

Aplicação de Metodologia Fuzzy em Dados Reais para Diagnóstico de Transformadores de Potência por meio de Análise de Gases Dissolvidos

Adson Silva Rocha¹, Cacilda de Jesus Ribeiro², Diogo Pereira Veloso², Leonardo da Cunha Brito²,
Tiago Henrique Vivas e Silva²

André Pereira Marques^{2,3,4}, Cláudio Henrique Bezerra Azevedo³, José Augusto Lopes dos Santos³

¹Instituto Federal Goiano (IFGoiano), ²Universidade Federal de Goiás (UFG)

³CELG Distribuição, ⁴Instituto Federal de Goiás (IFG) Goiânia, Brasil

Resumo— Um dos métodos mais comumente utilizados para diagnósticos de transformadores de potência, a partir da técnica de Análise de Gases Dissolvidos em óleo mineral isolante, é o Triângulo de Duval. Este método apresenta uma precisão e confiabilidade consideravelmente altas. No entanto, o planejamento da manutenção de transformadores de potência necessita de mais informações para ser realizado de forma eficiente, incluindo uma análise quantitativa – além da qualitativa – das causas das falhas incipientes e um histórico da evolução do estado operativo do equipamento. Para incrementar a aplicabilidade do Triângulo de Duval, propõe-se a utilização da lógica *fuzzy* junto ao método de Duval para fornecer uma análise das transições entre os diagnósticos apresentados originalmente, permitindo acompanhar a evolução do nível de pertinência de cada possível causa no diagnóstico do transformador de potência. A metodologia proposta foi validada utilizando dados reais de equipamentos em operação no Sistema Elétrico Brasileiro.

Palavras-Chave— análise de gases dissolvidos, sistemas *fuzzy*, transformadores de potência, triângulo de Duval.

I. INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência representam uma parte significativa dos investimentos referentes à implantação e operação do sistema elétrico [1]. Dessa forma, seu desempenho deve ser monitorado com eficiência a fim de se evitar ocorrências de falhas que possam vir a retirar o equipamento de operação. A falha de transformadores de potência gera custos, comumente elevados, com a manutenção corretiva do próprio equipamento, além daqueles inerentes às interrupções de atendimento de unidades consumidoras de energia elétrica.

Atualmente, são utilizados diversos métodos para o monitoramento das condições operativas de transformadores baseados na interpretação da Análise de Gases Dissolvidos no óleo isolante (AGD). Entre elas pode-se citar as sugeridas no guia IEEE Std C57.104 – 2008 [2]: Análise de Gases-Chave,

Análise de Doernenburg, Análise de Rogers e as técnicas apresentadas no guia internacional IEC 60599 [3], que trata sobre a utilização de métodos como a Análise de Relação de Gases e o Triângulo de Duval, tema central deste trabalho.

A técnica de AGD é considerada uma das mais confiáveis em diagnósticos de transformadores de potência [4]. A partir de uma amostra do óleo isolante coletada do transformador, é feita a análise cromatográfica para identificação dos gases presentes e suas respectivas concentrações. Cada método citado anteriormente utiliza essas concentrações, ou mesmo a relação entre elas, para predizer o estado de operação do equipamento e, se for o caso, identificar uma falha em evolução e indicar a possível causa do problema.

Este artigo apresenta a proposta de uma metodologia para diagnóstico de falhas incipientes em transformadores de potência baseada na aplicação do Sistema de Inferência *Fuzzy* na metodologia do Triângulo de Duval. A vantagem identificada na aplicação da lógica *fuzzy* neste trabalho é a possibilidade de se obter um diagnóstico mais completo, que forneça, além do resultado qualitativo da provável causa do problema, uma saída quantitativa do nível de pertinência das possíveis causas. Outra vantagem é a possibilidade de se visualizar a evolução do estado operativo do equipamento ao longo do tempo, o que auxilia o especialista na análise preditiva do equipamento.

