

## METODOLOGIE ȘI APLICAȚII ÎN MONITORIZAREA TRANSFORMATOARELOR DE PUTERE

Dan Gabriel RADU<sup>1</sup>, Valentin NĂVRĂPESCU<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București  
dan\_gabriel.radu@upb.ro<sup>1</sup>, valentin.navrapescu@upb.ro<sup>2</sup>

**Rezumat.** Această lucrare prezintă importanța și aplicabilitatea Analizei Gazelor Dizolvate (DGA) pentru monitorizarea stării de sănătate a transformatoarelor de putere, esențiale în rețelele de distribuție a energiei electrice. Fiabilitatea transformatoarelor este critică, iar DGA reprezintă o metodă eficientă pentru detectarea timpurie a defectelor interne prin măsurarea gazelor dizolvate în uleiul izolan. Diferite tehnici de interpretare, cum ar fi metoda Triunghiului Duval și metoda Roger, sunt discutate pentru identificarea tipurilor de defecte bazate pe concentrația și raportul gazelor rezultate. Lucrarea explorează și limitările acestor metode, dar și perspectivele viitoare, propunând o abordare multi-metodă bazată pe algoritmi de învățare automată pentru a îmbunătăți acuratețea și consistența interpretării DGA.

### 1. INTRODUCERE

Transformatoarele de putere joacă un rol vital în sistemele moderne de distribuție a energiei electrice, asigurând transferul eficient de energie între diferite niveluri de tensiune. Fiabilitatea acestora este esențială pentru funcționarea neîntreruptă a rețelelor electrice. De-a lungul ciclului lor de viață, transformatoarele sunt supuse unor solicitări termice, electrice și mecanice care pot genera defecte interne. Aceste defecte pot evolua în mod silentios și pot duce la avarii majore dacă nu sunt detectate în stadiile incipiente. Pentru a monitoriza starea de sănătate a transformatoarelor și a preveni defecțiunile catastrofale, au fost dezvoltate mai multe tehnici de diagnosticare. Printre acestea, Analiza Gazelor Dizolvate (DGA) s-a dovedit a fi una dintre cele mai eficiente metode de detectare timpurie a defectelor interne. DGA este utilizată pentru a monitoriza gazele generate de diferite tipuri de defecte, cum ar fi descărcările electrice, supraîncălzirile și arsurile care apar în uleiul izolan al transformatoarelor.

Metoda se bazează pe faptul că atunci când un transformator este afectat de un defect termic sau electric, anumite gaze caracteristice, cum ar fi hidrogenul, metanul, etanul și acetilena, sunt eliberate în uleiul izolan. Concentrațiile acestor gaze pot oferi indicii clare despre natura și gravitatea defectului. Prin monitorizarea continuă a gazelor dizolvate și interpretarea corectă a datelor, se poate preveni deteriorarea transformatorului și se pot reduce costurile de întreținere neplanificată [1].

De-a lungul ultimilor decenii, DGA a devenit un standard în diagnosticarea și întreținerea transformatoarelor, cu multiple standarde internaționale, cum ar fi IEC 60599, care reglementează procedurile și interpretările acestor analize. În plus, metode de interpretare precum Triunghiul Duval și metoda Roger permit identificarea tipurilor de defecte în funcție de gazele generate și de proporțiile acestora [2].

Acest articol își propune să ofere o analiză detaliată a principiilor care stau la baza Analizei Gazelor Dizolvate (DGA), a metodelor de interpretare a rezultatelor și a aplicațiilor sale în monitorizarea stării transformatoarelor de putere. Vom discuta, de asemenea, despre avantajele și limitările acestei tehnici, precum și despre perspectivele viitoare pentru îmbunătățirea acesteia.

## 2. PRINCIPIILE ANALIZEI GAZELOR DIZOLVATE (DGA)

Analiza Gazelor Dizolvate (DGA) este o metodă esențială pentru diagnosticarea stării de sănătate a transformatoarelor de putere. Aceasta se bazează pe măsurarea concentrațiilor de gaze dizolvate în uleiul izolant al transformatorului, gazele fiind produse de defectele interne, cum ar fi descărcările electrice, supraîncălzirile și arsurile localizate. Gazele rezultate din aceste fenomene variază în funcție de tipul și severitatea defectului, iar identificarea și măsurarea lor oferă indicii cruciale despre natura problemei.

### 2.1 Gazele de interes în DGA

Diferitele defecte mecanice și electrice care apar în transformatoare duc la descompunerea uleiului dielectric și a materialelor celulozice din transformator, generând o serie de gaze (Fig. 2.1). Principalele gaze analizate în DGA sunt:

1. Hidrogen ( $H_2$ ): produs în toate tipurile de defecte, în special în cazul descărcărilor parțiale și supratensiunilor minore.
2. Metan ( $CH_4$ ) și etilenă ( $C_2H_4$ ): apar frecvent în defectele termice, precum supraîncălzirile moderate.
3. Acetilena ( $C_2H_2$ ): generată în principal de arcuri electrice și descărcări coronale.
4. Monoxid de carbon ( $CO$ ) și dioxid de carbon ( $CO_2$ ): asociate cu degradarea materialelor celulozice (hârtie și izolații) din transformator, în special în cazul supraîncălzirii.

