

4 Estudo de Casos

O estudo de casos compreende a análise de desempenho do modelo SADTRAFOS e a apresentação dos resultados obtidos em todas as etapas referentes a sua modelagem. A avaliação do modelo SADTRAFOS foi dividida em duas etapas:

- A primeira etapa apresenta todos os recursos utilizados e os resultados obtidos em cada módulo do modelo, assim como o seu desempenho utilizando a base de dados de casos reais de transformadores retirados de operação e com diagnóstico identificado por inspeções. Nesta etapa, faz-se uso de dados fornecidos pela CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco), e de outros existentes na literatura (com diagnóstico identificado após a AGD em transformadores de empresas no exterior);
- A segunda etapa considera um único equipamento retirado de operação e inspecionado por outra empresa do setor elétrico, no qual se utiliza o modelo SADTRAFOS para verificação do seu desempenho.

4.1. Estudo de Caso 1

No primeiro estudo de caso são abordados o processo de obtenção da base de dados de gases dissolvidos no OMI de transformadores, a etapa de pré-processamento e a seleção dos dados utilizadas nos módulos do modelo SADTRAFOS.

Também é abordada a aplicação de técnicas de seleção de variáveis que, em conjunto com o conhecimento de especialistas, definem as entradas do sistema de inferência.

A última etapa consiste na elaboração do módulo de apoio à decisão. Este módulo envolveu o desenvolvimento de três sistemas de apoio à decisão que são utilizados de acordo com a saída obtida no módulo de diagnóstico.

4.1.1. Descrição da Base de Dados

A base de dados utilizada para o desenvolvimento de todo o modelo foi obtida através de casos reais de transformadores que foram retirados de operação em virtude, basicamente, de dois tipos de situações:

- Equipamentos retirados antes de falharem, pela AGD no óleo isolante por meio de cromatografia gasosa;
- Equipamentos retirados de operação através da atuação de proteções após a falha.

Na primeira situação, os transformadores retirados foram inspecionados e tiveram o seu diagnóstico identificado após avaliações e perícias técnicas. No segundo caso, foram levantadas as causas de falha pela inspeção em conjunto com a própria indicação da atuação da proteção. Em algumas situações, falhas mais críticas puderam ter a sua causa identificada, como as que foram seguidas de explosão nos sistemas de comutação e em buchas.

Os dados foram obtidos através de pesquisas e de empresas do setor elétrico brasileiro, totalizando três grupos de bases de dados. As fontes foram:

- A CHESF (Companhia Hidro Elétrica do São Francisco): forneceu a maior parte da base de dados utilizada no modelo. Sua base de dados com a AGD no óleo isolante de transformadores é muito extensa, pois a cromatografia gasosa é uma das principais ferramentas preditivas de diagnose adotada pela empresa.
- A IEC (*International Electrotechnical Commission*): através do grupo de trabalho TC-10, publicou uma revisão da norma e apresentou uma base de dados referente a equipamentos inspecionados que possuíam o acompanhamento da AGD no OMI. Neste caso, apenas alguns valores do banco foram selecionados para compor a base de dados utilizada no trabalho.

- A NTT (*Northern Technology & Testing*): laboratório independente dedicado a serviços relacionados à indústria de equipamentos elétricos de potência e que desenvolve trabalhos relacionados à AGD no OMI de transformadores de potência. Os dados relativos a transformadores que posteriormente foram inspecionados, foram obtidos de publicações de pesquisas e estudos de caso desenvolvidos pela própria empresa.

Após a aquisição dos valores, cada amostra de gases relativa a um determinado equipamento estava associada a um determinado tipo de falta. Assim, todos os transformadores foram inicialmente separados em quatro grupos de diagnóstico definidos por:

- CNO – Condição Normal de Operação – apenas nesta classificação não houve, obviamente, inspeção, pois, tanto a AGD no OMI como a proteção do transformador não indicaram qualquer condição de falta incipiente ou anormalidade no equipamento;
- DP – Descargas Parciais – nesta classificação as inspeções indicaram em geral problemas em contatos e conexões internas com perda de material no transformador, sinais de descargas entre o enrolamento de alta tensão e o tanque, no suporte do núcleo, falta de isolamento no núcleo, depósito de borras e cera-x como subproduto da penetração de umidade no óleo e no papel (MILASCH, M., 1984), além de problemas de aterramento;
- FT – Falhas Térmicas – este grupo de faltas correspondeu aos casos de pontos quentes no núcleo e identificação de descoloração e fusão, problemas em contatos com pequena perda de material, problemas no sistema de refrigeração como entupimentos nos radiadores, mau funcionamento das bombas e ventiladores dependendo do tipo de projeto do transformador, aquecimento dos condutores e identificação de pontos de carbonização da isolação sólida (papel);
- Arco Elétrico – considerado como o mecanismo de falta mais severo em função da elevada energia necessária à sua formação, as faltas que o caracterizam são os curtos-circuitos entre espiras e nos enrolamentos de alta e baixa tensão, em alguns casos detectados pela

proteção diferencial ou de sobrecorrente ou atuações da válvula de alívio de pressão e do relé de gás. Nos casos mais graves, podem ocorrer antes da explosão de chaves comutadoras e buchas.

Identificados os resultados de inspeção de todos os transformadores das diferentes bases de dados, houve a divisão de acordo com os quatro grandes grupos de diagnóstico.

A primeira distribuição dos transformadores avaliados em função do diagnóstico obtido e a origem dos dados é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Distribuição dos dados

CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO	FONTE DOS DADOS		
	CHESF	IEC	NTT
CNO	32	–	–
DP	29	–	2
FT	15	12	2
AE	26	–	4
TOTAIS	102	12	8

4.1.2. Resultados do Pré-Processamento

A etapa de pré-processamento dos dados é fundamental para o desempenho de técnicas de Inteligência Computacional que utilizam bancos de dados.

Como os dados de AGD no OMI de transformadores possuem alguns fatores de incertezas relacionadas ao procedimento de coleta do óleo, problemas na calibração dos instrumentos de medição e alguns erros no preenchimento de dados como valores discrepantes e até mesmo a ausência de dados, torna-se necessário uma análise inicial das tabelas com os gases dissolvidos no óleo de cada transformador para observar a existência de alguma inconsistência que possa comprometer a utilização dos dados, que podem, inclusive, ser de fontes distintas.

Em sistemas de monitoramento on-line já mencionados neste trabalho, tais problemas são minimizados, pois a etapa de reamostragem é realizada de forma automática pelo equipamento acoplado ao transformador sem que haja problemas de procedimento de amostragem de um operador para outro, além do registro dos gases ser armazenado automaticamente pelo software do instrumento.

Dentre os procedimentos iniciais de pré-processamento aplicáveis, a análise do banco de dados não exigiu muitos recursos pois a maioria dos valores era consistente; entretanto, puderam ser constatados os seguintes aspectos:

- Por serem de fontes distintas e em alguns casos relativos a transformadores provenientes de outros países, algumas amostras consideravam apenas os sete principais gases para a análise (H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_2H_4 , CO e CO_2), não contemplando o O_2 e o N_2 . Apesar destes não serem considerados na AGD, eles são importantes na avaliação de vazamentos e problemas relacionados à deterioração da isolação do transformador. Para resolver este problema, a tabela com os valores em ppm destes gases foi completada pela média dos valores de todas as outras amostras observadas nos outros transformadores. Cabe ressaltar que esta aproximação é mais adequada apenas para transformadores de mesmo projeto;
- Foi efetuada, em poucos casos, a limpeza de dados discrepantes onde um determinado gás apresentava valor em ppm muito superior aos de outros gases da mesma amostragem, contrariando de forma discrepante o próprio modelo térmico de formação dos gases, já apresentado no capítulo 2.

Sabendo-se que a definição do diagnóstico dos transformadores, considerando somente gases, possui as limitações já descritas na seção 2.3.1, além dos sete gases mencionados acima, outras seis relações gasosas encontradas nos critérios tradicionais de diagnóstico foram consideradas:

- CO_2/CO
- C_2H_2/H_2
- CH_4/H_2
- C_2H_2/C_2H_4
- C_2H_4/C_2H_6
- C_2H_6/CH_4

Desta forma, a tabela total de dados contemplou treze variáveis, isto é, sete gases e seis relações gasosas.

Para a normalização dos valores adotou-se o critério de normalização por funções lineares em intervalos de valores da variável, descrito na seção 3.1 e modelado através das equações (2) e (3).

Considerando a planilha total com 122 transformadores, cada coluna representou uma variável a ser normalizada pelo critério descrito na seção 3.1. A seguir, é apresentada a análise gráfica das 122 amostras de cada uma das sete variáveis (gases) e as equações de normalização obtidas para cada gás. Para as relações gasosas, não houve necessidade de normalização, bastando apenas efetuar a razão entre dois gases já normalizados. Vale lembrar que os valores de X_0 e X_m , das equações gerais de normalização (2) e (3), variam de uma variável para outra e que especificamente o valor de X_0 foi definido após a análise gráfica de cada uma das sete variáveis, observando os valores mais distintos em relação à média de todas as amostras da variável e considerando que a quantidade de amostras normalizadas pela primeira função (valores menores ou iguais a X_0), fosse superior a 70% do total.

