

STIMA DELLA VITA RESIDUA DEI TRASFORMATORI IN OLIO BASATA SULLA D.G.A. (ANALISI DEI GAS DISCIOLTI IN OLIO)

C. NASO
ING MAN
POLIMERI EUROPA

1. Premessa

I trasformatori elettrici sono apparecchiature chiave nella produzione, trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, nelle piccole, medie e grandi industrie.

Improvvisi guasti, perdite, incidenti, ecc. possono essere causa di elevati danni:

- economici (perdita del bene e della produttività);
- ambientali (contaminazione di suoli e falde acquifere da idrocarburi o sostanze pericolose, inquinamenti ambientali determinati dalle conseguenze dei disservizi).

Un costante aggiornamento e la corretta conoscenza delle nuove tecnologie, procedure, norme tecniche e legislative in campo internazionale, unite all'esperienza sul campo, permettono di raggiungere l'obiettivo della protezione delle risorse aziendali ed ambientali, attraverso un'opportuna gestione, basata sulla manutenzione predittiva di tali unità funzionali, resa possibile da azioni analitiche opportune e sulla messa a punto di un sistema diagnostico programmatico, sia dal punto di vista operativo che organizzativo/progettuale.

Scopo della presente memoria è quello di:

- ◆ fornire una sintesi delle problematiche connesse con l'evoluzione dei gas che si manifestano nell'olio dei trasformatori;
- ◆ presentare il quadro normativo relativo alla diagnostica dello stato dei trasformatori mediante l'analisi dei gas disciolti nell'olio contenuto al loro interno
- ◆ richiamare alcune prescrizioni normative relative alla diagnostica dello stato dei trasformatori mediante l'analisi dei gas disciolti nell'olio contenuto al loro interno;
- ◆ attenzionare i criteri di interpretazione di tali prove analitiche;

L'olio minerale costituisce da circa un secolo un elemento indispensabile per l'isolamento e il raffreddamento di alcune macchine elettriche, quali i trasformatori di potenza e misura.

L'olio minerale è tuttora largamente impiegato nelle sopracitate macchine elettriche in quanto offre il miglior compromesso fra costi e prestazioni e presenta un'ottima compatibilità con gli altri materiali impiegati nella costruzione dei trasformatori.

Negli ultimi anni, lo sviluppo dei fluidi isolanti ha necessariamente dovuto confrontarsi con vincoli legislativi sempre più stringenti, di carattere sia sanitario sia ambientale; oggi, infatti, è sempre più sentita l'esigenza di introdurre studi e ricerche sistematiche che indichino la non pericolosità delle sostanze in uso, di possibile impiego e dei loro prodotti di decomposizione. Altro punto su cui si pone attenzione sempre crescente è quello relativo all'individuazione di metodologie in grado di fornire informazioni sullo stato dei componenti elettrici in servizio; infatti, già agli inizi degli anni settanta si venne sviluppando l'idea di usare l'olio come un mezzo per valutare le condizioni delle macchine attraverso l'esame dei gas disciolti in esso.

L'attività di ricerca sperimentale iniziata dal Roger e dal Dornenburg, fu successivamente ampliata in ambito CIGRE (Conférence Internationale des Grandes Réseaux Electriques) pervenendo nel 1978 alla pubblicazione di guide sull'argomento nei due contesti normativi di maggior rilievo:

- 1) in ambito IEC, a cura del TC 10, la Guida IEC 559;
- 2) in ambito IEEE/ANSI, la Std C57.104-1978.

Entrambi i suddetti documenti sono stati oggetto di revisione: nel marzo 1999 è stata emessa un'edizione profondamente trasformata, del documento IEC, già recepita a livello nazionale come **CEI EN 60599** che era stata preceduta, nel 1991, da un'edizione altrettanto innovativa del IEEE Std C57.104.

La **CEI EN 60599** ha esteso il campo di applicazione oltre che ai trasformatori di potenza anche a quelli di distribuzione ed industriali, ai trasformatori di misura, agli isolatori passanti, ai cavi in olio e agli interruttori.

Questo nuovo testo non ha, tuttavia, riscosso un completo assenso da parte dei costruttori e degli utilizzatori dei componenti considerati dal documento; pertanto per tentare di soddisfare le esigenze di questi utenti della normativa sono stati predisposti opportuni Gruppi di Lavoro misti incaricati di risolvere gli aspetti più controversi della pubblicazione in questione.

La presente memoria pone particolare attenzione ad applicazioni nell'ambito dei trasformatori di potenza, in quanto per altri componenti (trasformatori di misura, passanti, ecc.) non è ancora disponibile a livello nazionale una sufficiente esperienza a riguardo.

2. Teoria dell'evoluzione dei gas disciolti nell'olio dielettrico

La valutazione dei risultati delle analisi dei gas disciolti nell'olio isolante è considerato uno dei mezzi diagnostici più efficaci per valutare lo stato dei trasformatori in esercizio, individuare precocemente le anomalie e programmare eventuali interventi di riparazione; infatti, le più aggiornate tecniche analitiche e metodologie diagnostiche, focalizzate sulla prevenzione dei danni, consentono di realizzare decisivi miglioramenti nelle attività di manutenzione predittiva e di protezione ambientale sul parco trasformatori/apparecchi in esercizio con liquidi isolanti minerali e sintetici.

Informazioni di dettaglio riguardanti la generazione dei gas nell'olio possono essere desunte sia dalla letteratura tecnica che dalla stessa normativa; nel seguito si forniranno alcuni cenni, relativamente ai contenuti che interessano la trattazione.

Le principali cause di formazione di gas all'interno di un trasformatore sono connesse ad anomalie termiche ed elettriche.

I gas sono prodotti:

- per decomposizione termica dell'olio e degli isolanti associati (punti caldi);
- dalle temperature connesse ad un arco elettrico o da bombardamento ionico (senza temperature elevate associate) prodotto da scariche a bassa energia (PD o corona).

Questi gas, in misura diversa tra loro e variabile con la temperatura, sono abbastanza solubili in olio e di conseguenza sono facilmente determinabili tramite analisi del gas estratto dall'olio.

Va anche rilevato che tutti i trasformatori generano una certa quantità di gas, anche in assenza di anomalie, alle normali temperature di servizio.

La temperatura esercita una grande influenza sulla scomposizione delle molecole di idrocarburi che compongono l'olio minerale.

Tali scomposizioni portano alla produzione di ioni e radicali (H^* , CH_3^* , CH_2^* , CH^* e C^*) che attraverso reazioni chimiche complesse si ricombinano in molecole gassose.