Fiecare dintre aceste gaze poate oferi informații despre sursa și tipul defectului. De exemplu, prezența acetilenei ( $C_2H_2$ ) indică în mod specific un arc electric sau o descărcare de mare energie, în timp ce concentrațiile ridicate de hidrogen pot semnala descărcări parțiale [3].

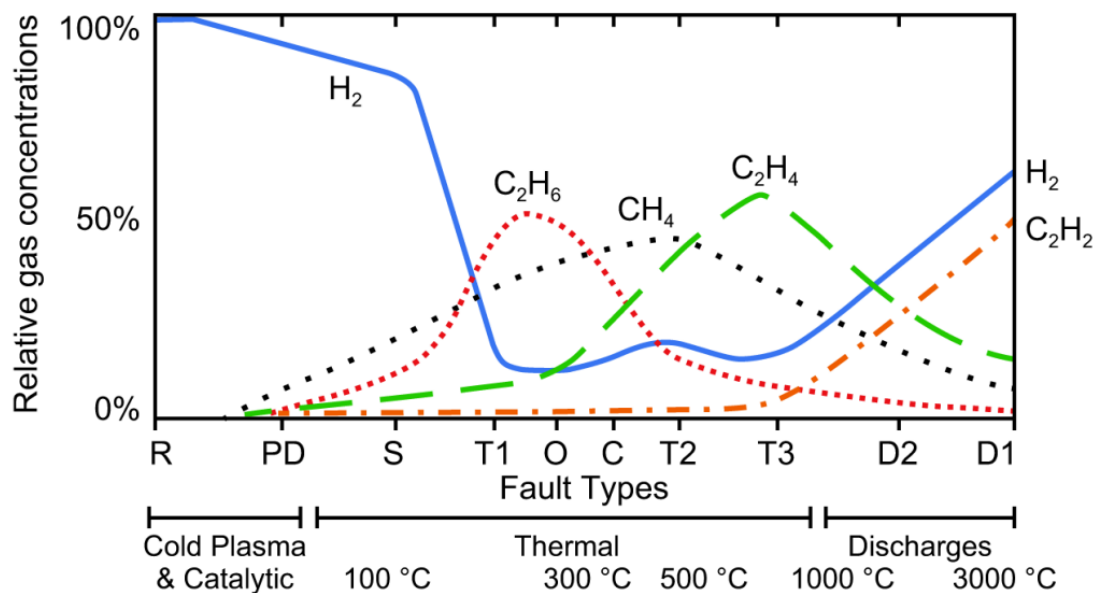


Fig. 2.1 Procentajul relativ al concentrațiilor de gaze dizolvate în ulei mineral în funcție de temperatură și de tipul de defect [4]

## Abrevieri:

*C* - posibila carbonizare a hârtiei

*D1* - descărcări de energie redusă

*D2* - descărcări de mare energie

*DGA* - analiza gazelor dizolvate

*GIO* - gaz în ulei standard

*GSU* - transformator crescător de generator

*LTC* - schimbare a prizei de sarcină (*OLTC* proiectat anterior)

$\mu\text{L}/$  - microlitru pe litru; echivalent cu ppm v/v (părți pe milion, volum/volum)

*ND* - nedeterminat sau nedetectat

*NEI* - intensitate energetică normalizată

*O* - supraîncălzire a hârtiei sau a uleiului mineral

*OLTC* - Comutator de ploturi (depreciat, înlocuit cu *LTC*)

*PD* - descărcări parțiale

*QA* - program de asigurare a calității

*R* - reacții catalitice

*S* - gaze vagabondă

*STP* - temperatură și presiune standard (0 °C și 1 atm)

*T1, T2, T3* - defect termic

## 2.2 Mecanismul de generare a gazelor

Gazele se formează atunci când legăturile moleculare din uleiul dielectric sunt descompuse de energia eliberată de defecte. Energia sub formă de căldură sau descărcări electrice poate rupe legăturile C-H, C-C și C=C din moleculele de hidrocarburi ale uleiului izolant, rezultând formarea gazelor. În plus, defectele mecanice sau supraîncălzirile localizate pot provoca degradarea materialelor celulozice din înfășurările transformatorului, generând monoxid și dioxid de carbon.

Există trei categorii principale de defecte care duc la generarea de gaze:

1. Defecte electrice: descărcările parțiale, descărcările coronale și arcurile electrice, care duc la formarea de hidrogen, acetilenă și metan.
2. Defecte termice: supraîncălzirile moderate până la severe generează în special etilenă, metan și etan.
3. Degradarea materialelor celulozice: în special în cazul supraîncălzirilor, rezultă în formarea de CO și CO<sub>2</sub>.

## 2.3 Metoda de analiză

Analiza gazelor dizolvate se realizează prin intermediul cromatografiei în fază gazoasă (GC). Uleiul dielectric este prelevat din transformator, iar gazele dizolvate sunt extrase din probă prin proceduri standardizate. Gazele sunt ulterior separate și identificate folosind cromatografia, care permite măsurarea concentrațiilor fiecărui gaz. Această metodă oferă o evaluare precisă a cantităților de gaze prezente și permite monitorizarea în timp a evoluției acestora.

