


I vantaggi di un programma di test per l'analisi dell'olio per la valutazione dello stato di salute di apparecchiature elettriche

Sofia Gandolfi

Service Engineer

sgandolfi@doble.com | +39 344 274 0810

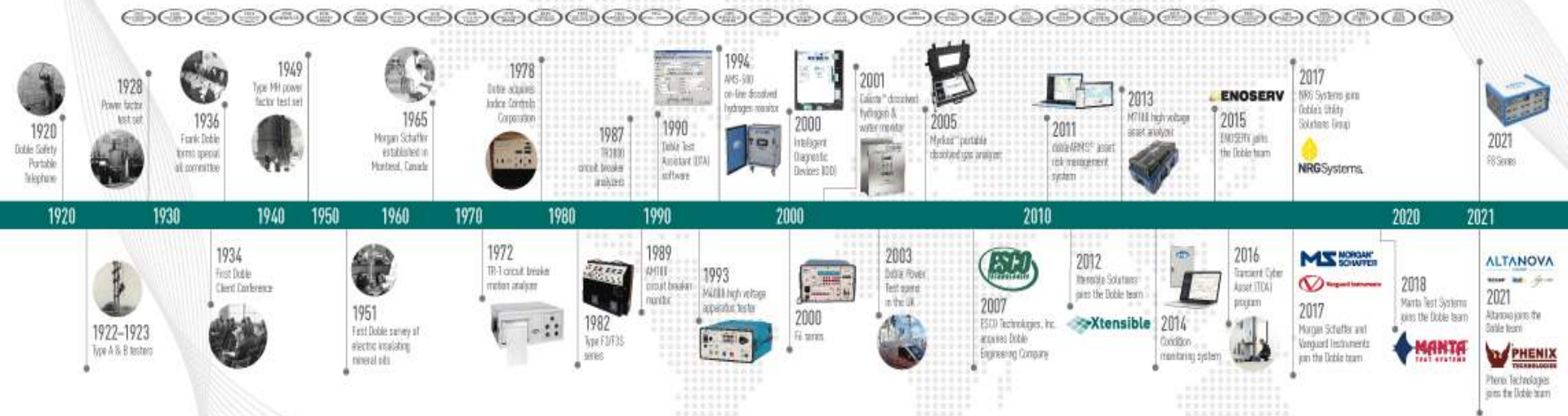




Competenze ingegneristiche e diagnostiche avanzate volte a garantire che, a livello globale, tutte le persone dispongano di energia *affidabile e sicura* in un mondo sostenibile

BUILT ON OVER A CENTURY OF INNOVATION AND EXPERTISE.
FOR THE NEXT CENTURY.

100 YEARS OF SERVICE TO THE ELECTRIC UTILITY INDUSTRY



DOBLE TODAY



110
COUNTRIES



112
GLOBAL
OFFICE
LOCATIONS



800+
EMPLOYEES



5,550+
CUSTOMERS GLOBALLY



Part of ESCO
Technologies' Utility
Solutions Group

OUR BRANDS



GARANTIRE AFFIDABILITÀ A FRONTE DI RAPIDI CAMBIAMENTI



- Transizione verso un'energia pulita;
- Crescente domanda di energia elettrica;
- Energia distribuita & rinnovabile;
- Evoluzione dei requisiti normativi e di sicurezza informatica;
- Rimanere al passo con l'IoT;
- Nuove tecnologie emergenti & *Artificial intelligence*.

Con un occhio rivolto al futuro, Doble aiuterà le *utility* a gestire il cambiamento – proprio come è stato fatto negli ultimi 100 anni.

OTTIMIZZARE LE PRESTAZIONI CON DOBLE



PRODOTTI & SOLUZIONI

- Sistemi di monitoraggio;
- Gestione degli *assets* aziendali;
- Test su sistemi/dispositivi di protezione;
- Test off-line;
- Servizi di consulenza e test;
- Test on-line;
- Sicurezza & conformità con le norme;
- Norme sull'olio.



Agenda

Questo *webinar* fornirà una panoramica dei seguenti argomenti:

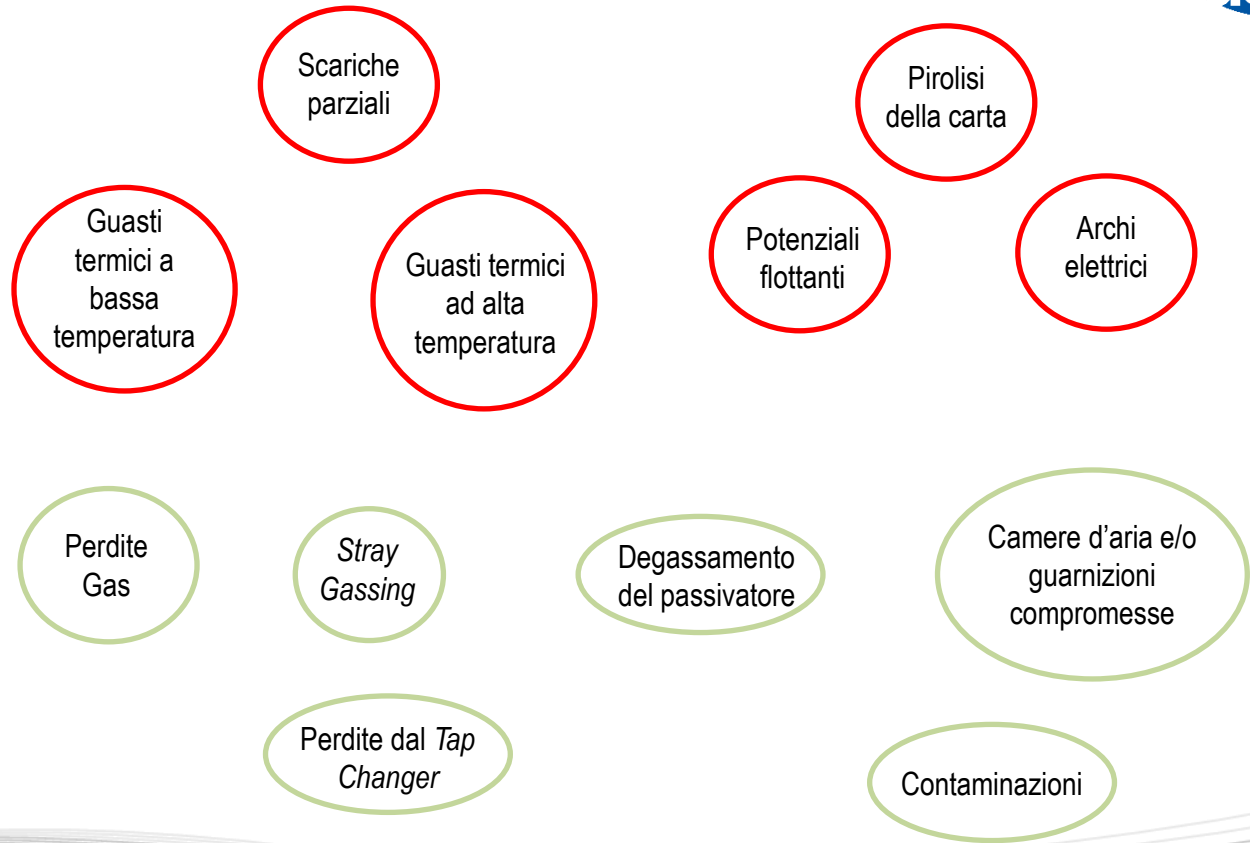
- Gas disciolti nell'olio (DGA);
- Ruolo ed importanza del livello di umidità in un sistema isolante;
- Test per valutare lo stato della carta all'interno del sistema isolante;
- Esempi applicativi;
- Q&A

