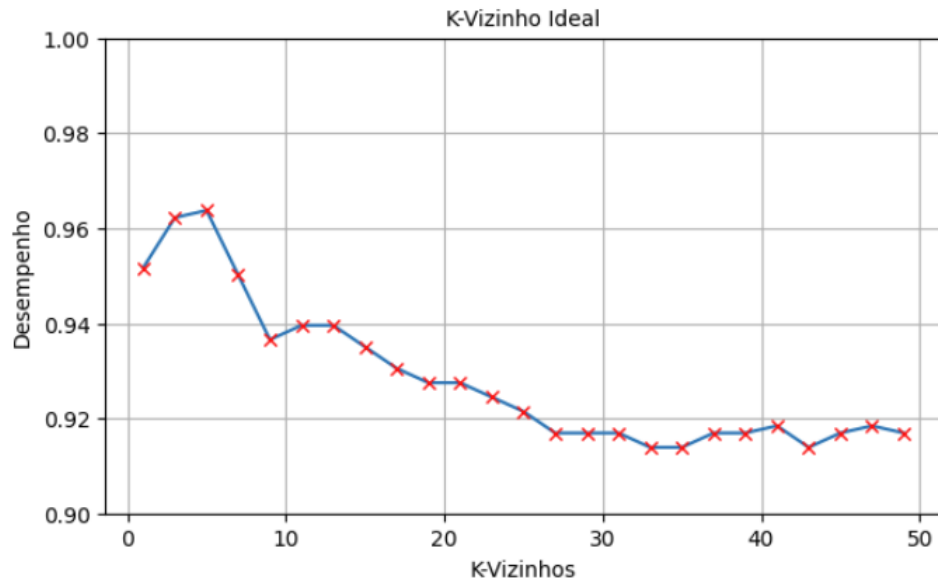
Na fase de treinamento, o aumento do número de épocas se mostrou diretamente proporcional ao desempenho do algoritmo. Entretanto, apresenta assertividade relativamente baixa na fase teste, caracterizando *overfitting*. Enquanto o aumento do pacote de amostras (*batch size*) resulta em baixo desempenho na fase de testes, sua redução implica em alto custo computacional.

A sintonia da ANN foi realizada a partir da escolha automática dos parâmetros que se deseja atribuir, para tanto, foi criada uma variável contendo um dicionário dos hiperparâmetros já citados. O processo de busca dos melhores parâmetros fora certificado através de validação cruzada ( $CV=5$ ).

#### 4.4.4 k-ésimos vizinhos mais próximos - KNN

Na fase de treinamento foi realizada a sintonia automática, para  $K=5$ , ver Figura-17. Foram testados os métodos de pesos uniformes e pesos pelo inverso da distância, no qual os pesos uniformes apresentaram melhor desempenho. Para a função de distância foi adotada a métrica euclidiana. Na escolha do parâmetro *algorithm*, onde o *Sklearn* dispõe de três opções, foi adotado o modo automático que avalia conforme a distribuição dos dados o melhor classificador.

Figura 17 – K vizinho ideal



Fonte: Próprio autor

#### 4.4.5 Avaliação dos classificadores inteligentes e convencionais

Em problemas de classificação em que se deseja medir a capacidade do algoritmo de extrair padrões corretamente, os erros e acertos do modelo devem ser avaliados conforme as características do processo.

Na análise DGA, o diagnóstico de falso negativo representa deixar em operação um transformador defeituoso que, dependendo das características operacionais do equipamento, uma falha pode ocasionar perdas imensuráveis. Enquanto um falso positivo, pode proporcionar uma programação de manutenção indevida, contudo, menos danosa ao setor elétrico. Deste modo, a partir da extração da matriz de confusão dos métodos inteligentes, foi calculada a métrica de avaliação sensibilidade.

Outra importante aplicação da matriz de confusão utilizada neste trabalho, foi a análise de concordância entre os métodos de AM aqui apresentados, onde método de *Kappa de Cohen* foi aplicado com ponderação linear.

Nos métodos convencionais, face aos inúmeros resultados indeterminados, a avaliação levou em consideração as amostras com diagnóstico, cujas métricas aplicadas foram precisão e acurácia. É importante ressaltar as limitações dos métodos convencionais para classificação de amostras normais, onde algumas metodologias apresentam resultados inconclusivos ou mesmo não são recomendadas para análise desta classe. Existe ainda o caso do Triângulo de Duval, que sempre atribui algum tipo de falha mesmo para amostras normais.

Os resultados extraídos das matrizes de confusão estão apresentados na Tabela-17, onde os resultados, discussões e considerações estão descritas no Capítulo 7.

#### 4.4.6 Metodologia de implementação de arquitetura de análise DGA

A composição desta estrutura híbrida foi definida a partir do desempenho individual dos métodos. E está composta por algoritmos de AM, associado ao um método convencional para a classificação de casos normais, falhas térmicas e elétricas, sendo assim estabelecida como uma abordagem híbrida com elevado grau de assertividade.

A proposta da arquitetura híbrida consiste em utilizar os classificadores em cascata. Inicialmente a amostra é apresentada ao KNN, que emitirá o diagnóstico para classificação de amostras normais, enquanto a ANN atua na contraprova deste diagnóstico. De modo que, na etapa para classificação de falha tenhamos um método convencional operando em conjunto com um inteligente. Foram escolhidos dois classificadores, KNN e ANN, e o método convencional de Duval.

A arquitetura, nomeada Sistema de Diagnóstico Inteligente (SDI), obteve desempenho superior aos métodos utilizados individualmente. Os testes foram realizados a partir da análise de 100 novas amostras, composta por 60 normais, 20 térmicas e 20 elétricas, além de três estudos de caso.

## 5 CONJUNTO DE DADOS - ANÁLISE E PRÉ-PROCESSAMENTO

Em aprendizado de máquina, a base de dados pode ser descrita como a fonte de extração de conhecimento das arquiteturas de inteligência artificial. Uma base de dados robusta e confiável, capaz de generalizar o problema intrínseco, é o primeiro passo para alcançar bons resultados de classificação. Nesse contexto, se buscou por uma base de dados diversa, composta por amostras de dados reais coletados de transformadores ao longo de 20 anos de operação da empresa brasileira de geração e transmissão e de literaturas consolidadas, a exemplo da IEC TC10:1999, além dos dados contidos em ([FILHO, 2012](#); [LI, 2019](#); [ISLAM](#); [LEE](#); [HETTIWATTE, 2017](#); [KIRKBAS et al., 2020](#)).

Em geral, os algoritmos de aprendizado de máquina apresentam melhor desempenho para conjunto de dados balanceados, ou seja, quando existe uma relação de equilíbrio entre a quantidade de amostras de cada classe da base de dados. No conjunto de amostras, nota-se o forte desbalanceamento entre classes, cuja tendência para a classe majoritária pode ser transferida para o modelo. Por exemplo, neste caso, têm-se cerca de 35 por cento de amostras que apresentam falha, pode-se obter 65% de acurácia apenas classificando tudo como normais.

O estudo prévio de gases dissolvidos deve promover entendimento da dinâmica do problema e suas variáveis, para em seguida, a partir da análise da base de dados sejam adotadas técnicas de pré-processamento capazes de melhorar o desempenho dos algoritmos aplicados. A análise de gases dissolvidos parte do princípio que um transformador de potência em boas condições operativas, de acordo com ([CARDOSO et al., 2005](#)), gera pouco ou nenhum dos gases tido como gás de falha. A natureza do tipo de falha é representada pela concentração dos gases e está relacionada ao nível de energia e temperatura no local da falha, muito embora, falhas incipientes evoluam para dois ou mais tipos de falha, dificultando o diagnóstico, caracterizando um problema de classificação não-linear e de múltiplas classes ([IKESHOJI, 2020](#)).

Percebe-se a complexidade do problema, cuja busca por algoritmos que se adaptem a dados desbalanceados e não-lineares e a necessidade de tratamento do *dataset* aplicando técnicas de pré-processamento, estão abordados nesta dissertação. Com este foco, foram utilizadas ferramentas de estatísticas, logaritmos e normalização, além da aplicação de algoritmos de clasterização (*K-means*) e redução de dimensionalidade (PCA).

Deste modo, apresenta-se a base de dados composta inicialmente com 2585 amostras, cujas análises seguintes irão possibilitar a identificação e exclusão de amostras sensíveis ao aprendizado de máquina.

## 5.1 Base de dados para análise DGA

### 5.1.1 Base de dados de empresa de geração e transmissão

A Resolução Normativa ANEEL nº 906, de 8 de dezembro de 2020, seção 4.2, regulamenta os requisitos mínimos de manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão da rede básica do setor elétrico. Neste aspecto, particularmente a Eletrobrás Eletronorte possui um robusto sistema de monitoramento de manutenções preditivas, como análise de óleo isolante e termovisão, além do monitoramento de grandezas elétricas, por exemplo, o fator de potência da isolação de buchas de transformadores de potência. No Capítulo 2, item 2.2.1.6, detalhes deste sistema (DianE) foram abordados.

Especificamente, as amostras para análise gascromatográfica são coletadas semestralmente em todos os transformadores de potência da rede básica de transmissão e transformadores elevadores das usinas hidrelétricas da Eletronorte. Os ensaios gascromatográficos são realizadas no Laboratório Central (LACEN), localizado em Belém-PA e armazenadas no Sistema DianE, gerando uma base de dados numerosa, possuindo histórico de dados dos últimos 20 anos de vários transformadores do setor elétrico.

Apesar das metodologias convencionais, como as relações de Rogers, Gás chave, Laborelec, da IEC e ABNT, implementadas no DianE, apontarem falhas incipientes em várias amostras, o sistema faz uso de outras técnicas de análise já comentadas, a exemplo da curva de tendência, que analisa o percentual de aumento de concentração gasosa no óleo, que classifica as amostras, em sua imensa maioria, como normais.

No contexto de análise do sistema DianE, o especialista dispõe além do parecer das metodologias convencionais de forma automatizada, das informações sobre a condição operativa do equipamento para conclusão do diagnóstico, que garante alta assertividade na classificação das amostras quanto ao tipo de falha incipiente e/ou condição normal.

#### 5.1.1.1 Seleção e classificação de amostras da empresa de geração e transmissão

Os transformadores elevadores, de hidrelétricas, face a predominância de problemas térmicos (TENBOHLEN; JAGERS; VAHIDI, 2017), apresentam elevada concentração de gases em relação aos transformadores de transmissão. Por este motivo, buscou-se diversificar o grupo de transformadores de forma a abranger variadas condições operativas. Foram selecionados 28 transformadores da rede básica de transmissão, distribuídos nas classes de tensão 230kV e 550kV, além de 23 transformadores elevadores, 13,8/550kV.

Inicialmente as 2295 amostras estavam distribuídas em 13 de descargas de baixa intensidade ( $D1$ ), 24 de descargas alta intensidade ( $D2$ ), 50 para descargas parciais ( $PD$ ), 127 falhas térmicas ( $T1$  e  $T2$ ), 71 falhas térmicas ( $T3$ ) e 2010 normais. Contudo, algumas amostras dos transformadores elevadores, analisadas pelas metodologias convencionais apontavam falhas incipientes, no entanto, no contexto operativo daquele transformador, era classificada normal, pois não apresentava tendência de evolução das concentrações de gases ao longo dos anos. Todavia, o objetivo deste trabalho é propor uma arquitetura

híbrida de análise DGA para apoio aos especialistas de manutenção na identificação de transformadores com formação de falhas incipientes, para posterior análise do ciclo de operação, avaliando carregamento, existência de vazamentos, ocorrência de curto-circuito ou outro tipo de falha. Desse modo, as amostras dos transformadores elevadores passaram por novo processo de classificação, avaliadas isoladamente, fora do contexto operativo do transformador e seguindo os critérios abaixo, estabelecidos no contexto da metodologia deste trabalho.

Aplicados os critérios de classificação, foram excluídas 400 amostras, as demais obtiveram a seguinte estratificação: 26 amostras de descargas de baixa intensidade ( $D1$ ), 32 de descargas alta intensidade ( $D2$ ), 58 para descargas parciais ( $PD$ ), 188 falhas térmicas ( $T1$  e  $T2$ ), 115 falhas térmicas ( $T3$ ) e 1476 amostras normais, totalizando 1895 amostras.

### 5.1.2 Base de dados IEC TC10:1999

Citada por grande parte dos autores de análise DGA, a base de dados da IEC TC10:1999, foi construída ao longo de muitos anos, composta a partir da análise por especialistas de equipamentos defeituosos retirados de operação, cujos resultados gascromatográficos estavam disponíveis para correlação, além de valores típicos (normais) observados em várias dezenas de milhares de transformadores operando em mais de 15 redes de energia individuais em todo o mundo (DUVAL; DEPABLA, 2001), tem se apresentado como uma excelente base de dados para análise e testes de estratégias de diagnóstico.

Um aspecto importante sobre a base de dados IEC TC10:1999 é que a partir deste conjunto de dados foi desenvolvida a metodologia convencional do triângulo de Duval, proposto inicialmente na década de 1980 por Michel Duval (SENNA, 2010).

Entretanto, alguns cuidados devem ser observados ao utilizar a base de dados IEC TC10:1999, pois as amostras disponíveis contemplam equipamentos, como reatores, transformadores de corrente e de potencial, além de diferentes tipos de transformadores de potência, por exemplo, com e sem comunicação com o comutador de tap (OLTC), que podem influenciar no diagnóstico (IEC-60599, 2015).

Neste trabalho foram utilizadas 37 amostras de transformadores de potência sem comunicação com OLTC, distribuídas em 7 amostras de falha de baixa energia ( $D1$ ), 16 amostras de alta energia ( $D2$ ), 6 amostras classificadas com baixa e média temperatura ( $T1$  e  $T2$ ) e 8 amostras de alta temperatura ( $T3$ ).

### 5.1.3 Outras bases de dados

Demais amostras, somente casos de falhas, foram extraídas das bases de dados IEEE Dataport (LI, 2019), CPFL Companhia Paulista de Força e Luz (FILHO, 2012) e artigos (ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2017; KHERIF et al., 2021; KIRKBAS et al., 2020). Reunindo 253 amostras distribuídas em 50 descargas de baixa intensidade ( $D1$ ), 48 descargas

de alta intensidade ( $D2$ ), 30 descargas parciais ( $PD$ ), 61 falhas térmicas  $T < 700^{\circ}\text{C}$  ( $T1$  e  $T2$ ), 64 falhas térmicas  $T > 700^{\circ}\text{C}$  ( $T3$ ).

## 5.2 Tratamento da base de dados DGA

Fase que antecede a análise e modelagem do problema, o tratamento de dados, se apresenta como procedimento imprescindível no processo de classificação para minimizar os erros de classificação. Nesta etapa, realiza-se o pré-processamento, aplicando técnicas para limpeza, visualização gráfica, transformação e seleção de atributos.

Nos itens seguintes, estão apresentadas as técnicas de pré-processamento, que serão aplicadas na base de dados compilada a partir da reunião das amostras de literaturas pesquisadas e somadas a IEC TC10:1999 e empresa de geração e transmissão, totalizando 2185 amostras distribuídas em 83 descargas de baixa intensidade ( $D1$ ), 96 descargas de alta intensidade ( $D2$ ), 88 descargas parciais ( $PD$ ), 255 falhas térmicas  $T < 700^{\circ}\text{C}$  ( $T1$  e  $T2$ ), 187 falhas térmicas  $T > 700^{\circ}\text{C}$  ( $T3$ ) e 1476 amostras normais.

### 5.2.1 Pré-processamento e análise gráfica da base de dados DGA

A análise gráfica de dados pode ser conceituada pelo processo no qual transforma-se números em conhecimento. Faz-se necessário o entendimento prévio do fenômeno envolvido, entender sua origem, se de natureza química, física, térmica, elétrica etc.

Analisa-se, dentre outras características, a dependência de uma grandeza em relação a outra, a distribuição em planos bidimensional e tridimensional, a dispersão, além da aplicação de metodologias matemáticas de análises e tratamento de dados, como normalização, logaritmos, Análise de Componente Principal (PCA) e outros. Nesta abordagem, avaliou-se ainda a distribuição dos dados em função do tipo de falha.

#### 5.2.1.1 Normalização e logaritmos

Em sua essência, a normalização busca sem distorcer as diferenças nos intervalos entre as amostras, alterar seus valores para uma escala comum, pois valores muito altos podem influenciar no resultado da classificação e não necessariamente porque são mais importantes como preditor. Nas Tabelas-8, 9 e 10, observa-se os valores máximos, mínimos, média e variância das amostras para o dataset puro, normalizado e logaritimizado, respectivamente. É possível notar que existem intervalos muito diferentes entre amostras, cuja normalização e logarítmicos reduzem significativamente esta discrepância.

Tabela 8 – Estratificação de *dataset*.

|           | Hidrogênio | Metano | Etileno | Etano | Acetileno |
|-----------|------------|--------|---------|-------|-----------|
| Máximo    | 22566      | 64064  | 95650   | 72128 | 57000     |
| Mínimo    | 0,010      | 0,010  | 0,010   | 0,010 | 0,010     |
| Média     | 138,307    |        |         |       |           |
| Variância | 1617,387   |        |         |       |           |

Fonte: Autor.

Tabela 9 – Estratificação de *dataset* normalizado.

|           | Hidrogênio | Metano  | Etileno | Etano   | Acetileno |
|-----------|------------|---------|---------|---------|-----------|
| Máximo    | 22,0092    | 41,7582 | 41,1886 | 44,4541 | 43,7308   |
| Mínimo    | -0,1804    | -0,1000 | -0,0801 | -0,0648 | -0,0490   |
| Média     | 2,836      |         |         |         |           |
| Variância | 1,000      |         |         |         |           |

Fonte: Autor.

Tabela 10 – Estratificação de *dataset* logaritmizados.

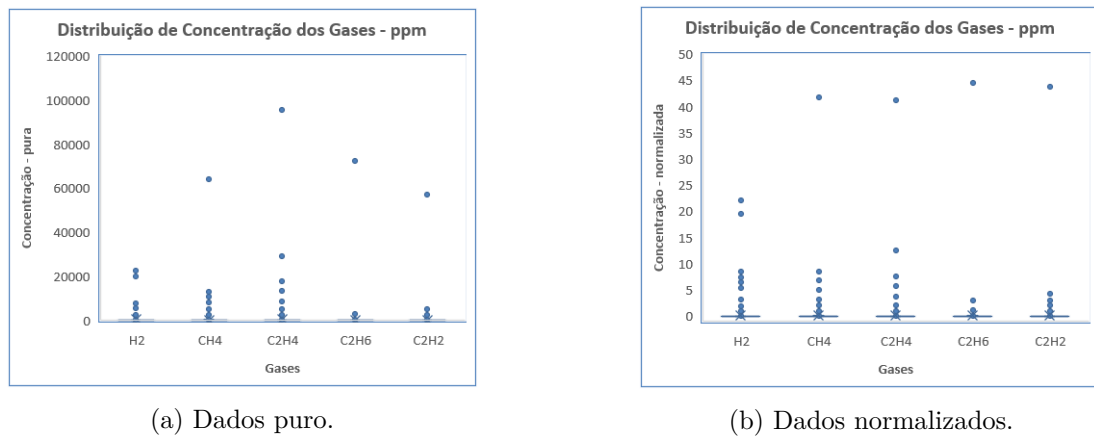
|           | Hidrogênio | Metano  | Etileno | Etano   | Acetileno |
|-----------|------------|---------|---------|---------|-----------|
| Máximo    | 10,0242    | 11,0676 | 11,4684 | 11,1862 | 10,9508   |
| Mínimo    | -4,6052    | -4,6052 | -4,6052 | -4,6052 | -4,6052   |
| Média     | 1,443      |         |         |         |           |
| Variância | 3,495      |         |         |         |           |

Fonte: Autor.

Na distribuição dos dados das Figuras-18a e 18b, têm-se os gráficos com os dados puros (escala original das amostras) e normalizados, respectivamente. Nesta primeira visualização, percebe-se a forte presença de *outliers*, além da dificuldade de visualização mesmo na escala dos dados normalizados. Adicionalmente, observa-se que poucos dados de CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> estão dispersos e ocasionaram aumento da média e variância.

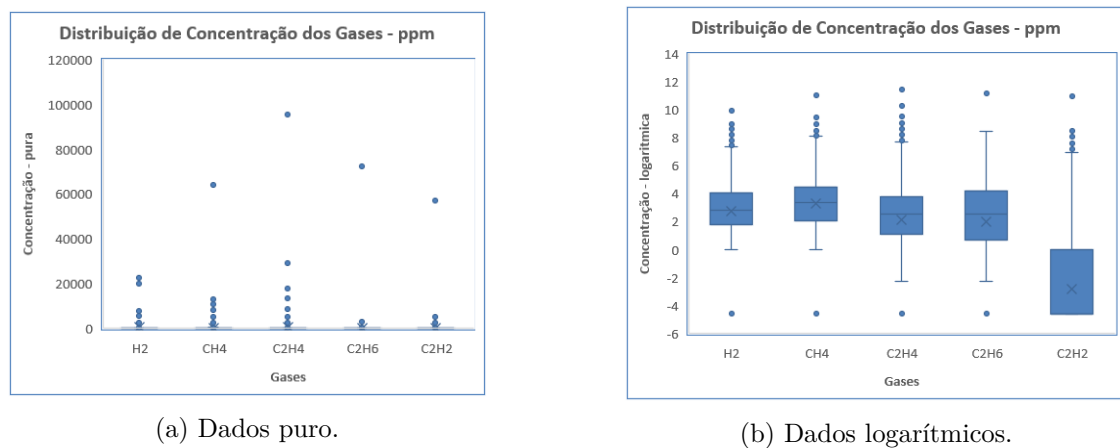
No gráfico com dados logarítmicos, Figura-19b, apresenta melhor aspecto visual, pois as delimitações dos quartis do *boxplot* estão bem delineadas. Contudo, é importante ressaltar que, a melhor visualização gráfica pode não refletir no desempenho das arquiteturas de aprendizado de máquina. Todavia, fica evidenciado que esta etapa no pré-processamento é fundamental para análise e interpretação da distribuição de dados.

Figura 18 – Gráficos de distribuição comparativo das concentrações dos gases em ppm - dados puros e normalizados.



Fonte: Autor

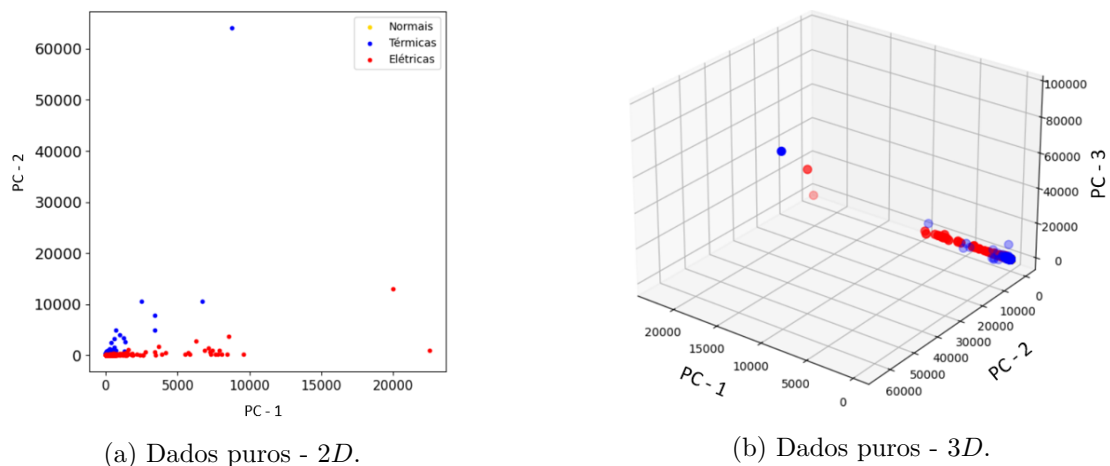
Figura 19 – Gráficos de distribuição comparativo das concentrações dos gases em ppm - dados puros e lognormal.



Fonte: Autor

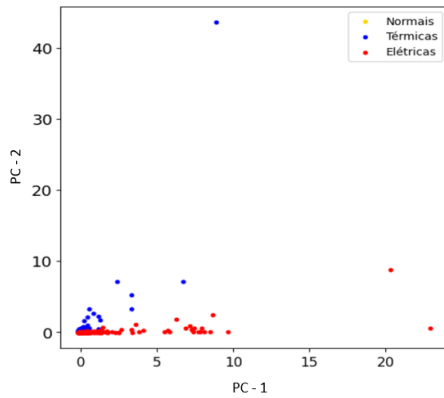
Quanto a visualização da distribuição dos dados em relação aos tipos de falhas, Figuras-20a até a 22b, novamente a distribuição logarítmica permite melhor análise.

Figura 20 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados puros.

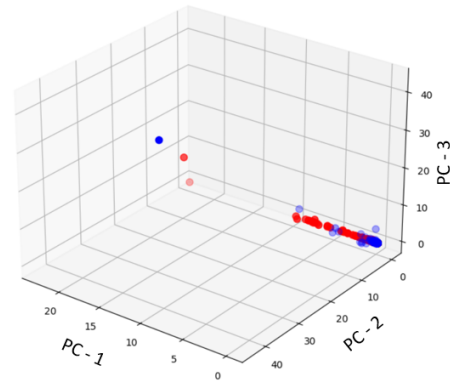


Fonte: Autor

Figura 21 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados normalizados.



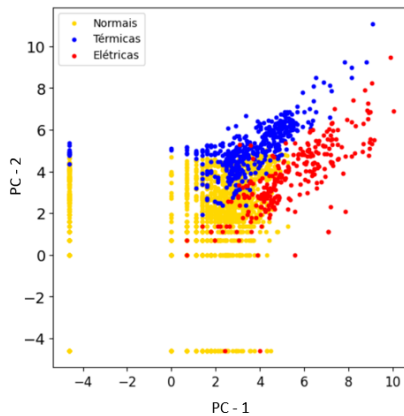
(a) Dados normalizados - 2D.