- Scariche parziali a **basso contenuto energetico** comportano la scissione dei deboli legami C-H e idrogeno (H₂) si manifesta come il principale prodotto di questa reazione;
- **Energie e temperature maggiori** comportano in sequenza la scissione di elementi con legami più forti quali il legame singolo, doppio e triplo carbonio-carbonio.
Gli atomi di carbonio si ricombinano quindi con l'idrogeno presente nell'olio dando origine a molecole libere di etilene (C₂H₄), etano (C₂H₆), metano (CH₄) ed acetilene (C₂H₂);
- Ulteriori idrocarburi, in quantità più modeste, e cere costituiscono altri elementi risultanti dalle **reazioni termochimiche**;
- **Le carte e i cartoni** che costituiscono l'isolamento delle macchine elettriche sono una ulteriore fonte di produzione di gas. Nei trasformatori elettrici, raffreddati con liquidi isolanti, il principale isolante solido è costituito dalla **Carta Kraft**.
La carta viene utilizzata principalmente nella forma di strisce, che vengono avvolte attorno ai conduttori degli avvolgimenti elettrici, o nella forma di fogli, posti tra gli avvolgimenti ed il nucleo.
I trasformatori di potenza contengono, tipicamente, un rapporto carta/olio di circa 1:20.
La vitale funzione dei cartogeni è quella di isolare elettricamente i conduttori degli avvolgimenti e di separare meccanicamente i dischi e gli strati di avvolgimenti tra loro, verso il nucleo e verso terra.
Le numerose catene glucosiche, che hanno un debole legame C-O, tendono a rompere questo legame a temperature superiori a 110 °C.
I gas conseguenti a questa fenomenologia sono principalmente ossido di carbonio (CO) e anidride carbonica (CO₂) oltre a modeste quantità di acqua e composti furanici;
- Gas si possono produrre a seguito di **ossidazioni o di reazioni chimiche che interessano i materiali ferrosi, superfici metalliche non verniciate o vernici protettive**;
- In alcuni casi si è manifestata una significativa produzione di idrogeno a seguito della **reazione di parti metalliche con l'umidità e l'ossigeno presente nell'olio**;
- Talvolta gas si sono manifestati come conseguenza della **decomposizione dei sottili veli d'olio negli spazi interlaminari dei pacchi magnetici** in presenza di sovrariscaldamenti localizzati;
- Nell'olio sono altresì presenti **azoto ed ossigeno, di origine atmosferica**, che, pur non essendo caratteristici di alcun guasto, contribuiscono in modo determinante a stabilire la condizione di completa saturazione dell'olio.

3. Analisi gascromatografiche e normative di riferimento

Sulla base delle modalità di produzione dei gas sopra descritte e con riferimento a rilievi di tipo sperimentale, si è pervenuti alla definizione di criteri per consentire di associare lo specifico contenuto di gas allo stato del trasformatore (servizio regolare, presenza di una o più anomalie) od alla causa che ha determinato l'eventuale fuori servizio per guasto.

<i>CASISTICA DI GUASTO PER TRASFORMATORI DI POTENZA (*)</i> (* Hand buchder Sschandenverhunting Allianz Versicherungs – AG Berlin (1979)	
• La Responsabilità del danno (*) è attribuita a:	<ul style="list-style-type: none"> - Prodotto (40% per carenze di progetto e costruzione) - Esercizio (39% per degrado funzionale) - Influssi esterni (21% per scariche atmosferiche, ecc.)
• Le parti danneggiate (*) sono:	<ul style="list-style-type: none"> - Avvolgimenti (50%) - Sistemi di regolazione (29%) - Nucleo ed avvolgimenti (21 %) di cui <ul style="list-style-type: none"> - Nucleo (2%) - Cassa (2%)

Partendo dal presupposto che ogni tipo di difetto interno è caratterizzabile da uno specifico quadro gas e che la sua gravità può essere correlata al tasso di produzione degli stessi, sono state sviluppate metodologie per consentire di effettuare una diagnosi sullo stato di un trasformatore in relazione alle quantità di gas prodotti.

In linea di principio, facendo riferimento ad una schematizzazione semplice, i principali tipi di guasto e gli associati prodotti gassosi possono essere classificati come riportato nella Tabella 1 seguente (Metodo del Key Gas).

Tipo di guasto	Scariche in vuoli gassosi	Scariche ad elevata energia (parziali od archi)	Sovrariscaldamenti
Gas significativi	Idrogeno (H ₂) Metano (CH ₄) Etano (C ₂ H ₆)	Acetilene (C ₂ H ₂) Idrogeno (H ₂) Etilene (C ₂ H ₄) Altri	Etilene (C ₂ H ₄) Etano (C ₂ H ₆) Metano (CH ₄) Idrogeno (H ₂)
		Ossidi di carbonio (C ₂ O e CO ₂) per decomposizione della cellulosa.	

Tabella 1: *Suddivisione delle principali categorie di guasto a seconda dei loro gas significativi*

La schematizzazione semplice, riportata nella tabella, utile per una interpretazione di massima, è stata approfondita sulla base di ampie sperimentazioni ed è stata successivamente recepita dalla normativa definendo dei criteri interpretativi basati sul valore del rapporto fra diversi gas, vedi Tabella 2 a pagina seguente, che permettono di stabilire con maggiore attendibilità la natura del guasto:

Caso	Guasto caratteristico	Acetilene/Etilene C_2H_2/C_2H_4	Metano/Idrogeno CH_4/H_2	Etilene/Etano C_2H_4/C_2H_6
PD	Scariche parziali	Non significativo	<0.1	<0.2
D1	Scariche a bassa energia	>1	0.1 - 0.5	>1
D2	Scariche ad alta energia	0.6 - 2.5	0.1 - 1	>2
T1	Guasto termico $T < 300^\circ C$	Non significativo ⁽¹⁾	> 1 ma non significativo ⁽¹⁾	< 1
T2	Guasto termico $300^\circ C < t < 700^\circ C$	< 0.1	> 1	1-4
T3	Guasto termico $t > 700^\circ C$	< 0.2 ⁽²⁾	> 1	>4
NOTA 1:	In alcuni paesi. Il rapporto C_2H_2/C_2H_6 è usato invece di CH_4/H_2 . In alcuni paesi vengono anche adottati limiti di rapporto leggermente differenti.			
NOTA 2:	I rapporti sopraindicati sono significativi e possono essere calcolati solamente se almeno uno dei gas è in una concentrazione e con un tasso di crescita superiore ai valori tipici.			
NOTA 3:	$CH_4/H_2 < 0.2$ per scariche parziali nei trasformatori di misura. $CH_4/H_2 < 0.2$ per scariche parziali negli isolatori passanti.			
NOTA 4:	Modalità di sviluppo di gas analoghe a quelle associate alle scariche parziali sono stati riscontrati anche come risultato della decomposizione dell'olio nei sottili strati fra lamierini magnetici surriscaldati a temperature di $140^\circ C$ ed oltre.			
(1)	Non significativo qualunque sia il valore.			
(2)	Un valore crescente di C_2H_2 può indicare che la temperatura del punto caldo è superiore a $1000^\circ C$			

Tabella 2: Tabella interpretativa dei gas disciolti in Olio secondo la nuova versione della IEC 60599

L'impiego di rapporti fra gas per individuare un possibile tipo di guasto è tuttavia un processo alquanto empirico, basato sull'esperienza acquisita nel correlare le analisi gascromatografiche delle macchine con il reale problema o guasto accertato sperimentalmente una volta che sulla macchina sono stati eseguiti i necessari rilievi di tipo elettrico e che successivamente è stata aperta ed ispezionata.