Perché misurare i gas disciolti nell'olio

- Test diagnostico fondamentale nel settore;
- Ottimo indicatore di eventuali guasti presenti ;
- Utile per rilevare un'ampia gamma di problemi;
- Sensibile nelle prime fasi di sviluppo dei guasti;
- Fornisce informazioni sui materiali coinvolti nel guasto;
- Fornisce indicazioni sulla gravità del guasto e conseguenti azioni correttive;
- Può essere complesso – in alcuni casi i dati non facilmente interpretabili



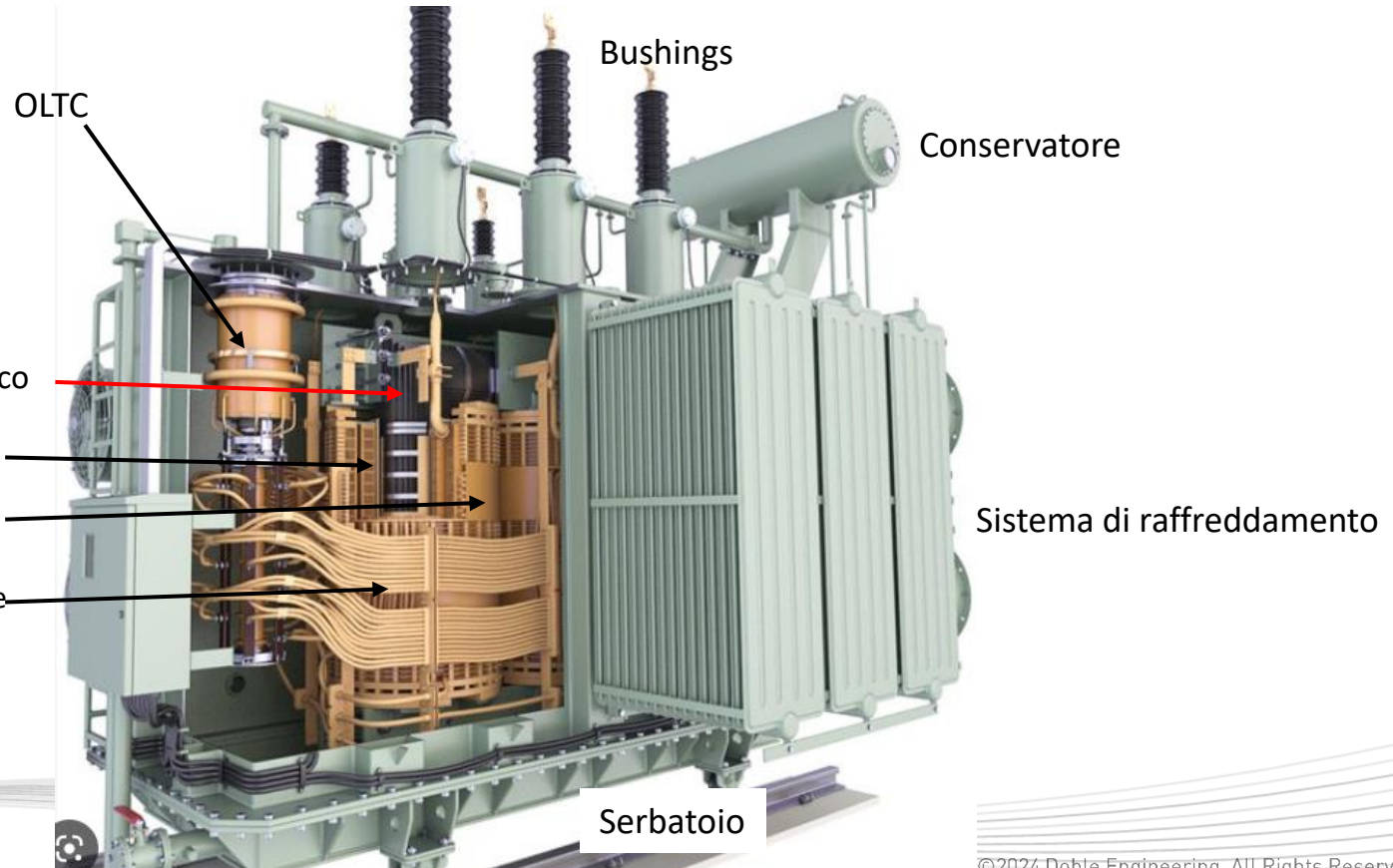
DGA - Guasti rilevati e problemi comuni



Trasformatore – Materiali responsabili della formazione di gas

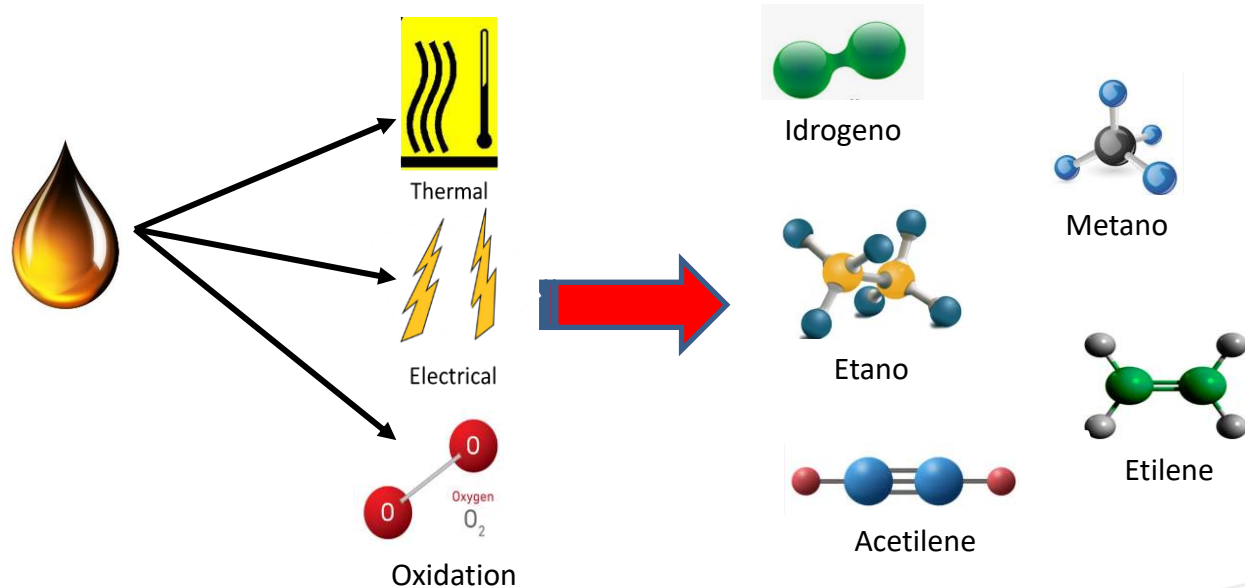


- Acciaio
- Vernici
- Guarnizioni
- Smalti
- Collanti
- Olio
- Vetroresine
- Carta
- Fenoli
- Rame
- Alluminio
- Ottone
- Acciaio inossidabile
- Stagno



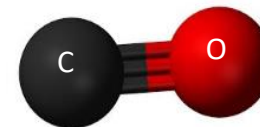
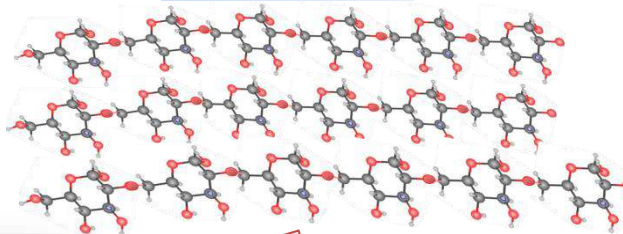