- H_2 – Equações de normalização: (7) e (8).

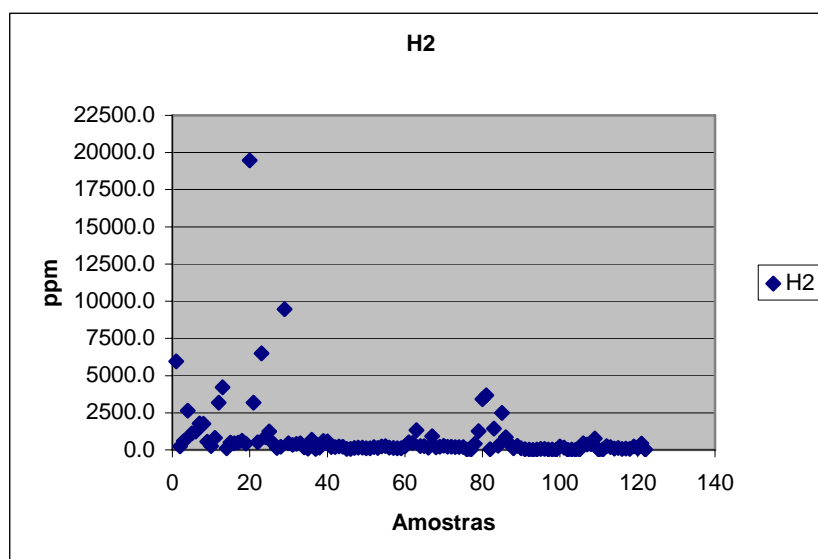


Figura 29 – Gráfico da variável hidrogênio em 122 amostras

$$Y_{1n} = 3,506 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \quad (7)$$

$$Y_{2n} = 0,926 + 4,4 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 \quad (8)$$

A equação (7) normalizou 113 amostras entre 0 e 3000 ppm e a equação (8) 9 amostras maiores que 3000 ppm até 19458 ppm (maior valor assumido pela

variável referente ao ponto mais alto do gráfico em relação ao eixo das ordenadas).

- CH₄ – Equações de normalização: (9) e (10).

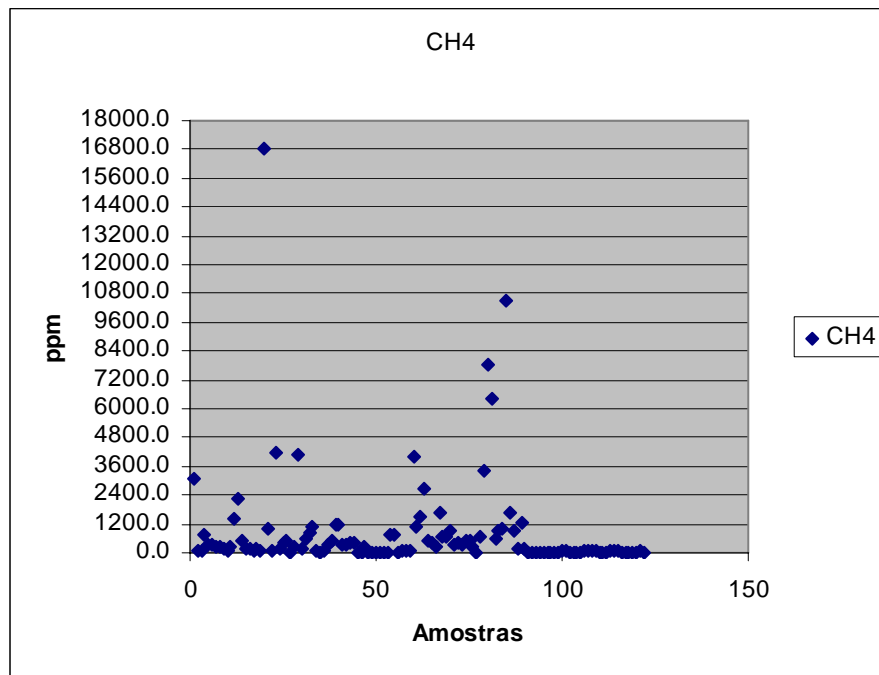


Figura 30 - Gráfico da variável metano em 122 amostras

$$Y_{1n} = 7,32 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \quad (9)$$

$$Y_{2n} = 0,896 + 8,36 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 \quad (10)$$

A equação (9) normalizou 106 amostras entre 0 e 1200 ppm e a equação (10) 16 amostras maiores que 1200 ppm até 16855 ppm (maior valor assumido pela variável referente ao ponto mais alto gráfico).

- CO – Equações de normalização: (11) e (12).

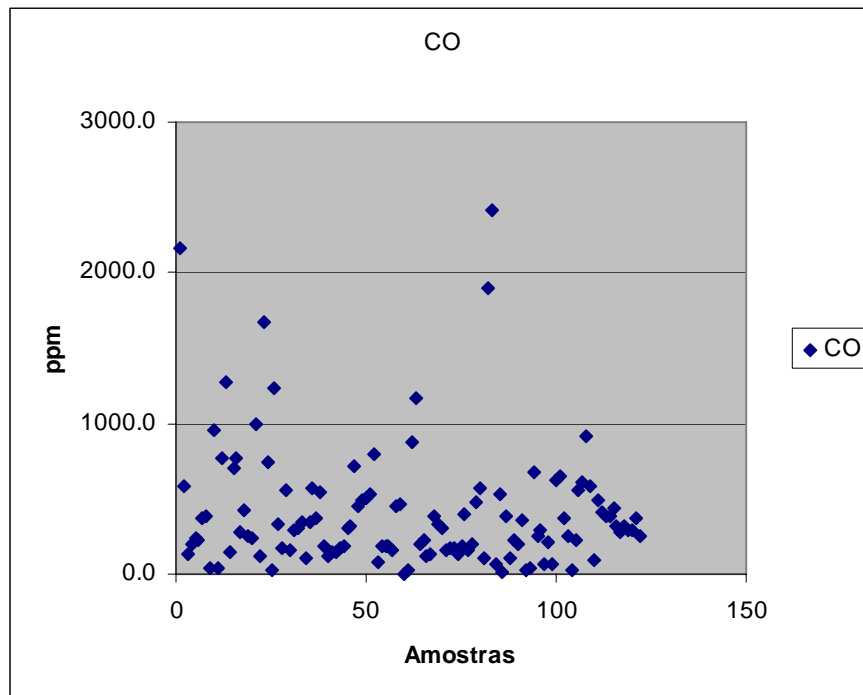


Figura 31 – Gráfico da variável monóxido de carbono em 122 amostras

$$Y_{1n} = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \quad (11)$$

$$Y_{2n} = 0,746 + 1,321 \cdot 10^{-4} \cdot X_2 \quad (12)$$

A equação (11) normalizou 91 amostras entre 0 e 500 ppm e a equação (12) 31 amostras maiores que 500 ppm até 2420 ppm.

- CO₂ – Equações de normalização: (13) e (14).

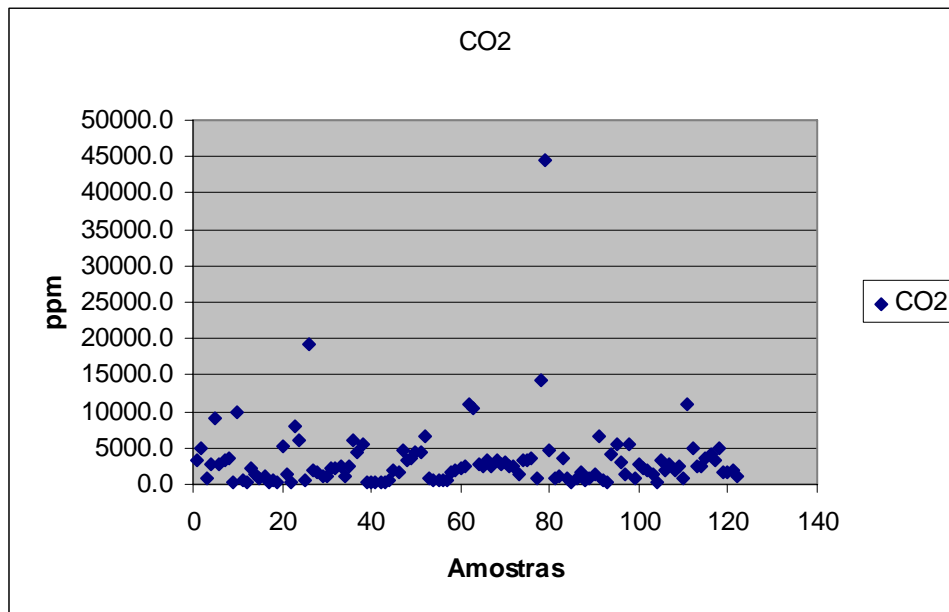


Figura 32 - Gráfico da variável dióxido de carbono em 122 amostras

$$Y_{1n} = 2,183 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \quad (13)$$

$$Y_{2n} = 0,746 + 5,7 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 \quad (14)$$

A equação (13) normalizou 91 amostras entre 0 e 3500 ppm e a equação (14) 31 amostras maiores que 3500 ppm até 44500 ppm.