A representação do Triângulo de Duval com o emprego da lógica *fuzzy* existe na literatura, como pode ser constatado em [4] e [5], por exemplo. Contudo, a característica que confere um diferencial considerável a este trabalho se dá pela apresentação de uma proposta original de tal representação, na qual os valores dos parâmetros e regras do Sistema de Inferência *Fuzzy* foram adequadamente dimensionados, e principalmente pela sua validação tomando-se dados reais de equipamentos em operação no Sistema Elétrico Brasileiro. A validação desta proposta foi realizada utilizando 427 resultados de amostras reais obtidas nos anos de 1984 a 2015 de 15 transformadores de potência operando no Sistema

Elétrico Brasileiro com diferentes características e valores nominais: potências de 2,5 MVA a 50 MVA e tensões de 34,5 kV a 138 kV. Os resultados das amostras foram fornecidos pela concessionária de energia elétrica do Estado de Goiás, CELG-D. Parte destes resultados corresponde a equipamentos que, após sua retirada de operação para manutenção, foram efetivamente inspecionados em oficina eletromecânica, quando foi possível identificar a real causa do problema, o que permitiu validar as indicações apresentadas pela metodologia proposta em 11 dos casos avaliados.

II. O TRIÂNGULO DE DUVAL

O método de análise utilizando o Triângulo de Duval foi proposto por Michael Duval em 1960 e é uma forma de representação gráfica da concentração de gases dissolvidos no transformador de potência. Os gases utilizados na análise são o metano (CH_4), o etileno (C_2H_4) e o acetileno (C_2H_2) [5].

O método consiste em determinar a presença ou não de indicativos de falha no equipamento por meio da concentração de alguns gases chaves. Sendo que, neste trabalho, considera-se que é necessário ao menos um dos gases apresentados na Tab. I estar acima do limite L1 apresentado, da mesma forma que em [4].

TABELA I. Limites mínimos de concentração de gases para se considerar equipamento em possível falha [4].

Gás	Limite L1 ($\mu\text{L/L}$)
H_2	100
CH_4	75
C_2H_2	3
C_2H_4	75
C_2H_6	75

Assim, caso ao menos um dos gases exceda o limite L1, são calculadas as concentrações relativas dos gases metano (CH_4), etileno (C_2H_4) e acetileno (C_2H_2) dissolvidos no óleo isolante do equipamento utilizando-se das equações 1 a 3.

$$\% \text{CH}_4 = \frac{100z}{x+y+z} \quad (1)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_4 = \frac{100y}{x+y+z} \quad (2)$$

$$\% \text{C}_2\text{H}_2 = \frac{100x}{x+y+z} \quad (3)$$

Sendo que x , y e z são, respectivamente, as concentrações absolutas dos gases acetileno, etileno e metano.

Finalmente, são traçadas retas paralelas a cada lado do Triângulo de Duval nos pontos de concentração calculados. A região na qual essas retas se encontram indica a mais provável causa da falha segundo a metodologia. Na aplicação deste método para concentrações verificadas de 30% de metano (CH_4), 40% de etileno (C_2H_4) e 30% de acetileno (C_2H_2), o ponto de cruzamento (1) das retas referentes a cada gás encontra-se na região D2 do triângulo, ou seja, o diagnóstico é: presença de descargas de alta energia (Figura 1).

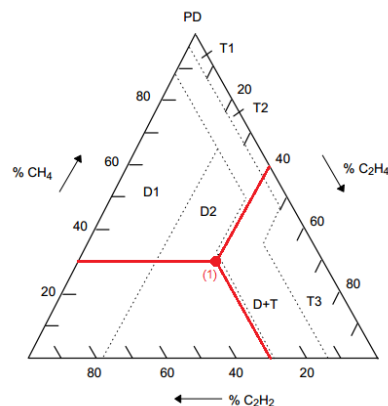


Fig. 1. Exemplo de aplicação do Triângulo de Duval no diagnóstico de falhas em transformadores de potência. Adaptado de [3].

Os possíveis diagnósticos apresentados na Fig. 1 são:

- PD: descargas parciais;
- D1: descargas de baixa energia;
- D2: descargas de alta energia;
- T1: falha térmica com temperatura menor que 300°C;
- T2: falha térmica com temperatura entre 300 e 700°C;
- T3: falha térmica com temperatura maior que 700°C;
- D+T: combinação de descargas elétricas e falha térmica.