Le teorie diagnostiche basate sui principi di decomposizione dell'olio e dei materiali isolanti, descritte precedentemente, possono essere giustificate mediante l'impiego di una matrice di rapporti gassosi indici di possibili cause di guasto.

Questi rapporti sono fondamentalmente i cinque seguenti:

- Rapporto 1 - metano/idrogeno _____ (CH_4/H_2);
- Rapporto 2 - acetilene/etilene _____ ($\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$);
- Rapporto 3 - acetilene/metano _____ ($\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$);
- Rapporto 4 - etano/acetilene _____ ($\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$);
- Rapporto 5 - etilene/etano _____ ($\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$).

Nella nuova edizione della Guida IEC 60599, i rapporti vengono ipotizzati variabili in un campo fra 0,1 e 4, secondo la Tabella 2 di pagina precedente.

La Norma CEI EN 60599. Nell'Allegato B, fornisce un'indicazione su come rappresentare graficamente detti rapporti fra gas, sia in maniera bidimensionale che tridimensionale, definendo, per ognuna delle rappresentazioni, le zone relative ad ognuna dei tipi di guasto sopra indicato (PD, D1, D2, T1, T2, T3).

La nuova edizione del documento IEC riporta anche uno schema semplificato di interpretazione dei gas disciolti in olio di cui, in Tabella 3, se ne fornisce un estratto dalla pubblicazione originale.

Caso	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$
PD	-	< 0.2	-
D	> 0.2	-	-
T	< 0.2	-	-

Tabella 3: Schema semplificato di interpretazione (secondo la nuova versione della IEC 60599)

La Norma CEI EN 60599 introduce il concetto di "Valore Tipico", da altri definito "Normale" o di "Norma" (valori tuttora oggetto di discussione e riconsiderazione); tale valore, per ciascun gas, rappresenta:

il valore di concentrazione al di sotto del quale, in base all'esperienza di esercizio, è ragionevole escludere la presenza di anomalie significative (tali da portare all'esclusione dal servizio) all'interno della macchina.

Tali valori sono superati da una percentuale relativamente bassa della popolazione dei trasformatori (ad esempio 10%). In tale caso si parla di valori tipici al 90%.

I valori “Tipici” sono riferimenti da utilizzare per valutare in modo comparativo il contenuto di gas e non debbono essere utilizzati per stabilire la gravità di anomalie all’interno della macchina né tantomeno per stabilire correlazioni con la probabilità di guasto.

Essi sono utilizzati essenzialmente per decidere se intraprendere attività per una sorveglianza più frequente dello sviluppo di gas o per un approfondimento delle cause.

Per ciascun tipo di componente elettrico, la CEI EN 60599 riporta i valori tipici di concentrazione dei gas; in particolare, la seguente Tabella 4 (estratto dal documento):

Tipo di unità	Idrogeno H₂ [ppm]	Ossido di Carbonio CO [ppm]	Anidride Carbonica CO₂ [ppm]	Metano CH₄ [ppm]	Etano C₂H₆ [ppm]	Etilene C₂H₄ [ppm]	Acetilene C₂H₂ [ppm]
Trasformatori senza Commutatore sotto carico	60–150	540–900	5100–13000	40–110	50–90	60–280	3–50
Trasformatori con commutatore sotto carico	75–150	400–850	5300–12000	35–130	50–70	110–250	80–270
Trasformatori da forno (*)	200	800	6000	150	150	200	(*)
Trasformatori per distribuzione	100	200	5000	50	50	50	5
<p>NOTA 1: I valori elencati in questa tabella sono stati ottenuti da reti singolari. Valori ottenuti su altre reti possono risultare diversi.</p> <p>NOTA 2: “Con commutatore sotto carico” significa che una certa comunicazione di olio E/o gas è possibile fra il contenitore dell’interruttore di commutazione e la Cassa principale o fra i rispettivi conservatori d’olio. Questi gas possono contaminare l’olio nella cassa principale ed influenzare i Normali valori rilevabili in questi tipi di macchine. “Senza commutatore sotto carico” significa che il trasformatore non è provvisto di questo componente o se lo è non esiste possibilità di comunicazione o di fuga dell’olio e/o del gas verso la cassa principale.</p> <p>NOTA 3: Alcuni paesi hanno dichiarato valori tipici di C₂H₂ < 0,5 ppm e di C₂H₄ < 10 ppm.</p> <p>(*) Questi valori sono influenzati dal progetto e dal montaggio del commutatore sotto carico. Per questa ragione non è stato possibile proporre valori statistici significativi per l’acetilene.</p>							

Tabella 4: Esempi di valori tipici di concentrazione al 90% osservati su una rete tipica

Per ciascun tipo di componente elettrico, la CEI EN 60599 riporta, inoltre, in particolare per i trasformatori di potenza, i valori tipici di crescita dei gas in millilitri al giorno, secondo quanto riportato nella seguente Tabella 5 (estratto dal documento):

Idrogeno (H ₂)	< 5
Metano (CH ₄)	< 2
Etano (C ₂ H ₆)	< 2
Etilene (C ₂ H ₄)	< 2
Acetilene (C ₂ H ₂)	< 0.1
Ossido di carbonio (CO)	< 50
Anidride carbonica (CO ₂)	< 200
NOTA — I valori elencati in questa tabella sono stati ottenuti da reti singolari. Valori ottenuti su altre reti possono risultare diversi. Valori per altri tipi di trasformatori, ad esempio trasformatori sigillati, possono anch'essi differire.	

Tabella 5: Valori tipici dei tassi di crescita dei gas per trasformatori di potenza, espressi in ml/giorno.