- C₂H₄ – Equações de normalização: (15) e (16).

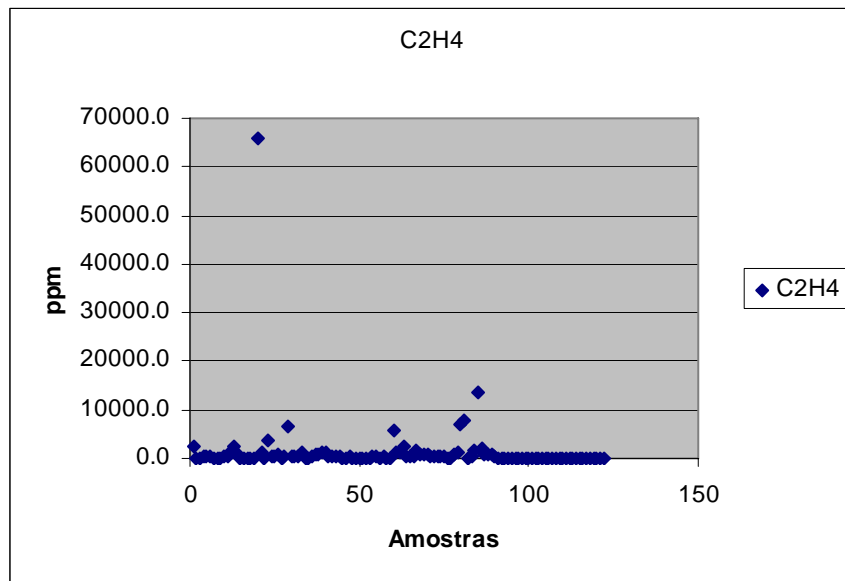


Figura 33 – Gráfico da variável etileno em 122 amostras

$$Y_{1n} = 8,338 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \quad (15)$$

$$Y_{2n} = 0,828 + 2,646 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 \quad (16)$$

A equação (15) normalizou 100 amostras entre 0 e 1000 ppm e a equação (16) 22 amostras maiores que 1000 ppm até 65976 ppm.

- C₂H₆ – Equações de normalização: (17) e (18).

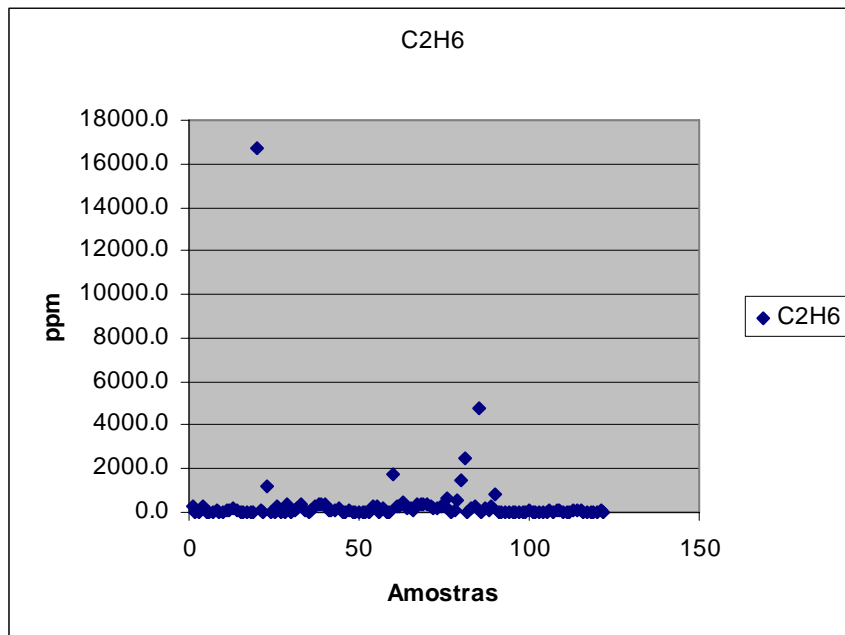


Figura 34 – Gráfico da variável etano em 122 amostras

$$Y_{1n} = 1,124 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 \quad (17)$$

$$Y_{2n} = 0,951 + 2,937 \cdot 10^{-6} \cdot X_2 \quad (18)$$

A equação (17) normalizou 116 amostras entre 0 e 1000 ppm e a equação (18) 6 amostras maiores que 1000 ppm até 16682 ppm.

- C_2H_2 – equações de normalização: (19) e (20).

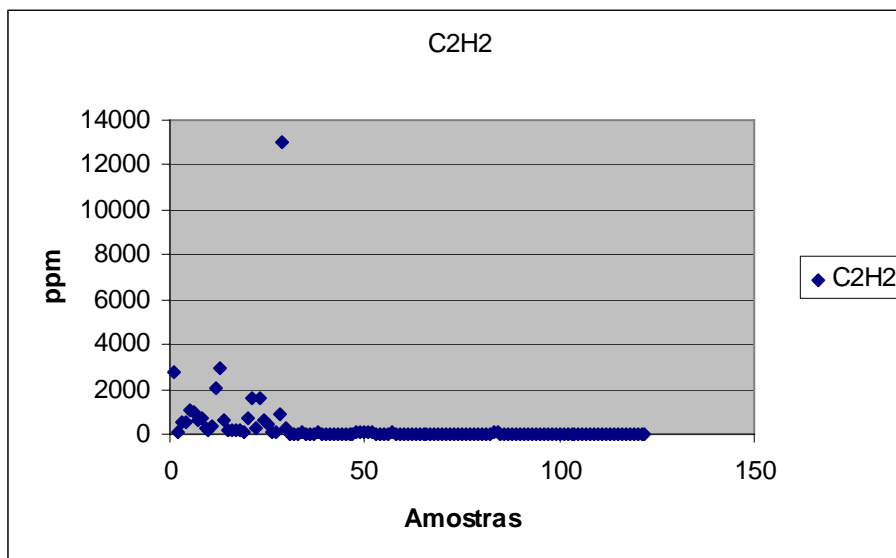


Figura 35 - Gráfico da variável acetileno em 122 amostras

$$Y_{1n} = 3,11 \cdot 10^{-4} \cdot X_1 \quad (19)$$

$$Y_{2n} = 0,992 + 8,15 \cdot 10^{-7} \cdot X_2 \quad (20)$$

A equação (19) normalizou 121 amostras entre 0 e 3000 ppm e a equação (20) apenas uma amostra maior que 3000 ppm com o valor de 12997 ppm.

Conforme mencionado anteriormente, após a normalização dos sete gases, as relações gasosas também foram normalizadas, completando a matriz de dados com 122 amostras de 13 variáveis normalizadas.

Com a matriz de dados normalizada, o encerramento da etapa de pré-processamento exigiu a aplicação de alguma ferramenta de seleção de variáveis que auxiliasse na definição de quais variáveis eram mais relevantes para compor o vetor de entradas do SIF no módulo de diagnóstico.

Conforme descrito na seção 3.1, duas técnicas foram empregadas:

- PCA (*Principal Component Analysis*);
- LSE (*Least Square Estimator*).

Os resultados obtidos com ambas as técnicas é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados obtidos pelas técnicas de seleção de variáveis

ORDEM DE IMPORTÂNCIA	PCA	LSE
1°	C2H6/CH4	CH4
2°	C2H4	C2H4
3°	CO	C2H2/C2H4
4°	CO2	C2H6/CH4
5°	CH4	CO2/CO
6°	C2H6	C2H4/C2H6
7°	CH4/H2	CO
8°	H2	C2H6
9°	C2H4/C2H6	CO2
10°	C2H2/H2	CH4/H2
11°	C2H2	H2
12°	CO2/CO	C2H2/H2
13°	C2H2/C2H4	C2H2

Após a definição do grau de importância das variáveis pelas duas técnicas, em conjunto com o conhecimento de especialistas sobre os mecanismos de formação de gases e as faltas associadas, foram realizados testes com três e quatro variáveis de entrada, com o objetivo de se obter o melhor desempenho do SIF no módulo de diagnóstico. A opção por um número reduzido de entradas deve-se ao fato de que o número de regras é função do número de variáveis; um número excessivo de entradas e, conseqüentemente, de regras, prejudica a interpretabilidade. Os resultados obtidos no módulo de diagnóstico serão apresentados na seção seguinte.

4.1.3. Resultados do Módulo de Diagnóstico

Nesta seção apresenta-se o desempenho do módulo de diagnóstico em testes realizados com três e quatro variáveis de entrada para o SIF, assim como a base de regras obtida para cada conjunto de variáveis utilizado.