Standardele internaționale, cum ar fi IEC 60599, reglementează metodele de prelevare și analiză a probelor, oferind ghiduri clare pentru interpretarea datelor obținute. În plus, metoda Headspace GC este adesea utilizată pentru a asigura o extracție rapidă și eficientă a gazelor din ulei [5].

## 2.4 Interpretarea concentrațiilor de gaze

Pentru a interpreta corect rezultatele DGA, se utilizează mai multe metode bazate pe raporturile de gaze și concentrațiile acestora. Cele mai frecvent utilizate metode includ:

1. Metoda Triunghiului Duval: o diagramă ternară care clasifică defectele în funcție de raporturile dintre acetilenă, etilenă și metan.
2. Metoda Roger: folosește raporturile de gaze specifice pentru a identifica tipurile de defecte (de exemplu, raportul  $H_2/CH_4$  sau  $C_2H_2/C_2H_4$  pentru descărcările electrice).

Prin utilizarea acestor metode, operatorii pot evalua cu precizie natura și severitatea defectelor, facilitând luarea deciziilor de întreținere.

## 3. METODE DE ANALIZĂ A GAZELOR DIZOLVATE

Analiza Gazelor Dizolvate (DGA) implică mai multe tehnici și standarde care asigură obținerea de date precise despre gazele prezente în uleiul izolant al transformatoarelor. În această secțiune, vom explora metodele de prelevare, tehnicile de măsurare și procedurile de interpretare utilizate pentru a diagnostica defectele din transformatoare.

### 3.1. Prelevarea probelor de ulei

Prelevarea corectă a probelor de ulei este esențială pentru acuratețea rezultatelor DGA. Procedura constă în extragerea unei cantități de ulei din transformator, fie din rezervorul principal, fie din robinetele de probă, utilizând echipamente speciale care minimizează contaminarea. Standardul **IEC 60599** oferă ghiduri pentru prelevarea probelor, specificând volumul necesar și metodele de transport pentru a preveni pierderea gazelor volatile.

### 3.2. Extracția gazelor din ulei

După prelevarea probelor, gazele dizolvate trebuie extrase din ulei pentru a fi analizate. Există mai multe tehnici pentru această etapă:

- **Metoda Headspace GC** (Cromatografie în fază gazoasă cu spațiu de cap): În această metodă, proba de ulei este plasată într-un recipient etanș încălzit, iar gazele eliberate în spațiul de cap (headspace) sunt colectate și analizate.
- **Metoda vacuumului**: Gazele sunt extrase prin crearea unui vid în recipientul cu ulei, ceea ce favorizează eliberarea gazelor din lichid. Această metodă este eficientă pentru extragerea completă a gazelor dizolvate.

### 3.3. Măsurarea concentrațiilor de gaze

Cromatografia în fază gazoasă (**GC**) este tehnica standard utilizată pentru analiza gazelor dizolvate. Aceasta implică separarea gazelor în funcție de proprietățile lor chimice și măsurarea concentrațiilor individuale. Un detector specific pentru fiecare gaz (de exemplu, detector de conductivitate termică pentru hidrogen) este utilizat pentru a cuantifica concentrațiile. Metoda GC oferă o precizie ridicată și permite detectarea gazelor în concentrații mici, fiind ideală pentru monitorizarea defectelor incipiente.

### 3.4. Proceduri standardizate de analiză

DGA este reglementată prin diverse standarde internaționale, care oferă ghiduri pentru toate etapele, de la prelevarea probelor până la interpretarea rezultatelor. Printre cele mai importante standarde se numără:

**-IEC 60599:** Furnizează îndrumări pentru interpretarea gazelor dizolvate și pentru identificarea defectelor incipiente din echipamentele împregnate cu ulei.

**-IEEE C57.104:** Acest standard specifică concentrațiile limită pentru diferitele gaze și raporturile lor în funcție de tipurile de defecte posibile.

Interpretarea DGA se referă la cel mai recent standard IEEE C57.104-2019 care a actualizat orientările anterioare: IEEE C57.104-2008 și IEEE C.57.104-1991. Aceste revizuirii rezultă din evaluările implementării lor în practica din industrie. IEEE C57.104-2019 a introdus modificări semnificative la standardele IEEE C57.104-2008. Unele dintre modificările cheie includ reducerea celor patru condiții la trei stări DGA bazate pe valorile percentilei 90 și 95; modificarea normelor pentru a include mai multe subcategorii de vârstă și tipuri de respiratoare; eliminarea interpretării bazate pe gazele combustibile totale; introducerea tabelelor delta și rata; definiții actualizate ale defectelor; și introducerea metodelor de interpretare a triunghiului Duval și a pentagonului [6].

### 3.5. Metode de interpretare a rezultatelor DGA

Cele mai frecvente tehnici utilizate în prezent pentru interpretarea DGA sunt prezentate pe scurt mai jos.