Nell'Allegato A della Norma CEI EN 60599, in particolare nella Tab. A.1, riportata a pagina seguente, sono indicati i Guasti Tipici nei trasformatori di potenza:

Tipo	Guasto	Esempi
PD	Scariche parziali	<ul style="list-style-type: none"> - Scariche nelle cavità gassose derivanti da un'impregnazione incompleta, dall'elevata umidità della carta, dalla supersaturazione dell'olio o dalla cavitazione e che comportano la formazione di paraffina solida.
D1	Scariche di debole energia	<ul style="list-style-type: none"> - Scintillamento o archi tra cattive connessioni di potenziali diversi o flottanti, provenienti da anelli di schermatura, toroidi, dischi o conduttori adiacenti di avvolgimenti, brasatura rotta o anelli chiusi nel nucleo - Scariche tra le parti di serraggio, i passanti e la cassa, l'alta tensione e la terra all'interno degli avvolgimenti, sulle pareti della cassa; - Tracciature nei blocchi di legno, nella colla delle travi isolanti, nei distanziatori degli avvolgimenti; - Cedimento nell'olio, corrente di interruzione del selettore.
D2	Scariche di alta energia	<ul style="list-style-type: none"> - Scariche superficiali, tracce o archi di alta energia locale o con corrente sostenuta; - Cortocircuiti tra la bassa tensione e la terra, i connettori, gli avvolgimenti, i passanti e la cassa, le sbarre di rame e la cassa, gli avvolgimenti ed il nucleo, nel condotto dell'olio, nella torretta; - Anelli chiusi tra due conduttori adiacenti attorno al flusso magnetico principale, i bulloni isolati del nucleo, gli anelli metallici che sostengono le colonne del nucleo.
T1	Guasto termico $t < 300^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> - Sovraccarico del trasformatore in situazioni di emergenza; - Elemento bloccante che limita il flusso di olio negli avvolgimenti; - Flusso disperso nelle travi di smorzamento dei gioghi.
T2	Guasto termico $300^{\circ}\text{C} < t < 700^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> - Contatti difettosi tra le connessioni imbullonate (in particolare tra le sbarre di alluminio), i contatti scorrevoli, i contatti all'interno dell'interruttore selettore (formazione di carbone pirolitico), le connessioni tra il cavo e i conduttori estraibili dei passanti; - Correnti di circolazione tra i serraggi dei gioghi ed i bulloni, i serraggi ed i lamierini, nella messa a terra, saldature e serraggi difettosi nelle schermature metalliche; - Isolamento danneggiato tra i conduttori adiacenti paralleli negli avvolgimenti.
T3	Guasto termico $t > 700^{\circ}\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> - Forti correnti di circolazione nella cassa e nel nucleo; - Correnti minori nella parete della cassa create da un campo magnetico elevato non compensato; - Cavallotti nei lamierini di acciaio del nucleo.

Tabella A.1: Guasti tipici nei trasformatori di potenza.

4. Discussione sulle controversie normative e modifiche alla normativa

Come accennato in precedenza il TC 14 Trasformatori della IEC ha considerato che il testo della attuale IEC 60599 potesse essere interpretato in maniera impositiva e che i valori riportati nelle Tabelle 4 e 5 fossero eccessivamente restrittivi.

Pertanto è stato concordato, nell'ambito di un GdL congiunto IEC 14-10, di introdurre al testo IEC 60599 le seguenti modifiche:

- ♦ Il paragrafo “scopo” sarà integrato dal testo seguente:

I valori forniti dalle Tabelle dell'Allegato A (tabelle 4 e 5) sono forniti solo a titolo informativo; se tali valori sono superati ciò non richiede né la rimozione del servizio dell'unità né l'avvio di operazioni di riparazioni.

Alcune macchine possono operare in sicurezza con valori superiori a quelli forniti dalle tabelle, sia in relazione al loro progetto, ai materiali impiegati e alle tecniche costruttive adottate che in relazione alle condizioni di esercizio adottate dagli utilizzatori.

Il costruttore, l'utilizzatore o altri esperti dovrebbero essere consultati al fine di suggerire un eventuale programma di prove diagnostiche;

- ♦ una Nota 4 verrà aggiunta alla Tabella 4 in cui sarà riportato che:

Il TC 14 dell'IEC segnala che alcuni paesi prevedono valori tipici di concentrazione pari a:

– Idrogeno	(H ₂)	=	500 ppm
– Ossido di carbonio	(CO)	=	1000 ppm
– Anidride carbonica	(CO ₂)	=	14000 ppm
– Metano	(CH ₄)	=	350 ppm
– Etano	(C ₂ H ₆)	=	800 ppm
– Acetilene	(C ₂ H ₂)	=	200 ppm

- ♦ Per quanto riguarda la Tabella 5 il presente testo dovrebbe essere integrato da una ulteriore nota in cui si stabilisce che:

l'intervallo di tempo (d₂-d₁) fra due successive analisi dell'olio dovrebbe essere tale che il corrispondente aumento del gas rilevato (y₂-y₁), in microlitri per litro o in ppm, deve essere compatibile con i limiti di sensibilità dei laboratori di prova.

- ♦ Una terza nota dovrebbe inoltre essere inserita al fine di evidenziare che:

valori da 5 a 10 volte più elevati di quelli riportati in tabella probabilmente indicano la presenza di guasto all'interno della macchina.

- ◆ Tutto il testo che tratta della velocità di crescita dei gas (paragrafo A.1.5) dovrebbe essere integrato da una ulteriore nota, da aggiungere a quella già presente nel testo del documento, in cui si precisa che:

Il TC 14 dell'IEC segnala che alcuni paesi prevedono i seguenti valori in ppm/mese:

– Idrogeno	(H ₂)	=	22	ppm
– Ossido di carbonio	(CO)	=	50	ppm
– Anidride carbonica	(CO ₂)	=	500	ppm
– Metano	(CH ₄)	=	40	ppm
– Etano	(C ₂ H ₆)	=	50	ppm
– Acetilene	(C ₂ H ₂)	=	2	ppm

Queste proposte del TC 14 dell'IEC è fondamentale mirata a:

- ✓ evitare problemi di natura tecnico-legali per quanto riguarda la gestione delle unità sottoposte a controlli periodici dei gas disciolti in olio;
- ✓ recepire le esperienze maturate in alcuni paesi, quali Francia e Germania e condivisibili anche dall'Italia.

Disporre di adeguati riferimenti sui valori accettabili delle concentrazioni di gas in olio e di validi criteri interpretativi del tipo di anomalia in atto, consente di valutare lo stato delle macchine ed attuare, dove richiesto, ulteriori indagini o efficaci azioni correttive.