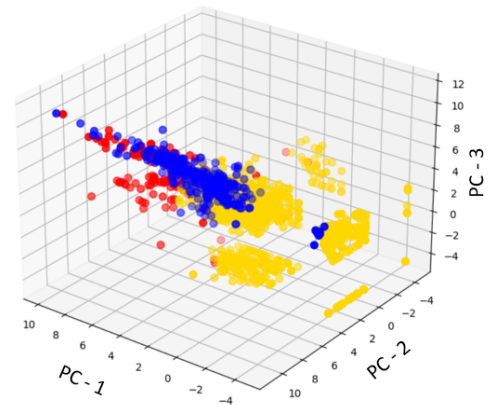
(b) Dados normalizados - 3D.

Fonte: Autor

Figura 22 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 2D e 3D dados logaritmicados.



(a) Dados logaritmicados - 2D.



(b) Dados logaritmicados - 3D.

Fonte: Autor

### 5.2.1.2 Eliminação de *outliers* da base de dados DGA

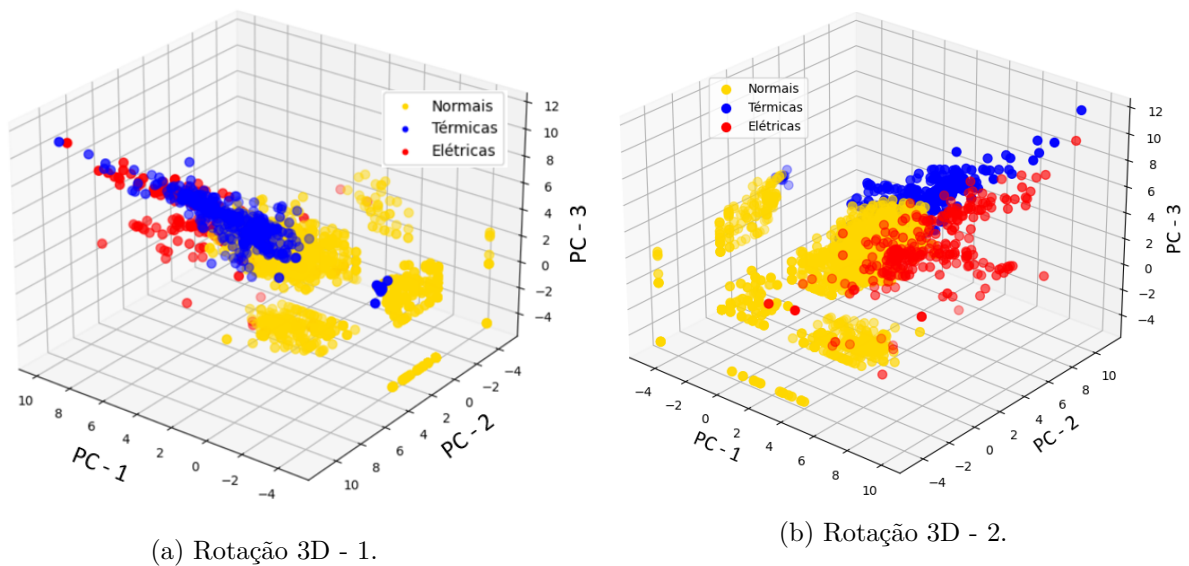
Dentre as etapas de pré-processamento, a eliminação de *outliers*, é fundamental para o sucesso do algoritmo, trata-se do processo exclusão de amostras sensíveis ao processo de análise da arquitetura de aprendizado de máquina, seja por erro de classificação ou interferência externa na amostra.

No contexto de incertezas da análise DGA, conforme apresentado no Capítulo 2, têm-se a contaminação de amostras por fatores, muitas vezes, desconhecidos, a exemplo do tempo decorrido após uma falha para coleta de amostra (os gases tendem a se dissolver no óleo com o tempo) e problemas de hermeticidade das seringas, além de equipamentos que operam com comutador de tap comunicado ao transformador (geram gases durante as comutações), equipamentos selados etc., estas situações contribuem para surgimento de *outliers*, cujas concentrações gasosas podem apresentar valores muito baixos ou elevados. Uma vez que, as amostras não fornecem detalhes sobre os tipos de defeitos, por exemplo, casos que envolvam dois ou mais tipos de falhas, além de concentrações atípicas, que permitam excluí-las, faz-se necessário adotar técnicas de eliminação de *outliers*.

Na análise gráfica a seguir, é importante destacar que a base de dados está logaritimizada. Na Figura-23a e 23b, percebe-se muitas amostras normais contidas nos grupos de falhas. Outro ponto a se destacar, é o desbalanceamento da base de dados, cuja classe normal representa cerca de 67% da base de dados. Observa-se ainda a formação de pequenos grupos nas amostras normais, inferindo a presença de *outliers*.

A partir desta análise, visando reduzir o desbalanceamento e exclusão de amostras que não contribuem para otimização do algoritmo, realizou-se aplicação do *K-means*, utilizando o método do cotovelo em toda a base de dados, dividido em dois grupos, avaliando os casos normais e de falha separadamente.

Figura 23 – Gráficos de dispersão das amostras dos gases - 3D dados logaritimizados.



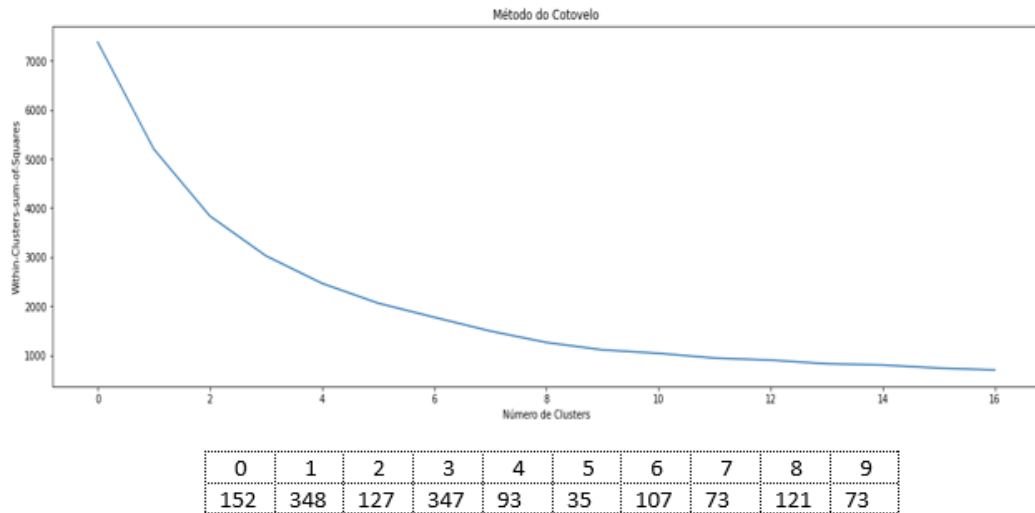
Fonte: Autor

No método do cotovelo, Figura-24, utilizado para análise qualitativa, foram estabelecidos 16 grupos (*clusters*), gerando uma curva descendente, cuja atenuação na inclinação remete ao número de amostras de cada grupo. O método permitiu observar que a partir do décimo *cluster*, não existiam mais amostras, ou seja, formou-se *clusters* vazios. Decidiu-se pela exclusão dos *clusters*, 5, 7 e 9 que possuem menor quantidade de amostras (181), preservando cerca de 87,5% dos dados normais, para em seguida avaliar graficamente a distribuição de amostras nas três classes selecionadas.

Sobre o limiar para exclusão de amostras aplicado nesta metodologia, no qual se preservou cerca de 87,5%, foi corroborado pela norma IEC 60599:2015, pois, esta menciona que em determinada população de transformadores, 90% deles apresentam concentração de gases abaixo dos valores típicos e outros 10% estão acima, entretanto, não considera como valores limites, apenas informação como ferramenta de manutenção preditiva.

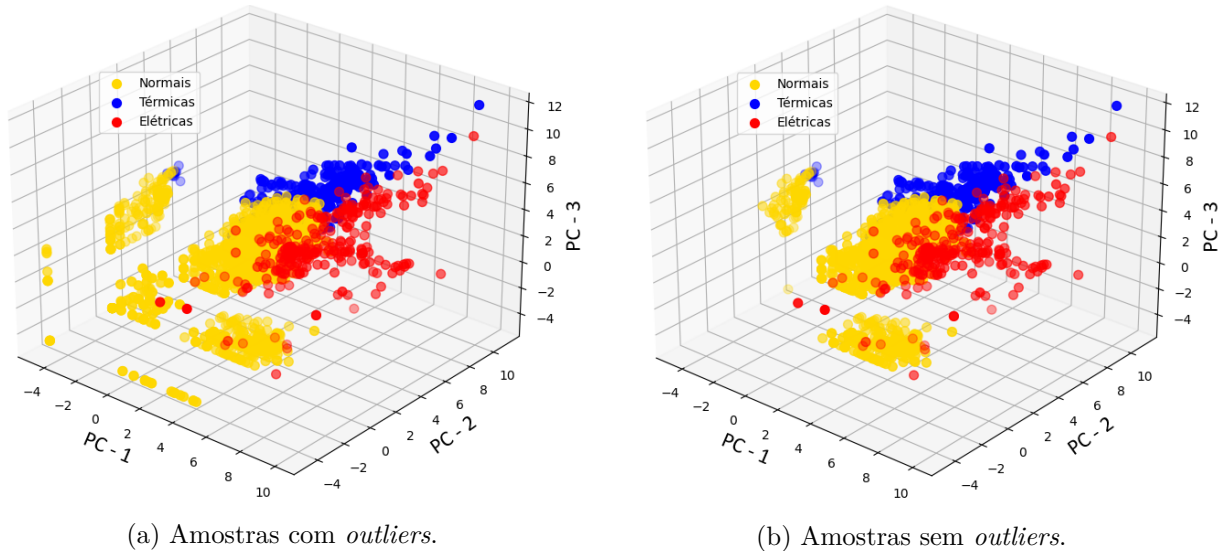
Após eliminação das 181 amostras normais, se observa a conservação na distribuição das amostras de falha, contudo, a metodologia aplicada, de fato, proporcionou a “limpeza” de *outliers* das amostras normais, Figuras-25a, 25b e Figuras-26a e 26b.

Figura 24 – Método do Cotovelo - amostras normais



Fonte: Autor

Figura 25 – Gráficos de dispersão das amostras - 3D dados logaritmizados.

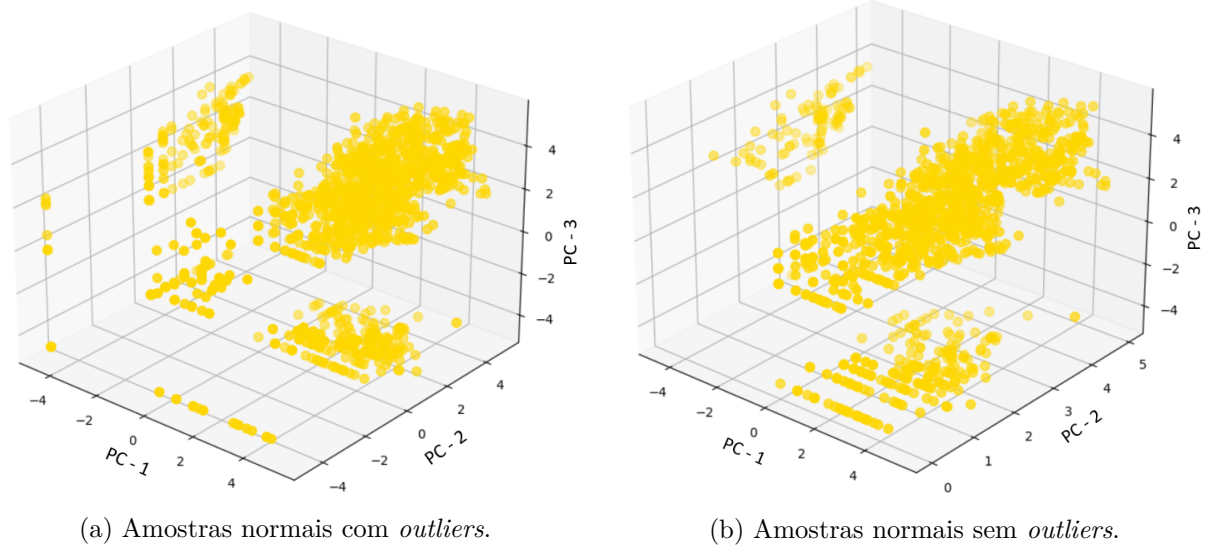


Fonte: Autor

### 5.2.1.3 Análise das amostras de falha elétrica e térmica

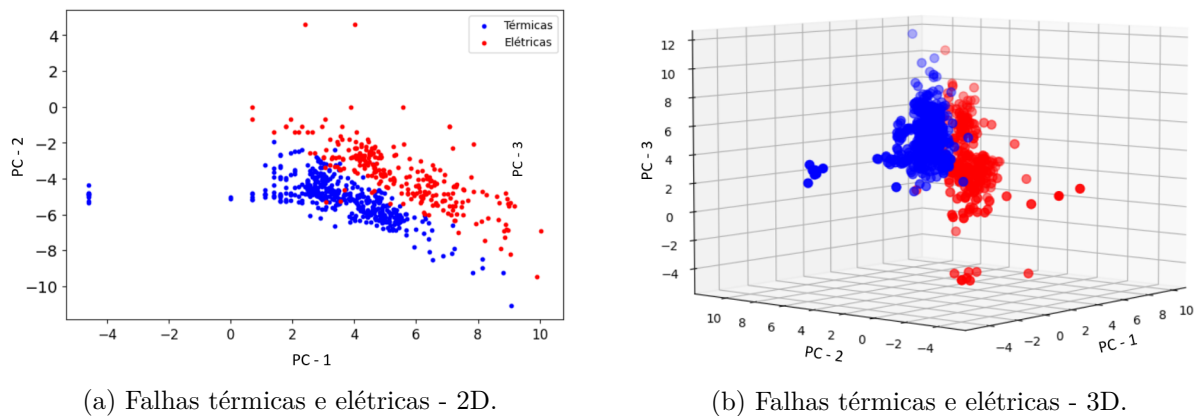
A análise gráfica, Figuras-27a e 27b, da distribuição dos dados de falha térmica e elétrica, apresentam dois grupos de amostras distintos, percebe-se forte interação entre estes tipos de falha, na prática este comportamento é esperado, pois alguns casos de anomalias evoluem de falha térmica para falha elétrica. Nota-se também uma região de interseção, em que algumas amostras, tanto elétrica como térmica, estarem presentes no grupo contrário à sua classificação, entretanto, entende-se que os algoritmos de classificação devem possuir capacidade matemática de aprendizado para obter bons resultados. Neste contexto, e corroborado pela *clusterização*, Figura-28, realizada pelo método do cotovelo, que apresentou excelente definição de dois grupos, apesar destes grupos não serem necessariamente formados de classes distintas, e o fato, do número relativamente reduzido de casos de falha, optou-se por não excluir *outliers* destas amostras.

Figura 26 – Gráficos de dispersão das amostras normais - 3D dados logaritmizados.



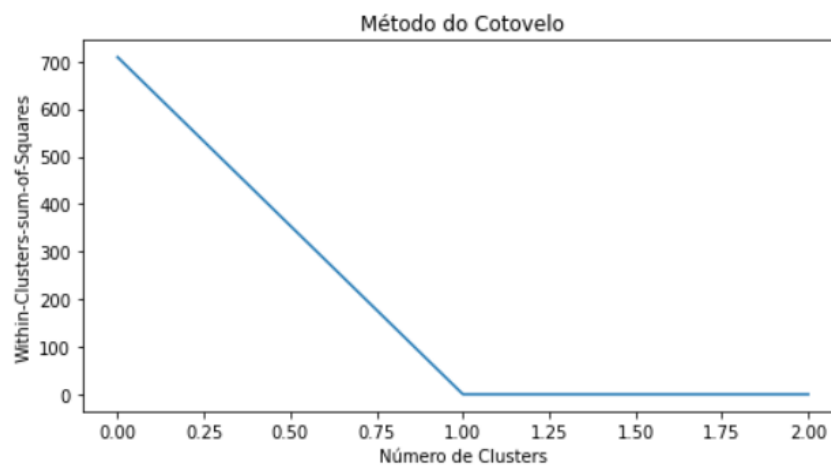
Fonte: Autor

Figura 27 – Gráficos de dispersão das amostras de falha - 2D e 3D dados logaritmizados.



Fonte: Autor

Figura 28 – Método do Cotovelo - amostras de falhas



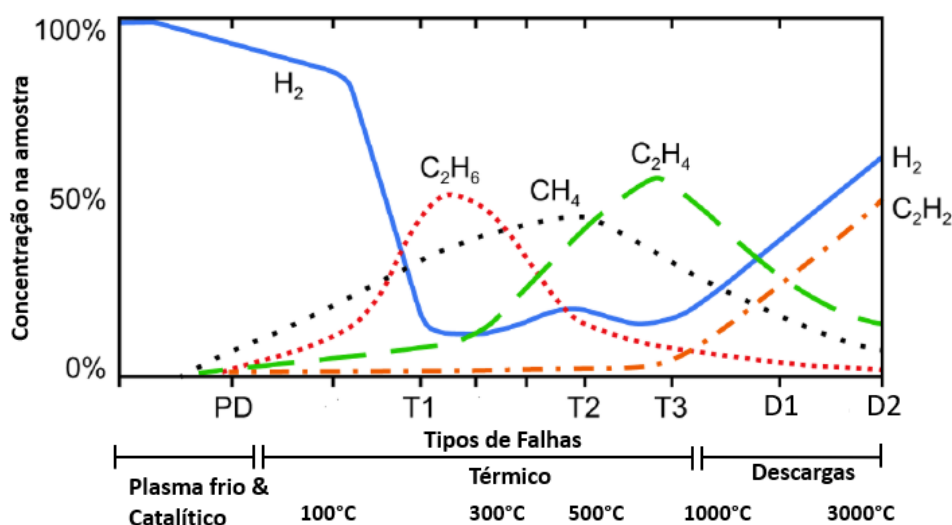
Fonte: Autor

### 5.3 Análise gráfica das concentrações dos gases

Para melhor compreensão da análise, apresenta-se novamente o gráfico da IEEE C57.104:2019, que trata dos tipos de falhas em função da temperatura, desta vez, será sintetizado em apenas dois tipos: térmica (T1, T2 e T3) e elétrica (PD, D1 e D2), mostrado na Figura-29.

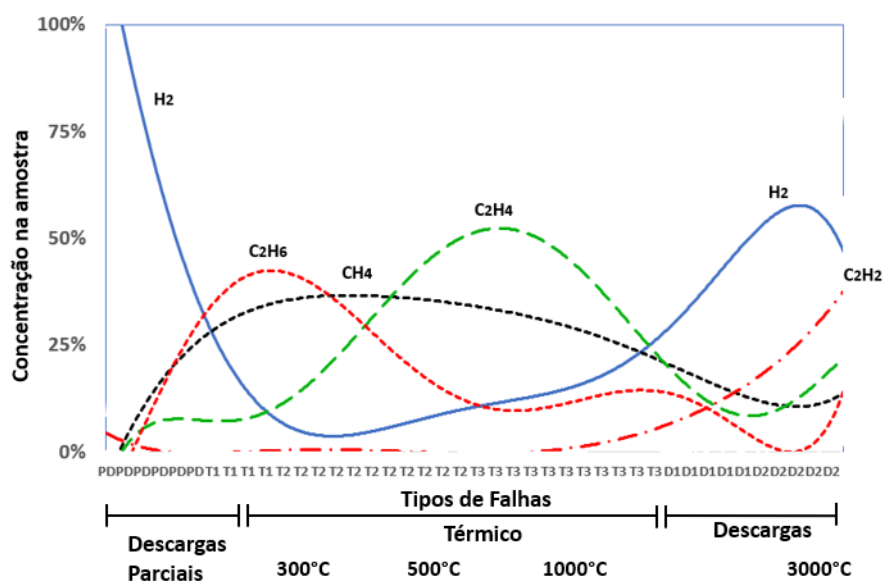
Ressalta-se que a análise seguinte, possui caráter comparativo, e têm o propósito de interpretar a distribuição dos dados em função do tipo de falha, temperatura e concentração em ppm, que tem por objetivo promover o entendimento das correlações intrínsecas a estes parâmetros, conforme a norma IEEE, C57.104, 2019.

Figura 29 – Concentrações de gases em função tipo de falha e temperatura



Fonte: Adaptado pelo autor de IEEE C57.104:2019

Figura 30 – Concentrações de gases em função tipo de falha e temperatura



Fonte: Próprio autor

Na Figura-30, estão apresentadas as curvas de tendência das concentrações dos gases geradas por uma função polinomial de sexta ordem e permitem observar as semelhanças no comportamento das amostras em relação a Figura-29. Destacam-se as curvas do acetileno e hidrogênio, principais gases marcadores de falhas elétricas de alta intensidade, que apresentam além das inclinações, os percentuais de concentração similares ao padrão esperado em IEEE C57.104:2019.

Sobre as amplitudes de concentração, as inclinações das curvas seguem padrão semelhante ao da Figura-29, além dos pontos de interseção entre curvas. Tais constatações inferem que o *dataset* possui boa capacidade de generalização do problema, particularmente para falhas térmicas e elétricas, de interesse deste trabalho.

## 5.4 Considerações do capítulo

O estudo de análise de gases dissolvido DGA encontra forte barreira na aquisição de amostras de falha e principalmente classificadas corretamente, seja pelo fato do transformador apresentar geração de gases mesmo em condições normais de operação (ABNT-7274, 2012), pela evolução de falhas incipientes para dois ou mais tipos, contaminação de amostras ou apenas erro no diagnóstico, influenciado por perturbação instantânea, por exemplo, curto-circuito. Atualmente, metodologias convencionais têm sido empregadas no auxílio aos especialistas para classificação de amostras, contudo, o correto diagnóstico necessita de inspeções internas, conhecimento das condições operativas do transformador e sobretudo, a disponibilidade de ensaios gascromatográficos anteriores e após a falha, muito embora, empresas de geração e transmissão pratiquem as inspeções pós falha, a quantidade de casos conhecidos, dificilmente generalizam todos os tipos de falhas que estes equipamentos estão sujeitos. Nesse contexto, a etapa de aquisição de dados, análise e pré-processamento é fundamental para o bom desempenho das arquiteturas de aprendizado de máquina.

As pesquisas para composição da base de dados buscaram por amostras que pudessem diversificar variadas condições operativas de transformadores, a exemplo das amostras da empresa de geração e transmissão e por dados amplamente utilizados nas literaturas de análise DGA (FILHO, 2012; ISLAM; LEE; HETTIWATTE, 2017; KIRKBAS et al., 2020; LI, 2019), bem como, os dados com alto grau de confiabilidade, dados da IEC TC10:1999.

A fase de análise dos dados em função do tipo de falha associada, avalia, a partir de conhecimentos empíricos contidos em normas, a distribuição das amostras em relação aos níveis de concentração gasosa e comparando as outras classes. Tal procedimento permite inferir, que de fato, as amostras da base de dados possuem características similares ao apresentado no gráfico da Figura-7, referente as concentrações de gases em função do tipo de falha e temperatura da IEEE C57.104:2019. Quanto a presença de *outliers*, a análise gráfica foi avaliada antes e depois da exclusão de 181 amostras normais, cujos gráficos de distribuição do *dataset* apresentaram visualmente a redução destes.

Levando em consideração o objetivo de propor arquiteturas de classificadores para auxílio no diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência, que performem melhor em relação as metodologias convencionais, propôs-se a entregar o *dataset* para os algoritmos de aprendizados de máquina: ANN, KNN, SVM e RL.

## 6 RESULTADOS E PROPOSTA DE ARQUITETURA HÍBRIDA DE DIAGNÓSTICO

Este capítulo apresenta o desempenho entre as metodologias convencionais e algoritmos inteligentes de aprendizado de máquina na análise de amostras das concentrações dos gases dissolvidos em óleo mineral isolante, cujo objetivo é identificar falhas incipientes (térmicas e elétricas) em transformadores de potência.

Conforme apresentado no Capítulo 2, os métodos convencionais navegam nos mares calmos da análise DGA, possuem total hegemonia no setor elétrico, visto que algumas metodologias são normatizadas. Contudo, comumente apresentam resultados inconsistentes ou ambíguos, que são constantemente associados a baixa assertividade. Neste contexto, os métodos inteligentes se apresentam como alternativa cada vez mais viável e confiável.

Em linhas gerais, conforme explanado no Capítulo 2, as classes de falhas podem ser rotuladas em 6 tipos, térmicas (baixa, média e alta intensidade) e elétricas (descargas parciais, descargas de baixa e de alta intensidade). Entretanto, nesta dissertação a base de dados DGA foi avaliada considerando 3 classes: normais, falha térmica e elétrica.

Apesar dos esforços para aquisição de dados de falhas, têm-se um *dataset* desbalanceado, cujas amostras normais representam cerca de 65% dos dados. Fato que tende a favorecer a classificação de amostras para a classe majoritária nos métodos inteligentes. Contudo, os resultados alcançados evidenciam a capacidade dos algoritmos de performar bons resultados mesmo em condições de dados desbalanceados.

A base de dados apresentada aos métodos está composta em 2004 amostras distribuídas em 83 descargas de baixa intensidade ( $D1$ ), 96 descargas de alta intensidade ( $D2$ ), 88 descargas parciais ( $PD$ ), 255 falhas térmicas  $T < 700^\circ\text{C}$  ( $T1$  e  $T2$ ), 187 falhas térmicas  $T > 700^\circ\text{C}$  ( $T3$ ) e 1295 amostras normais.

### 6.1 Métodos convencionais

O desempenho dos métodos convencionais confirmaram às informações contidas nas literaturas pesquisadas. Dentre as quais, são verificadas a presença de diagnósticos indeterminados e baixa assertividade de alguns métodos. Contudo, os resultados de natureza analítica dos métodos surpreendem pela capacidade de classificação do problema não-linear de análise DGA.