III. METODOLOGIA PROPOSTA

Além do diagnóstico da provável causa de falha do equipamento, o método do Triângulo de Duval também fornece informações sobre a evolução do estado de operação do transformador ao longo do tempo, permitindo estimar seu estado futuro (tendência) e planejar ações de manutenção preventiva. No entanto, a interpretação de resultados para equipamentos em campo exige conhecimentos e experiência de um especialista ou um *software* especialmente elaborado para interpretar estes resultados usando as mesmas regras de decisão que o especialista. Representando o Triângulo de Duval por meio de um Sistema de Inferência Fuzzy, é possível codificar o conhecimento do especialista no próprio método e criar uma ferramenta de auxílio à tomada de decisões para empresas concessionárias de energia elétrica.

Sistemas *fuzzy* são sistemas especialistas baseados em um conjunto de conhecimentos sobre um dado tema. Estes conhecimentos são representados pelo conjunto de regras e tem o objetivo de representar o comportamento de um sistema real, uma vez que a maioria dos problemas encontrados no mundo real são muito complexos para serem representados de forma completa, precisa e exata por uma lógica binária [6].

Para criar essa representação, as variáveis de entrada CH_4 , C_2H_4 e C_2H_2 foram separadas em funções de pertinência representadas pelas variáveis linguísticas: Baixa (1), Média (2), Alta (3) e Muito_alta (4). As funções de pertinência estabelecidas são indicadas nas Fig 2, 3 e 4, sendo que as regiões delimitadas pelos trapezoides que representam as variáveis linguísticas foram adaptadas para melhor representar o Triângulo de Duval e são identificadas nas Tabs. II a IV.

Na Fig. 5 são apresentadas as funções de pertinência para a variável de saída, Diagnóstico, com cada um dos possíveis diagnósticos identificados anteriormente (PD, D1, D2, T1, T2, T3, D+T).

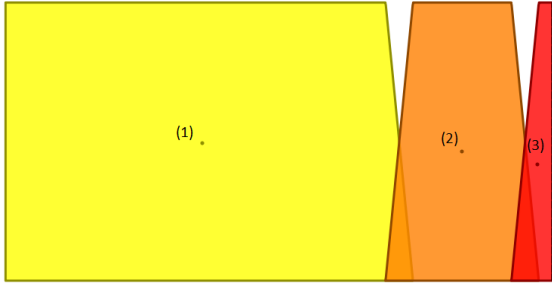


Fig. 2. Funções de pertinência para o gás CH₄.

TABELA II. Limites dos trapezoides que representam as variáveis linguísticas da gás CH₄.

Variável	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa (1)	0,0	0,0	69,5	74,5
Media (2)	69,5	74,5	92,5	97,5
Alta (3)	92,5	97,5	100,0	100,0

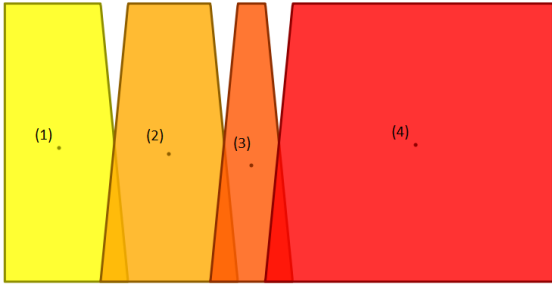


Fig. 3. Funções de pertinência para o gás C₂H₄.

TABELA III. Limites dos trapezoides que representam as variáveis linguísticas da gás C₂H₄.

Variável	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa (1)	0,0	0,0	17,5	22,5
Media (2)	17,5	22,5	37,5	42,5
Alta (3)	37,5	42,5	47,5	52,5
Muito_alta (4)	47,5	52,5	100,0	100,0

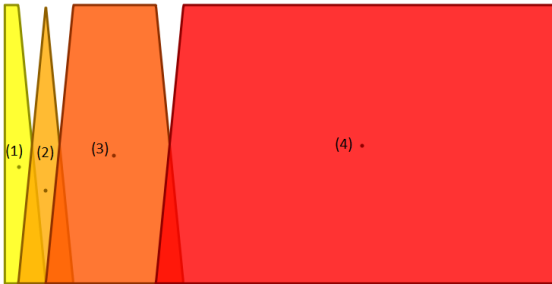


Fig. 4. Funções de pertinência para o gás C₂H₂.