Come si formano i gas – Liquidi isolanti

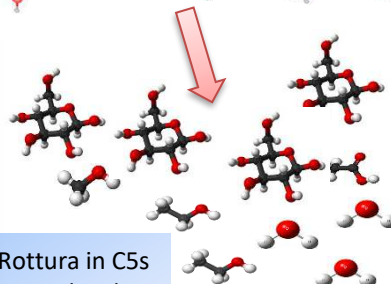


Generazione dei gas a partire dalla decomposizione della carta

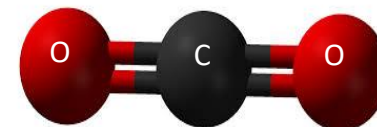
Cellulosa - glucosio



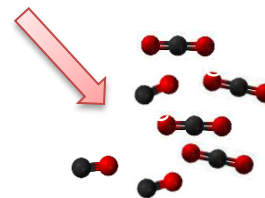
Monossido di Carbonio



Rottura in C5s
e molecole
più piccole



Anidride carbonica

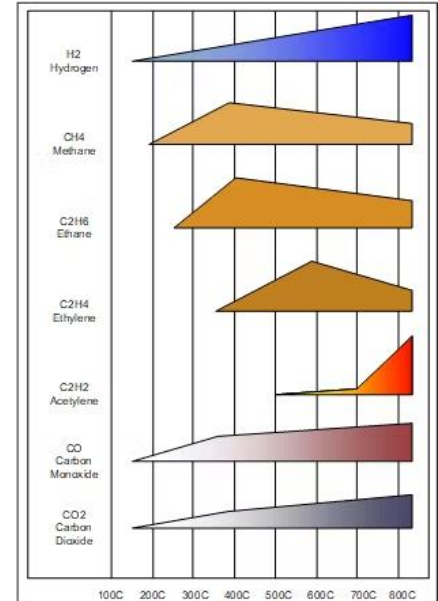


Rottura in ossidi di carbonio

Formazione dei gas: Oli Minerali



Temperatura [°C]	Gas	Simbolo	Energia richiesta kJ/mole
~120 ↓ >700	Idrogeno	H ₂	338
	Metano	CH ₄	338
	Etano	C ₂ H ₆	607
	Etilene	C ₂ H ₄	720
	Acetilene	C ₂ H ₂	960



<https://www.tdworld.com/test-and-measurement/article/20972772/building-a-transformer-health-index-part-2>



Profili di temperatura



Gas	Surriscaldamento dell'olio
Metano e/o etano, a volte idrogeno	Basse temperature, <300°C
Etilene (principalmente)	da 300 a 700°C
Etilene con un po' di acetilene	Punti caldi >700°C

Gas Combustibili e Non

Gas Combustibili	Simbolo	TCG
Idrogeno	H ₂	TCG = Total Combustible Gas ppm (parts per million) H₂ + CH₄ + CO + C₂H₆ + C₂H₄ + C₂H₂
Metano	CH ₄	
Monossido di carbonio	CO	
Etano	C ₂ H ₆	
Etilene	C ₂ H ₄	
Acetilene	C ₂ H ₂	

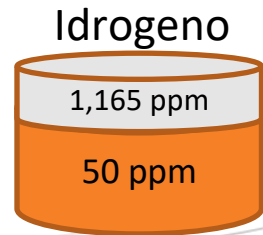
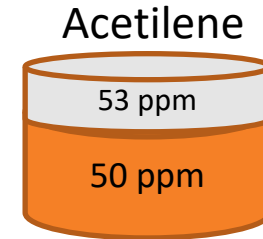
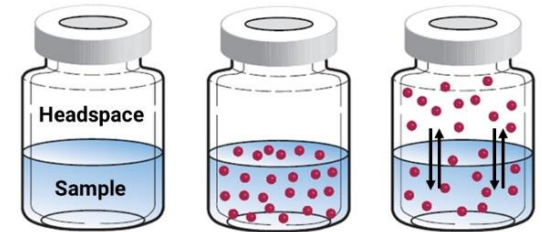
Gas Non - Combustibili	Simbolo
Anidride carbonica	CO ₂
Ossigeno	O ₂
Azoto	N ₂



Coefficienti di dissociazione (alla base del Metodo C)



Gas	Coefficienti di Ostwald
Ossigeno	0.138
Azoto	0.0745
Anidride carbonica	0.900
Monossido di carbonio	0.102
Idrogeno	0.0429
Metano	0.337
Etano	1.99
Etilene	1.35
Acetilene	0.938



Interpretazione dei dati (DGA)



- Normative – Quale sarebbe una concentrazione normale
- TCG (Total Combustible Gases) – Linee guida
- Key gases (Gas Chiave) – Identificazione del tipo di problema
- Proporzioni – Identificazione del tipo di problema (Rogers, IEC 60599, altri)
- Andamenti/Trends – C'è qualcosa di nuovo? Velocità di formazione dei gas
- Fingerprints (impronta digitale) – Comportamenti caratteristici dei gas in relazione al tipo di trasformatore
- Isolamento solido – Carta o altri materiali responsabili della formazione di gas
- *Stray gassing* – è un problema legato al surriscaldamento dell'olio
- Triangoli e pentagoni di Duval
- NEIs (Normalized Energy Index)



Interpretazione dei dati (DGA)



- Informazioni dai dati di targa inclusa l'età dell'asset
- Andamenti storici da dati precedenti
- Il TCG è aumentato improvvisamente?
- Il sistema è in sovraccarico?
- L'olio è già stato trattato?
- Ad un certo punto c'è stato un guasto in uno dei passanti (terminazioni) o nel trasformatore stesso?
- Qualora l'unità sia stata riparata a seguito di un guasto, l'olio è stato filtrato e/o degassato?

Limiti relativi ai gas disciolti (Varie fonti)



Criterio	H ₂	CO	Metano	Etano	Etilene	Acetilene	CO ₂	TCG
DOBLE	100	250	100	60	100	5 (1)*	10.000 –core** 20.000-shell**	610
IEEE C57.104 ⁺								
O ₂ /N ₂ ≤ 0.2	200	1100	100-200	70-250	40-175	2-4	7.000-14.000	
O ₂ /N ₂ > 0.2 (2019)	90	600	30-60	30-40	80-125	7	7.000-8.000	
IEC 60599 (ranges)	50-150	400-600	30-130	20-90	60-280	2-20 (No OLTC) 60-280 (Communicating OLTC)	3.800-14.000	

Valori calcolati a partire da norme statistiche o valori universalmente riconosciuti

*In generale una quantità di acetilene superiore ad 1ppm è da considerarsi anormale e necessita di ulteriori investigazioni