Os variados tipos de falhas, além de problemas que evoluem para dois ou mais tipos, os diversos ignitores de falhas, como descargas atmosféricas, curto-circuito, penetração de água, conexões frouxas e outros que, quando combinados, formam os mais variados tipos de falhas citadas no Capítulo 2. Neste aspecto, as peculiaridades do processo DGA, favorecem a baixa assertividade das metodologias convencionais.

Na Tabela-11 apresentam-se as matrizes de confusão dos métodos convencionais estudados anteriormente.

Tabela 11 – Matrizes de confusão - métodos convencionais

| Método      | Classes   | Normais | Térmicas | Elétricas | Ind.* |
|-------------|-----------|---------|----------|-----------|-------|
| Gás chave   | Normais   | 992     | 81       | 222       | 0     |
|             | Térmicas  | 393     | 49       | 0         | 0     |
|             | Elétricas | 110     | 2        | 155       | 0     |
| Doernenburg | Normais   | 1172    | 90       | 26        | 7     |
|             | Térmicas  | 177     | 260      | 4         | 1     |
|             | Elétricas | 233     | 2        | 23        | 9     |
| Rogers      | Normais   | 11      | 638      | 17        | 629   |
|             | Térmicas  | 0       | 372      | 1         | 69    |
|             | Elétricas | 4       | 23       | 90        | 150   |
| IEC 60599   | Normais   | 0       | 619      | 8         | 668   |
|             | Térmicas  | 0       | 418      | 0         | 24    |
|             | Elétricas | 0       | 4        | 91        | 172   |
| Duval       | Normais   | 0       | 1004     | 291       | 0     |
|             | Térmicas  | 0       | 428      | 14        | 0     |
|             | Elétricas | 0       | 88       | 179       | 0     |

\*Casos indeterminados.

Fonte: Próprio autor.

O método do Gás chave não apresentou casos sem diagnóstico (indeterminados), mostra bom desempenho para casos normais e baixa assertividades para amostras com falha térmica, fato que contribuiu para o fraco desempenho desta metodologia.

O método de Rogers, apresentou baixo desempenho para os casos normais, pois os limites estabelecidos a partir de suas relações, apontaram resultados indeterminados nas amostras do *dataset*. O método apresenta bons resultados nas falhas térmicas e apesar do baixo desempenho nos defeitos elétricos, obteve apenas 4 amostras classificadas normais.

Semelhante as relações de Rogers, o método da IEC 60599 faz uso das mesmas relações e não é indicado para análise de casos normais. Este, por sua vez, apresenta melhores resultados do que as relações de Rogers para falhas térmicas, contudo, assim como Rogers, possui elevado número de casos indeterminados para falhas elétricas.

Doernenburg faz uso do monóxido de carbono (CO), cuja concentração não foi levada em consideração no diagnóstico, uma vez que este gás não é oriundo de falha. Doernenburg é o método menos utilizado na atualidade ([IEEE-C57.104, 2019](#)) e faz uso de pré-condições para análise, todavia, na classificação do *dataset*, o método se apresenta como excelente marcador de amostras normais e falhas elétricas.

O triângulo de Duval sempre aponta algum tipo de falha, mesmo para amostras normais, por este motivo não foi contabilizado seu desempenho para esta classe. Dentre as metodologias testadas, apresenta o melhor precisão na análise de falhas térmicas.

Os resultados de precisão, acurácia e sensibilidade dos métodos estão apresentados na Tabela-17.

## 6.2 Métodos de aprendizado de máquina

### 6.2.1 Rede neural - ANN

Definida a arquitetura e sintonia dos parâmetros, conforme metodologia aplicada nesta dissertação, a ANN treinada apresentou a matriz de confusão contida na Tabela-12, cujas informações serão utilizada para medida de desempenho do algoritmo.

Tabela 12 – Matriz de confusão da ANN.

| Amostra                 | —        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | Ind.* |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Normal                  | <b>0</b> | 378      | 17       | 13       | 0     |
| Térmica                 | <b>1</b> | 8        | 113      | 2        | 0     |
| Elétrica                | <b>2</b> | 1        | 0        | 71       | 0     |
| Acurácia                | 93,20%   |          |          |          |       |
| * Casos indeterminados. |          |          |          |          |       |

Fonte: Próprio autor.

A matriz de confusão mostra 17 casos normais classificados com falha térmica e 13 com falha elétrica. As amostras rotuladas com falha térmica tiveram 8 classificadas normais e 2 com falha elétrica. Enquanto as elétricas tiveram apenas 1 erro de classificação, mostrando a ANN como excelente marcador para esta classe.

### 6.2.2 SVM

Os resultados iniciais com parâmetros padrões (*default*), apresentados na Tabela-13, obtiveram 94,11% de *acurácia*, além de excelente desempenho na classificação de amostras normais e baixa assertividade em falhas elétricas. A sintonia dos parâmetros proporcionou aumento de 0,3% na assertividade do algoritmo. Além de melhor desempenho para amostras de falhas elétricas (mais agressivas no transformador), ver Tabela-14.

A matriz de confusão evidencia que 8 casos normais foram classificados como falha térmica e 7 como falha elétrica. As amostras rotuladas com falha térmica tiveram 10 classificadas normais e 5 com falha elétrica.

Tabela 13 – Matriz de confusão do SVM (*default*).

| Amostra                 | —        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | Ind.* |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Normal                  | <b>0</b> | 429      | 10       | 3        | 0     |
| Térmica                 | <b>1</b> | 10       | 116      | 3        | 0     |
| Elétrica                | <b>2</b> | 11       | 2        | 78       | 0     |
| Acurácia                | 94,11%   |          |          |          |       |
| * Casos indeterminados. |          |          |          |          |       |

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 – Matriz de confusão do SVM (*GridSearchCV*).

| Amostra                 | —        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | Ind.* |
|-------------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Normal                  | <b>0</b> | 427      | 8        | 7        | 0     |
| Térmica                 | <b>1</b> | 10       | 114      | 5        | 0     |
| Elétrica                | <b>2</b> | 5        | 2        | 84       | 0     |
| Acurácia                | 94,41%   |          |          |          |       |
| * Casos indeterminados. |          |          |          |          |       |

Fonte: Próprio autor.

### 6.2.3 RL

Para a RL, os 22 casos de falsos negativos contribuíram para uma sensibilidade de 88,89%, o menor dentre os classificadores inteligentes. Entretanto, este método performa melhor que os convencionais. A Tabela-15 mostra a matriz de confusão e evidencia que o algoritmo possui melhor desempenho para amostras normais.

Tabela 15 – Matriz de confusão do RL.

| Amostra  | –        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | Ind.* |
|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Normal   | <b>0</b> | 419      | 12       | 11       | 0     |
| Térmica  | <b>1</b> | 13       | 112      | 4        | 0     |
| Elétrica | <b>2</b> | 9        | 2        | 80       | 0     |
| Acurácia |          | 92,30%   |          |          |       |

Fonte: Próprio autor.

### 6.2.4 KNN

O KNN se apresenta como uma das arquiteturas de aprendizado de máquina mais diretas. Sua sintonia está resumida em encontrar o  $K$  vizinho ideal. A matriz de confusão, Tabela-16, evidencia que apesar da simplicidade do KNN, seu desempenho para amostras normais e de falha térmica, superam os algoritmos ANN e SVM.

Tabela 16 – Matriz de confusão do KNN.

| Amostra  | –        | <b>0</b> | <b>1</b> | <b>2</b> | Ind.* |
|----------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Normal   | <b>0</b> | 436      | 3        | 3        | 0     |
| Térmica  | <b>1</b> | 8        | 120      | 1        | 0     |
| Elétrica | <b>2</b> | 9        | 1        | 81       | 0     |
| Acurácia |          | 96,22%   |          |          |       |

\* Casos indeterminados.

Fonte: Próprio autor.

## 6.3 Resultados dos métodos convencionais e inteligentes

As matrizes de confusão de ambas as metodologias permitem identificar de forma estratificada seus desempenhos. Nas análises seguintes, contidas na Tabela-17, é importante atentar para os conceitos de precisão, acurácia e sensibilidade.

Tabela 17 – Quadro comparativo de desempenho das metodologias.

| Metodologia  | Método      | Métrica por classe - Precisão (%) |          |           | Métricas do método (%) |               | Sensibilidade à falhas |
|--------------|-------------|-----------------------------------|----------|-----------|------------------------|---------------|------------------------|
|              |             | Normais                           | Térmicas | Elétricas | Acurácia               | Sensibilidade |                        |
| Convencional | Duval       | *                                 | 96,83    | 67,04     | **                     | **            | **                     |
|              | Rogers      | *                                 | 84,16    | 33,70     | **                     | **            | **                     |
|              | Gás chave   | 76,60                             | 11,09    | 58,05     | 59,68                  | 28,77         | **                     |
|              | Doernenburg | 90,50                             | 58,82    | 87,26     | 83,43                  | 69,93         | **                     |
|              | IEC 60599   | *                                 | 94,57    | 34,08     | **                     | **            | **                     |
| Inteligente  | RL          | 94,80                             | 86,82    | 87,91     | 92,30                  | 88,89         | 89,60T e 89,89E        |
|              | SVM         | 96,61                             | 88,37    | 92,31     | 94,41                  | 92,09         | 91,94T e 94,38E        |
|              | KNN         | 98,64                             | 93,02    | 89,01     | 96,22                  | 91,78         | 93,75T e 90,90E        |
|              | ANN         | 92,65                             | 91,87    | 98,61     | 93,20                  | 95,34         | 93,39T e 98,61E        |

\* Precisão não considerada na classe. \*\* Métrica não considerada no método.

Fonte: Próprio autor.

Os resultados mostrados na Tabela-17, evidenciam que os algoritmos possuem excelente precisão de diagnóstico para amostras normais, exceto a ANN, fato que pode estar relacionado a tendência dos classificadores a favorecerem a classe majoritária.

Para a RL, os 22 casos de falsos negativos contribuíram para uma sensibilidade de 88,89%, o menor dentre os classificadores inteligentes. Entretanto, este método performa melhor que os convencionais.

Enquanto a RL, SVM e KNN, obtiveram resultados de precisão acima de 94% para os casos normais, a ANN apresentou precisão de 98,61% para a classe minoritária (falhas elétricas), seguida pelo SVM, 92,31%. No desempenho geral, a acurácia dos algoritmos estão acima de 92%. Em ambas as métricas o KNN se destaca e possui desempenho de 98,64% e 96,22% para classificação de amostras normais (precisão) e desempenho geral (acurácia), respectivamente.

A redução de dimensionalidade por PCA aplicada ao SVM mostrou-se interessante. Pois, seu desempenho, exceto para amostras térmicas, ficaram todos acima de 90%. Onde a precisão para amostras normais foi de 96,61%, para falhas elétricas 92,31%, a acurácia do método foi de 94,41% e a sensibilidade 92,09%. No desempenho de acurácia dos métodos, o SVM é superado apenas pelo KNN.

Mais uma vez a análise da sensibilidade foi aplicada e estendida para as falhas térmicas e elétricas, onde os melhores classificadores foram o KNN para falhas térmicas e a ANN nas elétricas.

Outra importante aplicação das matrizes de confusão é a análise de concordância na classificação de amostras, aferida pelo índice *Kappa de Cohen*. Onde a RL e ANN obtiveram 85,18% de concordância, RL e KNN (81,63%), RL e SVM (84,70%), SVM e ANN (92,60%), SVM e KNN (88,81%) e KNN e ANN (92,55%), onde resultados acima de 80% apontam para concordância completa.

Quanto aos métodos convencionais, as relações de Rogers apresentou desempenho extremamente baixo para amostras normais, enquanto Duval e IEC 60599 não possuem classificação para esta classe, por este motivo, foram consideradas apenas os resultados para as classificações de falhas. Coincidentemente apresentaram as melhores precisões para defeitos térmicos.

O Gás chave tende a apresentar baixa acurácia quando aplicado de forma automática, por meio de programação(IEEE-C57.104, 2019). Em sua implementação foram utilizados os percentuais apontados na Tabela-4 e obteve acurácia de 59,68%. Doernenburg apresentou o melhor desempenho nas falhas elétricas, 87,26%. Enquanto Duval superou, inclusive, os métodos inteligentes nas falhas térmicas, com 96,83% de precisão.

## 6.4 Proposta de sistema inteligente de diagnóstico - SDI

A proposta de uma estrutura de análise DGA, foi definida a partir do desempenho individual dos métodos. Estar composta pelos algoritmos ANN e KNN, associado ao triângulo de Duval para a classificação de casos normais, falhas térmicas e elétricas, sendo assim estabelecida como uma abordagem híbrida com elevado grau de assertividade.

A proposta da arquitetura híbrida consiste em utilizar os classificadores em conjunto, de modo que na etapa para classificação de falha tenhamos um método convencional operando em conjunto com um inteligente. Foram escolhidos dois classificadores, KNN e ANN, e o método convencional de Duval.

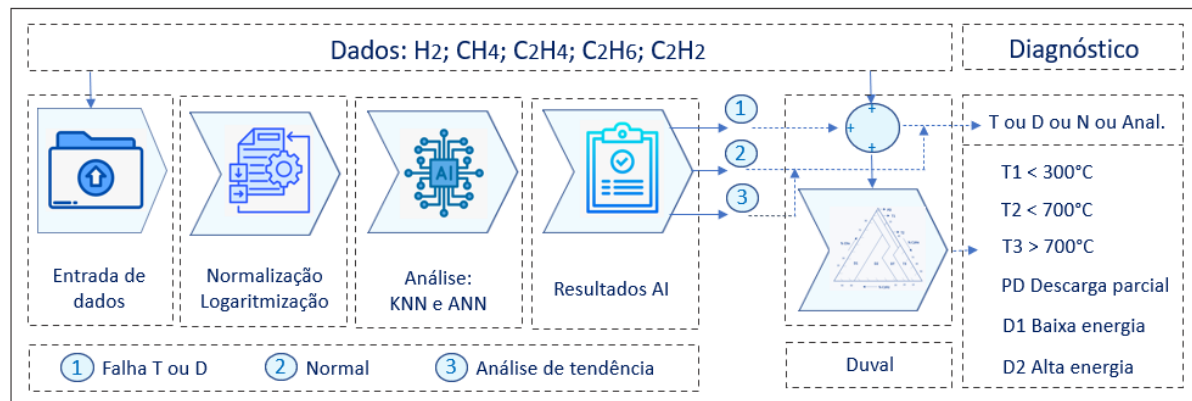
Inicialmente, a amostra é apresentada à arquitetura híbrida, que realizará a normalização e logaritmização dos dados, em seguida realizará a análise e emitirá o resultado nas saídas 1 ou 2 ou 3. As saídas 1 (falha T ou D) ou 2 (normal), serão habilitadas no caso de concordância dos algoritmos. No caso de discordância de diagnóstico, a saída 3 é acionada e solicita-se a análise de tendência, onde deve ser realizada uma análise mais abrangente do contexto operativo do transformador, por exemplo, se ocorreu o aumento das concentrações dos gases ao longo do tempo. Em caso de falha (saída 1), a amostra é entregue para o Triângulo de Duval para estratificação da intensidade do tipo de falha.

A forte sensibilidade do KNN para falhas térmicas será complementada com o método de Duval que permitirá estratificar a falha térmica em T1, T2 ou T3. O mesmo acontece para falhas elétricas entre a ANN e Duval, que classificará em PD, D1 ou D2.

É importante ressaltar sobre a baixa precisão de Duval nas amostras do *dataset* para falhas elétricas e, por este motivo, o Triângulo de Duval emitirá diagnóstico conforme o tipo de falha apontado pelos algoritmos e, em caso de discordância (entre os algoritmos e Duval), a arquitetura híbrida emitirá o resultado T ou D somente.

A arquitetura, nomeada Sistema de Diagnóstico Inteligente (SDI) e representada na Figura-31, obteve 98% desempenho na análise de 100 novas amostras, composta por 60 normais, 20 térmicas e 20 elétricas, além da correta classificação nos estudos de casos, que serão apresentados a seguir.

Figura 31 – Sistema de Diagnóstico Inteligente - SDI.



Fonte: Próprio autor.

Nos testes do SDI, ocorreram dois casos de discordância entre os algoritmos em amostras de falha térmica, conforme mostrado na Tabela-18. Vale ressaltar que apesar dos classificadores discordarem nas amostras abaixo, ambos possuem forte sensibilidade a falhas térmicas. Considerando que cada algoritmo possui metodologia diferente para classificação e que nestes casos contribuíram para que o sistema SDI não incorresse em erro, decidiu-se pela inserção na lógica de programação do SDI, a recomendação (saída 3) de análise da evolução das concentrações dos gases em caso de discordância do KNN e ANN.

Nas amostras utilizadas para teste do SDI não foi identificado casos em que ambos os classificadores erraram o diagnóstico, o que torna a abordagem superior a aplicação de qualquer um dos métodos (aqui apresentados) individualmente.

Tabela 18 – Amostras gascromatográficas

| Falha   | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | KNN     | ANN     | SDI            |
|---------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------|---------|----------------|
| Térmica | 5              | 54              | 5                             | 253                           | 0,1                           | Normal  | Térmico | Anál. Evolução |
| Térmica | 7              | 6               | 22                            | 16                            | 4,5                           | Térmico | Normal  | Anál. Evolução |

Fonte: Próprio autor.

#### 6.4.1 Estudo de caso 1 - aplicação SDI

O transformador de 69/13,8kV e 21,5MVA, que está em funcionamento desde 2007 na UHE Tucuruí, apresentou em novembro de 2023 aumento nas concentrações dos gases metano (CH<sub>4</sub>), etileno (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) e etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), cujas análises gascromatográfica estão apresentadas na Tabela-19. Nota-se que após a detecção do aumento, sucessivas coletas foram realizadas nos meses de janeiro e fevereiro de 2024. Em março do mesmo ano, após reparos, o equipamento retornou a operação com valores gascromatográficos normais.

A repetição de coletas é comum em casos indicativos de falhas, chamadas de reamostragem, tem o objetivo de confirmar concentrações e reduzir incertezas da análise DGA.

Os resultados DGA propiciaram a tomada de decisão para retirada de operação do transformador, onde outros ensaios foram realizados, a exemplo da resistência ôhmica de enrolamento, que apresentou alterações no enrolamento da fase A, inferindo problemas

Tabela 19 – Amostras gascromatográficas - Transformador 69/13,8 kV

| Amostra | Data       | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Análise - SDI |
|---------|------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1       | 11.03.2024 | 1              | 1               | 0                             | 0                             | 0                             | Normal        |
| 2       | 20.02.2024 | 22             | 36              | 71                            | 64                            | 0                             | Térmico - T3  |
| 3       | 19.02.2024 | 19             | 38              | 82                            | 64                            | 0                             | Térmico - T3  |
| 4       | 26.01.2024 | 11             | 36              | 59                            | 61                            | 0                             | Térmico - T3  |
| 5       | 08.01.2024 | 111            | 59              | 72                            | 72                            | 0                             | Térmico - T3  |
| 6       | 21.11.2023 | 20             | 44              | 59                            | 64                            | 0                             | Térmico - T3  |
| 7       | 17.11.2022 | 40             | 11              | 13                            | 5                             | 0                             | Normal        |
| 8       | 13.04.2022 | 9              | 13              | 13                            | 4                             | 0                             | Normal        |
| 9       | 09.11.2021 | 24             | 5               | 11                            | 3                             | 0                             | Normal        |
| 10      | 01.06.2021 | 56             | 17              | 15                            | 5                             | 0                             | Normal        |

Fonte: Próprio autor.

de conexão. O conjunto de resultados, novamente embasaram outra tomada de decisão, que foi a abertura do equipamento para inspeção interna. Onde a Figura-32, confirma a existência de conexão frouxa no cabo do enrolamento da fase A do transformador.

Figura 32 – Conexão frouxa - fonte de aquecimento.



Fonte: Próprio autor

A conexão frouxa promove a dissipação excessiva de energia no sistema de isolamento promovendo o aquecimento e ocasiona o desprendimento de gases que são dissolvidos no óleo, cujas concentrações serão em função da intensidade de energia e temperatura existente no local de falha. A análise do SDI, aqui proposto, obteve diagnóstico de defeito térmico T3, conforme indicado na Tabela - 19, que sugere temperatura acima de 700°C, entretanto, não tão alta, para permitir a presença de acetileno. O diagnóstico é condizente com as características do tipo de defeito encontrado na inspeção, pois apresenta coloração do metal, inferindo uma temperatura de 800°C (IEC-60599, 2015) . Outro ponto a se mencionar, é a correta classificação para casos normais.

### 6.4.2 Estudo de caso 2 - aplicação SDI

No segundo caso, apresenta-se um reator de derivação de tensão nominal  $525/\sqrt{3}$  kV, potência 50MVar, que esteve em operação em subestação de Marabá-PA desde 1980 até o ano 2013, quando a concentração de gases dissolvidos apontaram para formação de falha e o equipamento foi retirado de operação para inspeção interna. Nota-se pelo histórico das amostras mostrado na Tabela-20, o aumento abrupto das concentrações de todos os gases e que inferem a presença de defeito no reator.

Tabela 20 – Amostras gascromatográficas - Reator de derivação  $525/\sqrt{3}$  kV

| Amostra | Data       | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Análise - SDI |
|---------|------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------|
| 1       | 06.06.2013 | 1764           | 4785            | 7508                          | 1933                          | 12                            | Térmico - T3  |
| 2       | 23.05.2013 | 1363           | 3807            | 5919                          | 1553                          | 11                            | Térmico - T3  |
| 3       | 30.11.2012 | 0              | 9               | 1                             | 7                             | 0                             | Normal        |
| 4       | 03.10.2012 | 0              | 5               | 0                             | 3                             | 0                             | Normal        |
| 5       | 29.11.2011 | 0              | 42              | 5                             | 50                            | 0                             | Normal        |
| 6       | 27.05.2011 | 0              | 30              | 5                             | 28                            | 0                             | Normal        |
| 7       | 23.11.2010 | 0              | 30              | 5                             | 29                            | 0                             | Normal        |
| 8       | 21.05.2010 | 7              | 28              | 5                             | 38                            | 0                             | Normal        |

Fonte: Próprio autor.

Nas inspeções internas, muitas vezes o defeito não está aparente nas partes externas dos grupos de bobinas do equipamento, sendo necessário a destruição de camadas de papel para visualização do ponto de falha, neste caso específico, conforme a Figura - 33a não era possível a identificação. Porém, os demais ensaios realizados, a exemplo da resistência ôhmica de enrolamento, apontavam para problemas na fase *B* e optou-se pela retirada das camadas externas do dielétrico. Na Figura-33b está mostrado os sinais de aquecimento e nas Figuras-34a até a 35b confirmam a condição de sobreaquecimento na conexão.

A análise do SDI, obteve diagnóstico de defeito térmico T3, conforme indicado na Tabela-20, que sugere temperatura acima de 700°C. O tipo de falha T3 é caracterizado por fortes indícios de carbonização do óleo mineral, descoloração de metal (800°C) ou fusão de metal (>1000°C) ([IEEE-C57.104, 2019](#)).

Figura 33 – Identificação do local de defeito



(a) Local do defeito - suspeita.



(b) Sinais de sobreaquecimento.

Fonte: Próprio autor

Figura 34 – Extração do condutor lide com aquecimento



(a) Local do defeito - confirmado.



(b) Lide removido.

Fonte: Próprio autor

Figura 35 – Condutor lide extraído



(a) Condutor lide.



(b) Sinais de sobreaquecimento.

Fonte: Próprio autor

### 6.4.3 Estudo de caso 3 - aplicação SDI

No último caso, têm-se um transformador trifásico de tensão nominal 230/69 kV, potência 33MVA, que esteve em operação na subestação de Marabá-PA desde 1981 até o ano 2024, quando saiu de operação por fim de vida útil. Entretanto, em 2008 começou a apresentar gás acetileno nas amostras gascromatográficas e retirado de operação para inspeção interna. Nota-se pelo histórico das amostras na Tabela-21, o aumento das concentrações dos gases, exceto o  $C_2H_4$ , e que inferem a presença de defeito no transformador.

Na inspeção interna, realizada em maio de 2010, a concessionária contratou empresa especializada para obtenção do diagnóstico e recuperação do transformador. O laudo da inspeção apontou defeito elétrico (folga nos contatos elétricos do comutador de tap) associado a descargas parciais, cuja transcrição para o tipo de defeito conforme a norma IEEE C57.104:2019 é típico para D1. Na Figura-36 está mostrado a régua de contatos móveis, onde foi identificado problemas nas molas que impõe pressão aos contatos. Na Figura-37a na área destacada percebe-se o rastreamento provocado por descargas parciais e na Figura-37b acúmulo de borra de óleo provocado por sobreaquecimento.

Para enriquecer a discussão sobre o parecer do tipo de falha, cita-se o diagnóstico do sistema DianE, que realiza o monitoramento deste equipamento, o qual, indicou a presença de falha térmica ou elétrica (TD) nas amostras de 2 a 12 da Tabela-21. O sistema SDI, indicou falha elétrica de baixa intensidade (D1) nas amostras de 2 a 6.

Tabela 21 – Amostras gascromatográficas - Transformador 230/69 kV

| Amostra | Data       | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | SDI    | DianE  |
|---------|------------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|--------|
| 1       | 30.05.2010 | 1              | 0               | 0                             | 0                             | 0                             | Normal | Normal |
| 2       | 19.04.2010 | 70             | 15              | 1                             | 13                            | 18                            | D1     | TD     |
| 3       | 22.02.2010 | 52             | 16              | 2                             | 15                            | 19                            | D1     | TD     |
| 4       | 22.01.2010 | 51             | 16              | 2                             | 20                            | 20                            | D1     | TD     |
| 5       | 30.11.2009 | 80             | 23              | 2                             | 27                            | 18                            | D1     | TD     |
| 6       | 22.10.2009 | 26             | 18              | 0                             | 20                            | 10                            | D1     | TD     |
| 7       | 25.05.2009 | 14             | 11              | 1                             | 23                            | 5                             | Normal | TD     |
| 8       | 20.04.2009 | 14             | 15              | 2                             | 16                            | 3                             | Normal | TD     |
| 9       | 27.11.2008 | 17             | 10              | 1                             | 13                            | 4                             | Normal | TD     |
| 10      | 21.10.2008 | 13             | 9               | 7                             | 7                             | 2                             | Normal | TD     |
| 11      | 04.07.2008 | 11             | 5               | 5                             | 5                             | 2                             | Normal | TD     |
| 12      | 19.05.2008 | 4              | 2               | 1                             | 1                             | 1                             | Normal | TD     |

Fonte: Próprio autor.