TABELA IV. Limites dos trapezoides que representam as variáveis linguísticas do gás C₂H₂.

Variável	Limite 1	Limite 2	Limite 3	Limite 4
Baixa (1)	0,0	0,0	2,5	7,5
Media (2)	2,5	7,5	7,5	12,5
Alta (3)	7,5	12,5	27,5	32,5
Muito_alta (4)	27,5	32,5	100,0	100,0

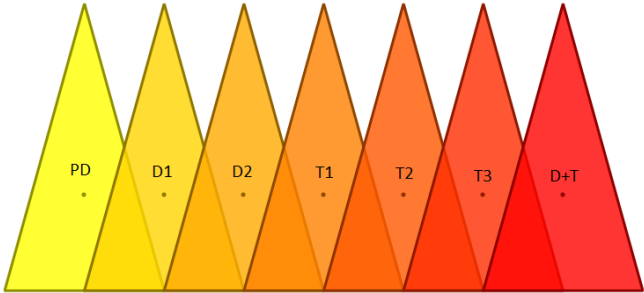


Fig. 5. Funções de pertinência para a variável de saída Diagnóstico.

Foram estabelecidas 17 regras que relacionam as variáveis de entrada à variável de saída de modo a apresentar um comportamento semelhante ao do modelo clássico do Triângulo de Duval. O conjunto de regras criado é apresentado na Fig. 6.

```
1 if CH4 is Alta and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then diagnostico is PD
2 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Alta then diagnostico is D1
3 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D1
4 if C2H4 is Media and C2H2 is Alta then diagnostico is D2
5 if C2H4 is Media and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
6 if C2H4 is Alta and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
7 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
8 if CH4 is Media and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then diagnostico is T1
9 if C2H4 is Media and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
10 if C2H4 is Alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
11 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is T3
12 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Media then diagnostico is T3
13 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Media then diagnostico is DT
14 if C2H4 is Media and C2H2 is Media then diagnostico is DT
15 if C2H4 is Alta and C2H2 is Media then diagnostico is DT
16 if C2H4 is Alta and C2H2 is Alta then diagnostico is DT
17 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Alta then diagnostico is DT
```

Fig. 6. Conjunto de regras utilizado na representação do Triângulo de Duval em sistema fuzzy.

Cada valor numérico das variáveis de entrada é convertido em um valor *fuzzificado* de acordo com as funções de pertinência apresentadas anteriormente. Em seguida ocorre o processo de inferência, no qual as regras são ativadas a partir das entradas gerando valores *fuzzificados* da variável de saída. Por último ocorre a *defuzzificação* da saída, fornecendo o diagnóstico com os graus de pertinência em cada possível causa da falha no equipamento. O software *QTFuzzy*[7] foi utilizado na etapa de testes. A lógica *fuzzy* aplicada ao Triângulo de Duval foi codificada em linguagem Java. Considerando valores de entrada iguais a 71% de CH₄, 25% de C₂H₄ e 4% de C₂H₂, obtêm-se uma saída 70% de T2 e 30% de D+T (Figura 7), sendo que as regras ativadas foram as de números 9 e 14 (Figura 8).