Conforme já explicado no capítulo 3, a maioria dos erros de diagnóstico envolve faltas de ordem térmica e descargas parciais. Em termos práticos, sabe-se que estes dois fenômenos dificilmente ocorrem de forma isolada no interior do transformador e que, na maioria das vezes, um fenômeno evolui para o outro de forma rápida nos transformadores de potência.

Cabe ressaltar que, descargas parciais e os fenômenos de ordem térmica implicam na maioria dos casos nos mesmos procedimentos pós-inspeção e

possuem um grau de severidade, dependendo da energia associada ao fenômeno, de mesma magnitude. Assim, para obter um melhor desempenho no diagnóstico, sem prejuízo à qualidade de identificação de defeitos, a classificação foi redefinida para três diagnósticos: os fenômenos de descargas parciais e falhas térmicas (DP e FT) foram agrupados em uma única classe. Além desta, foram mantidos os casos de condição normal de operação (CNO) e arco elétrico (AE), este relativo ao diagnóstico com maior grau de severidade. A Tabela 3 redefine a separação das amostras pelo tipo de diagnóstico associado e a fonte fornecedora dos dados.

Tabela 3 – Redefinição dos dados em relação ao diagnóstico

TIPO DE FALTA	FONTE DOS DADOS		
	CHESF	IEC	NTT
CNO	32	–	
DP e FT	44	12	4
AE	26	–	4

As próximas tabelas apresentam o desempenho das simulações conforme a parametrização adotada no software Fuzzy Rules de extração de regras, além da seleção das variáveis de entrada e o número de saídas no módulo de diagnóstico.

As tabelas 4 e 5 apresentam de forma resumida o desempenho de acerto de todas as simulações, diferenciando-as em relação ao número de classes de saída (3 ou 4). As Tabelas 6 a 27 apresentam de forma mais detalhada a parametrização e os resultados das 22 simulações realizadas.

Tabela 4 – Análise de desempenho considerando 4 diagnósticos (variáveis) de saída

ANÁLISE DE DESEMPENHO (% DE ACERTO) 4 DIAGNÓSTICOS DE SAÍDA					
Nº DE VARIÁVEIS DE ENTRADA	Nº DA SIMULAÇÃO	Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL DE ENTRADA			Nº DE REGRAS
		7	5	3	
4	1	40,6%	–	–	65
	2	62,5%	–	–	37
	3	–	56,25%	–	16
	4	–	–	53,12%	47
	5	–	–	46,87%	8
	6	–	59,37%	–	23
	7	–	68,75%	–	24
	8	–	–	65,62%	10
	9	–	56,25%	–	23
3	10	–	65,62%	–	23
	11	–	53,12%	–	23

Tabela 5 - Análise de desempenho considerando 3 diagnósticos (variáveis) de saída

ANÁLISE DE DESEMPENHO (% DE ACERTO) 3 DIAGNÓSTICOS DE SAÍDA					
N° DE VARIÁVEIS DE ENTRADA	N° DA SIMULAÇÃO	N° DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL DE ENTRADA			N° DE REGRAS
		7	5	3	
4	12		83,33%	–	23
	13	79,16%	–	–	30
	14	–	–	70,83%	15
	15	–	75,00%	–	17
	16	–	66,66%	–	20
	17	–	83,33%	–	23
	18	–	75,00%	–	16
	19	–	79,16%	–	18
	20	–	79,16%	–	22
3	21	–	83,33%	–	22
	22	–	75,00%	–	18

- Simulações com 4 variáveis de entrada e diagnóstico com 4 saídas:

Tabela 6 – Simulação 1: Critério de PCA

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CO, CO₂, C₂H₄, C₂H₆/CH₄			
SIMULAÇÃO 1 - PCA		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
N° DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	7	CNO	7/8 = 87,5%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	1/8 = 12,5%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	2/8 = 25%
N° DE REGRAS	65	TOTAL	40,6%

Tabela 7 – Simulação 2: Critério de seleção de variáveis pelo LSE

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH₄, C₂H₄, C₂H₂/C₂H₄, C₂H₆/CH₄			
SIMULAÇÃO 2 - LSE		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
N° DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	7	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	2/8 = 25%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	5/8 = 62,5%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
N° DE REGRAS	37	TOTAL	62,5%

Tabela 8 – Simulação 3

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CO ₂ /CO, CH ₄ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆			
SIMULAÇÃO 3		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	2/8 = 25%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	3/8 = 37,5%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	16	TOTAL	56,25%

Tabela 9 – Simulação 4

VARIÁVEIS DE ENTRADA - H ₂ , C ₂ H ₄ , CO, C ₂ H ₂ /H ₂			
SIMULAÇÃO 4		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	7	CNO	6/8 = 75%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	5/8 = 62,5%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	3/8 = 37,5%
Nº DE REGRAS	47	TOTAL	53,12%

Tabela 10 – Simulação 5

VARIÁVEIS DE ENTRADA - C ₂ H ₂ , CO ₂ /CO, CH ₄ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 5		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	1/8 = 12,5%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO	FT	2/8 = 25%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	4/8 = 50%
Nº DE REGRAS	8	TOTAL	46,87%

Tabela 11 – Simulação 6

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂			
SIMULAÇÃO 6		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO	FT	4/8 = 50%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	4/8 = 50%
Nº DE REGRAS	23	TOTAL	59,37%

Tabela 12 – Simulação 7

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 7		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO	FT	6/8 = 75%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	24	TOTAL	68,75%

Tabela 13 – Simulação 8

VARIÁVEIS DE ENTRADA - C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 8		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP	2/8 = 25%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO	FT	7/8 = 87,5%
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	4/8 = 50%
Nº DE REGRAS	10	TOTAL	65,62%

Tabela 14 – Simulação 9

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 9		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	4/8 = 50%
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	3/8 = 37,5%
Nº DE REGRAS	23	TOTAL	56,25%

- Simulações com 3 variáveis de entrada e diagnóstico com 4 saídas:

Tabela 15 – Simulação 10

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 10		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP	3/8 = 37,5%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	4/8 = 50%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	6/8 = 75%
Nº DE REGRAS	23	TOTAL	65,62%

Tabela 16 – Simulação 11

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆			
SIMULAÇÃO 11		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP	2/8 = 25%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO	FT	4/8 = 50%
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	3/8 = 37,5%
Nº DE REGRAS	23	TOTAL	53,12%

- Simulações com 4 variáveis de entrada e diagnóstico com 3 saídas:

Tabela 17 – Simulação 12: Critério de seleção de variáveis pelo LSE

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ /CH ₄			
SIMULAÇÃO 12 - LSE		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	6/8 = 75%
Nº DE REGRAS	24	TOTAL	83,33%

Tabela 18 – Simulação 13

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CO ₂ /CO, CH ₄ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆			
SIMULAÇÃO 13		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	7	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	30	TOTAL	79,16%

Tabela 19 – Simulação 14

VARIÁVEIS DE ENTRADA - H ₂ , C ₂ H ₄ , CO, C ₂ H ₂ /H ₂			
SIMULAÇÃO 14		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	3/8 = 37,5%
Nº DE REGRAS	15	TOTAL	70,83%

Tabela 20 – Simulação 15

VARIÁVEIS DE ENTRADA - C ₂ H ₂ , CO ₂ /CO, CH ₄ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₂			
SIMULAÇÃO 15		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	4/8 = 37,5%
Nº DE REGRAS	17	TOTAL	75%

Tabela 21 – Simulação 16

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ , C ₂ H ₂			
SIMULAÇÃO 16		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	4/8 = 50%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	4/8 = 50%
Nº DE REGRAS	20	TOTAL	66,66%

Tabela 22 – Simulação 17

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 17		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	6/8 = 75%
Nº DE REGRAS	23	TOTAL	83,33%

Tabela 23 – Simulação 18

VARIÁVEIS DE ENTRADA - C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 18		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP e FT	5/8 = 62,5%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	16	TOTAL	75%

Tabela 24 – Simulação 19

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 19		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	PRODUTO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	18	TOTAL	79,16%

Tabela 25 – Simulação 20

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 20		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	MÍNIMO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	5/8 = 62,5%
Nº DE REGRAS	22	TOTAL	79,16%

- Simulações com 3 variáveis de entrada e diagnóstico com 3 saídas:

Tabela 26 – Simulação 21

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄			
SIMULAÇÃO 21		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	ALTURA LIMITADA	AE	6/8 = 75%
Nº DE REGRAS	22	TOTAL	83,33%

Tabela 27 – Simulação 22

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆			
SIMULAÇÃO 22		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	5	CNO	8/8 = 100%
INTERSEÇÃO	PRODUTO	DP e FT	6/8 = 75%
IMPLICAÇÃO	MÍNIMO		
DEFUZZIFICAÇÃO	CENTRÓIDE	AE	4/8 = 50%
Nº DE REGRAS	18	TOTAL	75%

Após a avaliação dos resultados obtidos, o SIF do módulo de diagnóstico foi finalmente configurado com três variáveis de entrada e três saídas, conforme indicado na simulação 21. Sua parametrização e resultados constam da Tabela 26.