5. Esercizio ed utilizzo dell'analisi dei gas disciolti in olio

Le condizioni anomale possono essere a carattere permanente o verificarsi in particolari condizioni transitorie, quali: sovraccarichi temporanei, messa in tensione, alimentazione di corti circuiti esterni alla macchina.

E' importante, tuttavia, precisare che la presenza di elevate concentrazioni di gas in olio, pur essendo nella maggioranza dei casi, indice di anomalia, non può essere posta in diretta correlazione con la probabilità che occorra un guasto.

Ciò deriva dal fatto che la gravità dello sviluppo di gas dipende principalmente da dove l'anomalia è situata all'interno della macchina.

In altri termini si possono avere:

- anomalie gravi, se lo sviluppo di gas è localizzato in parti vitali (es. avvolgimenti, isolamenti principali, nucleo, passanti, ecc.);
- anomalie tollerabili, se lo sviluppo di gas è localizzato in parti secondarie (es. cassone, tiranti, schermi di flusso, collegamenti a massa, ecc.).

In generale si può affermare che:

- a) In condizioni stazionarie, la presenza di gas disciolti in olio in elevate concentrazioni, in assenza di elementi inquinanti dell'olio (umidità elevata, particelle in sospensione, ecc.) non pregiudica sostanzialmente la rigidità dielettrica dell'olio del trasformatore;
- b) In condizioni transitorie (es. variazioni rapide di temperatura, scariche locali durante la messa in tensione) in macchine con concentrazioni di gas elevate, si possono determinare situazioni locali in cui è possibile la formazione di bolle di gas; pertanto è sempre prudente esercire le macchine in condizioni lontane dalla saturazione (contenuto totale di gas, inclusi ossigeno ed azoto di origine atmosferica inferiori all'8%);
- c) In caso di produzioni di gas elevate ed improvvise, la condizione di saturazione (somma delle pressioni parziali di tutti i gas inclusi quelli atmosferici) uguale alla pressione atmosferica più la pressione del battente di olio, può essere superata localmente nelle zone adiacenti l'anomalia. Ciò rende assai probabile la formazione bolle di gas che, prima che si disciolgano nella massa dell'olio, possono determinare l'intervento del relè a gas o nei casi più gravi la formazione di scariche in potenza attraversando zone ad elevato gradiente di tensione.

Per quanto riguarda la ripetibilità delle analisi, al di là della precisione ottenibile in laboratorio, occorre ricordare che all'interno di un trasformatore in normale funzionamento, le condizioni dell'olio non sono omogenee, ma sono condizionate da gradienti di temperatura, pressione, flussi di olio ecc.; inoltre i fenomeni di produzione gas sono processi che avvengono in condizioni ben lontane dall'equilibrio.

A causa di tutto ciò due campioni prelevati contemporaneamente in parti diverse della macchina o a brevissimo tempo l'uno dall'altro possono presentare differenze del 10% e talvolta maggiori.

Trasformatori che producono elevate quantità di gas mostrano maggiori scostamenti tra campioni prelevati contemporaneamente, mentre trasformatori con bassa produzione di gas mostrano un migliore accordo.

Quanto detto, porta a concludere che l'interpretazione dei gas disciolti è materia complessa che deve tenere conto di molti parametri quali il tipo di macchina, il suo progetto, il suo modo di esercizio, la sua storia precedente, l'esperienza su macchine simili, i risultati di altre prove di tipo elettrico, ecc.

E' opportuno ricordare che l'analisi periodica dell'olio permette di ottenere, oltre alla misura dei gas disciolti, il contenuto di umidità dell'olio.

Questo parametro è determinante per valutare lo stato del trasformatore dal punto di vista della tenuta dielettrica e spesso integra le informazioni ottenibili dall'analisi gas e consente di formulare diagnosi più esatte.

Oltre al confronto dei valori scaturiti dall'analisi con i "Valori Tipici", il parametro più immediato per una stima della gravità dell'anomalia è la velocità di accumulo del gas.

In caso di rapidi incrementi del livello di gas si preferisce analizzare il singolo caso determinando la velocità di accumulo tramite interpolazioni tra più analisi, a frequenza intensificata nell'arco di un certo periodo.

La periodicità delle analisi è diversa a seconda della tipologia costruttiva dei trasformatori ed al servizio effettuato dagli stessi; a titolo di esempio, la periodicità consigliata è annuale per i trasformatori principali di unità con potenza superiore a 100 MVA e tensioni superiori a 220kV, mentre è biennale per trasformatori principali di unità di potenza e livello di tensione inferiore.

Per effettuare una corretta valutazione dei dati emersi dalle analisi dei gas disciolti in olio, occorre mettere a punto un sistema diagnostico programmatico, sia dal punto di vista operativo che organizzativo/progettuale; allo scopo, si può procedere nel seguente modo:

- ◆ I risultati delle analisi gas disciolti sono memorizzati in una Banca Dati suddivisa per tipologia di Trasformatore (principale, ausiliario, muffole) in modo da disporre di un archivio storico utile per ricostruire la vita precedente del trasformatore e per individuare significative variazioni delle misure nel tempo;
- ◆ Nella banca dati sono memorizzati le caratteristiche principali di ogni macchina e gli eventi rilevanti di esercizio;
- ◆ Le concentrazioni sono confrontate con i valori “Tipici” di ciascun gas; in caso di superamento, le concentrazioni sono elaborate secondo la metodologia prevista dalla Normativa.

Un aspetto importante di cui tenere conto nella valutazione è che i gas, una volta formati, tendono a rimanere nell’olio poiché le perdite gassose sono minime.

Questo significa che anche un’anomalia oramai corretta può dare ancora il suo contributo in termini di gas disciolto.

In questi casi, per le elaborazioni dei rapporti tra i gas, è necessario riferirsi agli incrementi rispetto a precedenti analisi piuttosto che al loro valore assoluto.

Occorre rilevare, inoltre, che per ottenere una corretta diagnosi dell’anomalia è necessario correlare i risultati delle analisi a conoscenze più specifiche riguardanti il trasformatore in esame quali:

- dati di esercizio (temperature olio, carico base, variabile, di punta, numero di energizzazioni, ecc.);
- eventi rilevanti di esercizio (sovratensioni, sovraccarichi, corti circuiti in rete, funzionamenti irregolari del sistema di raffreddamento);
- appartenenza a tipologie costruttive per le quali sono state individuate anomalie ricorrenti (in questi casi è determinante l’ausilio del costruttore);
- esperienze derivanti da smontaggio e ispezioni accurate di macchine costruttivamente simili;
- risultati di prove elettriche;
- ulteriori controlli di tipo fisico-chimici sull’olio.

Una particolare analisi è quella dei gas liberi presenti nel relè a gas in caso di un suo intervento.