#### 1) Metoda raportului Doernenburg (DRM):

DRM este una dintre primele metode propuse și aplicate pentru identificarea defectelor incipiente în transformatoarele de putere. Aceasta este valabilă și aplicabilă numai dacă concentrația unuia dintre gazele cheie ( $H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $CH_4$  și  $C_2H_2$ ) depășește cel puțin de două ori limita L1, iar unul dintre celelalte două gaze depășește limita L1, astfel cum sunt enumerate în Tabelul 3.1 [4]. Patru raporturi de gaze:  $R_1=CH_4/H_2$ ;  $R_2=C_2H_2/C_2H_4$ ;  $R_3=C_2H_2/CH_4$ ; și  $R_4=C_2H_6/C_2H_2$  sunt utilizate pentru a determina tipul de defect, în conformitate cu IEEE C.57 104-2019 Anexa G [4]. Valorile limită din Tabelul 3.2 clasifică defectele în trei categorii: descompunere termică, descărcare parțială și arc electric. O combinație a acestor patru raporturi poate duce la determinarea tipului de defect. În caz contrar, această metodă ar putea produce o defecțiune neidentificabilă.

Tabelul 3.1 Limitele nivelurilor de gaz pentru DRM [4]

Key Gas	Concentration of L1 (ppm)
Hydrogen ( $H_2$ )	100
Methane ( $CH_4$ )	120
Carbon Monoxide ( $CO$ )	350
Acetylene ( $C_2H_2$ )	1
Ethylene ( $C_2H_4$ )	50
Ethane ( $C_2H_6$ )	65

Tabelul 3.2 Limitele fiecărui raport în DRM[4]

Fault type	$C_2H_4/H_2$ (R1)	$C_2H_2/C_2H_4$ (R2)	$C_2H_2/CH_4$ (R3)	$C_2H_6/C_2H_2$ (R4)
Thermal Decomposition	>1	<0.75	<0.3	>0.4
PD	<0.1	Not Significant	<0.3	>0.4
Arcing	0.1 to 1	>0.75	<0.3	<0.4

## 2) Metoda raportului Roger (RRM)

RRM utilizează raporturile  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/C_2H_4$  și  $C_2H_4/C_2H_6$ , cu limitele detaliate în Tabelul 3.3. Diagnosticul RRM este valabil numai dacă concentrația gazelor utilizate în cele trei rapoarte depășește limita normală predefinită. Cu toate acestea, RRM întâmpină adesea dificultăți în identificarea defectelor într-un număr relativ mare de rezultate DGA (de obicei 35%). Astfel de scenarii apar atunci când combinația de rapoarte nu corespunde niciunui dintre codurile din Tabelul 3.3, chiar dacă concentrațiile de gaze sunt ridicate și există o defecțiune evidentă [4].

Tabelul 3.3 Limitele fiecărui raport în RRM [1]

Fault Type	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (R1)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (R2)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (R5)
Normal	0.1 to 1	<0.1	<1
Partial Discharge	<0.1	<0.1	<1
Arcing	0.1 to 1	0.1 to 3	>3
Low Temperature Thermal	0.1 to 1	<0.1	1 to 3
Thermal <700 °C	>1	<0.1	1 to 3
Thermal >700 °C	>1	<0.1	>3

## 3) Metoda raportului IEC (IRM)

IRM a fost dezvoltat pe baza RRM în 1978 [6]. Conform IEC 60599-2007 și IEEE C57.104-2008, IRM a fost revizuit pentru a identifica șase tipuri distincte de defecte. Acestea sunt: descărcare parțială, descărcare cu energie redusă, descărcare cu energie ridicată, defect termic mai mic de 300°C, defect termic între 300°C și 700°C și defect termic mai mare de 700°C, astfel cum sunt enumerate în Tabelul 3.4. Orientările IEC 60599-2015 și IEEE Std C57.104-2008 îmbină raporturile Rogers și concentrațiile de gaze pentru determinarea tipului de defect. IRM este valabilă numai dacă concentrația a cel puțin unui gaz dizolvat utilizat în cele trei rapoarte depășește limitele de concentrație stabilite. Mai jos sunt furnizate scurte explicații pentru fiecare defect din Tabelul 3.4 [6]: Descărcare parțială: Descărcare pe bule de gaz sau goluri pe izolația de hârtie din cauza uscării inadecvate sau a calității slabe a izolației de hârtie. Descărcare cu energie redusă: Descărcare parțială de la defectele cu scântei care induc înțepături carbonizate în hârtie sau arcuri cu energie redusă care cauzează urmărirea suprafeței pe hârtie și particule de carbon în ulei. Defecțiune termică < 300°C: Această defecțiune este cauzată de supraîncălzire sau de blocaje în conductele de ulei. Culoarea hârtiei se schimbă în maro ( $T > 200^\circ\text{C}$ ) și devine carbonizată ( $T > 200^\circ\text{C}$ ). Defect termic 300°C-700°C: Acest defect indică prezența elementelor carbonizate pe izolația hârtiei și formarea de particule de carbon în ulei. Ea apare din cauza unui contact defect, a unei suduri defectuoase sau a circulației curentului. Defect termic > 700°C: Acest defect duce la formarea unor cantități mari de carbon în ulei, la coroziunea metalelor (800°C) sau la fuziunea metalelor (>1000°C). Poate apărea din cauza circulației unor curenți de scurgere mari în rezervor și în miezuri sau a unui scurtcircuit pe laminații [6].