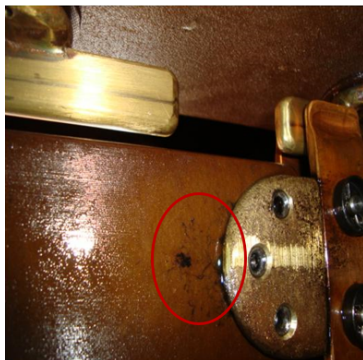
Nota-se, que apesar de diagnósticos diferentes, ambos os resultados (DianE e SDI) convergem para a existência de defeito e corroborados pelo laudo de inspeção interna. Nas amostras em que o DianE e SDI diferem, acredita-se ter sido em função do método de avaliação de tendência de aumento das concentrações observada no DianE, enquanto o SDI, realiza diagnóstico considerando apenas uma amostra isolada.

Figura 36 – Régua de contatos móveis.

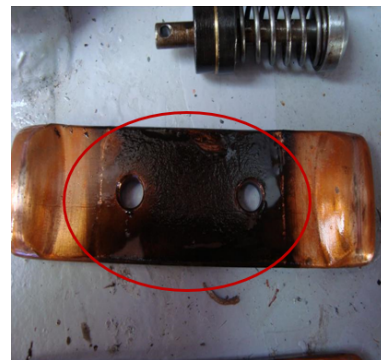


Fonte: Próprio autor

Figura 37 – Identificação do local de defeito



(a) Sinais de descarga parcial.



(b) Contato e mola de contato.

Fonte: Próprio autor

## 7 CONCLUSÃO

A análise DGA é utilizada desde 1960 e vários métodos convencionais, inclusive normatizados, foram desenvolvidos a exemplo do triângulo de Duval, Gás chave, relações de Rogers, Doernenburg, IEC 60599 e outros. Contudo, a característica não-linear do problema, dificulta o mapeamento de padrões de concentração gasosa destes métodos e, muitas vezes, apresentam resultados com baixa assertividade ou indeterminações. Nesse ambiente, se observa o aumento de esforços para projetar técnicas no contexto de aprendizado de máquina (AM) e tem sido suporte para desenvolvimento de metodologias de diagnósticos de falhas incipientes com o objetivo preencher a lacuna gerada pela baixa acurácia dos métodos convencionais. Por esta razão, o aprendizado de máquina se apresenta como alternativa a esta abordagem.

Neste trabalho propõe-se o estudo de falhas incipientes em transformadores de potência por meio da análise de gases dissolvidos (DGA) em óleo mineral isolante utilizando as técnicas de análise convencional e métodos inteligentes treinados por um *dataset* com boa capacidade de generalizar o problema intrínseco.

Este trabalho desenvolveu uma arquitetura híbrida, baseada em métodos inteligentes e convencional, capaz de identificar falhas térmicas e elétricas em transformadores de potência. Dentre as principais contribuições da pesquisa está o fornecimento dos algoritmos KNN e ANN treinados para identificação de falhas, além da base de dados.

Inicialmente buscou-se o entendimento do problema sob análise. Neste contexto, foi realizada pesquisa sobre as especificidades do transformador de potência, com ênfase em seus dielétricos, papel e óleo, este último sendo o foco da pesquisa e, não menos importante o entendimento sobre os tipos de falhas associadas a concentração dos gases dissolvidos e os métodos existentes de análise: convencionais e inteligentes.

Na revisão literária a pesquisa tratou desde trabalhos antigos até literaturas atuais, a exemplo da norma IEEE-57.104, revisada em 2019, que trata de um guia para a interpretação de gases gerados em transformadores imersos em óleo mineral. Além de artigos, dissertações e teses como a de Ikeshoji, que propôs em 2020 uma arquitetura inteligente para análise DGA, além de método de geração de dados sintéticos.

A coleta de dados, tornou-se um desafio a mais na pesquisa, face as incertezas inerentes ao processo de análise gascromatográfica que podem resultar em erro de classificação, conforme citado no Capítulo 2, além da dificuldade na obtenção de dados confiáveis.

O pré-processamento, fase imprescindível no tratamento de dados, ganhou destaque pelo fato da base de dados possuir cerca de 80% de amostras inéditas, cuja análise gráfica apresentada no Capítulo 5, demonstrou com clareza a boa capacidade do *dataset* representar os tipos de falhas (térmicas e elétricas), além da identificação e eliminação de *outliers*.

Quanto a aplicação dos métodos de análise DGA, em específico as metodologias convencionais, cuja essência de concepção se deu pelo conhecimento empírico de especialistas

e sobretudo da inspeção interna, pós falha, de transformadores que dispunham das análises gascromatográfica, pelas quais, as associações dos danos identificados puderam ser correlacionados às concentrações de determinados hidrocarbonetos, refletem a capacidade individual destes métodos para identificar corretamente os tipos de falhas e apresentam baixa assertividade.

Entretanto, o mapeamento entre padrões de concentração gasosa e os diferentes tipos de falhas resultam em um problema de classificação não-linear com múltiplas classes, que torna o diagnóstico por esta abordagem um problema não trivial (IKESHOJI, 2020). Apesar da dificuldade técnica, o uso desta abordagem pode representar ganhos significativos na identificação de falhas incipientes e/ou diagnóstico de falhas consumadas em transformadores. Neste aspecto, buscou-se compilar um *dataset* com boa capacidade de generalizar o problema intrínseco. E a partir do treinamento de classificadores propor uma arquitetura híbrida de análise DGA. A base de dados foi composta, em grande parte, por amostras de transformadores que operam há mais de 20 anos no setor elétrico brasileiro.

O desempenho dos métodos convencionais confirmaram às informações contidas nas literaturas pesquisadas. Dentre as quais, são verificadas a presença de diagnósticos indeterminados e baixa assertividade de alguns métodos. Contudo, os resultados de natureza analítica dos métodos surpreendem pela capacidade de classificação do problema não-linear de análise DGA.

Os métodos das relações de Rogers e IEC 60599 fazem uso das mesmas relações de gases, entretanto, diferem quanto aos limiares indicadores de falhas e os tipos de classes de diagnóstico. Enquanto Rogers possui limiar para casos normais, a IEC 60599 classifica descargas parciais. Dentre os métodos pesquisados são os que mais apresentaram resultados indeterminados, cerca de 42% das amostras e como esperado, obtiveram desempenho semelhante, ver Tabela-17.

O Gás chave apresentou a menor precisão na análise de falhas térmicas, fato que contribuiu de forma significativa para o menor desempenho dos métodos, contudo, eficaz para amostras normais apesar de ser um método identificador de falhas. Todavia, o baixo desempenho do método está condizente com a IEEE-C57.104:2019 em seu Anexo D.1-*Key Gas method*, no qual, menciona que a utilização do método por software, tende apresentar 50% de erro, visto suas particularidades de análise, fato comprovado nos resultados obtidos, ver Tabela-17.

Doernenburg fazendo uso de suas pré-condições de análise, surpreende nas amostras de casos normais, com cerca de 90% de acurácia e supera o tradicional método do triângulo de Duval nos casos de falhas elétricas. Duval por sua vez, possui o melhor desempenho em falhas térmicas, contudo, não possui diagnóstico para classe normal.

Por outro lado, os algoritmos inteligentes encontram um cenário quase perfeito, exceto pelo desbalanceamento de dados, para diagnóstico. Apresentaram alta capacidade de mapeamento entre padrões de concentração gasosa e os diferentes tipos falhas, além do excelente desempenho na predição das amostras.

O algoritmo de Redes Neurais foi o que apresentou maior complexidade no ajuste de sintonia dos hiperparâmetros, no número de camadas e de neurônios por camada. Todavia, o esforço demandado foi recompensado com o excelente desempenho. A ANN implementada obteve a melhor sensibilidade para falhas elétricas, e em todas as classes sua precisão foi superior a 90%, fato não identificado nas outras técnicas inteligentes.

No campo da redução de dimensionalidade se aplicou o PCA, que a partir do uso de métodos estatísticos de análise exploratória de dados e outras ferramentas matemáticas se promoveu o aumento de 5 para 31 dimensões. Para fins de treino e teste do SVM, foram utilizadas 10 componentes principais, que possuem cerca de 93% de representatividade das características do *dataset*. No desempenho de acurácia dos métodos, o SVM é superado apenas pelo KNN..

A RL, obteve 22 casos de falsos negativos que contribuíram para uma sensibilidade de 88,89%, o menor dentre os classificadores inteligentes. Entretanto, este método performa melhor que os convencionais. No método baseado em distâncias, o algoritmo KNN, cuja sintonia está resumida em encontrar o  $K$  vizinho ideal, no *dataset* DGA encontrado  $k=5$ , foi suficiente superar todos os algoritmos.

Muito embora os métodos de aprendizado de máquina tenham apresentado acurácia superiores ao convencionais, as matrizes de confusão carregam uma informação interessante sobre o desempenho por tipo de amostra. A Tabela-17, apresenta o comparativo de precisão por classe, acurácia e sensibilidade, evidenciando os pontos de destaque e de vulnerabilidade de cada metodologia.

Os métodos convencionais Duval e IEC 60599, destacam-se por apresentar precisão acima de 94% nas falhas térmicas e Doernenburg com 90,50% nas amostras normais. No aprendizado de máquina, o KNN apresenta precisão acima de 98% nas amostras normais e a ANN com excelente precisão nas falhas elétricas. Nos métodos convencionais o triângulo de Duval se destaca para a classe de amostras com falhas térmicas, cujo percentual de 96,83% supera, inclusive, os algoritmos inteligentes.

Apesar das diferentes abordagens dos algoritmos inteligentes, redução de dimensionalidade e método probabilístico, ocorreu um fato comum, ambos apresentaram dificuldade em performar nas amostras de falhas térmicas, que poderia ser explicado pela área de sobreposição de amostras desta classe e amostras normais e de falha elétrica. Entretanto, o KNN, que não possui metodologia matemática indutiva, além da ANN, obtiveram precisão acima de 90%. Sobre as amostras de falhas térmicas é importante lembrar da zona de interseção e sobreposição, o que infere *outliers*, entre as amostras normais e de falha elétrica e que talvez, por este motivo, justifique o menor precisão da RL e SVM.

Até então, se comentou sobre a análise quantitativa e seus percentuais de assertividade. Quanto a análise qualitativa, utilizou-se a métrica de sensibilidade. Na análise DGA, o diagnóstico de falso negativo representa deixar em operação um transformador defeituoso que, dependendo das características operacionais do equipamento, uma falha pode ocasionar perdas imensuráveis. Enquanto um falso positivo, pode proporcionar uma

programação de manutenção indevida, contudo, menos danosa ao setor elétrico. Deste modo, a partir da extração da matriz de confusão dos métodos inteligentes, foi calculada a métrica de avaliação sensibilidade. Os resultados de sensibilidade apresentados na Tabela-17 mostram os algoritmos ANN e KNN com performance superior aos outros, ambos com peculiaridades distintas em relação ao método de classificação.

Conforme os resultados comentados, implementou-se a arquitetura híbrida de análise DGA mostrada na Figura-31, a partir dos métodos inteligentes ANN e KNN e do convencional, triangulo de Duval, cujo desempenho foi aferido por meio de cem novas amostras, além dos estudos de caso apresentados no Capítulo 6.

Face ao estudo apresentado e a importância do diagnóstico de falhas em transformadores, no processo de manutenção das indústrias e do setor elétrico, verificou-se que:

- A base de dados utilizada possui boa representatividade do problema, além da capacidade de mapeamento para distinção entre diferentes condições do transformador. As curvas de concentração gasosa sugerem forte similaridade com os padrões pré-definidos na IEEE C57.104, 2019.
- Classificadores SVM podem ser treinados com alta eficiência (94,41%) ao usar métodos estatísticos de análise exploratórias de dados em conjunto com amostras e relações puras dos gases.
- A análise de sensibilidade para falhas, demonstrou que o método probabilístico multinomial da RL possui bom desempenho, contudo inferior aos demais algoritmos.
- O KNN performou inversamente proporcional às distâncias. Para amostras relativamente próximas, classe normal (98,64%), entretanto, nas falhas elétricas, que envolve maiores distâncias, seu desempenho foi de 89,01%.
- O classificador ANN não apresentou dificuldade ao performar dados desbalanceados e de alta variância, além de apresentar excelente desempenho de sensibilidade (98,61%) à falhas elétricas, classe minoritária do *dataset*.

É importante observar que os atributos considerados funcionam bem para os casos estudados, porém é possível que a abordagem necessite de novo treinamento para grupos de equipamentos específicos. Além disso, se o número de amostras não for suficiente para mapeamento das condições, haverá menos informação por tipo de falha, o que pode levar à diagnósticos incorretos e, portanto, perda de acurácia.

Por fim, embora a arquitetura SDI no contexto deste trabalho seja bastante robusta, deve-se observar que transformadores individuais ou grupos de equipamentos possuem características de operação peculiares. Apesar dos bons resultados, é importante expandir a pesquisa para analisar a influência de circunstâncias, tais como carregamento, idade do equipamento e variados tipos de defeitos, para uma visão definitiva sobre o uso desta técnica em sistemas reais de diagnóstico.

# Referências

- ABNT-7274. Interpretação da análise dos gases de transformadores em serviço. ABNT, 2012.
- ALMEIDA, N. C. d. Sistema inteligente para diagnóstico de patologias na laringe utilizando máquinas de vetor de suporte. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010.
- ALMEIDA, R. d.; FACEROLI, S. T. Análise comparativa das técnicas knn e rede neural mlp na classificação de padrões mioelétricos. In: *XXIV Congresso Brasileiro de Engenharia Biomédica*. [S.l.: s.n.], 2014.
- ANEEL. Resolução 729 de 2016 - estabelece as disposições relativas à qualidade do serviço público de transmissão de energia elétrica, associada à disponibilidade e à capacidade operativa das instalações sob responsabilidade de concessionária de transmissão integrantes da rede básica. ANEEL - Agência nacional de Energia Elétrica, 2016.
- ANEEL. Resolução 906 de 2020 - regulamenta os requisitos mínimos de manutenção e o monitoramento da manutenção de instalações de transmissão de rede básica. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020.
- ARANTES, J. G. et al. Diagnóstico de falhas em transformadores de potência pela análise de gases dissolvidos em óleo isolante através de redes neurais. Universidade Federal de Itajubá, 2005.
- ARAUJO, W. O. de; COELHO, C. J. Análise de componentes principais (pca). *University Center of Anápolis, Annapolis*, 2009.
- BACHA, K.; SOUAHLIA, S.; GOSSA, M. Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis by support vector machine. *Electric power systems research*, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 73–79, 2012.
- BANK, D.; KOENIGSTEIN, N.; GIRYES, R. Autoencoders. *arXiv preprint arXiv:2003.05991*, 2020.
- BATISTA, G. E. d. A. P. et al. *Pré-processamento de dados em aprendizado de máquina supervisionado*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.
- BAYAGA, A. Multinomial logistic regression: Usage and application in risk analysis. *Journal of applied quantitative methods*, v. 5, n. 2, 2010.
- BECHARA, R. *Análise de falhas de transformadores de potência*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- BENEDET, M. E. et al. Otimização de um analisador de gás dissolvido em óleo de múltiplos transformadores de potência. Florianópolis, SC, 2008.
- BOAS VILAS, V. M. Autobi: interface cérebro-máquina com configuração hiperparamétrica automatizada. Universidade Federal do Pará, 2021.
- BOVERI, A. A. B. Transformadores de potência em alta tensão. São Paulo, SP, 2013.

- BOŽIĆ, M. et al. Power transformer fault diagnosis based on dissolved gas analysis with logistic regression. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 89, n. 6, p. 83–87, 2013.
- CARDOSO, P. M. et al. Adaptação de um sistema de medição de gases dissolvidos em óleo mineral isolante para monitoração de múltiplos transformadores de potência. Florianópolis, SC, 2005.
- CARRAPATO, M. A. *Sistema de inferência Fuzzy para avaliação de defeitos elétricos em transformadores de potência utilizando análises cromatográficas*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.
- CASTRO, C. L. d.; BRAGA, A. P. Aprendizado supervisionado com conjuntos de dados desbalanceados. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 22, p. 441–466, 2011.
- DAI, J. et al. Dissolved gas analysis of insulating oil for power transformer fault diagnosis with deep belief network. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 24, n. 5, p. 2828–2835, 2017.
- DAMIÃO, L. J. D. S. et al. Desenvolvimento de um sistema de monitoramento online de descargas parciais para transformadores de potência. Universidade Federal de Itajubá, 2021.
- DEMARIS, A. A tutorial in logistic regression. *Journal of Marriage and the Family*, JSTOR, p. 956–968, 1995.
- DHINI, A. et al. Data-driven fault diagnosis of power transformers using dissolved gas analysis (dga). *Int. J. Technol*, v. 11, n. 2, p. 388–399, 2020.
- DOSCIATTI, M. M.; FERREIRA, L. P. C.; PARAISO, E. C. Identificando emoções em textos em português do brasil usando máquina de vetores de suporte em solução multiclasse. *ENIAC-Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional*. Fortaleza, Brasil, 2013.
- DUVAL, M. A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers. *IEEE electrical Insulation magazine*, IEEE, v. 18, n. 3, p. 8–17, 2002.
- DUVAL, M.; DEPABLA, A. Interpretation of gas-in-oil analysis using new iec publication 60599 and iec tc 10 databases. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, IEEE, v. 17, n. 2, p. 31–41, 2001.
- DUY, N. T. Apply the artificial neural network to diagnose potential fault of power transformer based on dissolved gas-in-oil analysis data. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering (CRPASE): Transactions of Electrical, Electronic and Computer Engineering*, v. 6, p. 127–131, 2020.
- ENRIQUEZ, A. R. S. et al. Diagnóstico de falhas em transformadores de potência através de análise de gases dissolvidos usando rede neural artificial. Universidade Federal do Maranhão, 2020.
- FILHO, G. L. *Comparação entre os critérios de diagnósticos por análise cromatográfica de gases dissolvidos em óleo isolante de transformador de potência*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2012.
- FLECK, L. et al. Redes neurais artificiais: Princípios básicos. *Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia*, v. 1, n. 13, p. 47–57, 2016.

- GOMATHY, V.; SUMATHI, S. Implementation of svm using sequential minimal optimization for power transformer fault analysis using dga. *International Journal of Computers & Technology*, v. 10, n. 5, p. 1687–1699, 2013.
- GONÇALVES, A. R. Máquina de vetores suporte. *Acesso em*, v. 21, 2010.
- GONÇALVES, E. B.; GOUVÊA, M. A.; MANTOVANI, D. M. N. Análise de risco de crédito com o uso de regressão logística. *Revista Contemporânea de Contabilidade*, Universidade Federal de Santa Catarina, v. 10, n. 20, p. 139–160, 2013.
- HELL, M. B. Sistemas de diagnostico de faltas em transformadores de potência utilizando análise de gases dissolvidos e técnicas de inteligência computacional. *Dados*, 2002.
- HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. de O. Análise de componentes principais: resumo teórico, aplicação e interpretação. *E&S Engineering and science*, v. 5, n. 1, p. 83–90, 2016.
- HOSMER, D. W.; JOVANOVIC, B.; LEMESHOW, S. Best subsets logistic regression. *Biometrics*, JSTOR, p. 1265–1270, 1989.
- IEC-60567. Oil-filled electrical equipment – sampling of gases and of oil for analysis of free and dissolved gases – guidance. IEC, 2005.
- IEC-60599. Mineral oil-filled electrical equipment in service – guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. 2015.
- IEEE-C57.104. Guide for the interpretation of gases generated in mineral oil immersed transformers. IEEE, 2019.
- IKESHOJI, M. A. Desenvolvimento de metodologia para diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando análise de gases e aprendizado de máquina. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2020.
- ISLAM, M. M.; LEE, G.; HETTIWATTE, S. N. A nearest neighbour clustering approach for incipient fault diagnosis of power transformers. *Electrical Engineering*, Springer, v. 99, p. 1109–1119, 2017.
- JAKOB, A. A. E.; YOUNG, A. F. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. *Trabalho apresentado no XV Encontro Nacional de Estudos Populacionais, ABEP, realizado em Caxambu, MG, Brasil*, 2006.
- KHERIF, O. et al. Accuracy improvement of power transformer faults diagnostic using knn classifier with decision tree principle. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 81693–81701, 2021.
- KIRKBAS, A. et al. Fault diagnosis of oil-immersed power transformers using common vector approach. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 184, p. 106346, 2020.
- KOPILER, A. A. et al. Redes neurais artificiais e suas aplicações no setor elétrico. *Revista de Engenharias da Faculdade Salesiana*, v. 1, n. 9, p. 27–33, 2019.
- LEMOS, L. E. F. d. Degradação prematura da isolamento papel-óleo em transformadores e reatores de potência devido a ação de enxofre corrosivo. 2015.

- LI, E. Dissolved gas data in transformer oil—fault diagnosis of power transformers with membership degree. *IEEE data-port*, 2019. Disponível em: <<https://iee-dataport.org/documents/dissolved-gas-data-transformer-oil-fault-diagnosis-power-transformers-membership-degree>>.
- LI, E. et al. Improved fuzzy c-means clustering for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis data. *Energies*, MDPI, v. 11, n. 9, p. 2344, 2018.
- LIMA, S. L. d. et al. Diagnostico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando a teoria da extensão. Universidade Federal do Maranhão, 2008.
- LORENA, A. C.; CARVALHO, A. C. P. d. L. F. Introdução às máquinas de vetores suporte (support vector machines). 2003.
- LUO, Z. et al. Dissolved gas analysis of insulating oil in electric power transformers: a case study using sdae-lstm. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Limited, v. 2020, p. 1–10, 2020.
- LYRA, W. d. S. et al. Classificação periódica: um exemplo didático para ensinar análise de componentes principais. *Química Nova*, SciELO Brasil, v. 33, p. 1594–1597, 2010.
- MANOCHA, S.; GIROLAMI, M. A. An empirical analysis of the probabilistic k-nearest neighbour classifier. *Pattern Recognition Letters*, Elsevier, v. 28, n. 13, p. 1818–1824, 2007.
- MESQUITA, P. S. B. *Um modelo de regressão logística para avaliação dos programas de pós-graduação no brasil. 2014*. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)—Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, 2014.
- MILDEMBERGER, L. et al. Avaliação da degradação de distintos tipos de sistemas de isolamento papel-óleo usados em transformadores. 2013.
- MINUSSI, J. A.; DAMACENA, C.; JR, W. L. N. Um modelo de previsão de solvência utilizando regressão logística. *Revista de Administração Contemporânea*, SciELO Brasil, v. 6, p. 109–128, 2002.
- MORAIS, D. R. et al. Ferramenta inteligente para detecção de falhas incipientes em transformadores baseada na análise de gases dissolvidos no óleo isolante. Florianópolis, SC, 2004.
- NACARATO, R. L. et al. Diagnóstico de falha em transformadores de alta tensão com redes neurais artificiais. *Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação*, v. 2, n. 1, p. 374–378, 2018.
- NATALINO, R. Caracterização de açúcar mascavo aplicando análise das componentes principais a dados espectrométricos. Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- NITIN, K.; HELONDE, J. Improvement in transformer diagnosis by dga using fuzzy logic, 2013 journal of electrical engineering & technology, vol. 9, pp. 615–621, 2014.[9] duval, m. and dukaram, j. *Improving the Reliability of the Transformer Gas-in-Oil Diagnosis*, *IEEE Electrical insulation magazine*, v. 21, n. 4, p. 21–27, 2005.
- OLIVEIRA, A. L. *Perceptron Dilatação-Erosão Linear com Treinamento Baseado em Otimização DC: Aplicações em Problemas de Regressão e Classificação*. Tese (Doutorado) — [sn], 2023.

- OLIVEIRA, W. D. d. *Operação de busca exata aos K-vizinhos mais próximos reversos em espaços métricos*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2010.
- PAULA, J. F. S. de et al. Algoritmos e modelos do ldc e do oltc uma análise comparativa para estudos de fluxo de carga. *Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica*, v. 3, n. 2, p. 116–125, 2021.
- PINTO, Y. G.; ROCHA, M. d.; RAMOS, G. Comparação entre krigagem ordinária e krigagem lognormal, aplicadas a uma base de dados de cobre da mina sequeirinho. 2021.
- PORTELLA, M. G. et al. Estudo comparativo do envelhecimento químico acelerado de papel kraft termoequilizado e convencional. In: *VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)*. [S.l.: s.n.], 2011.
- PUC-RIO, E. E. *Leonardo Torres Bispo dos Santos*. Tese (Doutorado) — PUC-Rio, 2009.
- RAUBER, T. W. Redes neurais artificiais. *Universidade Federal do Espírito Santo*, v. 29, 2005.
- RUFINO, H. L. P. et al. Algoritmo de aprendizado supervisionado-baseado em máquinas de vetores de suporte-uma contribuição para o reconhecimento de dados desbalanceados. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- SÁ, A.; NEPOMUCENO, P. Avaliação do grau de polimerização antes e após a secagem de transformadores em fábrica. *Anais do XIV SNPTEE-Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Belém*, 1997.
- SABIN, J. G.; FERRÃO, M. F.; FURTADO, J. C. Análise multivariada aplicada na identificação de fármacos antidepressivos. parte ii: Análise por componentes principais (pca) e o método de classificação simca. *Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, SciELO Brasil*, v. 40, p. 387–396, 2004.
- SALAMI, A.; PAHLEVANI, P. Neural network approach for fault diagnosis of transformers. In: IEEE. *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*. [S.l.], 2008. p. 1346–1349.
- SANCHES, M. K. *Aprendizado de máquina semi-supervisionado: proposta de um algoritmo para rotular exemplos a partir de poucos exemplos rotulados*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2003.
- SCHMITT, J. et al. Pré-processamento para a mineração de dados: uso da análise de componentes principais com escalonamento ótimo. Florianópolis, SC, 2005.
- SENNA, S. L. de. Computação evolucionária aplicada ao diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência utilizando dados de cromatografia. Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
- SILVA, D. F. B. F. d. Pré-processamento de dados e comparação entre algoritmos de machine learning para a análise preditiva de falhas em linhas de produção para o controle. 2021.
- SILVA, J. G. B. d. Aplicação da análise de componentes principais (pca) no diagnóstico de defeitos de rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução. 2008.