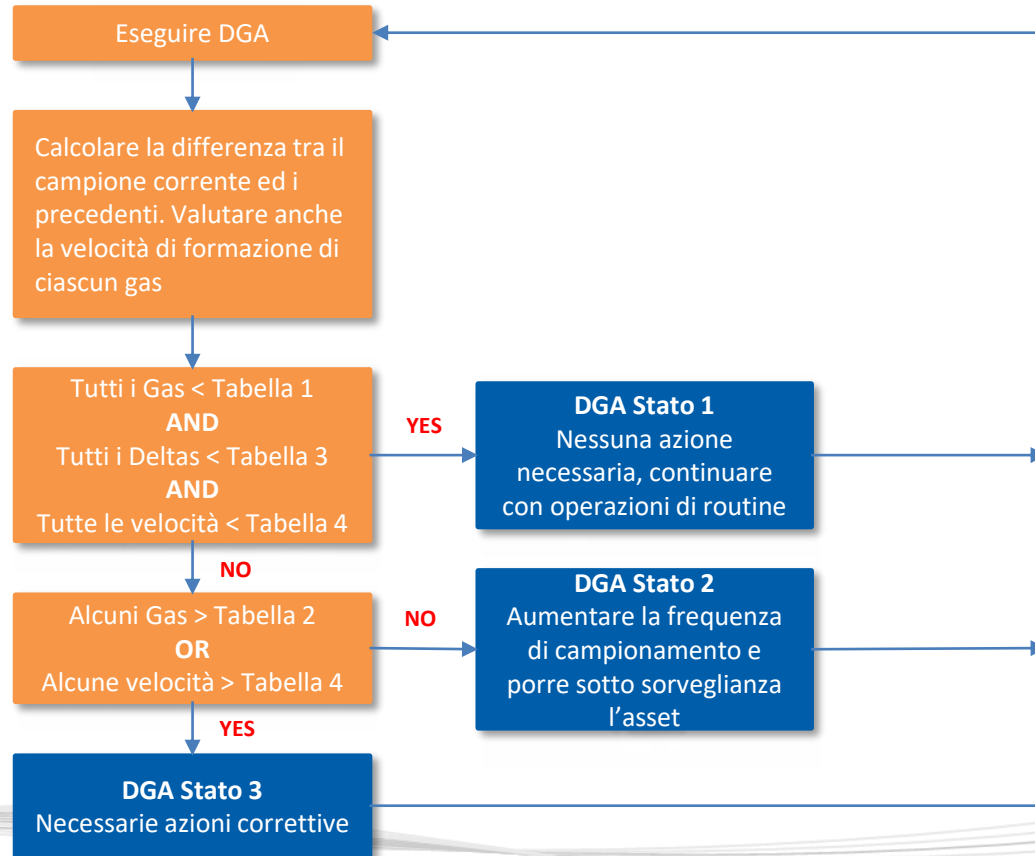
**Linee guida ottenute empiricamente

⁺IEEE 2019 Valori riferiti al 95° percentile, validi per trasformatori di diverse età

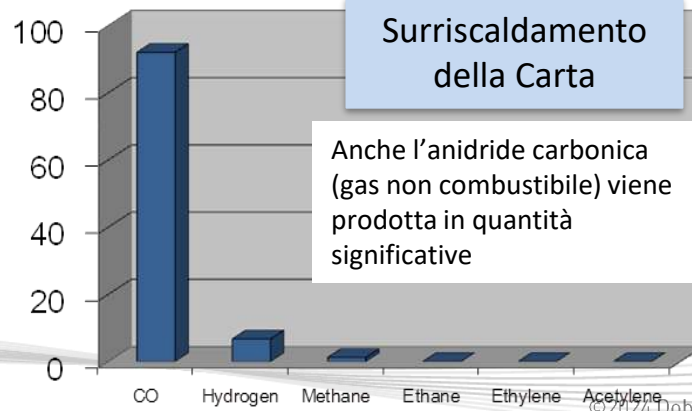
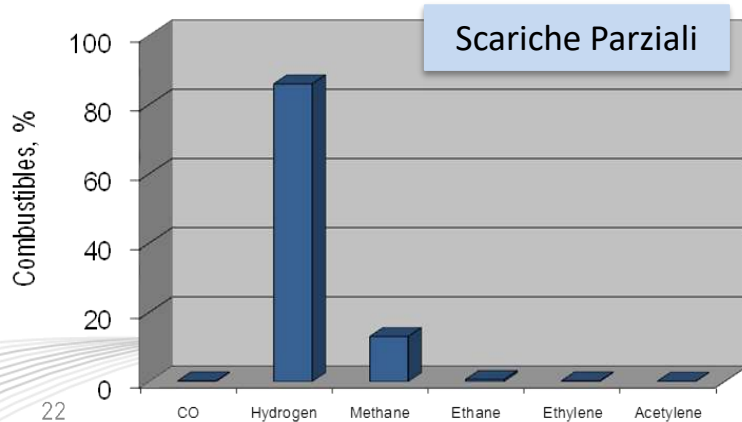
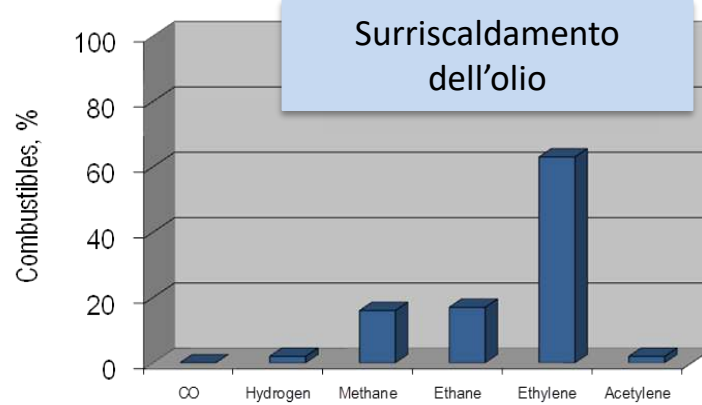
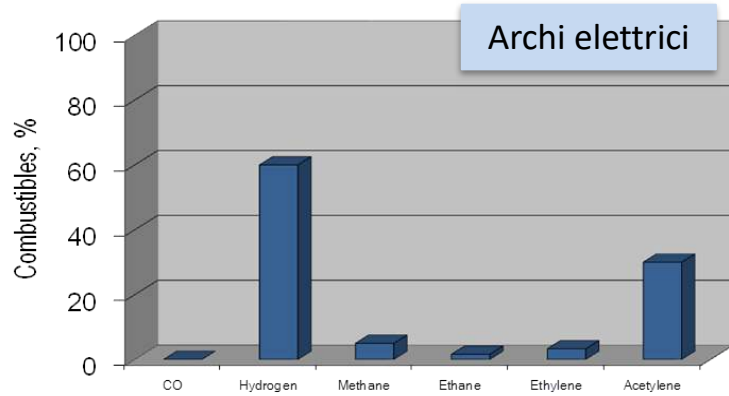
IEEE C57.104 2019

Stato	Definizione
DGA Stato 1	I risultati ottenuti dalla DGA sono da ritenersi accettabili. Continuare con le operazioni di routine
DGA Stato 2	Recente produzione di gas modesta oppure moderatamente elevata. Ricampionare per confermare e monitorare l'evoluzione dei gas.
DGA Stato 3	Elevati livelli di gas o produzione significativa e continua di gas. Procedere con opportune azioni correttive oppure considerare altre soluzioni (i.e. sistemi di monitoraggio, etc...).

IEEE C57.104 2019 Flowchart



Key Gases



Ossidi di carbonio e rispettive proporzioni

- Isolamento in cellulosa
- Trasformatore di tipo *Shell* > CO₂ rispetto al tipo *Core*
- CO₂ indesiderata proveniente dall'aria
- Rapporto CO₂/CO tendente ad 1 = guasti ad alta temperatura
- Concentrazioni alte di CO₂ e basse di CO - Perdite nel sistema di raffreddamento/ generale surriscaldamento dell'*asset*
- Andamento in diminuzione del rapporto di CO₂/CO indicazione di surriscaldamento della carta



Esempi applicativi - DGA

Problemi a seguito del riavvolgimento in fabbrica

- 1992 General Electric 115kV - trasformatore di trasmissione
- Riavvolgimento effettuato a seguito del danneggiamento dell'avvolgimento di bassa tensione della fase C dovuto ad un evento di scarica
- L'unità ha superato tutti i test elettrici e relativi all'olio dopo la riparazione.
- Il trasformatore viene energizzato e messo in esercizio con il 50% del carico per un anno.