Il confronto fra la fase gassosa (gas libero) e la fase liquida (gascromatografia) tenendo conto della diversa solubilità di ciascun gas nell'olio permette di valutare la rapidità del fenomeno in atto; la presenza di gas combustibili e la loro composizione consentono di formulare ipotesi circa l'anomalia.

I dati delle analisi, i risultati della loro elaborazione ed, in caso di anomalia, la diagnosi di guasto è presentata con l'ausilio della seguente documentazione:

- Diagrammi che riportano l'andamento nel tempo dei gas disciolti;
- Scheda dei valori misurati;
- Scheda indicante la diagnosi formulata secondo la normativa CEI; la scheda fornisce inoltre le velocità d'incremento del gas disciolto rispetto all'ultima analisi, la valutazione del rapporto tra CO₂ e CO, significativo di degrado della cellulosa, ed i risultati delle analisi chimiche dell'olio (umidità, acidità, ecc.).

Alla luce di quanto sopra, si ritiene auspicabile realizzare un vero e proprio sistema diagnostico programmatico, basato, essenzialmente, su tre fattori chiave ABC:

A Le Funzioni Principali	A1	Un unico "Mosaico Diagnostico & Decisionale", validato per valutare la situazione in atto, le criticità riscontrate, il degrado, gli esiti, le azioni e l'impatto finanziario, con il supporto di robusti Modelli derivanti da una significativa casistica in Banca dati.
	A2	Analisi precise dei Segni e Sintomi di Degrado e/o Criticità ambientali (PCB), per identificare le anomalie incipienti, prima che evolvano in guasti catastrofici e per l'inventario PCB+PCT+PCBT (Art. 2 Direttiva CEE 59/96 e D.Lgs 209/99). Per ogni analisi deve essere utilizzato un metodo "a regola d'arte" validato con la migliore strumentazione in grado di garantire una elevata precisione (in termini di limiti di quantificazione, ripetibilità e riproducibilità).
	A3	Efficacia nella pianificazione delle priorità, per pilotare interventi mirati sul parco macchine con la migliore allocazione delle risorse tecniche ed economiche disponibili nel tempo.
B Il Metodo Diagnostico		Le concentrazioni dei contaminanti correlati, i loro rapporti caratteristici e le velocità relative costituiscono un preciso ed efficace strumento diagnostico per predire le condizioni di degrado funzionale e di criticità delle singole apparecchiature (analogia con la diagnosi clinica del paziente, attraverso l'esame del sangue).
C Le Fasi Operative	C1	Progettazione della Copertura Diagnostica del parco macchine con la definizione del tipo di diagnosi; della tempistica, della frequenza; del budget per un arco temporale di 3 anni, idoneo alla valutazione delle velocità e dei trends di degrado.
	C2	Campionamento rappresentativo dei liquidi isolanti dei trasformatori in esercizio, con l'ispezione visiva delle macchine e la compilazione delle relative schede (evidenze visive-Segni);
	C3	Analisi e Ricerche mirate dei contaminanti sintomatici del degrado/criticità;
	C4	Diagnosi/Reporting: per un efficace supporto decisionale

Tabella 6: Schema possibile sistema diagnostico.

Tale modello diagnostico, naturalmente, dovrà contenere tutti i dati relativi ad ogni singola apparecchiatura e tutte le informazioni inerenti le sue vicissitudini durante la sua vita operativa, gli esiti diagnostici delle analisi, la valutazione dei dati analitici rapportati a dei criteri/indici di valutazione, le azioni correttive proposte ed effettuate.

In definitiva, nello specifico, occorre che il sistema diagnostico abbia i requisiti riportati nella seguente tabella 7:

REQUISITI DEL RAPPORTO DIAGNOSTICO
<ol style="list-style-type: none"> 1. Rapporto sulle priorità dei Fattori Critici riscontrati e delle Azioni Proposte, 2. Rapporto Generale sul Parco Macchine, aggiornato con dati statistici chiave, 3. Scheda Diagnostica per ciascuna Macchina con i dati relativi a: <ul style="list-style-type: none"> • Soggetto, Fluido, Anamnesi (Guasti, riparazioni, trattamenti ecc.) • Segni & Sintomi, risultati analitici, grafici dei parametri più critici con velocità, $\Delta\%$, Diagnosi del Degrado, Priorità dei Fattori Critici e delle Azioni Proposte, basata su un'ampia esperienza a casistica. • Esiti Diagnostici: scariche parziali/corona; scariche elettriche; sovrariscaldamenti (range di temperatura in $^{\circ}\text{C}$); termossidazione; degrado connessioni; degrado isolanti solidi/carta; umidità isolanti; degrado fluido isolante; contaminazione liquido isolante; contaminazione cloro; contaminazione PCB; influssi esterni; ecc. • Classificazione dei Livelli ed Indici di Priorità. • Azioni Correttive: Diagnosi PCB in olio; Gestione PCB; dealogenazione PCB in olio; cambio silica-gel; eliminazione perdite; rabbocco liquido isolante; decontaminazione fisica liquido isolante; Ridiagnosi entro (mesi); contattare costruttore; ispezione/Revisione; stop esercizio; sostituzione macchina, ecc. • Sistema Indici di Classificazione: <ul style="list-style-type: none"> – Ic = Fattore criticità funzionale della macchina; – Id = Degrado termico isolamento solido; – If = Impatto finanziario

Tabella 7: Requisiti di un sistema diagnostico.

Assodato, quindi che, per effettuare una corretta diagnosi del degrado, una corretta valutazione delle priorità dei Fattori Critici ed delle Azioni Proposte, riveste fondamentale importanza un'ampia esperienza in merito, nel seguito sono riportate, a titolo di esempio e come adeguato riferimento, le principali azioni attuate nell'ambito dell'attività svolta da grosse società di produzione, trasmissione e distribuzione dei energia elettrica (ad es. ENEL Produzione).

Le principali azioni attuate sono, nella prevalenza dei casi, classificabili in due categorie:

- a) controlli ed azioni con trasformatore in esercizio;
- b) controlli ed azioni con trasformatore fuori servizio.