- SINGH, J. et al. Condition assessment of power transformer using dissolved gas analysis. *Int. J. Adv. Res. Electr., Electron. Instrum. Eng.*, v. 5, n. 4, p. 1–6, 2016.
- SIQUEIRA, R. F. et al. *Redução de dimensionalidade em bases de dados de classificação hierárquica multirrótulo usando autoencoders*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.
- SOUZA, A. M. d.; POPPI, R. J. Experimento didático de quimiometria para análise exploratória de óleos vegetais comestíveis por espectroscopia no infravermelho médio e análise de componentes principais: um tutorial, parte i. *Química nova*, SciELO Brasil, v. 35, p. 223–229, 2012.
- SUTTON, C. Nearest-neighbor methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, Wiley Online Library, v. 4, n. 3, p. 307–309, 2012.
- TAVARES, L. A.; MEIRA, M. C.; AMARAL, S. F. do. Inteligência artificial na educação: Survey. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 7, p. 48699–48714, 2020.
- TENBOHLEN, S.; JAGERS, J.; VAHIDI, F. Standardized survey of transformer reliability: On behalf of cigre wg a2. 37. In: IEEE. *2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM)*. [S.l.], 2017. v. 2, p. 593–596.
- TISSOT, H. C.; CAMARGO, L. C.; POZO, A. T. Treinamento de redes neurais feedforward: comparativo dos algoritmos backpropagation e differential evolution. In: *Brazilian Conference on Intelligent Systems*. [S.l.: s.n.], 2012.
- TRAMONTIN, E. R.; RIVA, A. D. Unindo knn e marketing digital: Algoritmo de recomendação. In: SBC. *Anais da II Escola Regional de Computação do Rio Grande do Sul*. [S.l.], 2022. p. 93–104.
- VENDRAMETO, H. V. Avaliação do ciclo de vida de transformadores de potência considerando aspectos técnicos, regulatórios e econômicos. Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.
- VISHAL, S.; VIKAS, P. Transformer's history and its insulating oil. In: *5th National Conf., INDIACom, Computing For Nation Development*. [S.l.: s.n.], 2011.
- YANG, M.-T.; HU, L.-S. Intelligent fault types diagnostic system for dissolved gas analysis of oil-immersed power transformer. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, IEEE, v. 20, n. 6, p. 2317–2324, 2013.
- ZAKARIA, F.; JOHARI, D.; MUSIRIN, I. Artificial neural network (ann) application in dissolved gas analysis (dga) methods for the detection of incipient faults in oil-filled power transformer. In: IEEE. *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*. [S.l.], 2012. p. 328–332.
- ZHANG, Y. et al. A new support vector machine model based on improved imperialist competitive algorithm for fault diagnosis of oil-immersed transformers. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, v. 12, n. 2, p. 830–839, 2017.
- ZIRBES, R.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Metodologias para avaliação e diagnóstico do estado de isolamentos de papel impregnado com óleo mineral. *Sba: Controle e Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, SciELO Brasil, v. 16, p. 318–331, 2005.

# A Base de Dados

## A.1 Dados com Diagnóstico Normal

Tabela 22 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 1

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 21             | 63              | 4                             | 87                            | 1                             | NO     | 4              | 5               | 6                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 61              | 6                             | 81                            | 1                             | NO     | 13             | 15              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 58              | 5                             | 77                            | 1                             | NO     | 13             | 14              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 56              | 6                             | 73                            | 1                             | NO     | 22             | 12              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 58              | 5                             | 75                            | 1                             | NO     | 9              | 13              | 2                             | 33                            | 0.01                          |
| NO     | 11             | 56              | 5                             | 75                            | 1                             | NO     | 17             | 16              | 2                             | 31                            | 0.01                          |
| NO     | 10             | 61              | 5                             | 76                            | 1                             | NO     | 10             | 6               | 1                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 37              | 3                             | 40                            | 1                             | NO     | 18             | 20              | 2                             | 26                            | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 36              | 2                             | 38                            | 1                             | NO     | 20             | 5               | 3                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 28              | 4                             | 13                            | 1                             | NO     | 35             | 4               | 21                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 18              | 1                             | 4                             | 1                             | NO     | 2              | 12              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 18              | 0.01                          | 1                             | 1                             | NO     | 5              | 3               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 2               | 1                             | 1                             | 1                             | NO     | 7              | 5               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 17             | 37              | 4                             | 32                            | 1                             | NO     | 6              | 6               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 24              | 3                             | 20                            | 1                             | NO     | 6              | 7               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 38             | 22              | 1                             | 27                            | 1                             | NO     | 9              | 8               | 7                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 35             | 19              | 1                             | 20                            | 1                             | NO     | 22             | 4               | 48                            | 26                            | 0.01                          |
| NO     | 30             | 20              | 1                             | 21                            | 1                             | NO     | 33             | 8               | 4                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 21              | 1                             | 23                            | 1                             | NO     | 31             | 7               | 3                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 40             | 23              | 1                             | 28                            | 1                             | NO     | 28             | 6               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 24             | 19              | 2                             | 25                            | 1                             | NO     | 28             | 6               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 20              | 1                             | 27                            | 1                             | NO     | 18             | 5               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 16              | 1                             | 18                            | 1                             | NO     | 11             | 4               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 37             | 12              | 7                             | 18                            | 1                             | NO     | 2              | 1               | 5                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 54             | 15              | 7                             | 20                            | 1                             | NO     | 13             | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 23             | 13              | 5                             | 15                            | 1                             | NO     | 17             | 3               | 12                            | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 32             | 24              | 1                             | 23                            | 1                             | NO     | 15             | 5               | 9                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 18             | 11              | 1                             | 20                            | 1                             | NO     | 76             | 8               | 9                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 17             | 9               | 1                             | 22                            | 1                             | NO     | 4              | 15              | 3                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 12              | 1                             | 12                            | 1                             | NO     | 5              | 12              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 19              | 2                             | 24                            | 1                             | NO     | 5              | 15              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 17              | 2                             | 20                            | 1                             | NO     | 6              | 18              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 15              | 1                             | 24                            | 1                             | NO     | 4              | 12              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 47              | 7                             | 63                            | 1                             | NO     | 4              | 14              | 3                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 14              | 1                             | 19                            | 1                             | NO     | 5              | 13              | 2                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 11              | 1                             | 15                            | 1                             | NO     | 6              | 10              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 16              | 1                             | 21                            | 1                             | NO     | 10             | 11              | 2                             | 3                             | 0.01                          |

Tabela 23 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 2

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 2              | 1               | 12                            | 0.01                          | 1                             | NO     | 2              | 1               | 5                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 87             | 76              | 9                             | 345                           | 1                             | NO     | 13             | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 73             | 62              | 51                            | 10                            | 1                             | NO     | 17             | 3               | 12                            | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 76             | 53              | 36                            | 7                             | 1                             | NO     | 15             | 5               | 9                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 56             | 43              | 36                            | 8                             | 1                             | NO     | 76             | 8               | 9                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 21             | 28              | 40                            | 6                             | 1                             | NO     | 12             | 20              | 1                             | 16                            | 0.01                          |
| NO     | 27             | 31              | 41                            | 6                             | 1                             | NO     | 13             | 13              | 1                             | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 41             | 34              | 28                            | 6                             | 1                             | NO     | 8              | 2               | 20                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 41             | 11              | 13                            | 2                             | 1                             | NO     | 10             | 3               | 20                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 3               | 5                             | 2                             | 1                             | NO     | 7              | 2               | 11                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 25             | 8               | 10                            | 1                             | 1                             | NO     | 9              | 6               | 24                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 9               | 7                             | 2                             | 1                             | NO     | 9              | 6               | 24                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 9               | 7                             | 2                             | 1                             | NO     | 9              | 8               | 25                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 5               | 5                             | 2                             | 1                             | NO     | 13             | 10              | 16                            | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 5              | 5               | 5                             | 1                             | 1                             | NO     | 22             | 13              | 17                            | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 27             | 11              | 24                            | 2                             | 1                             | NO     | 25             | 9               | 19                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 19             | 13              | 22                            | 20                            | 1                             | NO     | 25             | 9               | 16                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 16              | 12                            | 5                             | 1                             | NO     | 15             | 7               | 12                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 13              | 23                            | 7                             | 1                             | NO     | 15             | 5               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 42             | 29              | 25                            | 7                             | 1                             | NO     | 15             | 3               | 10                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 32             | 20              | 26                            | 6                             | 1                             | NO     | 16             | 6               | 7                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 31             | 20              | 17                            | 5                             | 1                             | NO     | 10             | 3               | 3                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 31             | 19              | 16                            | 5                             | 1                             | NO     | 15             | 25              | 3                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 36             | 46              | 9                             | 8                             | 1                             | NO     | 21             | 31              | 3                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 27              | 6                             | 5                             | 1                             | NO     | 24             | 24              | 2                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 31             | 3               | 15                            | 3                             | 1                             | NO     | 26             | 24              | 2                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 24             | 22              | 8                             | 4                             | 1                             | NO     | 31             | 23              | 3                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 11              | 5                             | 2                             | 1                             | NO     | 31             | 18              | 2                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 4               | 3                             | 1                             | 1                             | NO     | 8              | 5               | 11                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 67              | 44                            | 26                            | 1                             | NO     | 6              | 5               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 32              | 10                            | 6                             | 1                             | NO     | 6              | 5               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 27              | 11                            | 5                             | 1                             | NO     | 11             | 6               | 10                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 17             | 14              | 13                            | 2                             | 1                             | NO     | 9              | 5               | 9                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 13              | 7                             | 3                             | 1                             | NO     | 4              | 17              | 4                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 12              | 7                             | 3                             | 1                             | NO     | 11             | 3               | 8                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 11              | 5                             | 2                             | 1                             | NO     | 12             | 7               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 4               | 3                             | 0.01                          | 1                             | NO     | 16             | 5               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 3               | 4                             | 1                             | 1                             | NO     | 12             | 5               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 4               | 8                             | 2                             | 1                             | NO     | 3              | 2               | 6                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 8               | 8                             | 2                             | 1                             | NO     | 6              | 1               | 6                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 17              | 2                             | 23                            | 1                             | NO     | 12             | 11              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 6               | 10                            | 1                             | 1                             | NO     | 10             | 13              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 54             | 38              | 90                            | 10                            | 1                             | NO     | 7              | 10              | 1                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 6               | 10                            | 2                             | 1                             | NO     | 7              | 12              | 4                             | 2                             | 0.01                          |

Tabela 24 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 3

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 7              | 7               | 8                             | 2                             | 1                             | NO     | 4              | 1               | 6                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 6               | 6                             | 1                             | 1                             | NO     | 9              | 2               | 19                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 8               | 7                             | 2                             | 1                             | NO     | 10             | 17              | 3                             | 15                            | 0.01                          |
| NO     | 6              | 7               | 7                             | 2                             | 1                             | NO     | 8              | 2               | 8                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 15              | 4                             | 1                             | 1                             | NO     | 2              | 3               | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 9              | 10              | 4                             | 2                             | 1                             | NO     | 3              | 5               | 4                             | 15                            | 0.01                          |
| NO     | 10             | 9               | 3                             | 2                             | 1                             | NO     | 16             | 4               | 4                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 9              | 8               | 4                             | 2                             | 1                             | NO     | 6              | 3               | 1                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 2               | 6                             | 4                             | 1                             | NO     | 20             | 5               | 9                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 4               | 5                             | 1                             | 1                             | NO     | 21             | 5               | 19                            | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 3               | 3                             | 0.01                          | 1                             | NO     | 25             | 4               | 22                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 6               | 6                             | 1                             | 1                             | NO     | 16             | 12              | 19                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 3               | 0.01                          | 1                             | 1                             | NO     | 18             | 18              | 5                             | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 6              | 10              | 6                             | 3                             | 1                             | NO     | 40             | 2               | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 54              | 35                            | 15                            | 1                             | NO     | 7              | 17              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 49              | 34                            | 14                            | 1                             | NO     | 9              | 17              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 32              | 25                            | 8                             | 1                             | NO     | 8              | 16              | 2                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 25             | 30              | 22                            | 9                             | 1                             | NO     | 11             | 7               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 30              | 17                            | 4                             | 1                             | NO     | 9              | 7               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 28             | 15              | 16                            | 3                             | 1                             | NO     | 10             | 8               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 1                             | NO     | 5              | 10              | 24                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 56              | 28                            | 13                            | 1                             | NO     | 4              | 8               | 21                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 23             | 39              | 17                            | 7                             | 1                             | NO     | 7              | 12              | 25                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 36             | 59              | 34                            | 13                            | 1                             | NO     | 5              | 13              | 18                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 28             | 35              | 19                            | 7                             | 1                             | NO     | 9              | 17              | 15                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 27             | 30              | 17                            | 5                             | 1                             | NO     | 9              | 19              | 11                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 35              | 21                            | 9                             | 1                             | NO     | 15             | 19              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 22              | 18                            | 4                             | 1                             | NO     | 18             | 18              | 4                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 33             | 22              | 11                            | 2                             | 1                             | NO     | 19             | 17              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 7               | 5                             | 2                             | 1                             | NO     | 17             | 16              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 7               | 14                            | 3                             | 1                             | NO     | 17             | 15              | 3                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 13              | 15                            | 3                             | 1                             | NO     | 11             | 12              | 3                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 24             | 11              | 10                            | 1                             | 1                             | NO     | 6              | 10              | 1                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 13              | 30                            | 10                            | 1                             | NO     | 12             | 1               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 27              | 33                            | 11                            | 1                             | NO     | 5              | 7               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 20              | 17                            | 8                             | 1                             | NO     | 8              | 7               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 19              | 20                            | 7                             | 1                             | NO     | 5              | 9               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 14              | 17                            | 4                             | 1                             | NO     | 4              | 8               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 25             | 14              | 5                             | 5                             | 1                             | NO     | 17             | 8               | 1                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 6               | 2                             | 1                             | 1                             | NO     | 21             | 10              | 3                             | 2                             | 0.01                          |

Tabela 25 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 4

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 25             | 7               | 3                             | 2                             | 1                             | NO     | 5              | 10              | 24                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 7               | 4                             | 2                             | 1                             | NO     | 4              | 8               | 21                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 22              | 16                            | 4                             | 1                             | NO     | 7              | 12              | 25                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 20              | 14                            | 5                             | 1                             | NO     | 5              | 13              | 18                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 9              | 19              | 13                            | 3                             | 1                             | NO     | 9              | 17              | 15                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 13              | 4                             | 1                             | 1                             | NO     | 9              | 19              | 11                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 12             | 11              | 4                             | 1                             | 1                             | NO     | 15             | 19              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 8               | 22                            | 5                             | 1                             | NO     | 18             | 18              | 4                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 18              | 26                            | 6                             | 1                             | NO     | 19             | 17              | 3                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 11              | 22                            | 5                             | 1                             | NO     | 17             | 16              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 16              | 24                            | 6                             | 1                             | NO     | 17             | 15              | 3                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 11              | 23                            | 7                             | 1                             | NO     | 11             | 12              | 3                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 9              | 14              | 17                            | 4                             | 1                             | NO     | 6              | 10              | 1                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 7               | 12                            | 3                             | 1                             | NO     | 12             | 1               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 6               | 9                             | 2                             | 1                             | NO     | 5              | 7               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 0.01           | 50              | 24                            | 17                            | 1                             | NO     | 8              | 7               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 29              | 7                             | 3                             | 1                             | NO     | 5              | 9               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 23              | 15                            | 4                             | 1                             | NO     | 4              | 8               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 21              | 14                            | 3                             | 1                             | NO     | 17             | 8               | 1                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 41             | 20              | 13                            | 3                             | 1                             | NO     | 21             | 10              | 3                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 18              | 12                            | 5                             | 1                             | NO     | 3              | 4               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 18              | 13                            | 3                             | 1                             | NO     | 4              | 4               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 14              | 9                             | 2                             | 1                             | NO     | 5              | 6               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 9               | 30                            | 5                             | 1                             | NO     | 7              | 8               | 11                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 21             | 7               | 24                            | 3                             | 1                             | NO     | 8              | 8               | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 34             | 10              | 14                            | 5                             | 1                             | NO     | 5              | 13              | 35                            | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 17             | 11              | 15                            | 8                             | 1                             | NO     | 5              | 13              | 16                            | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 53             | 9               | 17                            | 6                             | 1                             | NO     | 2              | 9               | 14                            | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 5               | 14                            | 2                             | 1                             | NO     | 5              | 14              | 21                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 24             | 10              | 10                            | 1                             | 1                             | NO     | 2              | 12              | 18                            | 17                            | 0.01                          |
| NO     | 40             | 16              | 10                            | 1                             | 1                             | NO     | 2              | 12              | 9                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 36              | 5                             | 57                            | 0.01                          | NO     | 11             | 1               | 12                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 60             | 15              | 21                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 15             | 7               | 9                             | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 20             | 122             | 4                             | 44                            | 0.01                          | NO     | 2              | 5               | 5                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 49              | 2                             | 56                            | 0.01                          | NO     | 3              | 5               | 6                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 45              | 6                             | 52                            | 0.01                          | NO     | 11             | 6               | 11                            | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 12             | 41              | 3                             | 37                            | 0.01                          | NO     | 9              | 5               | 10                            | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 20              | 20                            | 27                            | 0.01                          | NO     | 2              | 4               | 2                             | 53                            | 0.01                          |
| NO     | 136            | 57              | 22                            | 343                           | 0.01                          | NO     | 2              | 18              | 2                             | 38                            | 0.01                          |
| NO     | 194            | 85              | 17                            | 473                           | 0.01                          | NO     | 20             | 19              | 2                             | 38                            | 0.01                          |

Tabela 26 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 5

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 125            | 96              | 14                            | 499                           | 0.01                          | NO     | 4              | 13              | 3                             | 25                            | 0.01                          |
| NO     | 20             | 88              | 91                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 12             | 12              | 5                             | 19                            | 0.01                          |
| NO     | 15             | 83              | 65                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 10             | 6               | 3                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 13             | 98              | 87                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 1              | 3               | 3                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 37             | 14              | 184                           | 43                            | 0.01                          | NO     | 5              | 15              | 1                             | 28                            | 0.01                          |
| NO     | 37             | 17              | 185                           | 26                            | 0.01                          | NO     | 5              | 17              | 2                             | 30                            | 0.01                          |
| NO     | 33             | 15              | 101                           | 6                             | 0.01                          | NO     | 2              | 18              | 2                             | 38                            | 0.01                          |
| NO     | 7              | 10              | 211                           | 40                            | 0.01                          | NO     | 3              | 5               | 4                             | 19                            | 0.01                          |
| NO     | 8              | 9               | 112                           | 30                            | 0.01                          | NO     | 3              | 5               | 4                             | 18                            | 0.01                          |
| NO     | 32             | 108             | 102                           | 22                            | 0.01                          | NO     | 3              | 6               | 4                             | 19                            | 0.01                          |
| NO     | 5              | 42              | 1                             | 38                            | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 1                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 52             | 56              | 7                             | 24                            | 0.01                          | NO     | 22             | 11              | 15                            | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 21             | 26              | 20                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 7              | 16              | 34                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 51             | 124             | 37                            | 58                            | 0.01                          | NO     | 3              | 5               | 4                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 55             | 115             | 29                            | 49                            | 0.01                          | NO     | 2              | 4               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 52             | 103             | 41                            | 49                            | 0.01                          | NO     | 12             | 19              | 14                            | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 59             | 112             | 44                            | 50                            | 0.01                          | NO     | 10             | 11              | 12                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 62             | 118             | 40                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 3              | 24              | 11                            | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 67             | 119             | 40                            | 50                            | 0.01                          | NO     | 4              | 18              | 10                            | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 69             | 112             | 38                            | 51                            | 0.01                          | NO     | 3              | 16              | 10                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 123             | 43                            | 53                            | 0.01                          | NO     | 16             | 20              | 10                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 57             | 98              | 34                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 7              | 19              | 14                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 83             | 115             | 39                            | 56                            | 0.01                          | NO     | 5              | 15              | 17                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 68             | 99              | 37                            | 49                            | 0.01                          | NO     | 3              | 6               | 8                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 68             | 99              | 37                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 4              | 8               | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 69             | 97              | 38                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 17             | 6               | 20                            | 23                            | 0.01                          |
| NO     | 65             | 97              | 32                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 14             | 5               | 31                            | 37                            | 0.01                          |
| NO     | 46             | 92              | 38                            | 51                            | 0.01                          | NO     | 3              | 6               | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 76             | 88              | 38                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 3              | 3               | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 46             | 61              | 23                            | 29                            | 0.01                          | NO     | 10             | 18              | 10                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 71             | 90              | 30                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 26             | 22              | 1                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 58             | 75              | 32                            | 38                            | 0.01                          | NO     | 4              | 16              | 12                            | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 47             | 82              | 25                            | 40                            | 0.01                          | NO     | 4              | 12              | 24                            | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 58             | 58              | 11                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 4              | 11              | 23                            | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 55             | 43              | 15                            | 29                            | 0.01                          | NO     | 7              | 9               | 6                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 49              | 16                            | 34                            | 0.01                          | NO     | 14             | 8               | 4                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 72             | 39              | 31                            | 25                            | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 79             | 61              | 43                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 9              | 7               | 10                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 79             | 63              | 28                            | 39                            | 0.01                          | NO     | 7              | 19              | 19                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 41             | 59              | 24                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 26             | 15              | 15                            | 5                             | 0.01                          |

Tabela 27 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 6

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 104            | 69              | 18                            | 37                            | 0.01                          | NO     | 20             | 16              | 17                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 76             | 48              | 16                            | 34                            | 0.01                          | NO     | 14             | 15              | 17                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 87             | 49              | 15                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 12             | 15              | 19                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 92             | 59              | 33                            | 46                            | 0.01                          | NO     | 12             | 15              | 19                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 108            | 58              | 22                            | 30                            | 0.01                          | NO     | 14             | 14              | 17                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 84             | 52              | 29                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 16             | 14              | 21                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 84             | 22              | 26                            | 102                           | 0.01                          | NO     | 48             | 14              | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 75             | 36              | 11                            | 36                            | 0.01                          | NO     | 40             | 11              | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 123             | 43                            | 53                            | 0.01                          | NO     | 26             | 28              | 17                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 57             | 98              | 34                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 13             | 6               | 12                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 83             | 115             | 39                            | 56                            | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 9                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 68             | 99              | 37                            | 49                            | 0.01                          | NO     | 10             | 9               | 13                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 68             | 99              | 37                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 2              | 7               | 5                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 69             | 97              | 38                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 2              | 5               | 2                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 65             | 97              | 32                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 4              | 17              | 21                            | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 46             | 92              | 38                            | 51                            | 0.01                          | NO     | 8              | 44              | 1                             | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 76             | 88              | 38                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 3              | 37              | 2                             | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 46             | 61              | 23                            | 29                            | 0.01                          | NO     | 3              | 24              | 1                             | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 71             | 90              | 30                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 13                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 58             | 75              | 32                            | 38                            | 0.01                          | NO     | 2              | 5               | 5                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 47             | 82              | 25                            | 40                            | 0.01                          | NO     | 7              | 7               | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 58             | 58              | 11                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 10             | 4               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 55             | 43              | 15                            | 29                            | 0.01                          | NO     | 22             | 1               | 70                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 49              | 16                            | 34                            | 0.01                          | NO     | 3              | 16              | 18                            | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 72             | 39              | 31                            | 25                            | 0.01                          | NO     | 4              | 3               | 2                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 79             | 61              | 43                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 23             | 7               | 17                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 79             | 63              | 28                            | 39                            | 0.01                          | NO     | 1              | 6               | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 41             | 59              | 24                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 1              | 5               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 104            | 69              | 18                            | 37                            | 0.01                          | NO     | 14             | 5               | 9                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 76             | 48              | 16                            | 34                            | 0.01                          | NO     | 13             | 3               | 50                            | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 87             | 49              | 15                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 53             | 6               | 17                            | 22                            | 0.01                          |
| NO     | 92             | 59              | 33                            | 46                            | 0.01                          | NO     | 12             | 21              | 8                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 108            | 58              | 22                            | 30                            | 0.01                          | NO     | 52             | 6               | 18                            | 20                            | 0.01                          |
| NO     | 84             | 52              | 29                            | 42                            | 0.01                          | NO     | 10             | 12              | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 75             | 36              | 11                            | 36                            | 0.01                          | NO     | 3              | 5               | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 139            | 127             | 6                             | 195                           | 0.01                          | NO     | 16             | 27              | 12                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 115             | 5                             | 187                           | 0.01                          | NO     | 15             | 21              | 10                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 168            | 123             | 8                             | 184                           | 0.01                          | NO     | 16             | 19              | 6                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 183            | 116             | 7                             | 198                           | 0.01                          | NO     | 12             | 16              | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 91             | 93              | 7                             | 60                            | 0.01                          | NO     | 11             | 17              | 4                             | 1                             | 0.01                          |