Problemi dopo il riavvolgimento



Gas disciolti nell'olio	Dopo il guasto – Prima della riparazione, ppm	Dopo la riparazione, ppm	Un Anno dopo la riparazione, ppm
Idrogeno	151	0	26
Metano	23	0	74
Monossido di carbonio	394	3.0	84
Etano	5.8	0	30
Anidride carbonica	4,740	53	466
Etilene	6.9	0	99
Acetilene	7.3	0	tracce

Aumento della concentrazione di Etilene

- Osservato un continuo aumento della concentrazione di etilene a seguito di un piano di campionamento bimensile

Data di Campionamento	H ₂	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	C ₂ H ₆	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
08/14/2017	0	3700	12300	0	3.0	0	53	0	0
07/10/2018	20	7,070	73,900	64	64	28	385	95	0
08/14/2018	26	6,010	78,600	74	84	30	466	99	Tracce
08/30/2018	24	6,810	81,400	75	81	32	513	103	Tracce
09/17/2018	24	5,770	75,800	77	83	34	540	107	Tracce
09/28/2018	25	9,980	95,600	82	92	36	568	114	0
10/16/2018	25	5,120	77,400	82	92	35	543	111	Tracce

Problemi dopo il riavvolgimento

- Bordi dei lamierini, essendo piegati, fanno contatto con le pareti del serbatoio
 - Separatori in cartone mancanti
- Aumento dell'etilene dovuto al contatto involontario con la terra/conseguente circolazione di correnti

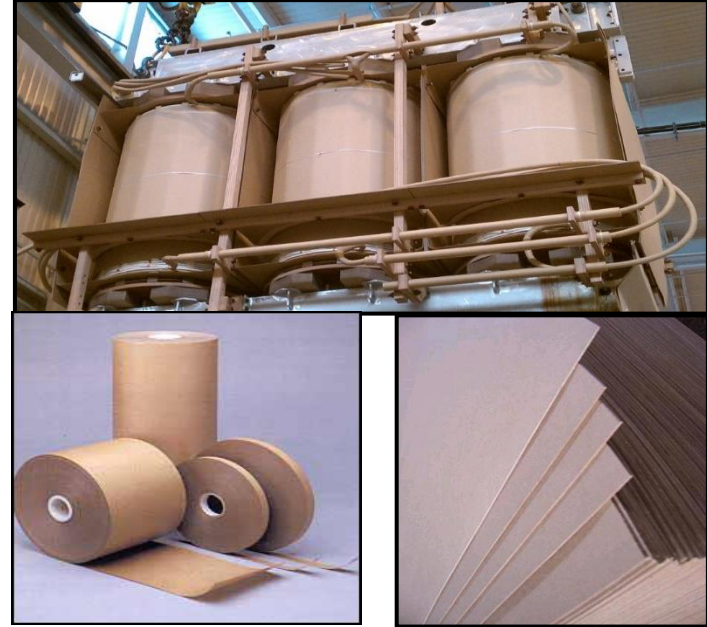


Perché è importante valutare il livello di umidità del sistema isolante



Dove si concentra l'acqua

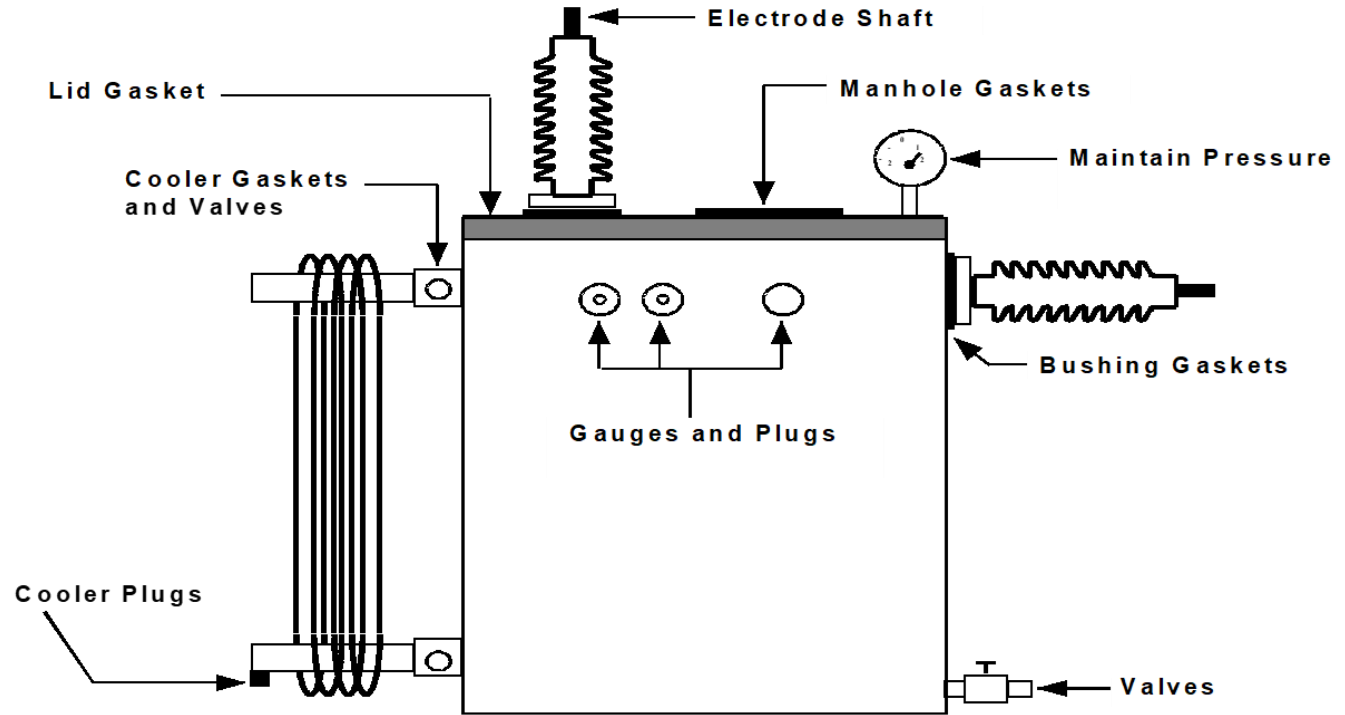
- La maggior parte dell'acqua si trova nell'isolamento solido a base di cellulosa
 - Legno
 - Carta
 - Cartone
- La quantità nell'olio è spesso <1% del totale



Punti di ingresso dell'acqua in un trasformatore

- Residui dopo le fasi di:
 - Fabbricazione
 - Installazione
 - Manutenzione
- Perdite
 - Attraverso punti deboli del trasformatore
- Sistemi di conservazione
 - Essiccatori inefficaci- conservatori aperti
 - Rottura membrana di separazione– conservatori sigillati
- Sottoprodotti della degradazione della carta

Punti di ingresso dell'acqua





Qual è l'importanza dell'acqua



- Quattro motivi principali
 - La rigidità dielettrica è correlata al contenuto di acqua
 - La rigidità dielettrica diminuisce al crescere della concentrazione di acqua
 - La resistenza dell'isolamento alla deformazione diminuisce al crescere della concentrazione di acqua
 - La velocità di invecchiamento della carta è direttamente proporzionale al contenuto di acqua
 - Il rischio di formazione di bolle durante i sovraccarichi dipende dal contenuto di acqua nella carta
 - Il rischio di condensazione durante i raffreddamenti aumenta all'aumentare del contenuto di acqua.