Tabelul 3.4 Diagnosticarea tipului de defect pe baza IRM [7]

Fault Type	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> (R1)	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (R2)	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> /C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (R5)
Partial Discharge	<0.1	NS <sup>a</sup>	<0,2
Discharge of Low Energy	<0,1	>1	>1
Discharge of High Energy	0.1 to 1	0.6 to 2.5	>2
Thermal fault <300 °C	NS <sup>a</sup>	NS <sup>a</sup>	<1
Thermal fault 300 °C-700 °C	>1	<0.1	1 to 4
Thermal fault >700 °C	>1	<0.2	>4

<sup>a</sup> NS: Not significant whatever the value.

#### 4) Metoda Triunghiului Duval

Metoda triunghiului Duval a fost introdusă pentru prima dată în 1974, folosind o combinație de trei hidrocarburi gazoase: CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> și C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, dispuse într-o formă triunghiulară, așa cum se arată în Fig. 3.1 [2], [4]. După cum se arată în Fig. 3.1, triunghiul Duval este împărțit în șase zone reprezentând diferite tipuri de defecte și o zonă pentru defecte termice-electrice combinate. Este demn de remarcat faptul că C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> și C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> sunt adoptate în toate metodele de interpretare DGA pentru a detecta defectele cu niveluri ridicate de energie, cum ar fi arcul electric și temperatura ridicată. În același timp, H<sub>2</sub> este utilizat în tehnici specifice pentru a indica o defecțiune cu energie scăzută, cum ar fi descărcarea parțială (PD), în care H<sub>2</sub> este generat într-o cantitate considerabilă. CH<sub>4</sub> este generat în cantități mai mici decât H<sub>2</sub> (de aproximativ 10-20 de ori mai mici) în cazul defectului PD. CH<sub>4</sub> este utilizat în DTM deoarece oferă un diagnostic mai bun pentru toate tipurile de defecte. H<sub>2</sub> se disipează mai repede decât gazele de hidrocarburi în uleiul transformatorului prin garnituri și îmbinări metalice. Prin urmare, orice raport de gaze care utilizează H<sub>2</sub> va fi foarte afectat de pierderea de H<sub>2</sub> în comparație cu gazele de hidrocarburi cu o rată de difuzie mai mică [4].

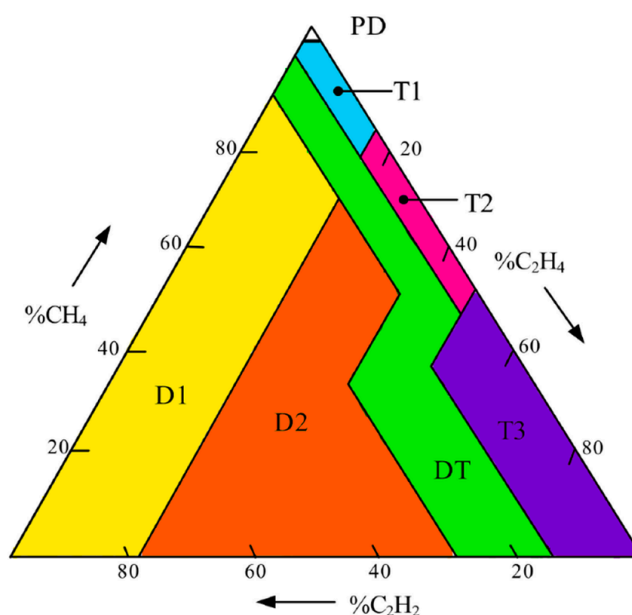


Fig. 3.1 Triunghiul Duval și zonele de defect asociate [8]

- PD - Descărcare parțială*
- D1 - Descărcare cu energie redusă*
- D2 - Descărcare cu energie ridicată*
- T1 - Defecțiune termică < 300 °C*
- T2 - Defecțiune termică 300 °C - 700 °C*
- T3 - Defect termic 700 °C*
- DT - Descărcare și defecțiune termică*

Pentru a utiliza triunghiul Duval, procentul fiecărui gaz utilizat în triunghi se calculează folosind Ecuațiile (1) – (3) [9].

$$\% CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (1)$$

$$\% C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (2)$$

$$\% C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4} \quad (3)$$

### 5) Metoda Pentagonului Duval

Comparativ cu DTM (Metoda Triunghiului Duval), DPM (Metoda Pentagonului Duval) încorporează două gaze suplimentare:  $H_2$  și  $C_2H_6$ , pentru a distinge între descărcările parțiale (PD) și defectele termice de energie redusă în uleiul mineral [10]. O altă adăugire este zona gazelor parazitare (S), care indică apariția gazelor dizolvate în condiții normale de operare a transformatorului. Prezența zonei gazelor parazitare îmbunătățește capacitatea DPM de a identifica starea normală a transformatorului.