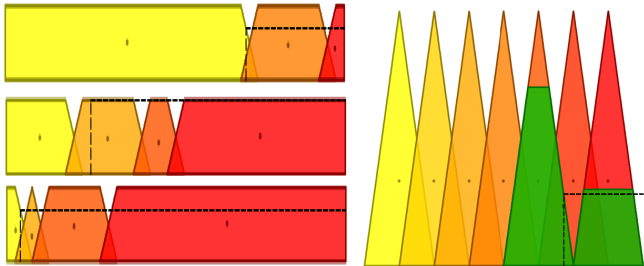


Fig. 7. Exemplo de aplicação da metodologia proposta por meio do software *QTFuzzy Lite*. Variáveis de entrada, à esquerda da imagem, e variável de saída, à direita da imagem.

```

1 if CH4 is Alta and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then diagnostico is PD
2 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Alta then diagnostico is D1
3 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D1
4 if C2H4 is Media and C2H2 is Alta then diagnostico is D2
5 if C2H4 is Media and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
6 if C2H4 is Alta and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
7 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Muito_alta then diagnostico is D2
8 if CH4 is Media and C2H4 is Baixa and C2H2 is Baixa then diagnostico is T1
9 if C2H4 is Media and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
10 if C2H4 is Alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is T2
11 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Baixa then diagnostico is T3
12 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Media then diagnostico is T3
13 if C2H4 is Baixa and C2H2 is Media then diagnostico is DT
14 if C2H4 is Media and C2H2 is Media then diagnostico is DT
15 if C2H4 is Alta and C2H2 is Media then diagnostico is DT
16 if C2H4 is Alta and C2H2 is Alta then diagnostico is DT
17 if C2H4 is Muito_alta and C2H2 is Alta then diagnostico is DT

```

Fig. 8. Regras ativadas a partir de determinados valores das variáveis de entrada.

IV. ESTUDOS DE CASOS E RESULTADOS OBTIDOS

A metodologia proposta foi aplicada a 427 dados reais de AGD de amostras coletadas em 15 transformadores com diferentes características, com potências nominais de 2,5 MVA até 50 MVA e tensões de 34,5 kV a 138 kV, os quais foram amostrados em campo, com os equipamentos tanto em operação como após a falha. Nos casos que o transformador foi retirado para manutenção corretiva ou preventiva em oficina eletromecânica, a abertura e a investigação interna ao equipamento permitiram identificar a real causa das falhas. Estas informações também foram utilizadas para validar as indicações obtidas pelas amostragens anteriores à retirada de operação, evidenciando a qualidade da abordagem proposta.

A seguir são apresentados três estudos de casos que foram extraídos do conjunto de transformadores inspecionados internamente.

A. Transformador TR01 (25MVA)

A Tab. V apresenta as concentrações dos gases chave identificadas por meio da AGD ao longo de várias amostragens realizadas no equipamento TR01, sendo este um transformador com potência nominal de 25 MVA.

TABELA V. Concentrações dos gases chave no transformador TR01.

Número da amostragem	Data da amostragem	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
15	27/03/2015	250	97	29	63	0
14	10/09/2014	17	2	11	21	0
13	26/02/2014	19	2	12	22	0
12	22/10/2013	21	3	12	21	0
11	29/08/2013	19	2	14	24	0
10	13/03/2013	15	3	18	29	0
9	02/10/2012	35	3	16	31	0
8	09/05/2012	27	3	15	35	0
7	11/11/2011	30	3	14	35	0
6	04/07/2011	26	3	17	33	0
5	03/03/2011	22	3	19	31	0
4	14/10/2010	15	0	14	41	0
3	05/05/2010	16	3	15	31	0
2	05/02/2010	16	2	16	36	0
1	20/10/2009	19	3	19	34	0

A partir das concentrações relativas dos gases metano, etileno e acetileno, calculadas por meio das equações 1 a 3, pode-se determinar graficamente, no Triângulo de Duval clássico, a evolução dos diagnósticos apresentados. Observa-se que, por meio da aplicação do Triângulo de Duval clássico,

a maior parte dos diagnósticos está próxima a uma região de transição entre D2 e DT (Figura 9). Na última amostragem o ponto foi deslocado para a parte superior do triângulo, na região D2, indicando a influência da ocorrência das descargas elétricas através do óleo isolante, posteriormente evidenciada pela inspeção do equipamento.

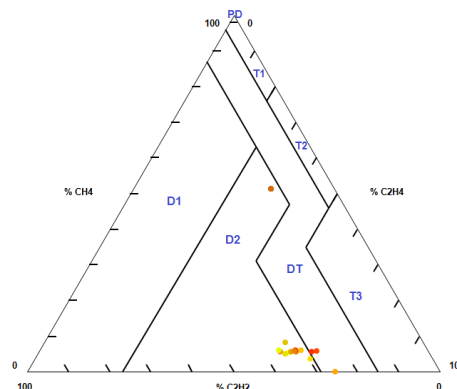


Fig. 9. Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR01 no Triângulo de Duval.