Com a definição das variáveis de entrada e o número de conjuntos fuzzy por variável (5 conjuntos), obteve-se 22 regras lingüísticas. As Figuras 36 a 39 apresentam a disposição dos conjuntos fuzzy para cada variável de entrada, além da classe de saída representando o diagnóstico. Cabe ressaltar que, para cada simulação efetuada no software Fuzzy Rules, foram realizados testes variando o percentual de interseção entre as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy. O melhor desempenho no módulo de diagnóstico foi obtido na simulação 21 com uma interseção de 50% entre os conjuntos fuzzy de cada variável de entrada.

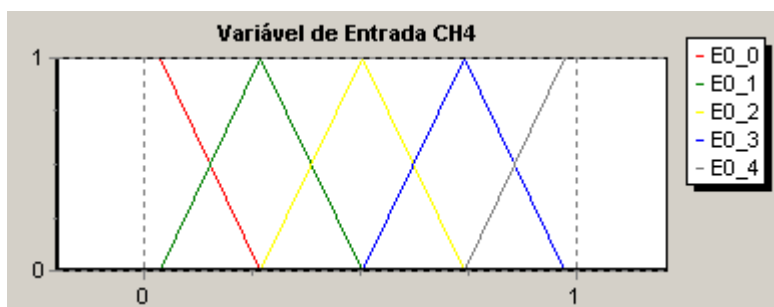


Figura 36 – Conjuntos fuzzy de entrada da variável metano

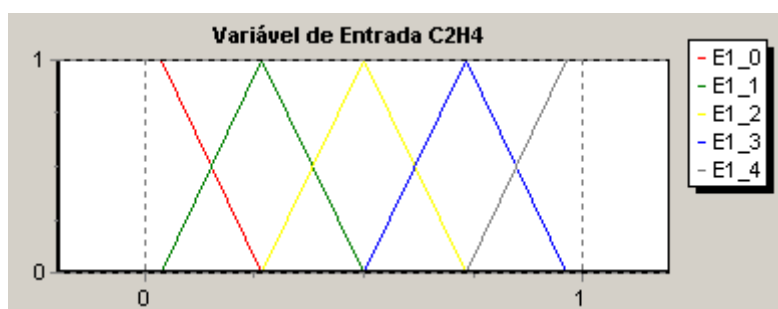


Figura 37 – Conjuntos fuzzy da variável de entrada etileno

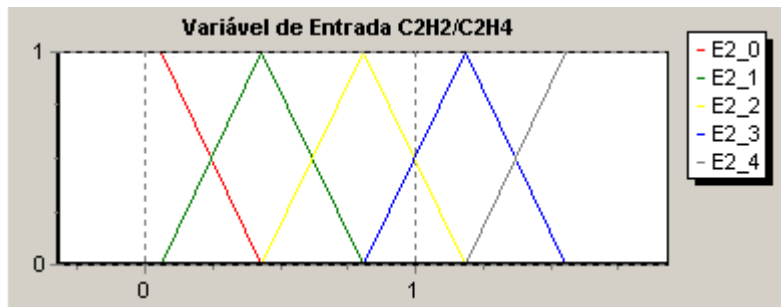


Figura 38 – Conjuntos fuzzy da variável de entrada correspondente à relação gasosa entre o acetileno e o etileno

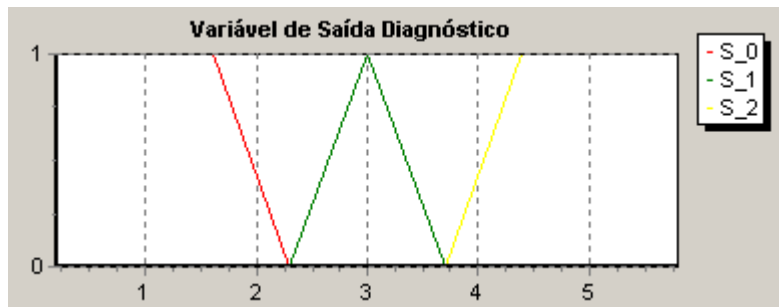


Figura 39 – Conjuntos fuzzy da variável de saída diagnóstica

De forma a melhor representar os conceitos lingüísticos de cada variável de entrada, os rótulos $E_{i_N} \in \{1, 2, 3\}$ e $N \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$, foram substituídos, nas tabelas a seguir, respectivamente por:

- MA – Muito alto;
- A – Alto;
- M – Médio;
- B – Baixo;
- MB – Muito baixo.

A Tabela 26 apresenta as regras definidas com a utilização dos parâmetros e variáveis descritas na simulação 21.

Tabela 28 – Base de regras obtida com a simulação 21

N°	BASE DE REGRAS								
1	SE	CH4	MA	C2H4	A	C2H2/C2H4	A	ENTAO	AE
2	SE	CH4	MB	C2H4	MB	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
3	SE	CH4	MB	C2H4	MB	C2H2/C2H4	MA	ENTAO	AE
4	SE	CH4	M	C2H4	M	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
5	SE	CH4	B	C2H4	M	C2H2/C2H4	M	ENTAO	AE
6	SE	CH4	B	C2H4	M	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
7	SE	CH4	B	C2H4	B	C2H2/C2H4	A	ENTAO	AE
8	SE	CH4	B	C2H4	B	C2H2/C2H4	MA	ENTAO	AE
9	SE	CH4	MB	C2H4	B	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
10	SE	CH4	B	C2H4	B	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
11	SE	CH4	MA	C2H4	A	C2H2/C2H4	M	ENTAO	AE
12	SE	CH4	B	C2H4	A	C2H2/C2H4	B	ENTAO	AE
13	SE	CH4	MA	C2H4	MA	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	AE
14	SE	CH4	M	C2H4	B	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
15	SE	CH4	M	C2H4	M	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
16	SE	CH4	A	C2H4	A	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
17	SE	CH4	MB	C2H4	MB	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	CNO
18	SE	CH4	MB	C2H4	B	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
19	SE	CH4	B	C2H4	M	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
20	SE	CH4	M	C2H4	A	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
21	SE	CH4	MA	C2H4	A	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT
22	SE	CH4	B	C2H4	B	C2H2/C2H4	MB	ENTAO	DP e FT

A Figura 40 apresenta um esboço de como foi estruturado o SIF no módulo de diagnóstico.

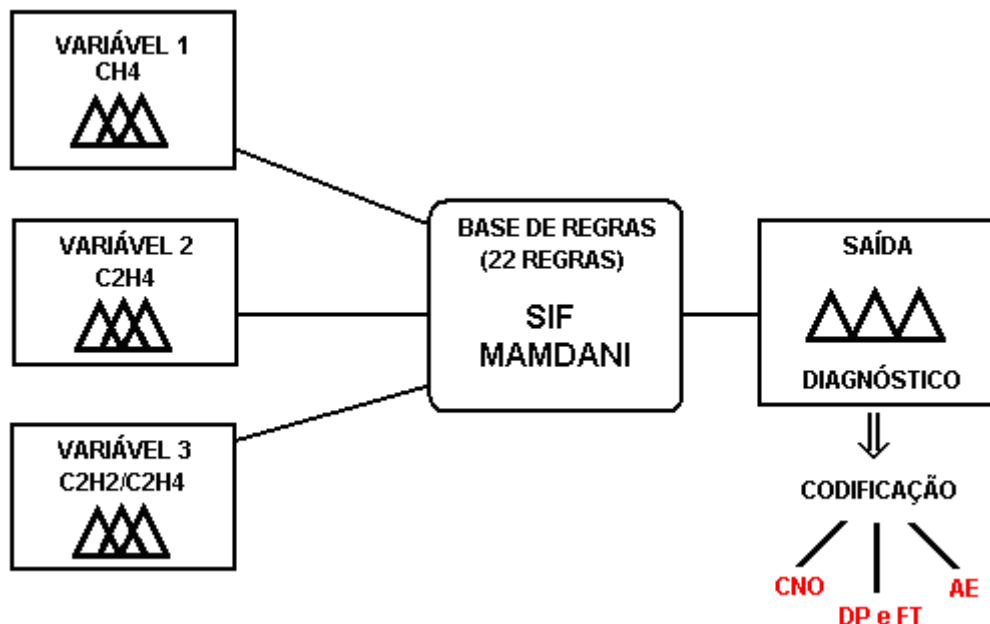


Figura 40 – Estrutura do sistema do SIF no módulo de diagnóstico

A Tabela 29 apresenta a comparação entre os resultados da inspeção do equipamento e o resultado apresentado pelo SIF. Os campos em azul identificam os acertos, e os vermelhos, os erros.