Axa pentagonului acoperă întreaga gamă, de la 0% la 100%, centrul Pentagonului fiind considerat punctul de plecare. Centrul de masă al concentrației de gaze este calculat și reprezentat grafic pe pentagonul Duval, prezentat în Fig. 3.2 [11].

Mai întâi, procentajul fiecărui gaz specific dizolvat este calculat utilizând Ecuațiile (4) - (7) [9] și este apoi reprezentat pe pentagonul Duval, prezentat în Fig. 3.2, pentru a identifica tipul de defect [4].

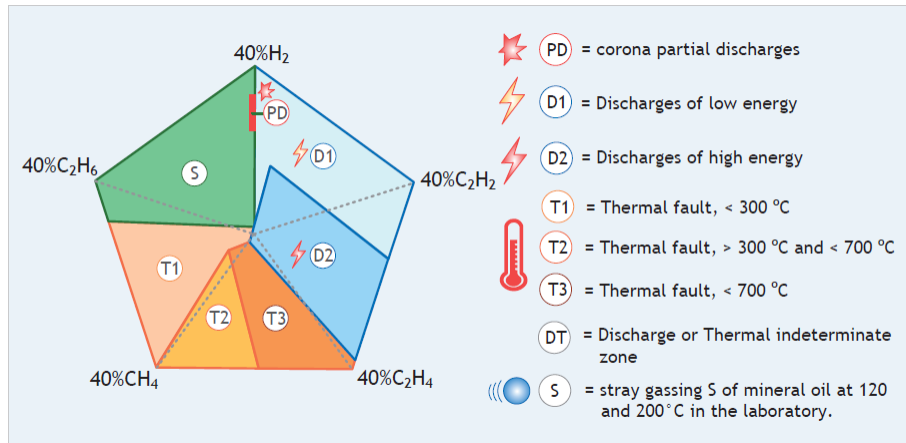


Fig. 3.2 Limitele zonelor din Pentagon [11]

$$\% H_2 = \frac{H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6} \quad (4)$$

$$\% CH_4 = \frac{CH_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6} \quad (5)$$

$$\% C_2H_2 = \frac{C_2H_2}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6} \quad (6)$$

$$\% C_2H_4 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6} \quad (7)$$

$$\% C_2H_6 = \frac{C_2H_6}{CH_4 + C_2H_2 + C_2H_4 + C_2H_6} \quad (8)$$



### 3.6. Limitări și surse de erori

Deși DGA este o tehnică foarte eficientă, există și anumite limitări:

- Influența factorilor externi: Condițiile de operare ale transformatorului, cum ar fi temperaturile ridicate, pot influența concentrațiile de gaze.
- Contaminarea probelor: Prelevarea incorectă sau transportul necorespunzător al probelor poate duce la rezultate eronate.
- Interpretarea subiectivă: Deși metodele standardizate oferă ghiduri clare, uneori interpretarea rezultatelor poate fi subiectivă, mai ales în cazurile complexe.

## 4. INTERPRETAREA REZULTATELOR

Pentru a evalua performanța fiecărei tehnici de interpretare DGA, parametrii asociați tipurilor de defecte obținuți din tehnicile de interpretare DGA menționate anterior au fost ajustați ușor pentru a include șase tipuri de defecte, și anume: PD, D1, D2, T1, T2 și T3.

PD se referă la descărcările parțiale de tip coroană. Pentru a analiza cazurile identificate, s-a aplicat un set de douăzeci și patru de cazuri obținute atât din referințe academice [12]-[19], cât și din transformatoare deschise, utilizate pentru investigarea problemelor în cadrul acestei cercetări. Studiul asupra transformatoarelor cu rezervor deschis (cazurile 1-3), prezentate în Fig. 4.1 și Tabelul 4.1. a fost realizat de autori împreună cu companiile de mentenanță pentru o centrală electrică [11].