Solubilità

- La solubilità dell'acqua nell'olio (Saturazione del 100%) viene definita come la quantità massima di acqua disciolta che l'olio è in grado di contenere ad una specifica temperatura
- La solubilità cambia significativamente con la temperatura
- All'aumentare della temperatura, la quantità di acqua che può essere contenuta nell'olio aumenta
- Ad esempio, la solubilità dell'acqua nell'olio a 10°C è 36 ppm, mentre a 90°C è 592 ppm
- Mano a mano che l'olio invecchia ed accumula grandi quantità di acidi e altri composti polari, la solubilità aumenta

Solubilità dell'acqua nei liquidi isolanti, ppm



Temp, °C	Oli minerali	Oli siliconici	Askarel	Esteri Naturali	Esteri Sintetici
0	22	88	43	631	1207
10	36	125	63	787	1452
20	55	174	91	966	1726
30	83	237	127	1171	2028
40	122	316	175	1402	2358
50	174	414	236	1661	2717
60	243	533	313	1948	3104
70	333	678	408	2263	3518
80	448	849	523	2607	3960
90	594	1051	662	2981	4428
100	775	1286	827	3385	4921



Esempio

- Un campione di olio è stato prelevato da un trasformatore:
 - Temperatura dell'olio nella parte alta 85°C
 - 30 ppm di acqua nell'olio
- Per determinare la saturazione relativa
 - Quantità di acqua misurata (30 ppm)
 - Diviso la solubilità a 85°C (517 ppm)
 - Espressa in termini percentuali (x100)

$$\text{Saturazione Relativa (RS)} = \left(\frac{30}{517} \right) \times 100\% = 5.8\%$$

Bassa %RS e alta %RS nell'olio

Contenuto d'acqua
30 ppm

Temperatura, 50°C

Bassa RS

Soluzione limpida



Contenuto d'acqua
30 ppm

Temperatura, 0°C

Alta RS

Soluzione torbida

Rigidità dielettrica

Si riduce notevolmente quando:

- Il contenuto di acqua nella carta/cartone cresce dal 2% fino al 4%
- La tensione di scarica dell'isolante liquido si riduce proporzionalmente alla saturazione relativa dell'acqua
 - Nello specifico crolla del 50% quando RS è circa il 50%

Condensazione

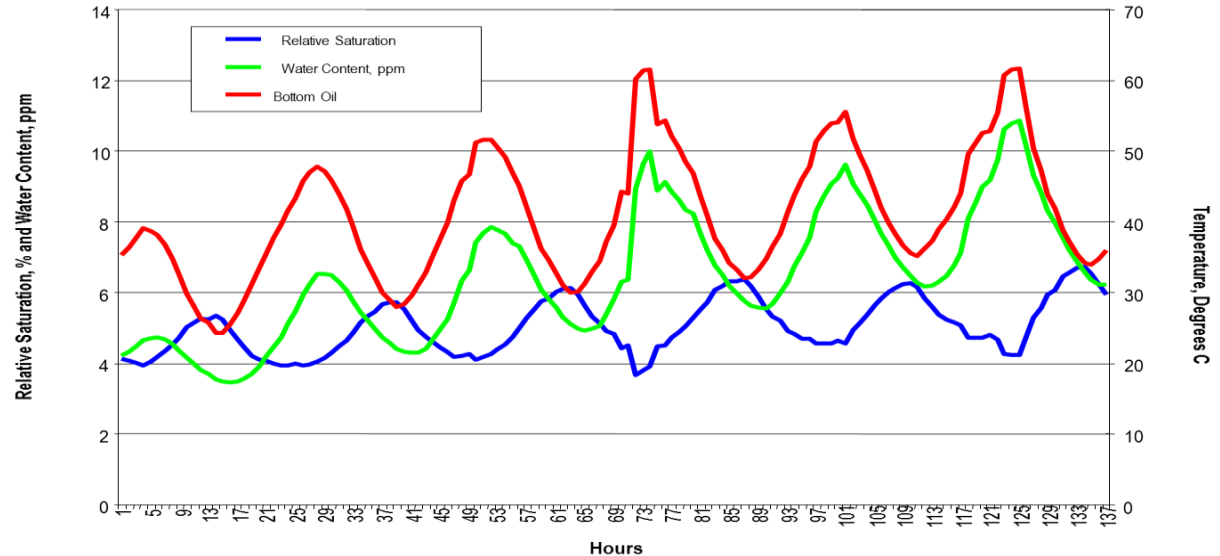
- Periodo di raffreddamento durante i transitori termici
 - L'acqua migra dalla carta all'olio all'aumentare della temperatura di esercizio (conseguenza del carico e della temperatura ambiente)
 - Ad elevate temperature, l'umidità migra più velocemente e la solubilità dell'acqua nell'olio cresce a sua volta
 - Durante i raffreddamenti, l'acqua rimane principalmente nell'olio per un lungo intervallo di tempo in quanto la diffusione nella carta è lenta ... anche la solubilità diminuisce
 - Elevate quantità di acqua ... Alti valori di RS ... Basse tensioni di scarica
 - Condensazione molto probabile

Elevate quantità di acqua nell'olio – Fasi di raffreddamento durante i transitori termici

- Maggior suscettibilità nei trasformatori con
 - elevato contenuto di umidità ($> 1.5\%$ nella carta)
 - cicli termici
 - cicli termici rapidi e con elevate escursioni
 - lavorano a basse temperature

Continue rilevazioni nei trasformatori

- Il contenuto di acqua non è fisso ma cambia costantemente in base a molteplici fattori (interni ed esterni)
- Necessità di un continuo monitoraggio



La rigidità dielettrica di un liquido isolante è correlata meglio alla saturazione relativa che alla concentrazione in ppm

Test per valutare le condizioni dell'isolamento in carta e cartone pressato

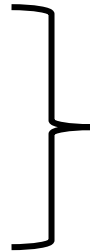
Materiali isolanti

- Principali componenti isolanti

- Carta
- Olio minerale

- Fattori di invecchiamento

- Calore
- Acqua
- Ossigeno



- Controllo di tali fattori per ridurre l'invecchiamento
- Effetti differenti su Carta e Olio
- Carta componente più critico
- Olio facilmente sostituibile

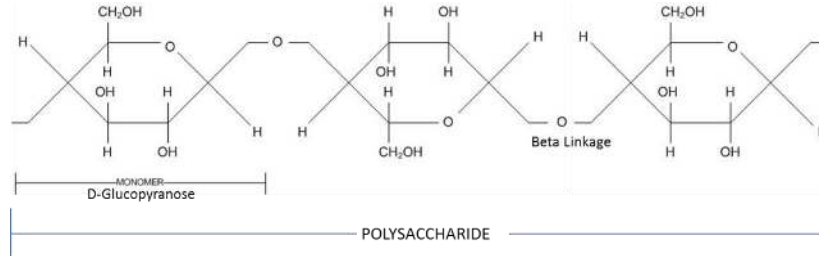
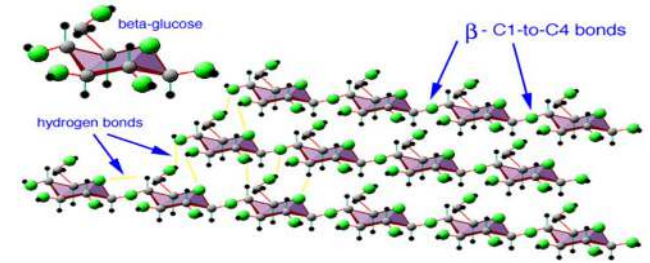
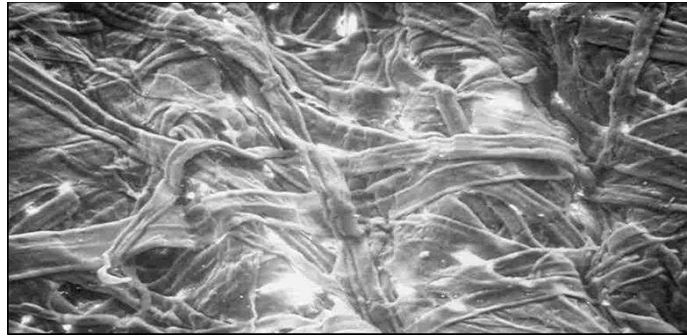
Cellulosa