Aplicando-se da metodologia proposta neste trabalho, doravante denominada *Fuzzy-Duval*, aos dados da Tab. V, pode-se identificar a contribuição de cada provável causa no diagnóstico do equipamento (Figura 10). Por exemplo, o diagnóstico da amostragem número 8, realizada no dia 09/05/2012, indica que a causa do problema é representada com um grau de pertinência de 16% por D2 (descargas de alta energia) e 84% por DT (falta térmica associada a descargas elétricas). Na amostragem seguinte, realizada 143 dias depois, no dia 02/10/2012, o diagnóstico evoluiu para 90% D2 e 10% DT, permanecendo majoritariamente em D2 até a data da última amostragem, 27/03/2015, quando o equipamento foi retirado preventivamente de operação para realização de manutenção. Durante esta manutenção, verificou-se que a causa do problema estava localizada em uma lide do enrolamento de alta tensão e caracterizava-se por um ponto quente em uma região inferior interna a uma das buchas de alta tensão, que evoluiu para ocorrência de descargas elétricas através do óleo isolante.

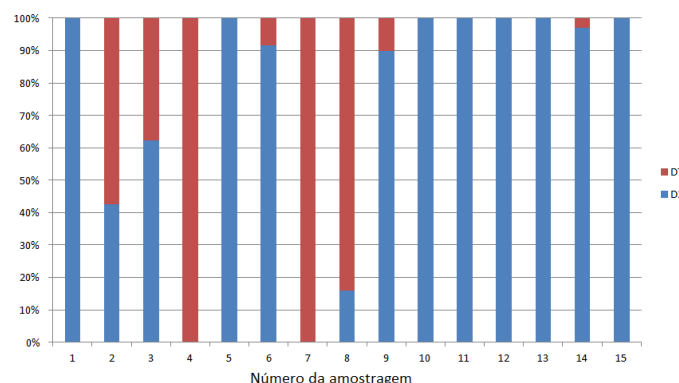


Fig. 10. Diagnósticos apresentados pelo método *Fuzzy-Duval* aplicados em dados históricos de amostragem de AGD do transformador TR01.

B. Transformador TR02 (25MVA)

A Tab. VI apresenta as concentrações dos gases chave identificadas por meio da AGD ao longo de várias amostragens realizadas no equipamento TR02, o qual tem potência nominal de 25 MVA.

TABELA VI. Concentrações dos gases chave no transformador TR02.

Número da amostragem	Data da amostragem	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
12	29/03/2007	19	10	8	109	18
11	10/08/2006	24	6	6	86	13
10	24/04/2006	49	18	16	207	29
9	15/02/2006	30	11	15	171	23
8	30/11/2005	59	14	18	163	23
7	28/09/2005	91	13	22	191	32
6	20/06/2005	51	12	17	139	19
5	12/04/2005	57	16	22	180	24
4	09/03/2005	49	15	18	151	20
3	07/12/2004	66	18	18	147	20
2	02/09/2004	79	16	20	131	19
1	15/06/2004	58	10	20	125	18

É possível perceber que a maior parte dos diagnósticos está na região correspondente a T3 (Figura 11). No caso deste equipamento, fica clara a necessidade de mais informações para descrever a evolução do comportamento do transformador. A metodologia proposta *fuzzy-Duval* identificou uma quantidade consideravelmente maior de informações relevantes, como é mostrado na Fig. 12.

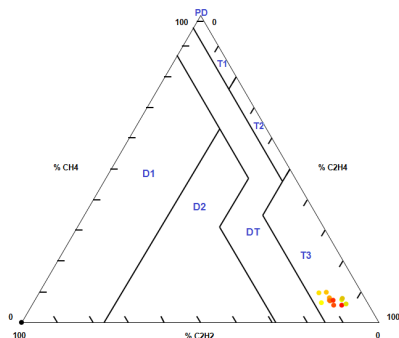


Fig. 11. Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR02 no Triângulo de Duval.