In merito al punto a) (controlli ed azioni effettuate con trasformatore in esercizio), si è agito come di seguito descritto:

- Intensificazione delle analisi gas: in relazione al superamento del valore Tipico e dell'incremento rispetto alle ultime analisi si procede all'intensificazione della frequenza delle analisi; da quella normale a semestrale, trimestrale, mensile o addirittura settimanale, adottata in alcuni casi particolari.
- Ulteriori controlli dell'olio isolante: verifica delle proprietà dielettriche e chimiche con l'attuazione di controlli specifici quali rigidità dielettrica, indice di dissipazione, contenuto di umidità, acidità, sedimenti, colore, contenuto di composti furanici, conteggio delle particelle in sospensione, ecc.
- Rilievi termografici alle parti esterne accessibili per l'individuazione di punti caldi, in caso sia diagnosticata un'anomalia di tipo termico.
- Monitoraggio continuo del gas in olio: l'installazione di un analizzatore continuo di gas in olio sensibile, in varia misura, ad alcuni gas presenti nella macchina rappresenta un'efficace soluzione per limitare la frequenza delle analisi di laboratorio quando il fenomeno di sviluppo gas sia tale da richiedere una sorveglianza molto frequente.
- Rilievo di scariche parziali con metodi ultrasonori in varie condizioni di funzionamento.

In merito al punto b) (controlli ed azioni effettuate con trasformatore fuori servizio), si è fatto quanto previsto nel seguito:

- Prove elettriche in bassa tensione. Le prove più ricorrenti sono:
 - verifica dell'isolamento;
 - verifica del rapporto di trasformazione;
 - misura della resistenza degli avvolgimenti;
 - verifica della deformazione degli avvolgimenti tramite misura dell'induttanza di dispersione;
 - verifica della corrente assorbita dagli avvolgimenti;
 - corretto collegamento a massa di nucleo ed armature;
 - isolamento dei sensori di temperatura.

Ogni prova è in grado di evidenziare o confermare la presenza di anomalie nelle varie parti della macchina. Ad esempio la misura dell'induttanza di dispersione permette di accertare la presenza di deformazione degli avvolgimenti, collegabile in alcuni casi con lo sviluppo gas in olio; la prova viene di solito eseguita a seguito di intense correnti di guasto dovute a corto circuito di montante o di rete che esercitano un'elevata sollecitazione elettrodinamica degli avvolgimenti.

Il tempo richiesto per le prove elettriche è generalmente limitato a 1-2 giorni

- Misura delle scariche parziali. In alcuni casi, quando si sospetta che sia compromesso l'isolamento principale degli avvolgimenti, è eseguita una prova di tensione indotta (a tensione aumentata) con rilievo delle scariche parziali; essa consente di verificare la tenuta degli isolamenti ed è eseguibile tramite un carro appositamente attrezzato. L'esecuzione della prova di scariche parziali richiede un tempo di ulteriori 2-3 giorni.
- Prove di funzionamento a vuoto con analisi dei gas per discriminare le cause della produzione: nel funzionamento a vuoto è coinvolto principalmente il flusso del nucleo; prima dell'inizio è raccomandabile un degassaggio dell'olio per azzerare la storia precedente ed abbassare i livelli delle concentrazioni per diminuire gli errori di misura. Il tempo necessario dipende dalla produzione di gas: più è bassa più tempo occorre; tenendo conto del trattamento non è inferiore a due settimane.
- Degasaggio dell'olio. Esso riduce drasticamente il contenuto di gas disciolto, per allontanarlo dalle condizioni di saturazione (un valore cautelativo di massimo contenuto di gas totale è l'8%). Un degasaggio dell'olio è consigliabile durante le fasi iniziali di monitoraggio dello sviluppo gas, per azzerare la storia precedente e valutare

più correttamente la produzione di gas. Il tempo necessario è di 4-5 giorni

- Trattamento dell'olio con essiccazione degli avvolgimenti. Si effettua mediante cicli ripetuti di riscaldamento del nucleo e degli avvolgimenti (tramite l'olio caldo) e successivo svuotamento ed essiccazione dell'olio. E' da attuare quando il contenuto d'umidità nella carta degli avvolgimenti supera il 4-5% in peso dell'isolante. Questa attività richiede tempi assai lunghi dell'ordine di tre settimane Entrambi i tipi di trattamento sono facilmente eseguibili in loco tramite l'impiego di speciali rimorchi attrezzati.
- Misura della capacità e "tangendelta" dei passanti: la misura consente di verificare le caratteristiche di un passante; è da eseguire dopo guasti o anomalie che abbiano interessato i passanti. Il tempo per la sua esecuzione rientra in quello delle altre prove elettriche.
- Ispezione delle connessioni ai passanti e dei collegamenti a massa di nucleo ed armatura. L'ispezione è eseguibile con un limitato abbassamento del livello olio. Dopo l'ispezione è necessario attuare un semplice degassaggio dell'olio e successivo riempimento sotto vuoto. Tempo necessario circa una settimana.
- Sostituzione completa olio: da attuare quando l'invecchiamento sia tale da determinare il superamento dei limiti di previsti dalle norme per le caratteristiche fisico-chimiche dell'olio (acidità, colore, sedimenti ecc.). Se l'olio presenta un elevato contenuto di morchie e sedimenti occorre procedere ad un lavaggio degli avvolgimenti con olio caldo. Il tempo richiesto è di circa 20 giorni, incluso il trattamento dell'olio.
- Ispezione del trasformatore con estrazione della parte attiva. Essa può essere eseguita anche in Sito, al fine di evitare trasporti generalmente onerosi e consente di esaminare la parte superiore del giogo lo stato esterno degli avvolgimenti e delle connessioni, di verificare le prese del commutatore se presente e di verificare la pressatura degli avvolgimenti; l'ispezione degli avvolgimenti interni può essere eseguita solo parzialmente con l'uso di mezzi endoscopici. La limitazione citata, riguardante la parziale ispezione della macchina, richiede una attenta valutazione in termini di costi-benefici, prima della attuazione di questo tipo di intervento. Tempo richiesto circa 50 giorni.

Le attività descritte, se l'anomalia non è in rapida evoluzione o tale da non richiedere la rimozione dal servizio, possono essere eseguite nell'ambito di fermate programmate.