Tabela 29 – Comparação dos resultados obtidos com 24 equipamentos testados

Nº do Teste	Nº de Série	Diagnóstico após Inspeção	Diagnóstico do SIF (SADTRAFOS)
1	D203255	AE	AE
2	SP3926	AE	AE
3	569990-2	AE	AE
4	SP2106	AE	DP e FT
5	NTT3	AE	CNO
6	NTT4	AE	AE
7	NTT5	AE	AE
8	NTT8	AE	AE
9	8234850103	DP e FT	AE
10	59890a	DP e FT	DP e FT
11	59890	DP e FT	DP e FT
12	371596	DP e FT	AE
13	TC10-44	DP e FT	DP e FT
14	TC10-48	DP e FT	DP e FT
15	TC10-49	DP e FT	DP e FT
16	TC10-51	DP e FT	DP e FT
17	1778-3	CNO	CNO
18	A88035-1	CNO	CNO
19	A88035-2	CNO	CNO
20	A88035-3	CNO	CNO
21	77406-1	CNO	CNO
22	77406-2	CNO	CNO
23	77406-3	CNO	CNO
24	371672	CNO	CNO

A título de comparação, foram realizadas simulações com o sistema ANFIS (*Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System*), disponível no software Matlab, que utiliza o modelo de inferência do tipo TSK (Takagi-Sugeno-Kang). Recorde-se que o estudo foi feito apenas para fins de comparação, uma vez que o sistema de inferência adotado do módulo de diagnóstico do SADTRAFOS é do tipo Mamdani, mais interessante do ponto de vista da interpretabilidade.

As tabelas 30 a 35 apresentam os resultados obtidos pelo sistema ANFIS de acordo com a parametrização realizada e o grupo de variáveis de entrada selecionadas em cada simulação.

- Simulações com 4 variáveis de entrada e diagnóstico com 4 saídas:

Tabela 30 – Simulação 1: Critério de Seleção por PCA

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CO, CO ₂ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ /CH ₄				
SIMULAÇÃO 1 - PCA		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	81			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	2/5 = 40%	25%
		DP	1/5 = 20%	
		FT	1/5 = 20%	
		CNO	1/5 = 20%	
	TRAPEZOIDAL	AE	2/5 = 40%	30%
		DP	1/5 = 20%	
		FT	1/5 = 20%	
		CNO	2/5 = 40%	
	GAUSSIANA	AE	2/5 = 40%	35%
		DP	1/5 = 20%	
		FT	1/5 = 20%	
		CNO	3/5 = 60%	

Tabela 31 – Simulação 2 : Critério de seleção pelo LSE

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ /CH ₄				
SIMULAÇÃO 2 - LSE (4 DIAGNÓSTICOS)		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	81			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	2/5 = 40%	45%
		DP	2/5 = 40%	
		FT	0/5 = 0%	
		CNO	5/5 = 100%	
	TRAPEZOIDAL	AE	1/5 = 20%	40%
		DP	2/5 = 40%	
		FT	0/5 = 0%	
		CNO	5/5 = 100%	
	GAUSSIANA	AE	2/5 = 40%	55%
		DP	3/5 = 60%	
		FT	1/5 = 20%	
		CNO	5/5 = 100%	

- Simulações com 4 variáveis de entrada e diagnóstico com 3 saídas:

Tabela 32 – Simulação 3: critério de seleção pelo LSE

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄ , C ₂ H ₆ /CH ₄				
SIMULAÇÃO 3 - LSE (3 DIAGNÓSTICOS)		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	81			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	3/5 = 60%	53,33%
		DP e FT	0/5 = 0%	
		CNO	5/5 = 100%	
	TRAPEZOIDAL	AE	5/5 = 100%	80%
		DP e FT	2/5 = 40%	
		CNO	5/5 = 100%	
	GAUSSIANA	AE	5/5 = 100%	73,33%
		DP e FT	1/5 = 20%	
		CNO	5/5 = 100%	

Tabela 33 – Simulação 4

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄				
SIMULAÇÃO 4		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	81			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	3/5 = 60%	86,66%
		DP e FT	5/5 = 100%	
		CNO	5/5 = 100%	
	TRAPEZOIDAL	AE	4/5 = 80%	86,66%
		DP e FT	4/5 = 80%	
		CNO	5/5 = 100%	
	GAUSSIANA	AE	3/5 = 60%	73,33%
		DP e FT	3/5 = 60%	
		CNO	5/5 = 100%	

Tabela 34 – Simulação 5

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /H ₂ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄				
SIMULAÇÃO 5		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	81			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	5/5 = 100%	93,33%
		DP e FT	4/5 = 80%	
		CNO	5/5 = 100%	
	TRAPEZOIDAL	AE	3/5 = 60%	80%
		DP e FT	4/5 = 80%	
		CNO	5/5 = 100%	
	GAUSSIANA	AE	3/5 = 60%	66,66%
		DP e FT	2/5 = 40%	
		CNO	5/5 = 100%	

- Simulação com 3 variáveis de entrada e diagnóstico com 3 saídas:

Tabela 35 – Simulação 6

VARIÁVEIS DE ENTRADA - CH ₄ , C ₂ H ₄ , C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄				
SIMULAÇÃO 6		DIAGNÓSTICO	% DE ACERTO	% DE ACERTO TOTAL
Nº DE CONJUNTOS FUZZY/VARIÁVEL	3			
MODELO DE INFERÊNCIA	TSK			
MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO	HÍBRIDO			
Nº DE REGRAS	27			
FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	TRIANGULAR	AE	3/5 = 60%	86,66%
		DP e FT	5/5 = 100%	
		CNO	5/5 = 100%	
	TRAPEZOIDAL	AE	4/5 = 80%	86,66%
		DP e FT	4/5 = 80%	
		CNO	5/5 = 100%	
	GAUSSIANA	AE	3/5 = 60%	73,33%
		DP e FT	3/5 = 60%	
		CNO	5/5 = 100%	

Apesar da simulação 5 com o sistema ANFIS ter apresentado o melhor desempenho de diagnóstico, o número de regras gerado (81 regras) é

consideravelmente maior do que as 22 regras obtidas pelo método de Wang e Mendel. A Figura 37 apresenta a estrutura básica do sistema ANFIS com 3 conjuntos por variável de entrada e a função “f” de saída.

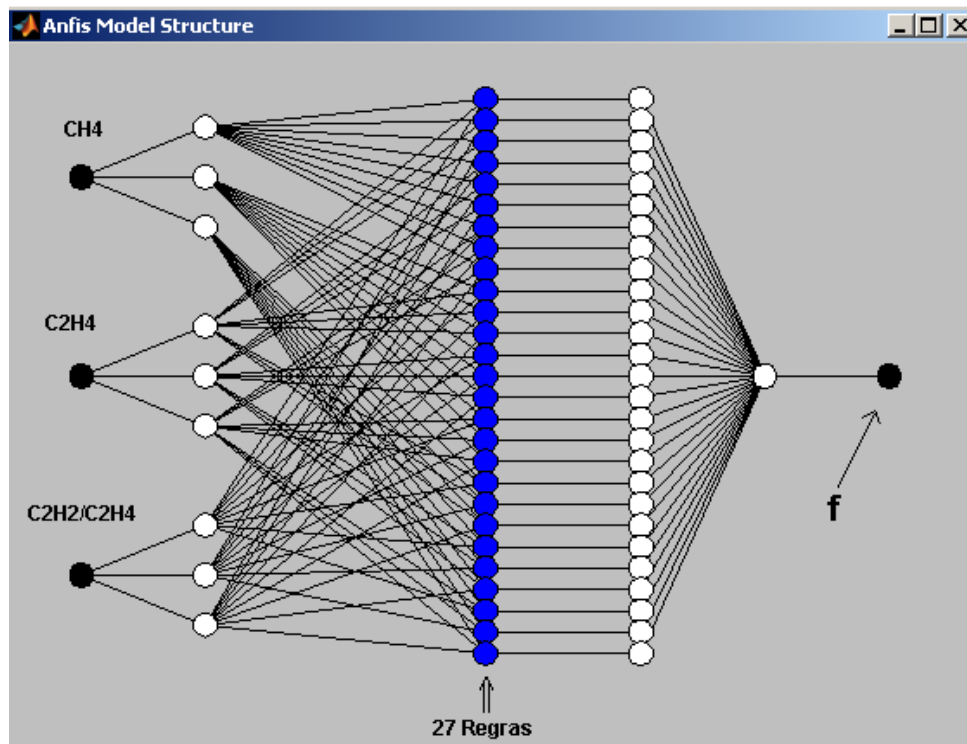


Figura 41 – Estrutura do sistema ANFIS obtida no Matlab através da simulação 6

Para fins de comparação entre o melhor desempenho obtido pelo software *Fuzzy Rules* e o resultado para as mesmas entradas fornecido pelo ANFIS, a Tabela 36 apresenta os percentuais de acerto e o número de regras geradas em ambos os casos. Ressalta-se novamente que, mesmo apresentando desempenho ligeiramente superior ao SIF, o ANFIS não foi adotado no módulo de diagnóstico em virtude da questão da interpretabilidade.