Tabela 28 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 7

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 90             | 43              | 12                            | 64                            | 0.01                          | NO     | 6              | 15              | 6                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 60              | 6                             | 52                            | 0.01                          | NO     | 4              | 29              | 15                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 34             | 14              | 15                            | 15                            | 0.01                          | NO     | 4              | 14              | 11                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 80             | 79              | 21                            | 146                           | 0.01                          | NO     | 6              | 26              | 17                            | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 111            | 102             | 47                            | 180                           | 0.01                          | NO     | 6              | 25              | 13                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 106            | 47              | 19                            | 53                            | 0.01                          | NO     | 7              | 16              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 91             | 89              | 62                            | 132                           | 0.01                          | NO     | 9              | 12              | 7                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 23              | 23                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 5              | 9               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 31             | 21              | 9                             | 40                            | 0.01                          | NO     | 12             | 28              | 5                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 81             | 41              | 12                            | 98                            | 0.01                          | NO     | 26             | 16              | 7                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 52             | 40              | 17                            | 97                            | 0.01                          | NO     | 13             | 7               | 8                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 40              | 13                            | 182                           | 0.01                          | NO     | 10             | 6               | 9                             | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 3              | 31              | 12                            | 161                           | 0.01                          | NO     | 15             | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 42              | 14                            | 176                           | 0.01                          | NO     | 10             | 1               | 1                             | 23                            | 0.01                          |
| NO     | 3              | 54              | 10                            | 189                           | 0.01                          | NO     | 21             | 14              | 12                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 49              | 9                             | 176                           | 0.01                          | NO     | 96             | 9               | 7                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 46              | 10                            | 166                           | 0.01                          | NO     | 92             | 20              | 3                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 51              | 10                            | 166                           | 0.01                          | NO     | 97             | 14              | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 47              | 10                            | 170                           | 0.01                          | NO     | 72             | 12              | 5                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 52              | 12                            | 175                           | 0.01                          | NO     | 40             | 6               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 44              | 11                            | 154                           | 0.01                          | NO     | 95             | 12              | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 31              | 8                             | 128                           | 0.01                          | NO     | 83             | 9               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 47              | 8                             | 116                           | 0.01                          | NO     | 43             | 5               | 4                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 80              | 13                            | 231                           | 0.01                          | NO     | 7              | 9               | 8                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 28              | 19                            | 209                           | 0.01                          | NO     | 9              | 9               | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 69              | 15                            | 213                           | 0.01                          | NO     | 10             | 6               | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 82              | 23                            | 278                           | 0.01                          | NO     | 8              | 6               | 7                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 72              | 23                            | 250                           | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 84              | 41                            | 241                           | 0.01                          | NO     | 14             | 15              | 13                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 81              | 33                            | 231                           | 0.01                          | NO     | 14             | 29              | 15                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 85              | 36                            | 220                           | 0.01                          | NO     | 9              | 8               | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 75              | 18                            | 160                           | 0.01                          | NO     | 26             | 19              | 8                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 27             | 56              | 16                            | 112                           | 0.01                          | NO     | 34             | 16              | 5                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 63             | 59              | 14                            | 106                           | 0.01                          | NO     | 31             | 14              | 5                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 42              | 5                             | 145                           | 0.01                          | NO     | 22             | 10              | 4                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 38              | 4                             | 120                           | 0.01                          | NO     | 34             | 17              | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 39              | 2                             | 72                            | 0.01                          | NO     | 36             | 2               | 6                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 32              | 3                             | 56                            | 0.01                          | NO     | 37             | 9               | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 31              | 2                             | 53                            | 0.01                          | NO     | 44             | 12              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 25              | 3                             | 39                            | 0.01                          | NO     | 29             | 11              | 8                             | 4                             | 0.01                          |

Tabela 29 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 8

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 3              | 92              | 20                            | 259                           | 0.01                          | NO     | 24             | 6               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 46              | 12                            | 131                           | 0.01                          | NO     | 42             | 10              | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 99              | 41                            | 421                           | 0.01                          | NO     | 50             | 7               | 10                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 69              | 20                            | 185                           | 0.01                          | NO     | 49             | 6               | 15                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 77              | 15                            | 185                           | 0.01                          | NO     | 43             | 6               | 8                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 96              | 17                            | 184                           | 0.01                          | NO     | 34             | 4               | 8                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 98              | 11                            | 209                           | 0.01                          | NO     | 35             | 7               | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 54              | 9                             | 169                           | 0.01                          | NO     | 9              | 1               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 49              | 7                             | 258                           | 0.01                          | NO     | 8              | 15              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 68              | 6                             | 265                           | 0.01                          | NO     | 4              | 5               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 71              | 6                             | 274                           | 0.01                          | NO     | 5              | 8               | 7                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 59              | 8                             | 245                           | 0.01                          | NO     | 15             | 6               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 60              | 6                             | 239                           | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 1                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 66              | 6                             | 193                           | 0.01                          | NO     | 12             | 4               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 76              | 5                             | 191                           | 0.01                          | NO     | 11             | 3               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 27             | 73              | 5                             | 201                           | 0.01                          | NO     | 19             | 2               | 10                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 51              | 5                             | 148                           | 0.01                          | NO     | 17             | 2               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 58              | 6                             | 147                           | 0.01                          | NO     | 5              | 38              | 2                             | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 56              | 7                             | 156                           | 0.01                          | NO     | 4              | 17              | 2                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 13             | 67              | 8                             | 177                           | 0.01                          | NO     | 12             | 20              | 4                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 53              | 9                             | 125                           | 0.01                          | NO     | 1              | 7               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 71              | 18                            | 159                           | 0.01                          | NO     | 8              | 6               | 6                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 67              | 12                            | 147                           | 0.01                          | NO     | 25             | 11              | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 62              | 15                            | 137                           | 0.01                          | NO     | 20             | 10              | 9                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 86              | 15                            | 167                           | 0.01                          | NO     | 22             | 11              | 10                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 24             | 83              | 10                            | 179                           | 0.01                          | NO     | 15             | 5               | 5                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 65              | 10                            | 162                           | 0.01                          | NO     | 16             | 7               | 8                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 57              | 10                            | 346                           | 0.01                          | NO     | 5              | 6               | 13                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 47             | 79              | 9                             | 357                           | 0.01                          | NO     | 10             | 17              | 24                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 74             | 69              | 10                            | 326                           | 0.01                          | NO     | 10             | 18              | 20                            | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 44             | 69              | 10                            | 350                           | 0.01                          | NO     | 7              | 13              | 16                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 68              | 10                            | 317                           | 0.01                          | NO     | 23             | 2               | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 50              | 8                             | 196                           | 0.01                          | NO     | 15             | 5               | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 66              | 9                             | 193                           | 0.01                          | NO     | 20             | 10              | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 35             | 84              | 12                            | 158                           | 0.01                          | NO     | 15             | 3               | 1                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 53              | 6                             | 118                           | 0.01                          | NO     | 6              | 6               | 4                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 92              | 20                            | 259                           | 0.01                          | NO     | 5              | 4               | 3                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 1              | 46              | 12                            | 131                           | 0.01                          | NO     | 6              | 2               | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 99              | 41                            | 421                           | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 1                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 85              | 16                            | 200                           | 0.01                          | NO     | 8              | 14              | 19                            | 6                             | 0.01                          |

Tabela 30 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 9

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 5              | 69              | 20                            | 185                           | 0.01                          | NO     | 6              | 14              | 16                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 5              | 75              | 20                            | 195                           | 0.01                          | NO     | 8              | 12              | 14                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 94              | 18                            | 207                           | 0.01                          | NO     | 5              | 26              | 9                             | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 38             | 86              | 15                            | 225                           | 0.01                          | NO     | 57             | 9               | 8                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 17             | 55              | 10                            | 152                           | 0.01                          | NO     | 16             | 10              | 18                            | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 10             | 37              | 21                            | 61                            | 0.01                          | NO     | 14             | 9               | 10                            | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 28              | 18                            | 56                            | 0.01                          | NO     | 13             | 9               | 9                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 22              | 16                            | 52                            | 0.01                          | NO     | 9              | 16              | 16                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 15              | 12                            | 35                            | 0.01                          | NO     | 10             | 12              | 11                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 64              | 28                            | 80                            | 0.01                          | NO     | 12             | 8               | 14                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 31              | 25                            | 28                            | 0.01                          | NO     | 15             | 3               | 3                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 12             | 30              | 13                            | 31                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 2                             | 64                            | 0.01                          |
| NO     | 41             | 32              | 22                            | 15                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 38              | 3                             | 57                            | 0.01                          |
| NO     | 40             | 28              | 17                            | 11                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 35              | 3                             | 48                            | 0.01                          |
| NO     | 40             | 28              | 17                            | 11                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 30              | 1                             | 39                            | 0.01                          |
| NO     | 40             | 23              | 22                            | 11                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 31              | 2                             | 36                            | 0.01                          |
| NO     | 15             | 56              | 22                            | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 54              | 5                             | 64                            | 0.01                          |
| NO     | 16             | 35              | 15                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 38              | 3                             | 23                            | 0.01                          |
| NO     | 38             | 123             | 105                           | 51                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 17              | 1                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 37             | 39              | 47                            | 49                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 14              | 1                             | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 40             | 61              | 77                            | 55                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 21              | 1                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 43             | 59              | 66                            | 74                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 17              | 1                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 48             | 64              | 63                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 9               | 4                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 35             | 71              | 65                            | 45                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 16              | 4                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 40             | 61              | 28                            | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 20              | 5                             | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 22              | 11                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 84              | 33                            | 44                            | 0.01                          |
| NO     | 21             | 97              | 42                            | 97                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 84              | 33                            | 44                            | 0.01                          |
| NO     | 50             | 63              | 145                           | 35                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 3               | 17                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 28              | 53                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 18              | 5                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 81              | 174                           | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 12              | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 71              | 133                           | 30                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 11              | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 49              | 102                           | 25                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 18              | 5                             | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 59              | 110                           | 27                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 12              | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 64              | 112                           | 27                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 11              | 2                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 42             | 68              | 108                           | 22                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 19              | 55                            | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 62             | 130             | 111                           | 36                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 13              | 46                            | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 43             | 85              | 91                            | 28                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 40              | 13                            | 179                           | 0.01                          |
| NO     | 66             | 116             | 177                           | 50                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 46              | 12                            | 162                           | 0.01                          |
| NO     | 57             | 112             | 119                           | 34                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 11                            | 155                           | 0.01                          |
| NO     | 51             | 94              | 89                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 13                            | 150                           | 0.01                          |

Tabela 31 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 10

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 48             | 49              | 36                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 40              | 9                             | 149                           | 0.01                          |
| NO     | 63             | 90              | 107                           | 29                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 10                            | 156                           | 0.01                          |
| NO     | 25             | 29              | 34                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 36              | 9                             | 143                           | 0.01                          |
| NO     | 66             | 57              | 114                           | 47                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 38              | 10                            | 129                           | 0.01                          |
| NO     | 72             | 151             | 144                           | 54                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 40              | 8                             | 130                           | 0.01                          |
| NO     | 50             | 73              | 96                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 27              | 5                             | 68                            | 0.01                          |
| NO     | 52             | 49              | 91                            | 41                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 6                             | 149                           | 0.01                          |
| NO     | 12             | 21              | 12                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 44              | 8                             | 144                           | 0.01                          |
| NO     | 17             | 56              | 93                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 37              | 3                             | 128                           | 0.01                          |
| NO     | 5              | 103             | 28                            | 73                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 40              | 5                             | 135                           | 0.01                          |
| NO     | 3              | 98              | 29                            | 74                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 39              | 5                             | 109                           | 0.01                          |
| NO     | 2              | 91              | 29                            | 54                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 35              | 4                             | 97                            | 0.01                          |
| NO     | 1              | 108             | 18                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 39              | 4                             | 86                            | 0.01                          |
| NO     | 4              | 70              | 25                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 15              | 4                             | 23                            | 0.01                          |
| NO     | 5              | 64              | 59                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 64              | 6                             | 271                           | 0.01                          |
| NO     | 5              | 30              | 43                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 61              | 10                            | 261                           | 0.01                          |
| NO     | 6              | 59              | 27                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 61              | 7                             | 254                           | 0.01                          |
| NO     | 21             | 39              | 16                            | 19                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 60              | 7                             | 250                           | 0.01                          |
| NO     | 9              | 40              | 24                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 64              | 7                             | 236                           | 0.01                          |
| NO     | 8              | 39              | 28                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 61              | 4                             | 238                           | 0.01                          |
| NO     | 63             | 53              | 197                           | 34                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 65              | 6                             | 151                           | 0.01                          |
| NO     | 31             | 83              | 183                           | 45                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 59              | 6                             | 100                           | 0.01                          |
| NO     | 31             | 107             | 110                           | 21                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 76              | 11                            | 348                           | 0.01                          |
| NO     | 33             | 118             | 156                           | 26                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 67              | 9                             | 333                           | 0.01                          |
| NO     | 13             | 45              | 15                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 72              | 11                            | 341                           | 0.01                          |
| NO     | 18             | 48              | 26                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 75              | 11                            | 307                           | 0.01                          |
| NO     | 14             | 32              | 21                            | 20                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 76              | 9                             | 315                           | 0.01                          |
| NO     | 19             | 46              | 13                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 76              | 8                             | 251                           | 0.01                          |
| NO     | 30             | 81              | 146                           | 48                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 81              | 8                             | 221                           | 0.01                          |
| NO     | 19             | 71              | 109                           | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 80              | 8                             | 195                           | 0.01                          |
| NO     | 16             | 79              | 113                           | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 59              | 12                            | 188                           | 0.01                          |
| NO     | 16             | 68              | 103                           | 31                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 7               | 6                             | 22                            | 0.01                          |
| NO     | 14             | 57              | 82                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 26              | 18                            | 30                            | 0.01                          |
| NO     | 21             | 58              | 79                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 52              | 25                            | 28                            | 0.01                          |
| NO     | 24             | 46              | 52                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 51              | 24                            | 27                            | 0.01                          |
| NO     | 86             | 103             | 96                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 8               | 21                            | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 72             | 66              | 4                             | 10                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 9               | 8                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 82             | 54              | 18                            | 11                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 7               | 7                             | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 73              | 78                            | 26                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 21              | 8                             | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 13              | 49                            | 21                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 104             | 34                            | 71                            | 0.01                          |

Tabela 32 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 11

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 9              | 20              | 39                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 101             | 37                            | 66                            | 0.01                          |
| NO     | 10             | 36              | 32                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 126             | 38                            | 83                            | 0.01                          |
| NO     | 106            | 88              | 35                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 104             | 38                            | 72                            | 0.01                          |
| NO     | 50             | 53              | 26                            | 11                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 37              | 29                            | 23                            | 0.01                          |
| NO     | 40             | 34              | 21                            | 5                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 7               | 12                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 93              | 103                           | 45                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 5               | 8                             | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 18             | 37              | 34                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 15              | 19                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 8              | 23              | 20                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 15              | 22                            | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 26              | 20                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 25              | 22                            | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 17             | 23              | 16                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 49              | 31                            | 63                            | 0.01                          |
| NO     | 22             | 20              | 16                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 55              | 29                            | 58                            | 0.01                          |
| NO     | 41             | 57              | 30                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 61              | 27                            | 26                            | 0.01                          |
| NO     | 29             | 55              | 24                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 8               | 5                             | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 43             | 39              | 23                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 36              | 17                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 35             | 51              | 20                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 35              | 20                            | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 28              | 26                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 17              | 11                            | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 94             | 56              | 53                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 12              | 13                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 45              | 36                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 29              | 23                            | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 49             | 24              | 67                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 0.01           | 14              | 10                            | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 73             | 118             | 69                            | 37                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 37              | 11                            | 17                            | 0.01                          |
| NO     | 89             | 90              | 152                           | 38                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 36              | 12                            | 16                            | 0.01                          |
| NO     | 6              | 28              | 65                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 37              | 9                             | 20                            | 0.01                          |
| NO     | 7              | 35              | 12                            | 47                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 41              | 9                             | 14                            | 0.01                          |
| NO     | 6              | 29              | 9                             | 20                            | 0.01                          | NO     | 0.01           | 37              | 10                            | 12                            | 0.01                          |
| NO     | 12             | 32              | 26                            | 25                            | 0.01                          | NO     | 5              | 38              | 0.01                          | 20                            | 0.01                          |
| NO     | 31             | 63              | 21                            | 91                            | 0.01                          | NO     | 21             | 71              | 0.01                          | 43                            | 0.01                          |
| NO     | 5              | 65              | 16                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 2              | 17              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 12             | 89              | 8                             | 4                             | 0.01                          | NO     | 2              | 15              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 69             | 115             | 29                            | 50                            | 0.01                          | NO     | 58             | 9               | 0.01                          | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 10             | 34              | 19                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 74             | 1               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 64             | 48              | 20                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 2              | 12              | 0.01                          | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 12             | 78              | 39                            | 107                           | 0.01                          | NO     | 1              | 7               | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 90              | 46                            | 121                           | 0.01                          | NO     | 2              | 23              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 13             | 80              | 49                            | 108                           | 0.01                          | NO     | 6              | 20              | 0.01                          | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 87              | 43                            | 107                           | 0.01                          | NO     | 1              | 17              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 77              | 47                            | 95                            | 0.01                          | NO     | 1              | 20              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 67              | 45                            | 84                            | 0.01                          | NO     | 2              | 20              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 54              | 36                            | 61                            | 0.01                          | NO     | 2              | 17              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 15             | 37              | 12                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 2              | 15              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 54              | 31                            | 34                            | 0.01                          | NO     | 16             | 4               | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |

Tabela 33 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 12

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 37             | 23              | 22                            | 15                            | 0.01                          | NO     | 7              | 2               | 0.01                          | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 43              | 19                            | 39                            | 0.01                          | NO     | 13             | 6               | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 75              | 44                            | 33                            | 0.01                          | NO     | 13             | 11              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 26             | 93              | 48                            | 44                            | 0.01                          | NO     | 17             | 11              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 18             | 78              | 43                            | 46                            | 0.01                          | NO     | 17             | 11              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 42              | 38                            | 21                            | 0.01                          | NO     | 19             | 11              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 21             | 46              | 35                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 18             | 10              | 0.01                          | 13                            | 0.01                          |
| NO     | 19             | 37              | 30                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 26             | 12              | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 16             | 22              | 29                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 62             | 5               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 44             | 48              | 46                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 3              | 14              | 0.01                          | 18                            | 0.01                          |
| NO     | 47             | 38              | 35                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 10             | 19              | 0.01                          | 27                            | 0.01                          |
| NO     | 11             | 19              | 39                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 4              | 11              | 0.01                          | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 40              | 19                            | 10                            | 0.01                          | NO     | 4              | 10              | 0.01                          | 9                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 39              | 15                            | 14                            | 0.01                          | NO     | 2              | 4               | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 40              | 21                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 3              | 7               | 0.01                          | 31                            | 0.01                          |
| NO     | 2              | 42              | 21                            | 7                             | 0.01                          | NO     | 27             | 18              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 44              | 18                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 2              | 10              | 0.01                          | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 36              | 19                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 1              | 15              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 4              | 35              | 18                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 8              | 6               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 6              | 31              | 17                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 7              | 2               | 0.01                          | 149                           | 0.01                          |
| NO     | 5              | 46              | 30                            | 8                             | 0.01                          | NO     | 5              | 2               | 0.01                          | 126                           | 0.01                          |
| NO     | 44             | 69              | 17                            | 20                            | 0.01                          | NO     | 7              | 2               | 0.01                          | 144                           | 0.01                          |
| NO     | 52             | 66              | 22                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 13             | 5               | 0.01                          | 257                           | 0.01                          |
| NO     | 84             | 83              | 22                            | 20                            | 0.01                          | NO     | 8              | 5               | 0.01                          | 190                           | 0.01                          |
| NO     | 74             | 69              | 14                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 11             | 5               | 0.01                          | 188                           | 0.01                          |
| NO     | 40             | 62              | 17                            | 9                             | 0.01                          | NO     | 11             | 6               | 0.01                          | 189                           | 0.01                          |
| NO     | 82             | 38              | 11                            | 7                             | 0.01                          | NO     | 12             | 6               | 0.01                          | 191                           | 0.01                          |
| NO     | 2              | 32              | 23                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 6              | 6               | 0.01                          | 172                           | 0.01                          |
| NO     | 7              | 87              | 38                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 10             | 4               | 0.01                          | 188                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 71              | 37                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 9              | 4               | 0.01                          | 167                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 58              | 33                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 11             | 3               | 0.01                          | 151                           | 0.01                          |
| NO     | 21             | 87              | 53                            | 25                            | 0.01                          | NO     | 11             | 5               | 0.01                          | 167                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 97              | 52                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 9              | 4               | 0.01                          | 150                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 78              | 44                            | 19                            | 0.01                          | NO     | 83             | 5               | 0.01                          | 149                           | 0.01                          |
| NO     | 3              | 75              | 45                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 14             | 4               | 0.01                          | 123                           | 0.01                          |
| NO     | 10             | 30              | 39                            | 15                            | 0.01                          | NO     | 32             | 4               | 0.01                          | 140                           | 0.01                          |
| NO     | 11             | 44              | 48                            | 19                            | 0.01                          | NO     | 9              | 3               | 0.01                          | 111                           | 0.01                          |
| NO     | 16             | 57              | 46                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 13             | 3               | 0.01                          | 55                            | 0.01                          |
| NO     | 10             | 85              | 71                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 20             | 2               | 0.01                          | 40                            | 0.01                          |
| NO     | 9              | 73              | 56                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 33             | 2               | 0.01                          | 39                            | 0.01                          |

Tabela 34 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 13

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 11             | 76              | 56                            | 17                            | 0.01                          | NO     | 14             | 1               | 0.01                          | 17                            | 0.01                          |
| NO     | 16             | 72              | 72                            | 22                            | 0.01                          | NO     | 22             | 26              | 0.01                          | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 20             | 60              | 47                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 11             | 1               | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 25             | 73              | 82                            | 23                            | 0.01                          | NO     | 4              | 15              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 23             | 59              | 59                            | 16                            | 0.01                          | NO     | 11             | 11              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 19             | 54              | 50                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 8              | 8               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 22             | 49              | 44                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 50             | 10              | 0.01                          | 17                            | 0.01                          |
| NO     | 24             | 48              | 47                            | 12                            | 0.01                          | NO     | 11             | 1               | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 19              | 26                            | 18                            | 0.01                          | NO     | 5              | 3               | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 30             | 36              | 30                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 4              | 14              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 7              | 91              | 41                            | 32                            | 0.01                          | NO     | 2              | 2               | 0.01                          | 200                           | 0.01                          |
| NO     | 5              | 91              | 37                            | 33                            | 0.01                          | NO     | 2              | 2               | 0.01                          | 219                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 51              | 11                            | 20                            | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 178                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 53              | 9                             | 29                            | 0.01                          | NO     | 4              | 3               | 0.01                          | 165                           | 0.01                          |
| NO     | 3              | 44              | 19                            | 21                            | 0.01                          | NO     | 3              | 4               | 0.01                          | 157                           | 0.01                          |
| NO     | 4              | 42              | 12                            | 20                            | 0.01                          | NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 182                           | 0.01                          |
| NO     | 18             | 54              | 22                            | 13                            | 0.01                          | NO     | 1              | 2               | 0.01                          | 139                           | 0.01                          |
| NO     | 8              | 25              | 19                            | 7                             | 0.01                          | NO     | 6              | 2               | 0.01                          | 97                            | 0.01                          |
| NO     | 11             | 24              | 37                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 21             | 27              | 0.01                          | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 21             | 28              | 0.01                          | 11                            | 0.01                          |
| NO     | 25             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 24             | 27              | 0.01                          | 5                             | 0.01                          |
| NO     | 53             | 8               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 36             | 17              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 28             | 9               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 29             | 17              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 45             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 30             | 12              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 45             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 14             | 13              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 55             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 11             | 15              | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 72             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 10              | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 116            | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 3               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 31             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 10              | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 42             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 3               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 4               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 4               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 4               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 4               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 9              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 8               | 0.01                          | 7                             | 0.01                          |
| NO     | 21             | 10              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 13             | 15              | 0.01                          | 2                             | 0.01                          |
| NO     | 36             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 32              | 0.01                          | 78                            | 0.01                          |
| NO     | 41             | 8               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 19              | 0.01                          | 35                            | 0.01                          |
| NO     | 54             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 26              | 0.01                          | 19                            | 0.01                          |
| NO     | 55             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 14              | 0.01                          | 16                            | 0.01                          |

Tabela 35 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 14

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 61             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 61             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 19             | 6               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 29             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 22             | 23              | 0.01                          | 15                            | 0.01                          |
| NO     | 14             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 24             | 29              | 0.01                          | 10                            | 0.01                          |
| NO     | 16             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 53              | 0.01                          | 30                            | 0.01                          |
| NO     | 2              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 2               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 2              | 17              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 96             | 9               | 0.01                          | 3                             | 0.01                          |
| NO     | 11             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 1               | 0.01                          | 1                             | 0.01                          |
| NO     | 14             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 28              | 0.01                          | 4                             | 0.01                          |
| NO     | 3              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 5              | 29              | 0.01                          | 6                             | 0.01                          |
| NO     | 19             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 59             | 12              | 0.01                          | 8                             | 0.01                          |
| NO     | 25             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 17              | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 29             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 17              | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 33             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 4               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 20             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 11              | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 23             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 10                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 23             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 9                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 38             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 38             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 4               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 21             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 3               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 36             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 41             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 192            | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 123            | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 82             | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 33             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 7              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 15             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 5              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 70             | 112             | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 16             | 8               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 26             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 70             | 112             | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 2               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |

Tabela 36 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 15

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 27             | 26              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 2               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 46             | 10              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 75             | 11              | 25                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 38             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 52             | 7               | 13                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 13             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 30             | 3               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 6               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 13             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 13             | 7               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 13             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 11             | 6               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 15             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 11             | 3               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 19             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 22             | 4               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 23             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 25             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 33             | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 37             | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 41             | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 3               | 8                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 50             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 2               | 9                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 24             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 10                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 1              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 10                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 16             | 12              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 3               | 17                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 23             | 13              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 4               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 25             | 12              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 11             | 8               | 4                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 29             | 8               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 14              | 15                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 22             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 15              | 15                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 8              | 14              | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 6               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 25             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 27             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 23             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 13             | 12              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 14              | 15                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 13             | 12              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 15              | 15                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 8              | 14              | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 3               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 23             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 8               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 13             | 6               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 2               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 12             | 10              | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 5              | 6               | 7                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 5              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 5              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 5              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |

Tabela 37 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico normal - 16

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| NO     | 5              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 3              | 2               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 8              | 6               | 11                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 8              | 2               | 13                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 8              | 3               | 11                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 22             | 1               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 9               | 7                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 7              | 4               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 9              | 1               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 15             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 19             | 7               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 51             | 5               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 24             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 16             | 10              | 15                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 29             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 45             | 5               | 16                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 29             | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 37             | 4               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 21             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 22             | 3               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 22             | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 15             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 1              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 21             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 2               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 9              | 21              | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 1              | 3               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 6              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 40             | 20              | 10                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 9               | 1                             | 4                             | 0.01                          | NO     | 11             | 5               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 6              | 37              | 2                             | 12                            | 0.01                          | NO     | 26             | 5               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 20              | 5                             | 21                            | 0.01                          | NO     | 16             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 25              | 1                             | 8                             | 0.01                          | NO     | 34             | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 12             | 8               | 1                             | 6                             | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 16             | 1               | 5                             | 1                             | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 19             | 10              | 3                             | 2                             | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 7              | 9               | 12                            | 6                             | 0.01                          | NO     | 9              | 2               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 16              | 5                             | 6                             | 0.01                          | NO     | 10             | 1               | 3                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 19              | 1                             | 6                             | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 2              | 25              | 1                             | 8                             | 0.01                          | NO     | 9              | 3               | 7                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 12             | 8               | 1                             | 6                             | 0.01                          | NO     | 8              | 2               | 10                            | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 6              | 7               | 1                             | 3                             | 0.01                          | NO     | 4              | 2               | 6                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 3              | 5               | 6                             | 1                             | 0.01                          | NO     | 5              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 4              | 6               | 7                             | 1                             | 0.01                          | NO     | 1              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 19             | 1               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 4              | 3               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 12             | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 23             | 1               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 7              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 2               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 5              | 13              | 12                            | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 2              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 5              | 13              | 17                            | 0.01                          | 0.01                          | NO     | 6              | 1               | 1                             | 0.01                          | 0.01                          |
| NO     | 11             | 2               | 2                             | 0.01                          | 0.01                          |        |                |                 |                               |                               |                               |

## A.2 Dados com Diagnóstico de Falha

Tabela 38 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 1

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| D1     | 70             | 15              | 1                             | 13                            | 18                            | D2     | 645            | 86              | 110                           | 13                            | 317                           |
| D1     | 52             | 16              | 2                             | 15                            | 19                            | D1     | 95             | 10              | 11                            | 0.01                          | 39                            |
| D1     | 51             | 16              | 2                             | 20                            | 20                            | D2     | 595            | 80              | 89                            | 9                             | 244                           |
| D1     | 80             | 23              | 2                             | 27                            | 18                            | D2     | 1330           | 10              | 66                            | 20                            | 182                           |
| D1     | 26             | 18              | 0.01                          | 20                            | 10                            | D2     | 440            | 89              | 304                           | 19                            | 757                           |
| PD     | 37             | 3               | 7                             | 51                            | 9                             | D2     | 545            | 130             | 153                           | 16                            | 239                           |
| PD     | 11             | 0.01            | 6                             | 50                            | 9                             | D2     | 7150           | 1440            | 1210                          | 97                            | 1760                          |
| D1     | 29             | 28              | 6                             | 33                            | 6                             | D2     | 755            | 229             | 404                           | 32                            | 460                           |
| D1     | 35             | 34              | 7                             | 36                            | 6                             | D2     | 1570           | 1110            | 1780                          | 175                           | 1830                          |
| D1     | 31             | 28              | 3                             | 43                            | 7                             | D2     | 1820           | 405             | 365                           | 35                            | 634                           |
| PD     | 562            | 45              | 12                            | 263                           | 0.01                          | D2     | 260            | 215             | 334                           | 35                            | 277                           |
| D2     | 49             | 17              | 12                            | 2                             | 14                            | D2     | 75             | 15              | 14                            | 7                             | 26                            |
| D2     | 58             | 18              | 11                            | 2                             | 16                            | D2     | 1500           | 395             | 395                           | 28                            | 323                           |
| D2     | 68             | 18              | 17                            | 2                             | 19                            | D2     | 20000          | 13000           | 29000                         | 1850                          | 57000                         |
| D2     | 62             | 17              | 16                            | 2                             | 20                            | D2     | 3700           | 1690            | 2810                          | 128                           | 3270                          |
| D2     | 63             | 17              | 16                            | 2                             | 21                            | D2     | 2770           | 660             | 712                           | 54                            | 763                           |
| D2     | 70             | 18              | 16                            | 2                             | 22                            | D2     | 1170           | 255             | 312                           | 18                            | 325                           |
| D2     | 61             | 16              | 16                            | 2                             | 24                            | PD     | 25             | 6               | 6                             | 3                             | 1                             |
| D2     | 73             | 17              | 16                            | 2                             | 24                            | D2     | 512            | 364             | 656                           | 33                            | 820                           |
| D2     | 69             | 17              | 16                            | 1                             | 23                            | D2     | 455            | 112             | 153                           | 13                            | 206                           |
| D2     | 57             | 15              | 14                            | 2                             | 25                            | D2     | 761            | 134             | 228                           | 12                            | 272                           |
| D1     | 6              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | PD     | 991            | 126             | 18                            | 44                            | 0.01                          |
| D1     | 435            | 77              | 26                            | 1                             | 58                            | D2     | 504            | 142             | 228                           | 14                            | 389                           |
| PD     | 268            | 8               | 7                             | 18                            | 1                             | D1     | 196            | 64              | 96                            | 8                             | 365                           |
| PD     | 874            | 33              | 250                           | 37                            | 2                             | D2     | 19             | 3               | 1                             | 0.01                          | 1                             |
| PD     | 223            | 29              | 201                           | 17                            | 2                             | D2     | 941            | 192             | 352                           | 20                            | 771                           |
| D1     | 139            | 33              | 199                           | 27                            | 2                             | D1     | 3389           | 589             | 726                           | 92                            | 3984                          |
| D1     | 427            | 57              | 269                           | 24                            | 2                             | D1     | 1115           | 375             | 899                           | 591                           | 977                           |
| D1     | 998            | 62              | 270                           | 33                            | 2                             | D1     | 22             | 202             | 3                             | 386                           | 0.01                          |
| D1     | 1116           | 128             | 6                             | 188                           | 0.01                          | D1     | 8              | 4               | 45                            | 0.01                          | 2                             |
| D1     | 247            | 121             | 7                             | 191                           | 0.01                          | D1     | 35             | 193             | 51                            | 1178                          | 0.01                          |
| D1     | 598            | 116             | 6                             | 198                           | 0.01                          | D1     | 21             | 29              | 49                            | 3                             | 62                            |
| D1     | 306            | 124             | 6                             | 196                           | 0.01                          | D1     | 1381           | 550             | 434                           | 28                            | 436                           |
| D1     | 250            | 82              | 18                            | 166                           | 0.01                          | D1     | 338            | 168             | 247                           | 20                            | 364                           |
| D1     | 122            | 72              | 112                           | 113                           | 0.01                          | D1     | 597            | 405             | 768                           | 50                            | 1982                          |
| D1     | 154            | 86              | 102                           | 84                            | 0.01                          | D1     | 73             | 19              | 13                            | 9                             | 1                             |
| D2     | 687            | 237             | 305                           | 31                            | 737                           | D1     | 288            | 72              | 138                           | 8                             | 218                           |
| D2     | 1438           | 569             | 596                           | 221                           | 1000                          | D1     | 49             | 1               | 3                             | 0.01                          | 3                             |
| D2     | 1256           | 415             | 451                           | 196                           | 973                           | PD     | 1198           | 3               | 1                             | 3                             | 1                             |
| D2     | 46             | 6               | 7                             | 0.01                          | 7                             | PD     | 1309           | 124             | 113                           | 6                             | 0.01                          |
| D1     | 7912           | 947             | 907                           | 97                            | 4844                          | D1     | 35             | 5               | 5                             | 2                             | 10                            |
| PD     | 89             | 21              | 5                             | 3                             | 0.01                          | PD     | 22566          | 1002            | 4                             | 107                           | 3                             |
| PD     | 111            | 23              | 4                             | 7                             | 0.01                          | D1     | 507            | 56              | 24                            | 17                            | 1                             |

Tabela 39 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 2

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| D2     | 7429           | 935             | 531                           | 31                            | 801                           | PD     | 2587           | 8               | 5                             | 1                             | 0.01                          |
| D2     | 142            | 42              | 40                            | 5                             | 43                            | PD     | 86             | 7               | 4                             | 3                             | 0.01                          |
| D2     | 20             | 17              | 21                            | 3                             | 4                             | PD     | 102            | 108             | 70                            | 41                            | 0.01                          |
| D2     | 15             | 13              | 14                            | 2                             | 2                             | PD     | 625            | 49              | 9                             | 7                             | 1                             |
| PD     | 132            | 45              | 8                             | 3                             | 2                             | PD     | 196            | 15              | 12                            | 2                             | 0.01                          |
| PD     | 171            | 40              | 11                            | 3                             | 2                             | PD     | 420            | 37              | 15                            | 30                            | 0.01                          |
| PD     | 339            | 30              | 16                            | 4                             | 2                             | PD     | 485            | 35              | 29                            | 6                             | 0.01                          |
| PD     | 695            | 25              | 6                             | 2                             | 2                             | PD     | 83             | 45              | 18                            | 36                            | 0.01                          |
| PD     | 461            | 20              | 10                            | 2                             | 2                             | D1     | 4              | 4               | 1                             | 1                             | 5                             |
| PD     | 55             | 0.01            | 8                             | 1                             | 2                             | D1     | 9              | 4               | 1                             | 4                             | 13                            |
| D2     | 27             | 16              | 14                            | 3                             | 3                             | D1     | 1198           | 3               | 1                             | 3                             | 0.01                          |
| PD     | 37             | 6               | 2                             | 1                             | 1                             | D1     | 14             | 4               | 1                             | 2                             | 10                            |
| PD     | 32             | 8               | 1                             | 1                             | 1                             | D1     | 30             | 17              | 2                             | 5                             | 30                            |
| D2     | 55             | 36              | 93                            | 9                             | 64                            | D1     | 45             | 11              | 3                             | 13                            | 28                            |
| PD     | 57             | 10              | 4                             | 1                             | 0.01                          | D1     | 65             | 20              | 4                             | 8                             | 25                            |
| PD     | 58             | 4               | 1                             | 1                             | 0.01                          | D1     | 68             | 9               | 2                             | 13                            | 36                            |
| PD     | 142            | 33              | 14                            | 16                            | 0.01                          | D1     | 102            | 28              | 7                             | 17                            | 54                            |
| PD     | 127            | 64              | 10                            | 26                            | 0.01                          | D1     | 549            | 121             | 25                            | 32                            | 198                           |
| PD     | 266            | 1               | 0.01                          | 0.01                          | 0.01                          | D2     | 56             | 10              | 1                             | 13                            | 18                            |
| D2     | 110            | 50              | 47                            | 23                            | 81                            | D2     | 57             | 15              | 3                             | 23                            | 25                            |
| D2     | 170            | 37              | 35                            | 18                            | 53                            | D2     | 65             | 26              | 10                            | 42                            | 58                            |
| D2     | 22             | 11              | 7                             | 0.01                          | 5                             | D2     | 75             | 30              | 2                             | 30                            | 18                            |
| PD     | 12             | 4               | 0.01                          | 0.01                          | 2                             | D2     | 146            | 41              | 10                            | 34                            | 60                            |
| PD     | 7              | 2               | 0.01                          | 0.01                          | 2                             | D2     | 196            | 58              | 16                            | 92                            | 97                            |
| PD     | 6              | 3               | 0.01                          | 0.01                          | 2                             | D2     | 1027           | 185             | 17                            | 271                           | 399                           |
| D2     | 501            | 161             | 196                           | 34                            | 270                           | D2     | 475            | 196             | 33                            | 187                           | 221                           |
| D2     | 480            | 151             | 182                           | 31                            | 234                           | D2     | 531            | 112             | 23                            | 122                           | 169                           |
| D2     | 357            | 124             | 142                           | 29                            | 187                           | D2     | 755            | 229             | 32                            | 404                           | 460                           |
| D1     | 38             | 18              | 22                            | 3                             | 3                             | PD     | 7663           | 166             | 8                             | 22                            | 1                             |
| D1     | 33             | 16              | 20                            | 3                             | 3                             | PD     | 1884           | 102             | 10                            | 13                            | 5                             |
| D1     | 20             | 16              | 19                            | 2                             | 3                             | PD     | 2140           | 181             | 9                             | 22                            | 3                             |
| PD     | 95             | 45              | 15                            | 3                             | 1                             | PD     | 1798           | 199             | 3                             | 28                            | 1                             |
| PD     | 54             | 34              | 11                            | 7                             | 1                             | PD     | 1448           | 200             | 3                             | 28                            | 1                             |
| PD     | 80             | 11              | 0.01                          | 2                             | 1                             | PD     | 3459           | 114             | 2                             | 19                            | 1                             |
| PD     | 58             | 10              | 3                             | 1                             | 1                             | PD     | 8444           | 209             | 10                            | 29                            | 1                             |
| PD     | 119            | 17              | 3                             | 2                             | 0.01                          | PD     | 9577           | 250             | 12                            | 36                            | 1                             |
| PD     | 105            | 36              | 6                             | 6                             | 0.01                          | PD     | 5515           | 145             | 6                             | 31                            | 1                             |
| PD     | 126            | 41              | 8                             | 9                             | 0.01                          | PD     | 3904           | 134             | 10                            | 41                            | 1                             |
| PD     | 147            | 46              | 12                            | 9                             | 1                             | PD     | 2367           | 50              | 15                            | 6                             | 22                            |
| PD     | 137            | 48              | 9                             | 9                             | 0.01                          | PD     | 7341           | 120             | 12                            | 11                            | 16                            |
| PD     | 121            | 34              | 6                             | 5                             | 0.01                          | PD     | 7797           | 219             | 11                            | 20                            | 14                            |
| D2     | 40             | 102             | 183                           | 32                            | 0.1                           | D2     | 84             | 6               | 14                            | 1                             | 86                            |
| D1     | 87             | 17              | 13                            | 4                             | 33                            | D2     | 60             | 40              | 110                           | 10                            | 70                            |
| D1     | 2              | 2               | 1                             | 0.5                           | 1                             | D2     | 31             | 7               | 5                             | 19                            | 67                            |
| PD     | 462            | 212             | 0.1                           | 32                            | 0.1                           | D2     | 293            | 50              | 15                            | 13                            | 120                           |

Tabela 40 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha elétrica - 3

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| PD     | 105            | 9               | 7                             | 3                             | 0.01                          | D1     | 633            | 63              | 17                            | 15                            | 3                             |
| PD     | 106            | 16              | 6                             | 2                             | 0.01                          | D1     | 567            | 54              | 17                            | 15                            | 2                             |
| PD     | 89             | 14              | 3                             | 2                             | 0.01                          | D1     | 210            | 14              | 7                             | 3                             | 1                             |
| PD     | 62             | 15              | 0.01                          | 6                             | 1                             | D1     | 326            | 18              | 9                             | 3                             | 1                             |
| PD     | 101            | 13              | 15                            | 3                             | 1                             | D1     | 95             | 118             | 18                            | 12                            | 3                             |
| PD     | 117            | 12              | 6                             | 2                             | 1                             | D1     | 717            | 32              | 1                             | 3                             | 1                             |
| PD     | 126            | 14              | 16                            | 4                             | 1                             | D1     | 1021           | 43              | 1                             | 4                             | 1                             |
| PD     | 97             | 10              | 8                             | 2                             | 1                             | D1     | 730            | 66              | 17                            | 12                            | 2                             |
| PD     | 90             | 12              | 10                            | 1                             | 1                             | D1     | 1819           | 98              | 21                            | 15                            | 6                             |
| PD     | 107            | 30              | 13                            | 2                             | 1                             | D1     | 1367           | 81              | 18                            | 13                            | 5                             |
| PD     | 102            | 31              | 14                            | 2                             | 1                             | D1     | 1440           | 83              | 19                            | 14                            | 5                             |
| PD     | 85             | 25              | 11                            | 2                             | 1                             | D1     | 1483           | 74              | 17                            | 12                            | 4                             |
| PD     | 102            | 28              | 11                            | 4                             | 1                             | D1     | 1444           | 85              | 19                            | 14                            | 4                             |
| PD     | 99             | 24              | 14                            | 3                             | 1                             | D1     | 1341           | 87              | 23                            | 19                            | 5                             |
| PD     | 89             | 13              | 10                            | 2                             | 1                             | D1     | 775            | 71              | 20                            | 17                            | 3                             |
| PD     | 94             | 14              | 12                            | 2                             | 1                             | D1     | 644            | 61              | 17                            | 15                            | 2                             |
| PD     | 92             | 12              | 10                            | 2                             | 1                             | D1     | 723            | 78              | 16                            | 15                            | 2                             |
| PD     | 69             | 8               | 7                             | 1                             | 1                             | D2     | 193            | 71              | 124                           | 45                            | 66                            |
| PD     | 79             | 9               | 10                            | 1                             | 1                             | D2     | 952            | 315             | 500                           | 32                            | 667                           |
| D1     | 39             | 31              | 29                            | 9                             | 4                             | D2     | 6272           | 2740            | 2370                          | 272                           | 2424                          |
| D2     | 13             | 13              | 16                            | 2                             | 6                             | D2     | 173            | 217             | 438                           | 63                            | 169                           |
| PD     | 38             | 19              | 7                             | 3                             | 1                             | D2     | 759            | 206             | 315                           | 19                            | 713                           |
| PD     | 64             | 13              | 10                            | 3                             | 1                             | D2     | 656            | 178             | 272                           | 16                            | 512                           |
| PD     | 195            | 9               | 5                             | 0.01                          | 0.01                          | D2     | 381            | 143             | 233                           | 51                            | 216                           |
| D2     | 8589           | 3746            | 2867                          | 188                           | 3664                          | D2     | 73             | 26              | 35                            | 4                             | 55                            |
| D2     | 193            | 58              | 66                            | 15                            | 73                            | D2     | 1727           | 262             | 231                           | 12                            | 643                           |
| D2     | 192            | 53              | 54                            | 13                            | 75                            | D2     | 4157           | 494             | 438                           | 21                            | 1317                          |
| D2     | 25             | 26              | 32                            | 8                             | 7                             | D2     | 309            | 126             | 177                           | 11                            | 315                           |
| D1     | 34             | 32              | 32                            | 11                            | 5                             | D2     | 559            | 128             | 361                           | 213                           | 385                           |
| D1     | 34             | 32              | 13                            | 5                             | 5                             | D2     | 1318           | 316             | 501                           | 164                           | 825                           |
| D2     | 10             | 3               | 11                            | 1                             | 5                             | D2     | 172            | 56              | 121                           | 15                            | 75                            |
| PD     | 102            | 10              | 12                            | 1                             | 2                             | D2     | 591            | 79              | 91                            | 16                            | 50                            |
| PD     | 130            | 16              | 13                            | 2                             | 1                             | D2     | 327            | 48              | 67                            | 4                             | 167                           |
| PD     | 128            | 17              | 10                            | 1                             | 1                             | D2     | 693            | 140             | 220                           | 23                            | 404                           |
| D1     | 78             | 20              | 13                            | 11                            | 28                            | D2     | 1313           | 249             | 337                           | 27                            | 593                           |
| D1     | 305            | 100             | 161                           | 33                            | 541                           | D2     | 1405           | 255             | 353                           | 29                            | 609                           |
| D1     | 1230           | 163             | 233                           | 27                            | 692                           | D2     | 793            | 243             | 338                           | 23                            | 666                           |
| D2     | 57             | 7               | 4                             | 19                            | 71                            | D2     | 404            | 121             | 229                           | 16                            | 412                           |
| D2     | 467            | 148             | 266                           | 13                            | 511                           | D2     | 966            | 184             | 770                           | 87                            | 393                           |
| D1     | 160            | 90              | 17                            | 27                            | 58                            | D2     | 527            | 394             | 1534                          | 114                           | 3791                          |
| D1     | 402            | 81              | 27                            | 39                            | 25                            | PD     | 2587           | 112             | 1                             | 5                             | 0.1                           |
| D2     | 5760           | 540             | 1000                          | 40                            | 2760                          | D1     | 6870           | 1028            | 900                           | 79                            | 5500                          |
| PD     | 104            | 39              | 9                             | 6                             | 1                             | PD     | 8074           | 255             | 11                            | 28                            | 10                            |
| PD     | 110            | 37              | 8                             | 5                             | 1                             | PD     | 5851           | 206             | 9                             | 28                            | 7                             |
| D1     | 21             | 2               | 1                             | 0.4                           | 6                             | D1     | 2              | 1               | 1                             | 0.1                           | 2                             |
| D2     | 7239           | 695             | 2394                          | 231                           | 2309                          | S/A    | 0              | 0               | 0                             | 0                             | 0                             |

Tabela 41 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 1

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T1     | 13             | 147             | 3                             | 117                           | 0.01                          | T3     | 257            | 550             | 792                           | 127                           | 2                             |
| T1     | 29             | 139             | 8                             | 124                           | 0.01                          | T3     | 234            | 475             | 684                           | 114                           | 1                             |
| T1     | 24             | 147             | 10                            | 126                           | 0.01                          | T3     | 228            | 447             | 636                           | 97                            | 2                             |
| T2     | 18             | 140             | 15                            | 107                           | 0.01                          | T3     | 192            | 299             | 449                           | 68                            | 3                             |
| T2     | 19             | 163             | 33                            | 94                            | 0.01                          | T3     | 111            | 181             | 246                           | 39                            | 2                             |
| T2     | 22             | 153             | 44                            | 141                           | 0.01                          | T3     | 124            | 193             | 259                           | 42                            | 3                             |
| T2     | 21             | 150             | 35                            | 116                           | 0.01                          | T3     | 60             | 85              | 103                           | 21                            | 2                             |
| T2     | 18             | 161             | 35                            | 121                           | 0.01                          | T2     | 150            | 249             | 237                           | 65                            | 2                             |
| T2     | 26             | 79              | 24                            | 113                           | 0.01                          | T2     | 124            | 172             | 144                           | 51                            | 0.01                          |
| T2     | 3              | 135             | 34                            | 229                           | 0.01                          | T2     | 120            | 153             | 135                           | 44                            | 1                             |
| T1     | 43             | 129             | 16                            | 564                           | 0.01                          | T1     | 122            | 101             | 75                            | 26                            | 0.01                          |
| T1     | 5              | 136             | 26                            | 587                           | 0.01                          | T1     | 121            | 107             | 76                            | 20                            | 0.01                          |
| T1     | 72             | 144             | 26                            | 601                           | 0.01                          | T2     | 142            | 602             | 657                           | 232                           | 0.01                          |
| T1     | 18             | 142             | 26                            | 594                           | 0.01                          | T2     | 105            | 491             | 506                           | 213                           | 0.01                          |
| T1     | 22             | 146             | 29                            | 611                           | 0.01                          | T2     | 91             | 360             | 325                           | 136                           | 0.01                          |
| T1     | 65             | 145             | 29                            | 625                           | 0.01                          | T2     | 108            | 548             | 504                           | 201                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 129             | 28                            | 586                           | 0.01                          | T2     | 160            | 585             | 416                           | 162                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 136             | 24                            | 586                           | 0.01                          | T2     | 215            | 310             | 440                           | 170                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 145             | 31                            | 600                           | 0.01                          | T2     | 198            | 299             | 396                           | 137                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 156             | 32                            | 613                           | 0.01                          | T2     | 235            | 254             | 445                           | 165                           | 0.01                          |
| T1     | 3              | 135             | 28                            | 536                           | 0.01                          | T2     | 170            | 364             | 362                           | 121                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 120             | 26                            | 493                           | 0.01                          | T2     | 180            | 407             | 422                           | 146                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 137             | 33                            | 502                           | 0.01                          | T2     | 15             | 90              | 80                            | 208                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 129             | 32                            | 508                           | 0.01                          | T2     | 9              | 87              | 67                            | 183                           | 0.01                          |
| T1     | 5              | 138             | 35                            | 475                           | 0.01                          | T1     | 14             | 132             | 81                            | 210                           | 0.01                          |
| T1     | 2              | 131             | 26                            | 362                           | 0.01                          | T2     | 14             | 95              | 73                            | 176                           | 0.01                          |
| T1     | 2              | 152             | 29                            | 344                           | 0.01                          | T2     | 12             | 99              | 76                            | 181                           | 0.01                          |
| T1     | 3              | 150             | 33                            | 358                           | 0.01                          | T2     | 11             | 87              | 72                            | 168                           | 0.01                          |
| T2     | 8              | 134             | 41                            | 309                           | 0.01                          | T1     | 17             | 147             | 90                            | 196                           | 0.01                          |
| T2     | 2              | 125             | 38                            | 313                           | 0.01                          | T1     | 17             | 133             | 51                            | 183                           | 0.01                          |
| T2     | 4              | 141             | 45                            | 432                           | 0.01                          | T1     | 18             | 139             | 67                            | 182                           | 0.01                          |
| T2     | 2              | 172             | 45                            | 354                           | 0.01                          | T1     | 19             | 124             | 69                            | 156                           | 0.01                          |
| T2     | 0.01           | 190             | 46                            | 384                           | 0.01                          | T1     | 16             | 105             | 62                            | 147                           | 0.01                          |
| T2     | 1              | 166             | 41                            | 336                           | 0.01                          | T1     | 17             | 113             | 55                            | 148                           | 0.01                          |
| T2     | 1              | 153             | 40                            | 312                           | 0.01                          | T2     | 14             | 98              | 56                            | 134                           | 0.01                          |
| T2     | 2              | 176             | 41                            | 315                           | 0.01                          | T2     | 15             | 82              | 55                            | 105                           | 0.01                          |
| T2     | 10             | 182             | 62                            | 354                           | 0.01                          | T1     | 19             | 175             | 79                            | 144                           | 0.01                          |
| T2     | 5              | 141             | 46                            | 237                           | 0.01                          | T1     | 34             | 168             | 79                            | 168                           | 0.01                          |
| T3     | 101            | 204             | 231                           | 42                            | 2                             | T2     | 34             | 23              | 75                            | 14                            | 2                             |
| T2     | 167            | 970             | 812                           | 290                           | 0.01                          | T2     | 14             | 50              | 118                           | 42                            | 2                             |
| T2     | 186            | 957             | 777                           | 255                           | 0.01                          | T2     | 51             | 89              | 53                            | 14                            | 1                             |
| T2     | 31             | 73              | 25                            | 207                           | 0.01                          | T3     | 1300           | 740             | 2000                          | 260                           | 71                            |
| T3     | 50             | 369             | 751                           | 169                           | 0.01                          | T3     | 42             | 97              | 600                           | 157                           | 0.1                           |
| T3     | 56             | 470             | 833                           | 191                           | 0.01                          | T3     | 44             | 52              | 119                           | 15                            | 1                             |
| T3     | 57             | 423             | 753                           | 177                           | 0.01                          | T3     | 42             | 79              | 152                           | 31                            | 1                             |