- La vita utile stimata dal produttore, operando nei range di prestazioni riportati in targa, è di circa 20 anni, molti trasformatori superano i 30 anni.
- Cellulosa
 - Disponibile ed economica
 - Conserva le proprietà isolanti quando si deteriora
 - Facilmente lavorabile
- Vita tipica di 40+ anni
 - Quando le unità chiuse/sigillate operano entro i valori nominali riportati in targa
- Cause di invecchiamento della carta in ordine di priorità
 - Alte temperature
 - Acqua
 - Ossigeno
 - Catalizzatori di rame, contaminanti





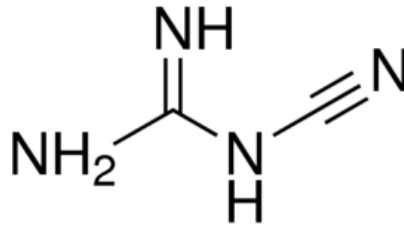
Cellulosa – Struttura chimica



- Lunghezza media della catena: 1000 fino a 1300 unità
- Invecchiamento causa la rottura in catene più corte

Caratteristiche di invecchiamento - Carta

- Termicamente instabile
 - Ad ogni aumento di 6-8°C, vita dimezzata
 - Cinetica che segue la relazione di *Arrhenius*
 - $K_0 = Ae^{B/T}$
 - Carta termicamente migliorata (TU) più stabile della carta Kraft



Temperatura °C	Vita stimata fino a DP 200, TU Kraft (anni)	Vita stimata fino a DP 200, Kraft (anni)
40	110,838	22,918
60	6,229	1,291
80	485	101
90	151	31
100	50	10
110	17	3.6
140	1	0.2
180	0.04	0.01

Caratteristiche di invecchiamento Carta

Acqua

- Effetti significativi
- Velocità di degradazione al variare del contenuto di acqua
 - da 0.5% a 1.0%: vita dimezzata
- TU Kraft più stabile della carta Kraft

Ossigeno

- Stabilità all'ossidazione
- Sistemi di conservazione
- TU Kraft più stabile della carta Kraft

Invecchiamento dei materiali

- Temperatura ambiente - influenza la temperatura operativa dell'unità
- Collocamento/posizionamento del trasformatore (ventilazione)
- Carico, operazioni delle pompe, sistema di raffreddamento
- Stabilità intrinseca dei materiali
- Posizione all'interno dell'unità
- Condizioni di guasto imminente
- Fattori non uniformi nel tempo

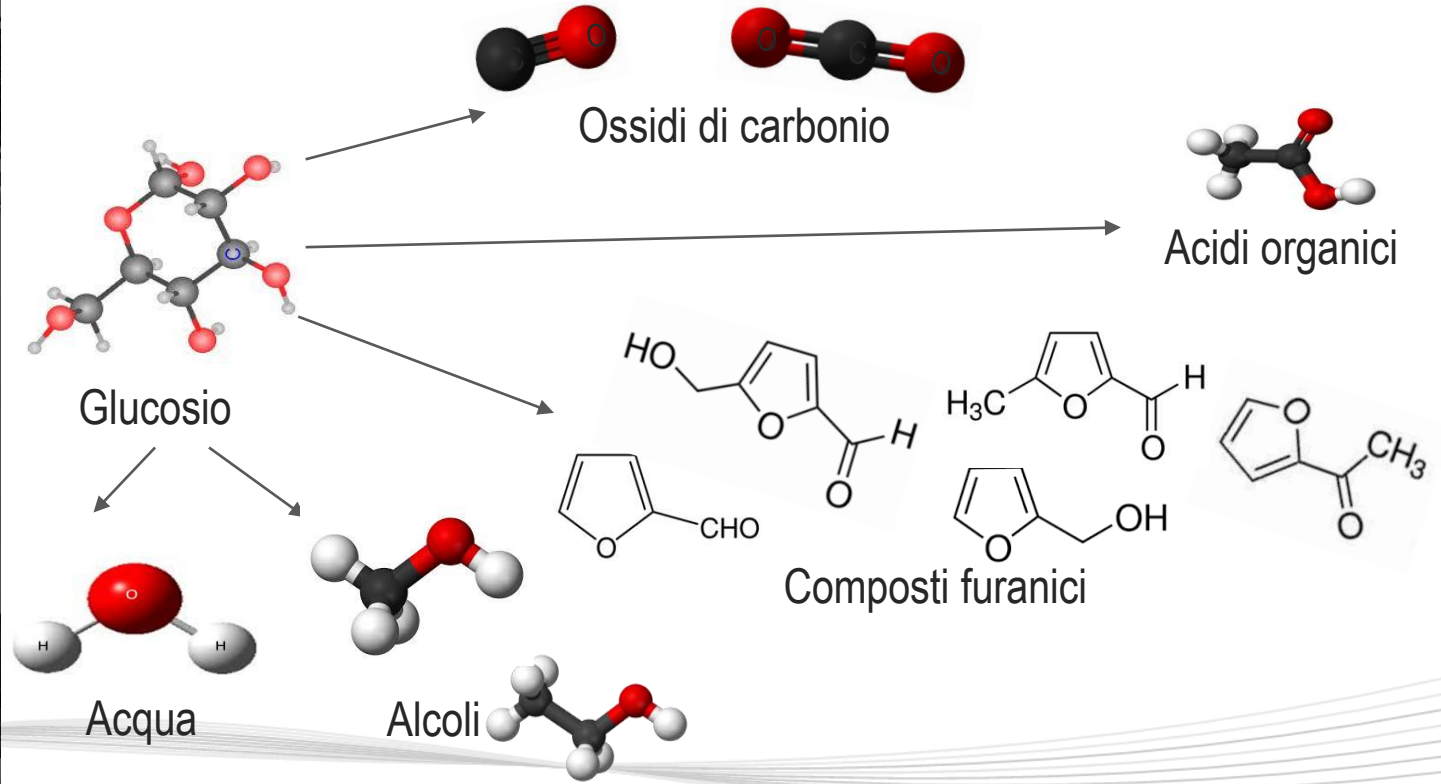




Test indiretti relativi alla degradazione della cellulosa



Generalmente effettuati tramite campionamento dell'olio





Coefficienti di dissociazione



- Rapporti di dissociazione tra la carta (dove i composti furanici si generano) e l'olio
- Temperatura
- La carta umida riduce la dissociazione nell'olio
- Qualità dell'olio (mano a mano che l'olio si degrada, ha più composti polari e aumenta la ripartizione dei composti furanici nell'olio)
- Il tasso/velocità di generazione può dipendere dalla quantità di carta nel trasformatore e dalla velocità con cui cambia la temperatura

Gli effetti delle scariche elettriche

- I composti furanici non sono rilevati in quantità elevate quando i materiali a base di cellulosa sono sottoposti a scariche elettriche prolungate
 - Isolamento a base di cellulosa/solido gravemente danneggiato a livello locale
 - Monossido di carbonio prodotto proporzionalmente alla quantità di carta coinvolta
- Teoria: le scariche elettriche inducono temperature molto alte ($>1200^{\circ}\text{C}$)
 - Vengono generati composti furanici
 - Ma subito si degradano a causa della temperatura



Precauzioni



- La carta Kraft in un conservatore aperto generalmente fornisce il trend migliore: si formano quantità più elevate di composti furanici
- È difficile dire se concentrazioni elevate provengano da una ridotta quantità di isolamento ad elevate temperature oppure da una estesa massa coinvolta a bassa temperatura.
- Il trattamento dell'olio del trasformatore altererà le concentrazioni – campionare prima e dopo tale procedura (a distanza di alcuni mesi) per determinare un riferimento.