Uno schema di principio, per i trasformatori di potenza, è anche fornito dalla **NORMA CEI-EN 60599 (2000)**:

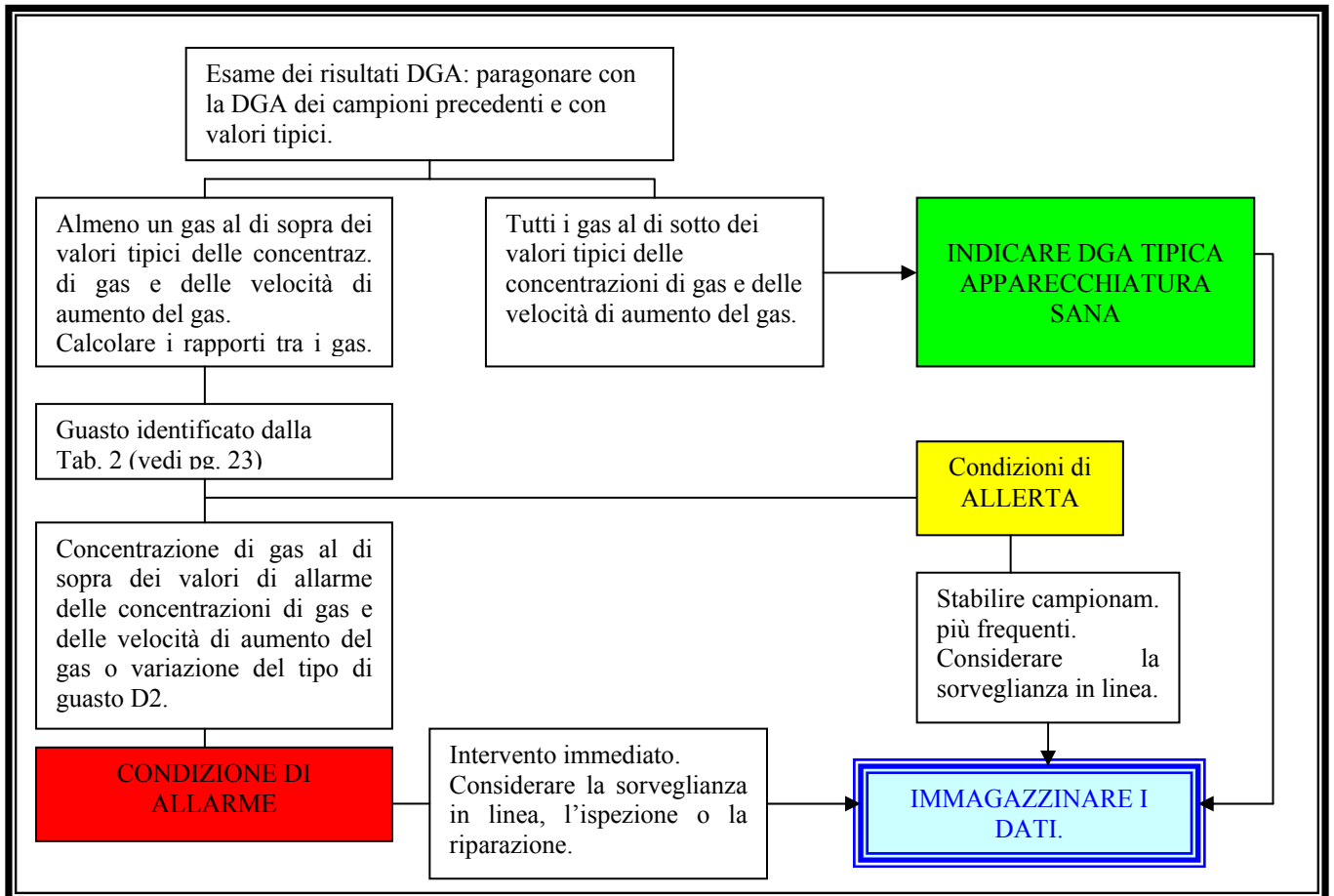


Tabella 8: Schema NORMA CEI-EN 60599

6. Conclusioni

I metodi di diagnosi basati sull'analisi dei gas disciolti in olio, coadiuvate anche dai risultati di altre prove, generalmente permettono di individuare l'origine dell'anomalia di un trasformatore, consentono di sorvegliarne nel tempo l'evoluzione e di pianificare le azioni correttive.

Ciò è possibile affermarlo anche alla luce del fatto che ispezioni ed approfondimenti effettuati su macchine smontate in officina dopo la loro rimozione dal servizio hanno permesso di accertare le cause del guasto, confermando, in generale, quanto scaturito dalle analisi precedentemente effettuate.

I processi analizzati nella presente memoria e gli elementi di diagnostica sono, a tutt'oggi, in fase evolutiva, soprattutto, come detto, in relazione all'individuazione dei Valori Tipici, della Velocità Critica di Crescita, le possibili imposizioni derivanti dalla definizione dei Valori Tipici.

Un'altra lacuna della Norma scaturisce dal fatto che, a differenza delle esperienze maturate sui trasformatori di potenza, diventa difficile, ad oggi e probabilmente anche nel futuro, sia in ambito nazionale che internazionale, maturare un'esperienza similare anche per gli isolatori passanti, i trasformatori di misura, gli isolatori passanti, i cavi in olio e gli interruttori, considerati nella stessa Norma; ciò, ad esempio, a causa dei limitati volumi d'olio disponibili.

In ogni caso, in particolare per i trasformatori di potenza, sembra opportuno rivolgere un'attenzione sempre maggiore alla realizzazione di un sistema diagnostico programmatico del tipo suggerito, in relazione all'importanza fondamentale di mettere a punto una strategia di manutenzione innovativa, la **manutenzione predittiva**, per poter acquisire tutte le informazioni possibili sullo stato di salute delle macchine e dei processi, al fine di:

- individuare sul nascere i difetti;
- seguirne la loro evoluzione nel tempo;
- programmare, con congruo anticipo e con una certa flessibilità, le necessarie azioni correttive da effettuarsi, previa valutazione della esigenza/necessità mediante una valutazione della vita residua delle macchine.

Ciò allo scopo di ottimizzare l'uso delle risorse per garantire:

- continuità di servizio dei processi produttivi, non gravati da eccessive e costose riserve/scorte;
- riduzione delle perdite di produzione e dei rischi, anche ambientali, connessi al disservizio improvviso di una apparecchiatura inserita in un ciclo produttivo;
- aumento della vita residua delle macchine;
- riduzione degli interventi non necessari;
- miglioramento dei fattori ambientali (consumo di energia, diminuzione rischi conseguenti al disservizio, ecc.);
- riduzione dei costi di manutenzione rispetto al metodo della manutenzione periodica.

BIBLIOGRAFIA

- 1 CEI EN 60599 Seconda Edizione 2000-01 *Guida all'interpretazione dell'analisi dei gas disciolti e liberi*
- 2 IEC 422 Second Edition 1999-03 *Supervision and Maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment.*
- 3 IEEE Std C57.104.1991 *Guide for the interpretation of gases generated in oil-immersed transformers*
- 4 IEC TC 10/14 *Revision of annex A1 of 60599 issued in 1999*
- 5 IEEE Std C57.125.1991 *Guide for failure investigation, documenttation and analysis for power transformers and shunt reactors.*
- 6 A.C. FRANKLIN, D.P. FRANKLIN, 12th Edition *The JPS Transformer Book*
- 7 S.D.MYERS, J.J.KELLY, R.H.PARRISH – Tranformer Maintenance Institute S.D. MYERS AKRON OHIO *A Guide to Transformer Maintenance*