Tabela 42 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 2

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T2     | 4              | 116             | 153                           | 63                            | 0.01                          | T1     | 22             | 113             | 62                            | 92                            | 0.01                          |
| T2     | 3              | 102             | 135                           | 57                            | 0.01                          | T1     | 28             | 108             | 50                            | 75                            | 0.01                          |
| T2     | 4              | 155             | 163                           | 62                            | 0.01                          | T2     | 32             | 103             | 71                            | 68                            | 0.01                          |
| T2     | 5              | 155             | 162                           | 65                            | 0.01                          | T1     | 34             | 222             | 45                            | 184                           | 0.01                          |
| T2     | 4              | 149             | 170                           | 64                            | 0.01                          | T1     | 17             | 140             | 31                            | 182                           | 0.01                          |
| T3     | 5              | 192             | 209                           | 65                            | 0.01                          | T1     | 37             | 170             | 34                            | 190                           | 0.01                          |
| T3     | 6              | 192             | 215                           | 63                            | 0.01                          | T1     | 21             | 141             | 28                            | 176                           | 0.01                          |
| T2     | 6              | 176             | 183                           | 61                            | 0.01                          | T1     | 18             | 76              | 33                            | 163                           | 0.01                          |
| T2     | 6              | 190             | 199                           | 68                            | 0.01                          | T3     | 4              | 7               | 17                            | 3                             | 3                             |
| T2     | 9              | 200             | 195                           | 62                            | 0.01                          | T3     | 5              | 15              | 19                            | 4                             | 4                             |
| T2     | 7              | 183             | 181                           | 61                            | 0.01                          | T3     | 7              | 13              | 21                            | 4                             | 4                             |
| T3     | 10             | 211             | 211                           | 67                            | 0.01                          | T2     | 4              | 38              | 27                            | 13                            | 1                             |
| T3     | 14             | 197             | 225                           | 63                            | 0.01                          | T2     | 4              | 30              | 24                            | 14                            | 1                             |
| T3     | 22             | 186             | 205                           | 62                            | 0.01                          | T2     | 3              | 25              | 21                            | 14                            | 1                             |
| T3     | 24             | 201             | 210                           | 64                            | 0.01                          | T2     | 5              | 29              | 22                            | 12                            | 1                             |
| T3     | 28             | 177             | 198                           | 62                            | 0.01                          | T2     | 5              | 55              | 33                            | 20                            | 1                             |
| T3     | 37             | 178             | 201                           | 59                            | 0.01                          | T2     | 16             | 115             | 64                            | 29                            | 0.01                          |
| T3     | 16             | 124             | 158                           | 43                            | 0.01                          | T2     | 16             | 135             | 92                            | 30                            | 0.01                          |
| T2     | 16             | 141             | 109                           | 38                            | 0.01                          | T2     | 18             | 43              | 30                            | 8                             | 1                             |
| T2     | 11             | 129             | 82                            | 23                            | 0.01                          | T2     | 19             | 42              | 30                            | 8                             | 1                             |
| T2     | 13             | 120             | 85                            | 22                            | 0.01                          | T2     | 18             | 29              | 27                            | 7                             | 1                             |
| T2     | 12             | 126             | 84                            | 25                            | 0.01                          | T2     | 18             | 29              | 28                            | 7                             | 1                             |
| T3     | 15             | 114             | 102                           | 23                            | 0.01                          | T2     | 8              | 12              | 25                            | 10                            | 1                             |
| T2     | 14             | 109             | 146                           | 23                            | 0.01                          | T2     | 8              | 33              | 37                            | 15                            | 1                             |
| T3     | 6              | 52              | 420                           | 48                            | 2                             | T2     | 12             | 102             | 51                            | 21                            | 3                             |
| T3     | 5              | 51              | 411                           | 49                            | 3                             | T2     | 22             | 95              | 58                            | 27                            | 2                             |
| T1     | 17             | 127             | 5                             | 212                           | 0.01                          | T2     | 24             | 88              | 86                            | 22                            | 1                             |
| T1     | 27             | 126             | 4                             | 211                           | 0.01                          | T2     | 13             | 42              | 56                            | 24                            | 5                             |
| T1     | 40             | 131             | 7                             | 196                           | 0.01                          | T2     | 12             | 70              | 56                            | 24                            | 5                             |
| T1     | 64             | 135             | 7                             | 151                           | 0.01                          | T2     | 12             | 61              | 55                            | 22                            | 5                             |
| T2     | 24             | 114             | 13                            | 112                           | 0.01                          | T2     | 12             | 69              | 57                            | 23                            | 5                             |
| T2     | 17             | 65              | 13                            | 127                           | 0.01                          | T2     | 15             | 71              | 60                            | 24                            | 5                             |
| T2     | 32             | 62              | 25                            | 120                           | 0.01                          | T3     | 15             | 35              | 31                            | 8                             | 3                             |
| T2     | 86             | 96              | 16                            | 149                           | 0.01                          | T3     | 13             | 35              | 42                            | 7                             | 4                             |
| T2     | 33             | 34              | 128                           | 231                           | 0.01                          | T3     | 4              | 51              | 22                            | 6                             | 4                             |
| T2     | 9              | 149             | 50                            | 306                           | 0.01                          | T2     | 6              | 88              | 41                            | 33                            | 1                             |
| T1     | 3              | 127             | 5                             | 173                           | 0.01                          | T3     | 16             | 16              | 37                            | 2                             | 3                             |
| T2     | 14             | 92              | 33                            | 247                           | 0.01                          | T3     | 19             | 29              | 31                            | 8                             | 5                             |
| T2     | 12             | 78              | 23                            | 225                           | 0.01                          | T3     | 22             | 24              | 23                            | 10                            | 6                             |
| T1     | 5              | 147             | 24                            | 131                           | 0.01                          | T3     | 194            | 355             | 589                           | 99                            | 4                             |
| T1     | 7              | 135             | 27                            | 120                           | 0.01                          | T3     | 66             | 322             | 809                           | 112                           | 7                             |
| T1     | 7              | 128             | 31                            | 110                           | 0.01                          | T1     | 68             | 205             | 61                            | 284                           | 0.01                          |
| T1     | 5              | 127             | 25                            | 116                           | 0.01                          | T3     | 160            | 598             | 1801                          | 212                           | 7                             |
| T3     | 139            | 237             | 243                           | 53                            | 3                             | T2     | 24             | 34              | 103                           | 25                            | 5                             |

Tabela 43 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 3

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T2     | 12             | 91              | 33                            | 241                           | 0.01                          | T3     | 20             | 23              | 21                            | 5                             | 5                             |
| T2     | 17             | 90              | 33                            | 243                           | 0.01                          | T3     | 22             | 24              | 22                            | 6                             | 6                             |
| T2     | 12             | 92              | 36                            | 223                           | 0.01                          | T3     | 22             | 49              | 33                            | 5                             | 5                             |
| T2     | 15             | 88              | 44                            | 220                           | 0.01                          | T3     | 8              | 37              | 67                            | 14                            | 6                             |
| T2     | 13             | 99              | 32                            | 238                           | 0.01                          | T3     | 8              | 41              | 65                            | 15                            | 6                             |
| T2     | 11             | 86              | 34                            | 206                           | 0.01                          | T3     | 12             | 59              | 81                            | 18                            | 8                             |
| T2     | 16             | 90              | 35                            | 193                           | 0.01                          | T3     | 7              | 43              | 73                            | 16                            | 8                             |
| T2     | 13             | 78              | 30                            | 184                           | 0.01                          | T3     | 15             | 58              | 90                            | 15                            | 7                             |
| T2     | 19             | 87              | 33                            | 170                           | 0.01                          | T3     | 15             | 49              | 87                            | 13                            | 8                             |
| T2     | 0.01           | 77              | 39                            | 136                           | 0.01                          | T3     | 17             | 47              | 79                            | 14                            | 9                             |
| T2     | 19             | 61              | 29                            | 101                           | 0.01                          | T3     | 19             | 57              | 80                            | 12                            | 11                            |
| T2     | 21             | 71              | 36                            | 120                           | 0.01                          | T3     | 14             | 40              | 61                            | 14                            | 8                             |
| T2     | 26             | 100             | 41                            | 110                           | 0.01                          | T3     | 18             | 44              | 64                            | 11                            | 9                             |
| T2     | 20             | 65              | 49                            | 114                           | 0.01                          | T3     | 16             | 39              | 58                            | 10                            | 9                             |
| T3     | 138            | 865             | 1173                          | 270                           | 0.01                          | T3     | 14             | 30              | 52                            | 10                            | 8                             |
| T3     | 160            | 822             | 1115                          | 260                           | 0.01                          | T3     | 12             | 26              | 45                            | 8                             | 7                             |
| T3     | 172            | 731             | 1053                          | 235                           | 0.01                          | T2     | 1270           | 3450            | 1390                          | 520                           | 8                             |
| T3     | 121            | 568             | 752                           | 187                           | 0.01                          | T3     | 3420           | 7870            | 6990                          | 1500                          | 33                            |
| T3     | 84             | 475             | 605                           | 160                           | 0.01                          | T1     | 48             | 610             | 10                            | 29                            | 0.01                          |
| T3     | 87             | 420             | 562                           | 154                           | 0.01                          | T2     | 8800           | 64064           | 95650                         | 72128                         | 0.01                          |
| T3     | 94             | 407             | 524                           | 129                           | 0.01                          | T3     | 6709           | 10500           | 17700                         | 1400                          | 750                           |
| T3     | 105            | 331             | 482                           | 106                           | 0.01                          | T3     | 290            | 966             | 1810                          | 299                           | 57                            |
| T3     | 107            | 316             | 433                           | 102                           | 0.01                          | T2     | 2500           | 10500           | 13500                         | 4790                          | 6                             |
| T3     | 86             | 199             | 294                           | 68                            | 0.01                          | T2     | 400            | 940             | 820                           | 210                           | 24                            |
| T2     | 101            | 277             | 211                           | 62                            | 0.01                          | T2     | 290            | 1260            | 820                           | 231                           | 8                             |
| T2     | 119            | 288             | 210                           | 58                            | 0.01                          | T3     | 107            | 143             | 222                           | 34                            | 2                             |
| T2     | 81             | 214             | 174                           | 51                            | 0.01                          | T1     | 25             | 108             | 18                            | 281                           | 0.01                          |
| T3     | 83             | 324             | 399                           | 118                           | 0.01                          | T3     | 198            | 313             | 727                           | 83                            | 3                             |
| T3     | 85             | 312             | 332                           | 64                            | 0.01                          | T3     | 200            | 462             | 8656                          | 2112                          | 300                           |
| T3     | 133            | 342             | 413                           | 112                           | 0.01                          | T3     | 98             | 309             | 578                           | 104                           | 2                             |
| T3     | 124            | 357             | 396                           | 107                           | 0.01                          | T3     | 124            | 190             | 349                           | 56                            | 0.01                          |
| T3     | 111            | 302             | 355                           | 101                           | 0.01                          | T1     | 60             | 159             | 161                           | 81                            | 0.01                          |
| T3     | 135            | 302             | 369                           | 109                           | 0.01                          | T1     | 16             | 213             | 11                            | 535                           | 0.01                          |
| T3     | 88             | 182             | 214                           | 66                            | 0.01                          | T1     | 22             | 259             | 9                             | 427                           | 0.01                          |
| T2     | 114            | 188             | 139                           | 47                            | 0.01                          | T1     | 0.01           | 211             | 13                            | 655                           | 0.01                          |
| T2     | 101            | 284             | 226                           | 136                           | 0.01                          | T3     | 131            | 386             | 500                           | 78                            | 5                             |
| T3     | 239            | 543             | 761                           | 130                           | 3                             | T3     | 101            | 24              | 128                           | 9                             | 0.1                           |
| T3     | 269            | 572             | 780                           | 134                           | 3                             | T3     | 74             | 148             | 181                           | 39                            | 2                             |
| T3     | 257            | 561             | 782                           | 134                           | 3                             | T3     | 18             | 22              | 47                            | 6                             | 4                             |
| T2     | 5              | 194             | 70                            | 331                           | 0.01                          | T1     | 27             | 166             | 60                            | 111                           | 0.01                          |
| T2     | 5              | 183             | 63                            | 323                           | 0.01                          | T1     | 16             | 139             | 58                            | 104                           | 0.01                          |
| T2     | 70             | 120             | 65                            | 271                           | 0.01                          | T1     | 48             | 138             | 68                            | 108                           | 0.01                          |
| T2     | 8              | 89              | 64                            | 291                           | 0.01                          | T1     | 30             | 124             | 61                            | 86                            | 0.01                          |
| T1     | 3              | 127             | 5                             | 173                           | 0.01                          | T3     | 17             | 20              | 36                            | 4                             | 4                             |

Tabela 44 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 4

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T1     | 7              | 132             | 30                            | 104                           | 0.01                          | T3     | 213            | 384             | 2028                          | 401                           | 3                             |
| T1     | 6              | 121             | 30                            | 94                            | 0.01                          | T3     | 512            | 1127            | 2248                          | 350                           | 316                           |
| T1     | 7              | 123             | 32                            | 94                            | 0.01                          | T1     | 22             | 187             | 17                            | 745                           | 0.01                          |
| T1     | 0.01           | 122             | 32                            | 89                            | 0.01                          | T1     | 110            | 112             | 32                            | 81                            | 0.01                          |
| T1     | 10             | 120             | 35                            | 73                            | 0.01                          | T1     | 143            | 123             | 38                            | 75                            | 0.01                          |
| T3     | 148            | 468             | 454                           | 110                           | 0.01                          | T1     | 181            | 162             | 70                            | 132                           | 0.01                          |
| T2     | 122            | 539             | 532                           | 136                           | 0.01                          | T2     | 20             | 42              | 20                            | 44                            | 0.01                          |
| T3     | 145            | 454             | 477                           | 97                            | 0.01                          | T2     | 20             | 60              | 45                            | 80                            | 0.01                          |
| T3     | 140            | 434             | 427                           | 82                            | 0.01                          | T2     | 23             | 61              | 45                            | 98                            | 1                             |
| T3     | 163            | 601             | 559                           | 118                           | 0.01                          | T2     | 47             | 162             | 94                            | 194                           | 1                             |
| T3     | 123            | 420             | 483                           | 111                           | 0.01                          | T2     | 47             | 120             | 90                            | 198                           | 3                             |
| T3     | 98             | 351             | 392                           | 116                           | 0.01                          | T2     | 72             | 442             | 221                           | 461                           | 1                             |
| T3     | 59             | 202             | 205                           | 34                            | 0.01                          | T2     | 110            | 459             | 243                           | 406                           | 0.01                          |
| T3     | 45             | 170             | 209                           | 46                            | 0.01                          | T2     | 128            | 419             | 269                           | 614                           | 0.01                          |
| T3     | 48             | 166             | 165                           | 32                            | 0.01                          | T2     | 24             | 35              | 14                            | 22                            | 0.01                          |
| T3     | 32             | 122             | 138                           | 27                            | 0.01                          | T2     | 613            | 3240            | 1432                          | 2788                          | 0.01                          |
| T3     | 132            | 481             | 469                           | 117                           | 0.01                          | T3     | 35             | 51              | 16                            | 93                            | 1                             |
| T3     | 151            | 617             | 685                           | 157                           | 0.01                          | T3     | 68             | 99              | 36                            | 203                           | 0.01                          |
| T3     | 170            | 489             | 549                           | 130                           | 0.01                          | T3     | 156            | 240             | 54                            | 399                           | 1                             |
| T3     | 143            | 419             | 396                           | 93                            | 0.01                          | T3     | 63             | 150             | 57                            | 276                           | 0.01                          |
| T3     | 126            | 365             | 266                           | 63                            | 0.01                          | T3     | 30             | 26              | 31                            | 93                            | 2                             |
| T3     | 55             | 555             | 589                           | 179                           | 0.01                          | T3     | 165            | 241             | 61                            | 515                           | 14                            |
| T3     | 92             | 603             | 624                           | 178                           | 0.01                          | T3     | 164            | 244             | 103                           | 497                           | 8                             |
| T2     | 81             | 457             | 434                           | 139                           | 0.01                          | T3     | 135            | 279             | 59                            | 492                           | 3                             |
| T2     | 82             | 387             | 373                           | 120                           | 0.01                          | T3     | 135            | 362             | 125                           | 827                           | 4                             |
| T2     | 87             | 374             | 359                           | 125                           | 1                             | T3     | 236            | 410             | 159                           | 817                           | 3                             |
| T2     | 76             | 354             | 332                           | 120                           | 0.01                          | T2     | 97             | 264             | 260                           | 85                            | 3                             |
| T2     | 71             | 346             | 341                           | 108                           | 1                             | T2     | 53             | 172             | 177                           | 61                            | 1                             |
| T2     | 71             | 306             | 297                           | 100                           | 2                             | T2     | 59             | 210             | 228                           | 78                            | 1                             |
| T2     | 66             | 318             | 296                           | 98                            | 1                             | T2     | 64             | 259             | 297                           | 101                           | 1                             |
| T2     | 70             | 270             | 284                           | 87                            | 1                             | T2     | 42             | 213             | 252                           | 90                            | 1                             |
| T3     | 62             | 235             | 240                           | 70                            | 0.01                          | T2     | 27             | 167             | 211                           | 76                            | 1                             |
| T3     | 56             | 195             | 199                           | 66                            | 0.01                          | T2     | 10             | 76              | 137                           | 53                            | 1                             |
| T3     | 79             | 185             | 194                           | 58                            | 0.01                          | T2     | 19             | 48              | 95                            | 41                            | 1                             |
| T3     | 83             | 155             | 172                           | 44                            | 0.01                          | T2     | 21             | 47              | 103                           | 16                            | 1                             |
| T2     | 72             | 253             | 224                           | 65                            | 1                             | T2     | 27             | 48              | 111                           | 18                            | 1                             |
| T3     | 205            | 603             | 810                           | 138                           | 0.01                          | T3     | 16             | 56              | 137                           | 22                            | 0.1                           |
| T3     | 225            | 611             | 807                           | 138                           | 1                             | T3     | 50             | 65              | 99                            | 21                            | 1                             |
| T3     | 232            | 600             | 825                           | 141                           | 1                             | T3     | 120            | 210             | 285                           | 36                            | 16                            |
| T3     | 208            | 586             | 796                           | 134                           | 2                             | T3     | 5              | 49              | 489                           | 97                            | 0.1                           |
| T3     | 234            | 619             | 799                           | 139                           | 3                             | T3     | 605            | 1586            | 1901                          | 655                           | 2                             |
| T3     | 235            | 623             | 812                           | 134                           | 3                             | T3     | 25             | 55              | 78                            | 9                             | 10                            |
| T3     | 225            | 590             | 777                           | 139                           | 2                             | T3     | 132            | 116             | 184                           | 19                            | 0.1                           |
| T3     | 230            | 586             | 795                           | 130                           | 2                             | T3     | 677            | 969             | 2483                          | 570                           | 17                            |

Tabela 45 – Amostras gascromatográficas com diagnóstico de falha térmica - 5

| Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> | Classe | H <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> |
|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------|----------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| T2     | 188            | 893             | 776                           | 254                           | 0.01                          | T2     | 532            | 433             | 410                           | 49                            | 16                            |
| T2     | 207            | 952             | 632                           | 246                           | 0.01                          | T2     | 5              | 27              | 107                           | 39                            | 1                             |
| T3     | 227            | 447             | 747                           | 276                           | 0.01                          | T2     | 19             | 46              | 89                            | 39                            | 3                             |
| T3     | 249            | 475             | 1034                          | 315                           | 0.01                          | T2     | 30             | 125             | 245                           | 80                            | 6                             |
| T3     | 172            | 430             | 696                           | 210                           | 0.01                          | T2     | 5              | 14              | 182                           | 84                            | 1                             |
| T3     | 207            | 486             | 713                           | 231                           | 0.01                          | T2     | 28             | 41              | 287                           | 123                           | 1                             |
| T2     | 223            | 658             | 599                           | 203                           | 0.01                          | T2     | 72             | 51              | 346                           | 147                           | 1                             |
| T3     | 9              | 12              | 24                            | 3                             | 4                             | T2     | 18             | 40              | 76                            | 59                            | 3                             |
| T3     | 10             | 11              | 23                            | 3                             | 4                             | T2     | 6              | 56              | 58                            | 55                            | 3                             |
| T3     | 17             | 18              | 23                            | 0.01                          | 4                             | T3     | 102            | 228             | 378                           | 57                            | 27                            |
| T3     | 18             | 20              | 24                            | 3                             | 3                             | T3     | 132            | 161             | 154                           | 26                            | 62                            |
| T2     | 12             | 64              | 158                           | 101                           | 0.01                          | T3     | 487            | 595             | 1066                          | 145                           | 144                           |
| T2     | 19             | 123             | 173                           | 103                           | 0.01                          | T3     | 66             | 135             | 200                           | 44                            | 2                             |
| T2     | 21             | 146             | 240                           | 126                           | 0.01                          | T3     | 296            | 518             | 512                           | 122                           | 2                             |
| T2     | 31             | 215             | 258                           | 131                           | 0.01                          | T3     | 109            | 147             | 197                           | 36                            | 58                            |
| T2     | 61             | 287             | 289                           | 147                           | 0.01                          | T3     | 380            | 2451            | 3150                          | 678                           | 6                             |
| T2     | 40             | 178             | 171                           | 96                            | 0.01                          | T3     | 596            | 631             | 763                           | 104                           | 34                            |
| T2     | 31             | 156             | 143                           | 67                            | 1                             | T3     | 80             | 625             | 1323                          | 348                           | 10                            |
| T2     | 19             | 303             | 238                           | 153                           | 0.01                          | T3     | 64             | 565             | 1269                          | 348                           | 8                             |
| T2     | 17             | 275             | 229                           | 146                           | 0.01                          | T3     | 46             | 458             | 1188                          | 330                           | 3                             |
| T2     | 21             | 298             | 239                           | 147                           | 0.01                          | T3     | 50             | 495             | 1214                          | 375                           | 4                             |
| T2     | 27             | 278             | 222                           | 135                           | 0.01                          | T3     | 29             | 299             | 889                           | 292                           | 4                             |
| T2     | 31             | 204             | 220                           | 95                            | 0.01                          | T3     | 133            | 630             | 1553                          | 520                           | 6                             |
| T2     | 33             | 164             | 148                           | 85                            | 0.01                          | T3     | 230            | 851             | 1956                          | 640                           | 8                             |
| T2     | 47             | 175             | 148                           | 78                            | 0.01                          | T3     | 547            | 518             | 854                           | 87                            | 78                            |
| T2     | 47             | 181             | 127                           | 97                            | 0.01                          | T3     | 376            | 472             | 797                           | 85                            | 76                            |
| T2     | 26             | 130             | 92                            | 63                            | 0.01                          | T3     | 287            | 399             | 678                           | 74                            | 61                            |
| T2     | 33             | 105             | 103                           | 60                            | 0.01                          | T3     | 290            | 395             | 692                           | 79                            | 66                            |
| T2     | 41             | 132             | 113                           | 67                            | 0.01                          | T3     | 166            | 347             | 692                           | 80                            | 52                            |
| T2     | 39             | 143             | 133                           | 68                            | 0.01                          | T3     | 157            | 317             | 712                           | 90                            | 47                            |
| T2     | 18             | 483             | 400                           | 312                           | 0.01                          | T3     | 3421           | 4862            | 5015                          | 1225                          | 1310                          |
| T2     | 13             | 437             | 315                           | 303                           | 0.01                          | T3     | 102            | 376             | 1270                          | 371                           | 1                             |
| T2     | 29             | 782             | 314                           | 242                           | 0.01                          | T3     | 60             | 142             | 228                           | 38                            | 0.1                           |
| T2     | 59             | 210             | 376                           | 296                           | 0.01                          | T2     | 960            | 4000            | 1560                          | 1290                          | 6                             |
| T2     | 30             | 236             | 280                           | 260                           | 0.01                          | T3     | 1374           | 2648            | 5376                          | 628                           | 298                           |
| T2     | 32             | 225             | 307                           | 283                           | 0.01                          | T2     | 4              | 79              | 312                           | 112                           | 0.1                           |
| T3     | 113            | 723             | 981                           | 216                           | 0.01                          | T3     | 164            | 244             | 497                           | 103                           | 8                             |
| T3     | 135            | 564             | 873                           | 188                           | 0.01                          | T2     | 22             | 51              | 57                            | 42                            | 0.1                           |
| T3     | 171            | 618             | 912                           | 204                           | 0.01                          | T2     | 679            | 4992            | 3671                          | 1823                          | 0.1                           |
| T3     | 167            | 594             | 919                           | 207                           | 0.01                          | T3     | 54             | 72              | 97                            | 10                            | 6                             |
| T3     | 145            | 536             | 812                           | 175                           | 0.01                          | T3     | 116            | 181             | 278                           | 52                            | 5                             |
| T3     | 196            | 713             | 874                           | 159                           | 0.01                          | T2     | 50             | 171             | 149                           | 75                            | 0.1                           |
| T3     | 203            | 627             | 848                           | 143                           | 0.01                          | T2     | 20             | 80              | 69                            | 25                            | 0.1                           |
| T3     | 217            | 638             | 856                           | 147                           | 0.01                          | T3     | 29             | 11              | 7                             | 2                             | 4                             |