Tabela 36 – Desempenho do ANFIS e do Fuzzy Rules

PARÂMETROS	Fuzzy Rules (Wang e Mendel)	ANFIS
Nº DA SIMULAÇÃO	21	6
% DE ACERTO	20/24 = 83,33	13/15 = 86,66
Nº DE REGRAS	22	27
Nº DE VARIÁVEIS DE ENTRADA	3	

4.1.4. Resultados do Módulo de Apoio à Decisão

O módulo de apoio à decisão corresponde à última etapa do modelo SADTRAFOS. Dependendo do resultado apresentado no módulo anterior de diagnóstico, um dos sistemas de apoio à decisão é utilizado para compor a saída final de todo o modelo.

No módulo de apoio à decisão, foram desenvolvidos três sistemas, cada um relativo a um possível diagnóstico do SIF, contemplando itens referentes a particularidades de projeto, histórico de ocorrências e informações de técnicas complementares à AGD, além do contexto operacional de cada equipamento. Estas informações, da mesma forma que os gases e as relações gasosas, são também inseridas pelo usuário.

A saída global do modelo SADTRAFOS é composta pelo diagnóstico do equipamento em conjunto com ações e recomendações direcionadas à manutenção dos transformadores, fornecendo aos gestores de manutenção maiores subsídios para a tomada de decisão quanto a possíveis intervenções nos equipamentos avaliados pelo modelo.

Um total de 24 transformadores foram avaliados pelo modelo proposto. Conforme apresentado na Tabela 29 da seção anterior, o sistema de inferência forneceu o diagnóstico correto em 20 transformadores e apresentou resultado diferente da inspeção em apenas 4 casos. Vale destacar que, para os transformadores em CNO não ocorreram erros, pois o modelo avaliou corretamente todos os oito equipamentos considerados.

Como os dados dos transformadores testados contemplavam apenas os resultados da AGD, o tempo de operação dos equipamentos e a avaliação da equipe de manutenção em relação às inspeções, os resultados do módulo de apoio à decisão foram apresentados sob a forma de tabelas e divididos em duas partes:

1. Resultado do módulo de diagnóstico.
2. Comentários baseados nas inspeções realizadas nos transformadores e, em negrito, a saída global padronizada do modelo SADTRAFOS com o diagnóstico apresentado no módulo de diagnóstico, o sistema utilizado do módulo de apoio à decisão em conjunto com as ações e recomendações de

manutenção padronizadas conforme as Figuras 25, 26 e 27 da seção 3.3 do capítulo anterior.

Os três sistemas do módulo de apoio à decisão foram definidos da seguinte forma:

- Sistema 1 – Sistema do módulo de apoio à decisão referente ao diagnóstico CNO.
- Sistema 2 – Sistema do módulo de apoio à decisão referente ao diagnóstico DP e FT.
- Sistema 3 – Sistema do módulo de apoio à decisão referente ao diagnóstico AE.

As tabelas seguintes indicam os comentários e, em negrito, a saída padronizada apresentada pelo módulo de apoio à decisão referente à avaliação de 24 transformadores de potência discriminados pelos seus respectivos números de série.

- N° de série: D203255

Tabela 37 – Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 1

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 1
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação da proteção diferencial, em função de curto-circuito entre espiras do enrolamento de baixa tensão. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M3: Avaliar danos e se possível programar a substituição de componentes, tratamento do óleo e recuperação da isolação sólida.

- N° de série: SP 3926

Tabela 38 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 2

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 2
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação do relé de gás, em função de baixa na rigidez dielétrica da isolação, seguida de curto-circuito. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M3: Avaliar danos e se possível programar, a substituição de componentes, tratamento do óleo e recuperação da isolação sólida.

- N° de série: 569990-2

Tabela 39 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 3

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 3
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação do relé diferencial e de sobrecorrente, em função de dano na bucha e contaminação do óleo. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M3: Avaliar danos e se possível programar, a substituição de componentes, tratamento do óleo e recuperação da isolamento sólida.

- N° de série: SP 2106

Tabela 40 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 4

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 4
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação do relé de gás e válvula de alívio de pressão, em função de explosão da bucha. Houve erro no módulo de diagnóstico que indicou "DP e FT". Ausência de informações do equipamento indicou o Sistema 2 do módulo de apoio à decisão. M1.10: Reduzir a periodicidade das análises do OMI e verificar as taxas de formação de H₂, C₂H₂ e CH₄.

- N° de série: NTT 3

Tabela 41 – Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 5

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 5
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento apresentou arco entre o tanque e os leads de alta tensão. Os leads de alta tensão foram reformados mediante inspeção e manutenção. Houve erro no módulo de diagnóstico que indicou "CNO". Ausência de informações do equipamento indicou o Sistema 1 do módulo de apoio à decisão. M6: Reduzir a periodicidade das análises para o nível mensal.

- N° de série: NTT 4

Tabela 42 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 6

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 6
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia. Nível de acetileno muito elevado em relação aos outros gases. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M2.2: Programar inspeção e testes

- N° de série: NTT 5

Tabela 43 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 7

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 7
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Explosão do comutador e elevação muito rápida dos gases combustíveis. Nível de acetileno muito elevado em relação aos outros gases. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M5.3: Programar inspeção e testes

- N° de série: NTT 6

Tabela 44 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 8

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 8
DIAGNÓSTICO: Arco Elétrico
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Falha com arco para a terra. O transformador operava sem o sistema de resfriamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 3. M1.2: Programar inspeção e testes.

- N° de série: 8234850103

Tabela 45 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 9

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 9
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação do relé de gás em função de desgaste excessivo dos contatos da chave inversora no sistema de comutação. Houve erro no módulo de diagnóstico que indicou "AE". Ausência de informações do equipamento ocasionou a indicação do Sistema 3 no módulo de apoio à decisão. M5.3: Possibilidade de falta de alta energia associada a "stress" térmico e elétrico. Reduzir a periodicidade das análises e se possível programar inspeções.

- N° de série: 59890 - A

Tabela 46 – Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 10

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Cas o 10
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia. Indicação de correntes de circulação e posterior aquecimento do núcleo. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2. M1.9: Reduzir a periodicidade das análises no OMI. Verificar a evolução dos "Hot metal gases" (CH₄, C₂H₄ e C₂H₆) associados a problemas de aquecimento no núcleo.

- N° de série: 59890

Tabela 47 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 11

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Cas o 11
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia. Marcas de descoloração no núcleo devido a aquecimento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2. M1.9: Reduzir a periodicidade das análises no OMI. Verificar a evolução dos "Hot metal gases" (CH₄, C₂H₄ e C₂H₆) associados a problemas de aquecimento no núcleo.

- N° de série: 371596

Tabela 48 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 12

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 12
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela atuação do relé de gás e relé diferencial em função de curto-circuito entre espiras. Neste caso especificamente pode ter ocorrido uma interpretação errada durante a inspeção pois a energia associada ao tipo de falha indica realmente a ocorrência de "AE" e não "DP e FT". Ausência de informações do equipamento ocasionou a indicação no Sistema 3 . M3: Avaliar danos e se possível programar, substituição de componentes, tratamento do óleo e recuperação da isolação sólida.

➤ N° de série: TC 10-44

Tabela 49 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 13

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 13
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia em função de obstrução dos canais de óleo e sobreaquecimento generalizado. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2 . M1.3: Verificar a obstrução dos radiadores e o funcionamento de ventiladores e bombas.

➤ N° de série: TC 10-48

Tabela 50 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 14

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 14
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia com correntes de circulação no núcleo seguido de marcas de erosão e desgaste. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2. M1.9: Reduzir a periodicidade das análises no OMI. Verificar a evolução dos "Hot metal gases" (CH₄, C₂H₄ e C₂H₆) associados a problemas de aquecimento no núcleo.

➤ N° de série: TC 10-49

Tabela 51 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 15

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 15
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia com correntes de circulação no núcleo seguido de descargas pelos parafusos de fixação. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2. M1.9: Reduzir a periodicidade das análises no OMI. Verificar a evolução dos "Hot metal gases" (CH₄, C₂H₄ e C₂H₆) associados a problemas de aquecimento no núcleo.

- N° de série: TC 10-51

Tabela 52 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 16

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 16
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Equipamento retirado pela cromatografia com sobreaquecimento nos contatos da chave comutadora. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 2. M1.10: Reduzir a periodicidade das análises no OMI. Verificar a evolução do H₂ e o CH₄ e do C₂H₂. Possibilidade de descargas parciais e/ou corona no óleo.

Nos casos em que os transformadores apresentaram condição normal de operação, não foram realizadas inspeções ou qualquer informação adicional do equipamento além da última análise de gases dissolvidos no OMI. Além disto, não ocorreram registros de atuação de qualquer proteção ou retirada de operação pela própria AGD.