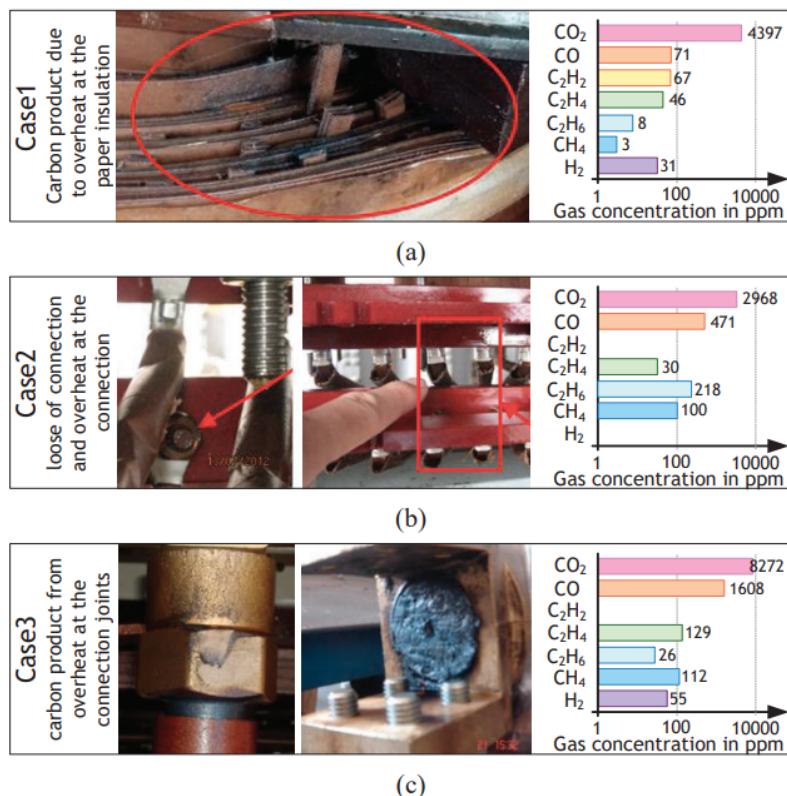


Fig. 4.1 Studii de caz privind transformatorul deschis pentru problemele DGA [11]

Tabelul 4.1 Studii de caz privind transformatoarele deschise [11]

Cazuri studiate	kVA	kV	Problemă
1	2000	22/0.4	Produs de carbon din cauza supraîncălzirii la nivelul hârtiei izolante
2	500	22/0.4	Conexiune slabă și supraîncălzirea conexiunii
3	2540	15/0.4	Produs din carbon de supraîncălzire la îmbinările de conectare

## 5. CONCLUZII ȘI PERSPECTIVE VIITOARE

### 5.1 Beneficiile DGA

- Detectarea timpurie a defectelor: DGA poate identifica probleme incipiente precum descărcările parțiale sau defectele termice, cu mult înainte ca acestea să evolueze în defecțiuni majore.

- Prevenirea defecțiunilor catastrofale: Prin monitorizarea continuă și identificarea rapidă a anomaliilor, DGA poate preveni avariile majore, reducând riscul opririlor neplanificate și costurile de reparație.

- Optimizarea întreținerii predictivă: Datele furnizate de DGA permit companiilor să planifice mai eficient intervențiile, contribuind la prelungirea duratei de viață a transformatoarelor și la îmbunătățirea eficienței operaționale.

- Eficiență economică: Prin identificarea și monitorizarea defectelor, DGA ajută la reducerea costurilor asociate cu intervențiile neplanificate și la minimizarea pierderilor energetice cauzate de defectele minore netratate.

### 5.2 Limitările DGA

- Incertitudinile în interpretarea rezultatelor: Interpretarea valorilor gazelor poate fi uneori dificilă, mai ales când concentrațiile gazelor se află în intervale de tranziție. Acest lucru poate duce la rezultate neconcludente.

- Influența factorilor externi: Temperatura, umiditatea și alți factori de mediu pot influența concentrațiile gazelor și pot afecta precizia interpretării.

- Dependența de metodele de interpretare: Deși metodele tradiționale, cum ar fi Triunghiul Duval sau metoda Roger, sunt folosite pe scară largă, acestea pot avea limitări în anumite condiții complexe și necesită completări sau ajustări pentru a oferi rezultate precise.

- Costuri de implementare: Echipamentele de analiză și monitorizare pentru DGA, precum cromatografele în fază gazoasă, pot fi costisitoare, iar instalarea și întreținerea acestora necesită resurse financiare considerabile.

### 5.2 Perspectivă viitoare

Interpretarea precisă a Analizei Gazelor Dizolvate (DGA) este esențială pentru a asigura fiabilitatea transformatoarelor de putere și, implicit, a sistemului energetic. Deși tehnici precum metoda Doernenburg, metoda Roger, metoda IEC, triunghiul Duval și pentagonul Duval sunt documentate și utilizate pe scară largă, acestea pot produce rezultate variabile și uneori pot conduce la interpretări eronate, mai ales dacă gazele analizate depășesc limitele specificate. Se dorește o nouă tehnică de interpretare DGA, care integrează mai multe metode convenționale printr-un index de scor și algoritmi de învățare automată de tip „random forest” pentru a spori acuratețea și consistența diagnosticării. Această abordare multi-metodă care asigură o interpretare mai fiabilă, oferind o direcție promițătoare pentru cercetări viitoare și pentru dezvoltarea unor tehnici de diagnostic mai robuste. Crearea unui algoritm care să funcționeze conform schemei bloc din Fig. 5.1