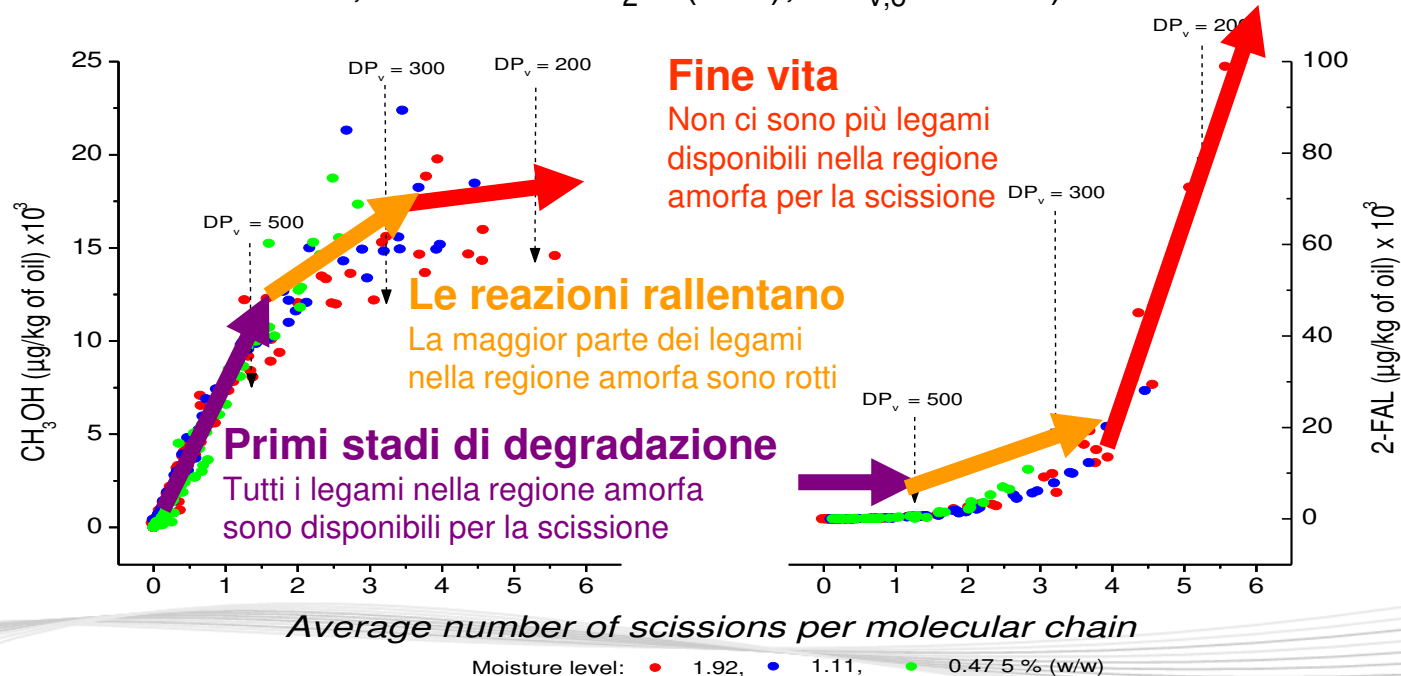
Rilevamento degli alcoli

- Metanolo ed etanolo
- Svantaggi della 2-FAL
 - Con la carta TU rilevate concentrazioni molto ridotte
 - Con la carta Kraft standard:
 - Quantità di 2-FAL influenzata dal contenuto di acqua nella stessa

Invecchiamento in laboratorio

Marcatore più realistico del modello di invecchiamento

Provini di carta Kraft standard invecchiati a diverse condizioni di temperatura e umidità (da 60 a 120°C – da 0,47 a 1.92% H₂O (w/w), DP_{v,o} = 1168)



Courtesy of IREQ, Varennes, Canada



Confronto tra Metanolo e composti furanici



- Basandosi su esperimenti in laboratorio
 - Il Metanolo potrebbe essere più affidabile della 2-FAL
 - Rilevato sia per la carta Kraft standard sia per quella TU
 - Non influenzato dalla quantità di umidità nella carta
 - Sensibile sin dai primi stadi di decomposizione della cellulosa
 - Necessario normalizzare i valori a 20°C
- Per la misurazione su apparati elettrici
 - Maggiori informazioni per confrontare gli apparati e individuare i problemi (Asset Management)
 - Maggiori informazioni per la decisione di manutenzione
 - Stessi problemi della 2-FAL qualora l'olio venga trattato
 - Bisogna prelevare i campioni con opportune siringhe per non perdere le sostanze volatili quali gli alcoli



Ridurre gli effetti dell'invecchiamento

- Mantenere il sistema asciutto e sigillato – controllare le guarnizioni, la bombola dell'azoto, la pressione dell'azoto
- Lavorare a temperature minori
- Valvole in posizione corretta, pulizia del sistema di raffreddamento, adeguata ventilazione
- Individuare eventuali ostruzioni nel sistema di raffreddamento mediante termografia ad infrarossi

Esempi – Valutazione dello stato della carta

Elevate concentrazioni di composti furanici e ossidi di carbonio



Targa del trasformatore	Dettagli
Produttore	Sconosciuto
Tipo di apparato	Trasformatore di messa a terra, di tipo <i>core</i>
Potenza MVA	11.5
Livello kV	33
Sistema di conversione	Unità sigillate in azoto
Volume di olio	Sconosciuto
Tipo di carta	Kraft
Carico	Ciclicamente elevato
Anno di produzione	Attorno al 1944, circa 50 anni di servizio
Condizioni	Messo fuori servizio prima del guasto, rilevato fumo durante un temporale, temperatura misurata oltre i 200°C

Elevate concentrazioni di composti furanici e ossidi di carbonio



Gas disciolti nell'olio	ppm
Idrogeno	1,980
Ossigeno	sconosciuta
Azoto	sconosciuta
Metano	318
Monossido di carbonio	2,990
Etano	98
Anidride carbonica	58,300
Etilene	42
Acetilene	0

Composti furanici	ug/L
2-furfural	35,124

- Trasformatore di messa a terra
- Fusibili nel lato di alta bruciati durante alcune operazioni di commutazione a causa di squilibri nelle correnti di tutte e tre le fasi
- Probabilmente verificatosi diversi giorni a settimana per almeno 2 anni

Elevate concentrazioni di Etanolo



Targa del trasformatore	Dettagli
Produttore	Magnetek
Tipo di apparato	Trasformatore, di tipo <i>core</i>
Potenza MVA	22.4
Livello kV	138
Sistema di conversione	Unità sigillate in azoto
Volume di olio	4050 galloni (18400 litri)
Tipo di carta	Carta TU
Carico	Sconosciuto
Anno di produzione	1986
Condizioni	Mai nessun guasto - Sotto osservazione poiché la qualità dell'olio è deteriorata rapidamente negli ultimi 2 anni

Elevate concentrazioni di Etanolo

Gas disciolti nell'olio	ppm
Idrogeno	139
Ossigeno	3,270
Azoto	36,800
Metano	123
Monossido di carbonio	825
Etano	104
Anidride carbonica	8,060
Etilene	30
Acetilene	0

Composti furanici	ug/L
5-HMF	< LD
FOL	< LD
2-FAL	255
AF	29
MF	< LD

Alcoli	ppb
Metanolo	200
Etanolo	1,313

- Il livello di etanolo indica un possibile surriscaldamento della cellulosa dovuto alle alte temperature > 300°C, altri test no



Grazie!

Sofia Gandolfi
Service Engineer

+39 344 274 0810

sgandolfi@doble.com | www.doble.com



©2024 Doble Engineering. All Rights Reserved.