É possível identificar a contribuição de cada provável causa no diagnóstico do equipamento (Figura 12). Neste equipamento é possível perceber a evolução do diagnóstico de forma gradual ao longo das amostras. A aplicação do método *Fuzzy-Duval* proposto à primeira amostra indica DT (falha térmica associada a descargas elétricas) como a causa da falha. Ao longo das amostragens seguintes o grau de pertinência de DT diminui enquanto a causa T3 (falha térmica de alta temperatura) passa a apresentar um grau de pertinência maior. Após a retirada de operação do transformador TR02 para a realização de uma manutenção, devido ao aumento da taxa de crescimento dos gases, identificou-se que a real causa do problema foi caracterizada pelo estado precário do isolamento das lides de alta tensão com indícios de descargas parciais ou centelhamento, o que evidencia a alta temperatura (T3) detectada pelo método proposto como uma possível causa da precarização do isolamento da lide.

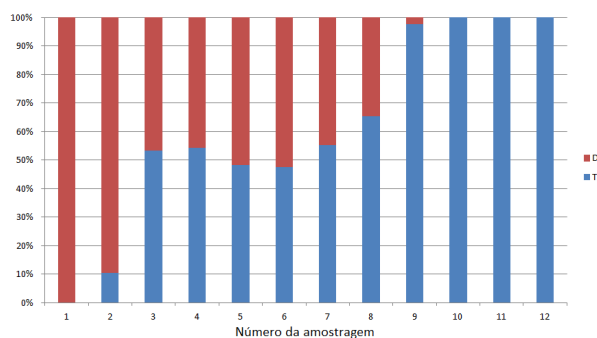


Fig. 12. Diagnósticos apresentados pelo método *Fuzzy-Duval* aplicados em dados históricos de amostragem de AGD do transformador TR02.

C. Transformador TR03 (33,25MVA)

A Tab. VII apresenta as concentrações dos gases chave identificadas por meio da AGD ao longo de várias amostragens realizadas no equipamento TR03, o qual tem potência nominal de 33,25.

TABELA VII. Concentrações dos gases chave no transformador TR03.

Número da amostragem	Data da amostragem	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
17	19/09/2014	209	45	76	34	10
16	25/08/2014	106	36	57	18	10
15	24/06/2014	129	41	56	18	11
14	23/05/2014	140	42	62	29	12
13	24/04/2014	142	50	72	20	12
12	27/03/2014	132	45	61	19	11
11	20/02/2014	144	48	69	18	12
10	12/02/2014	143	46	62	19	12
9	10/02/2014	92	46	47	18	11
8	15/08/2013	46	31	12	20	13
7	26/02/2013	33	38	8	13	12
6	04/09/2012	39	30	8	14	11
5	29/03/2012	47	40	7	19	14
4	07/11/2011	29	27	5	16	11
3	27/06/2011	34	35	8	17	15
2	15/02/2011	36	42	11	17	20
1	05/10/2010	56	37	11	33	15

Verifica-se inicialmente que os diagnósticos estavam concentrados na região de transição entre D1, D2 e DT (Figura 13). Nos diagnósticos referentes às amostragens mais recentes, percebe-se que se formou um novo agrupamento na região mediana de D1, indicando a presença de um elevado número de descargas elétricas persistentes e de baixa energia no equipamento.

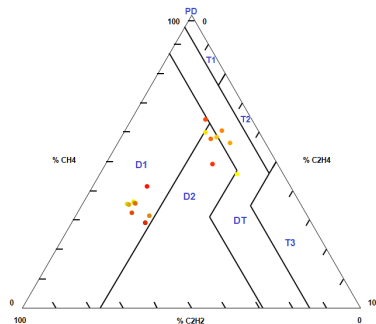


Fig. 13. Representação gráfica dos diagnósticos do equipamento TR03 no Triângulo de Duval.

Por meio da aplicação da metodologia *Fuzzy-Duval* proposta aos dados da Tab. VII, é possível identificar a contribuição de cada provável causa no diagnóstico do equipamento (Figura 14). Neste equipamento constata-se que a evolução do diagnóstico de faltas térmicas, DT, para a presença de descargas elétricas tanto de baixa energia, D1, quanto de alta energia, D2. A aplicação do método *Fuzzy-Duval* proposto às cinco primeiras amostras indica a presença de descargas de alta energia associadas à falha térmica. As demais amostras indicam existência tanto de descargas elétricas de baixa como de alta energia no interior do transformador. Após a retirada de operação do transformador TR03 para a realização de uma manutenção devido ao aumento da taxa de crescimento dos gases, identificou-se que a real causa do problema foi caracterizada por descargas elétricas de equipotencialização do aterramento do núcleo (conexão frouxa, flutuante) e grande número de descargas parciais distribuídas por toda a parte ativa devido à formação de borra, que usualmente está associada à degradação do óleo potencializada por efeito térmico.