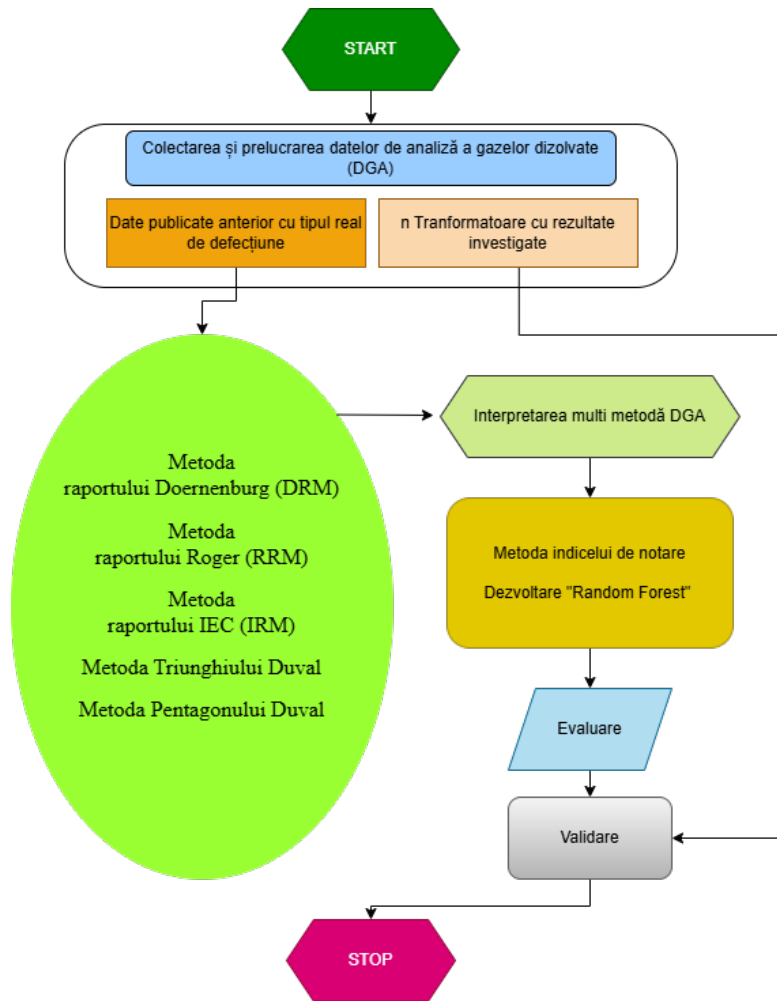


Fig. 5.1 Schema bloc a algoritmului multi metodă

## CONFIRMARE

Acest articol este o parte integrantă a cercetării doctorale în curs de desfășurare, axată pe îmbunătățirea și eficientizarea proceselor de instalare și asamblare a transformatoarelor de putere de înaltă tensiune. Numărul contractului este SD 1/28/02.10.2023 la Școala Doctorală de Inginerie Electrică. Ne exprimăm aprecierea sinceră față de Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA din București pentru contribuțiile inestimabile, și sprijinul acordat pe parcursul acestui demers de cercetare, de asemenea companiei Siemens Energy, în cadrul căreia îmi desfășor activitatea profesională.

Lucrarea a fost prezentată la Simpozionul de Mașini Electrice SME'XX, ediția 2024.

## 6. BIBLIOGRAFIE

1. R. Rogers, *IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis*, IEEE Trans. Electr. Insul., **EI-13**, 5, pp. 349–354, 1978.
2. M. Duval, *A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers*, IEEE Electr. Insul. Mag., **18**, 3, pp. 8–17, 2002.
3. IEC 60599, *Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis*, International Electrotechnical Commission (IEC), 2015.
4. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, 2019.

5. M. Fenger, S.R. Campbell, G. Gao, *The impact of surge voltage rise-time on PD inception voltage in random wound motors of different designs*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No.01CH37225), pp. 352–355, 2001.
6. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*, 2008.
7. *IEC 60599, Mineral Oil-Filled Electrical Equipment in Service - Guidance on the Interpretation of Dissolved and Free Gases Analysis*, 2022.
8. \*\*\*Conventional Duval triangle 1., ResearchGate.
9. Suwarno, H. Sutikno, R.A. Prasajo, A. Abu-Siada, *Machine learning based multi-method interpretation to enhance dissolved gas analysis for power transformer fault diagnosis*, Heliyon, **10**, 4, p. e25975, 2024.
10. M. Duval, L. Lamarre, *The duval pentagon — a new complementary tool for the*, IEEE Electr. Insul. Mag. **30** 6, pp. 9 - 12, 2014.
11. N. Pattanadech, W. Wattakapaiboon, *Application of Duval Pentagon Compared with Other DGA Interpretation Techniques: Case Studies for Actual Transformer Inspections Including Experience from Power Plants in Thailand*, 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), pp. 1–4, 2019.
12. I. Höhle, A.J. Kachler, S. Tenbohlen, M. Stach, T. Leibfried, *Transformer Life Management German Experience with Condition Assessment*, Contribution for CIGRE SC12/A2., pp. 1-13-13-13, 2003.
13. S.K. Mishra, S. Suresh, *Power Transformer and Reactors Operational Experience*.
14. M. Belmiloud, B. Raison, G. Rostaing, *Case studies of transformers investigations with DGA and winding resistances*, Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), International Conf., Tunis, pp. 1-5, 2014.
15. A.R. Gray, *Practical Experience Gained from Dissolved Gas Analysis at an Aluminium Smelter*, Doble Eskom Annual International Conf. Southern Africa, pp. 1-35, 2010.
16. \*\*\*TJ/H2b Analytical Service Pty. Ltd. *Diagnostic Testing and Condition Assessment of HV Equipment*.
17. \*\*\*Core Team and SP Consultancy Work, *Condition Monitoring and Condition Based Maintenance*.
18. R.W. Smith, *Transformer Failure Cases Studies*, AT&T Executive Education and Conf., Austin, 2016.
19. Mirant Ltd., *DGA Case Studies-Trusting your Results*, 2014.