Desta forma, o sistema 1 do módulo de apoio à decisão, referente aos equipamentos em condição de normalidade, somente terá a indicação do item referente à taxa de variação mensal dos gases. Caso não seja disponível no banco de dados pelo menos as duas últimas AGD no OMI do equipamento, será recomendado apenas a permanência da periodicidade das análises.

- N° de série: 1778 – 3

Tabela 53 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 17

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 17
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1. M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: A88035-1

Tabela 54 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 18

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 18
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1. M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: A88035-2

Tabela 55 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 19

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 19
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: 1778 – 3

Tabela 56 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 20

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Cas o 20
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: 77406 – 1

Tabela 57 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 21

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 21
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: 77406 – 2

Tabela 58 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 22

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 22
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

- N° de série: 77406 – 3

Tabela 59 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 23

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 23
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . Dos sete gases analisados houve variação de hidrogênio superior a 10% a.m. M6: Reduzir a periodicidade das análises do OMI para o nível mensal

- N° de série: 371672

Tabela 60 - Saída do módulo de apoio à decisão: Caso 24

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Caso 24
DIAGNÓSTICO: Condição normal de operação
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Ausência de informações do equipamento. Previsto no módulo de apoio à decisão pelo Sistema 1 . M5: Manter a periodicidade das análises do OMI

A próxima seção apresenta o segundo estudo de caso com a aplicação do modelo SADTRAFOS em um autotransformador de outra empresa do setor elétrico, o qual foi retirado de operação pela cromatografia gasosa e posteriormente inspecionado.

4.2. Estudo de Caso 2

Este estudo de caso consiste na avaliação de um autotransformador trifásico retirado de operação por uma empresa do setor elétrico em função da AGD no OMI por cromatografia. Desta forma, o estudo tem por objetivo utilizar o modelo SADTRAFOS para oferecer, além do diagnóstico do equipamento, indicações e recomendações de manutenção previstas no módulo de apoio à decisão. Os dados do equipamento estão apresentados na Tabela 61.

Tabela 61 – Dados do autotransformador retirado de operação

Equipamento	Autotransformador trifásico
Relação de Tensões	(288,67/199,18) kV – 13.8 kV
Potência	400 / 400 / 133 MVA (OFAF)
Volume de óleo	123.000 litros
Peso total	320.000 kg
Fabricante	General Electric – Conelec S. A.
Ano de Fabricação	1988

Tratando-se de um equipamento de elevada potência e, portanto, de muita importância para o sistema elétrico interligado, teve a sua condição operacional acompanhada pela cromatografia gasosa desde a sua energização em 1989.

Em 13/12/2006 o equipamento começou a apresentar 1,3 ppm de acetileno, despertando uma atenção especial dos técnicos e engenheiros do setor de manutenção, pois havia mantido há anos o mesmo padrão de formação nula do referido gás.

Após esta ocorrência, amostras subseqüentes foram analisadas e em setembro de 2007, a cromatografia indicou um novo aumento de acetileno atingindo o valor de 5ppm (aproximadamente 630 ml do gás dissolvido no óleo), que culminou na retirada do equipamento de operação pelo departamento de engenharia da empresa. A Figura 42 apresenta uma foto do autotransformador retirado de operação.



Figura 42 – Autotransformador trifásico

A Tabela 62 apresenta os valores dos sete principais gases antes e após as inspeções e manutenções realizadas no autotransformador.

Tabela 62 – AGD antes e após a inspeção e manutenção do autotransformador

Data	Teores de Gases Dissolvidos (ppm)	H2	CH4	CO	CO2	C2H4	C2H6	C2H2
17/9/2007		29	11	1325	4895	11,0	2,7	4,3
25/9/2007		36	13	1657	6040	13,0	3,1	5,1
25/9/2007		35	13	1547	5644	13,0	3,1	4,9
30/05/2008		0	0	9	77	0	0	0

Após a obtenção dos dados de AGD, foi feito o levantamento de algumas das características do equipamento, seu contexto operacional e informações de outros sistemas de monitoramento ou técnicas preditivas de diagnóstico auxiliares. Dentre as informações obtidas, destacam-se os seguintes aspectos:

- O autotransformador possui um sistema de refrigeração forçada com ventiladores e bombas;
- O comutador do transformador não opera sob carga;
- O equipamento está inserido em um sistema de transmissão e operava desde 1989 em condições normais;
- Antes de ser inspecionado, o equipamento foi submetido a ensaios de emissão acústica para que, além da AGD, pudesse ser identificado algum indicativo de falta e sua provável localização. Durante a avaliação, atividades acústicas de grande magnitude puderam ser observadas tanto nas proximidades do terciário do autotransformador como no comutador sem carga do equipamento.

Após a análise das informações obtidas sobre o equipamento, em conjunto com o pré-processamento dos dados de AGD apresentados na Tabela 60, tais aspectos foram inseridos ao modelo SADTRAFOS, para que a condição do equipamento pudesse ser definida pelo módulo de diagnóstico e que fossem feitas indicações e sugestões de manutenção pelo módulo de apoio à decisão.

A Tabela 63 apresenta a saída do modelo SADTRAFOS após a aplicação dos dados normalizados das três variáveis de entrada no módulo de diagnóstico.

Tabela 63 – Saída do modelo SADTRAFOS para a avaliação do autotransformador

SAÍDA DO MÓDULO DE APOIO À DECISÃO: Estudo de Caso 2
DIAGNÓSTICO: Descargas Parciais e Falta Térmica
RECOMENDAÇÕES DO SADTRAFOS: Sistema 2: M1.4: Verificar a obstrução dos radiadores e funcionamento dos ventiladores e bombas; M1.8: Reduzir a periodicidade das análises do OMI. Verificar as taxas de evolução de H2 em relação ao C2H2, além da evolução do CH4. Possibilidade de DP ou corona no óleo, aquecimento do núcleo com desgaste de material e problemas nos contatos do comutador; M2.2: Verificar a dependência com o carregamento e observar os limites de referência de formação dos gases. Verificar o teor de umidade e vazamentos; M4: Em caso de convergência de diagnóstico programar inspeções.

Diferentemente do primeiro estudo de caso, em que foram inseridos os comentários referentes à inspeção dos equipamentos, a tabela 63 apresenta somente a saída do modelo SADTRAFOS com o diagnóstico e as recomendações do módulo de apoio à decisão em função dos parâmetros de entrada fornecidos, onde:

- O diagnóstico corresponde à saída do modelo de acordo com o resultado apresentado no SIF;
- Os termos em negrito indicam o sistema e as mensagens de saída utilizadas no módulo de apoio à decisão em função das informações inseridas pelo usuário sobre o equipamento.

Para a análise de desempenho do modelo, obteve-se o relatório de inspeções e manutenção do equipamento após a sua retirada de operação, através do qual foram observados diversos problemas no interior do autotransformador, entre os quais destacam-se:

- Carbonização dos calços metálicos do núcleo;
- Cabos de interligação da bobina H1 com o comutador sem carga com sinais de aquecimento seguido de queima da isolação sólida (papel);
- Queima na camada externa do papel isolante dos cabos de blindagem do comutador H1;
- Desalinhamento das chapas do núcleo;
- Degradação das peças de papelão que envolvem o comutador;

- Contatos fixos do comutador com oxidação superficial e contatos móveis com a superfície desgastada necessitando de reparos.

As Figuras 43 a 45 apresentam as fotos obtidas do equipamento durante as inspeções.



Figura 43 – Queima da camada externa do papel isolante do comutador H1



Figura 44 – Detalhe do desalinhamento do núcleo



Figura 45 – Sinais de aquecimento no cabo de interligação da bobina de H1

De acordo com o resultado do modelo SADTRAFOS, pode-se observar a convergência do diagnóstico apresentado com o que foi observado durante as

inspeções. A existência de problemas de natureza térmica e elétrica com centelhamentos e descargas parciais na isolação do comutador e a existência de problemas no núcleo foram plenamente evidenciadas, indicando o correto mapeamento da falta.

Entre as saídas do sistema 2 de apoio à decisão, a mensagem (M1.8) indicou a possibilidade de problemas no núcleo e nos contatos do comutador, além da recomendação apresentada na mensagem (M4) de retirada de operação para inspeções, caso houvesse convergência de diagnóstico em relação a outra técnica preditiva diferente da AGD.

Conforme descrito anteriormente, antes da inspeção o equipamento foi analisado no campo pela metodologia acústica, quando foram identificados possíveis problemas no terciário e no comutador sem carga do equipamento.

O estudo pôde comprovar a boa eficiência do modelo na identificação de faltas, assim como o bom direcionamento das ações de manutenção propostas no módulo de apoio à decisão de acordo com a identificação do diagnóstico do equipamento. Cabe ressaltar que, neste estudo de caso, obteve-se inclusive um bom detalhamento dos mecanismos de falha do autotransformador em relação aos componentes, conforme as indicações do sistema 2 do módulo de apoio à decisão.