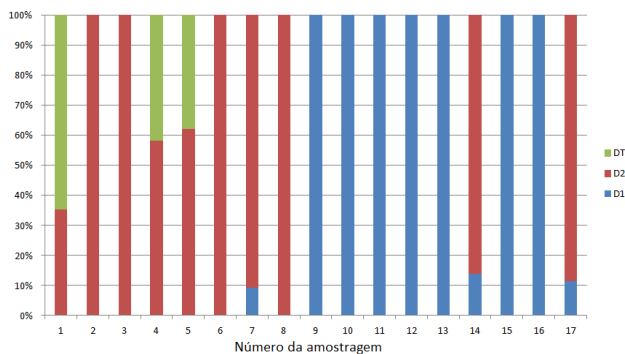


Fig. 14. Diagnósticos apresentados pelo método *Fuzzy-Duval* aplicados em dados históricos de amostragem de AGD do transformador TR03.

V. CONCLUSÃO

A metodologia do Triângulo de Duval é uma das mais utilizadas atualmente devido à precisão e confiabilidade de seus diagnósticos. No entanto para um planejamento eficiente da manutenção de transformadores de potência no setor elétrico, fazem-se necessárias mais informações,

principalmente relacionadas à evolução das condições operativas dos equipamentos.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma abordagem de diagnóstico baseada em Sistemas de Inferência *Fuzzy* e no Triângulo de Duval. Sua eficácia foi evidenciada com sua aplicação em transformadores de potência operando no Sistema Elétrico, com diferentes características e diferentes valores de potência e tensões nominais.

Além de fornecer o mesmo diagnóstico qualitativo dos equipamentos, assim como o Triângulo de Duval clássico, a abordagem *Fuzzy-Duval* fornece o diagnóstico quantitativo do grau de pertinência de cada possível causa nas falhas e permite a análise qualitativa da evolução temporal das condições dos transformadores fornecendo um histórico completo das causas do problema.

Trabalhos futuros podem ser desenvolvidos principalmente na aplicação da lógica *fuzzy* também aos limites apresentados na Tab. 1, permitindo que haja uma região de transição mais suave entre a aplicação ou não do método do Triângulo de Duval. Outra sugestão é a aplicação da lógica *fuzzy* às outras metodologias discutidas na literatura, como método de Rogers e Doernenburg, para fornecer um diagnóstico conjunto que considere todas as técnicas de AGD disponíveis.

REFERÊNCIAS

- [1] A.P. Marques, et al. A Mathematical Contribution to the Analysis of Moisture Migration in Power. 10th IEEE International Symposium on Diagnostic for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Guarda, Portugal, 2015.
- [2] IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE Std C57.104, 2008.
- [3] IEC Mineral Oil-Impregnated Electrical Equipment in Service – Guide to the Interpretation of Dissolved a Free Gases Analysis, IEC 60599, 2007.
- [4] M.R. Ahmed, M. A. Geliel, A. Khalil. Power Transformers Fault Diagnosis Using Fuzzy Logic Technique Based on Dissolved Gas Analysis. Mediterranean Conference on Control & Automation, Crete, Greece, 2013.
- [5] M. Suganya Bharathi, M. Willjuice Iruthayarajan, S. Sudalai Shunmugam. Interpretation of Dissolved Gas Analysis in Transformer Oil Using Fuzzy Logic System. International Conference on Power, Energy and Control, 2013.
- [6] L. X. Wang. A Course in Fuzzy Systems and Control. Prentice-Hall International, Inc. pg. 90 – 104.
- [7] QTFuzzyLite™. <http://www.fuzzylite.com/qt/>. Acesso em: 29/01/2016.