



# Trasformatori "Verdi"

La tecnologia degli associati ANIE  
a favore della Sostenibilità.








*Nelle nuove filosofie introdotte a livello Europeo e Mondiale per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> e preservare le risorse ambientali, enfatizzando un concetto di Sostenibilità ed Economia Circolare, l'attenzione del Mercato Internazionale, e di conseguenza dei produttori di trasformatori, si è focalizzata su possibili nuove tecnologie e/o sfruttamento di materie prime che vanno in questa direzione e che comprendono certamente anche l'utilizzo di materiali alternativi a basso impatto ambientale come gli esteri naturali.*

Questo tipo di isolanti fluidi a loro volta ha influenzato la progettazione nel campo dei trasformatori, in particolare per quanto riguarda gli aspetti dielettrici e termici.

Gli esteri naturali garantiscono un aspetto di sicurezza a livello rischio incendio decisamente maggiore degli oli minerali, oltre ad avere una caratteristica di elevatissima biodegradabilità nell'ambiente.

Per contro, considerando l'aspetto manifatturiero dei trasformatori, la prima sperimentazione nell'uso di esteri naturali ha avuto un forte impatto sul processo di produzione, soprattutto in termini di tempi di attraversamento che sono aumentati in modo significativo.

Questo aumento è dovuto essenzialmente ai seguenti fattori:

-  poca "confidenza" col nuovo prodotto;
-  adattamento/sostituzione delle attrezzature di lavoro (es. impianti per il trattamento dell'olio);
-  interazione tra i materiali e gestione delle caratteristiche critiche del prodotto.








## INTERAZIONE TRA I NUOVI MATERIALI E LA PROGETTAZIONE/COSTRUZIONE DEI TRASFORMATORI

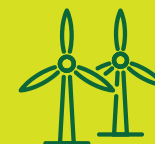
L'uso di esteri naturali, oltre alle già citate precauzioni dielettriche e termiche per quanto riguarda la progettazione, richiede una notevole attenzione per la conservazione del prodotto dovuta all'igroscopicità degli esteri stessi. Oltre a questo aspetto i tempi di imbibizione dei diversi materiali isolanti devono essere considerati rispetto a quelli già noti con l'uso di oli minerali. Infine, anche il sistema di trattamento ha caratteristiche differenti rispetto a quello utilizzato per gli oli minerali a causa della diversa viscosità dell'estere; inoltre andranno prese le dovute cautele per evitare la contaminazione tra i diversi liquidi. Tutti questi aspetti si riflettono in tempi e costi diversi nel processo di produzione dei trasformatori.

### CAMBIO DEI DRIVERS

Nel corso degli anni ci sono stati cambiamenti importanti da un punto di vista tecnologico, sociale ed economico che hanno influenzato le scelte di mercato. Alcuni di questi driver sono riepilogati di seguito:

-  nuovi materiali (esteri naturali, GOES ad alta permeabilità, sistemi di monitoraggio elettronico, ecc.);
-  nuove applicazioni (impianti HVDC, impianti solari, impianti eolici e parchi eolici offshore, etc.);
-  aspetti ambientali [Regolamento sulla progettazione ecocompatibile (UE 548/2014 - UE 1783/2019), tendenze politiche, valutazione del ciclo di vita (LCA), impronta di carbonio (Carbon Footprint), Certificazioni ambientali di Prodotto (EPD), Green Deal, etc.];
-  concorrenza e sviluppo del mercato (aumento delle esportazioni asiatiche, etc.).

CO<sub>2</sub> ✓





## PRIORITÀ

Nel mondo di trasformatori è in corso un adattamento a questi nuovi driver che hanno iniziato un cambiamento di priorità orientando i prodotti e lo sviluppo del mercato nei prossimi anni.

< 2000	2010	> 2020
Tecnico Commerciale Ambientale	Commerciale Tecnico Ambientale	Ambientale Commerciale Tecnico

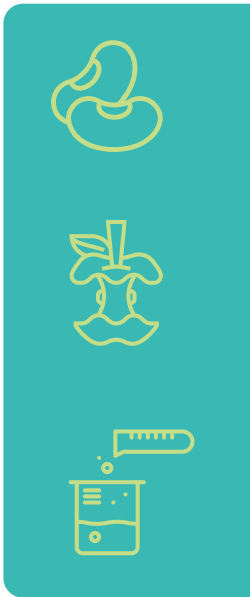
In un mondo sempre più sensibile al rispetto dell'ambiente, le Istituzioni ed il Mercato Internazionale hanno incentivato i costruttori di trasformatori a trovare soluzioni alternative per innovare le tecnologie di produzione e utilizzare materiali e processi a basso impatto ambientale.

## ESTERI NATURALI

Gli esteri naturali destinati all'uso in trasformatori e apparecchiature elettriche sono prodotti generalmente da fonti rinnovabili come gli oli vegetali e consistono sostanzialmente in trigliceridi. L'estere naturale presenta le seguenti principali caratteristiche:

- temperatura di "flash point" molto elevata, ovvero superiore ai 300°C contro i 140÷160°C dell'olio minerale. Ciò permette di ridurre praticamente a zero le possibilità di innesco incendio a seguito di un guasto;
- elevatissima biodegradabilità (per effetto della scarsa resistenza alla ossidazione);
- elevato potere solvente verso l'acqua;
- permittività dielettrica  $\epsilon_r = 3.2$ , contro  $\epsilon_r = 2.2$  dell'olio minerale;
- alta viscosità, ovvero 30÷40 mm<sup>2</sup>/sec contro i 7÷10 mm<sup>2</sup>/sec dell'olio minerale.

Inoltre sono sostanze essenzialmente non pericolose per la salute umana e l'ambiente, sono una risorsa rinnovabile, a fine vita possono essere riutilizzati come sottoprodotti (es. biodiesel) rispondendo ai requisiti dell'Economia Circolare, e sono caratterizzati da un'elevata biodegradabilità che fa presupporre un minor impatto ambientale.





## TRASFORMATORI “VERDI”

Nel mondo di trasformatori è in corso un adattamento a questi nuovi driver che hanno iniziato un cambiamento di priorità orientando i prodotti e lo sviluppo del mercato nei prossimi anni.

### ASPETTI GENERALI

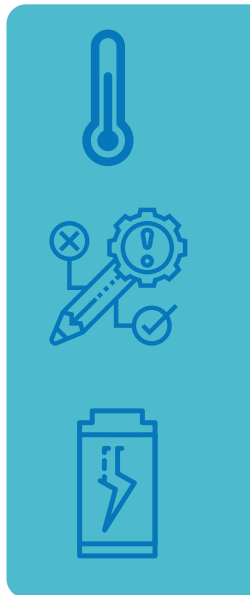
I fluidi dielettrici in estere naturale offrono senza dubbio vantaggi in termini di sicurezza antincendio, ambientali e di sostenibilità rispetto all’olio minerale.

Consideriamo le caratteristiche di invecchiamento e i limiti di temperatura della carta nell’estere naturale, trovati nelle Norme IEC e IEEE dei trasformatori per alte temperature (es. IEC 60076-14), ed analizziamo gli esteri naturali nel contesto dell’isolamento dei trasformatori.

I limiti di temperatura dell’Hot Spot, nei sistemi di isolamento in estere naturale/isolante solido (es. carta Kraft o TUK), sono discussi in termini di applicazioni pratiche nei trasformatori.

Una di queste applicazioni è relativa alla possibile progettazione di un trasformatore in grado di sfruttare una temperatura dell’Hot Spot più alta.

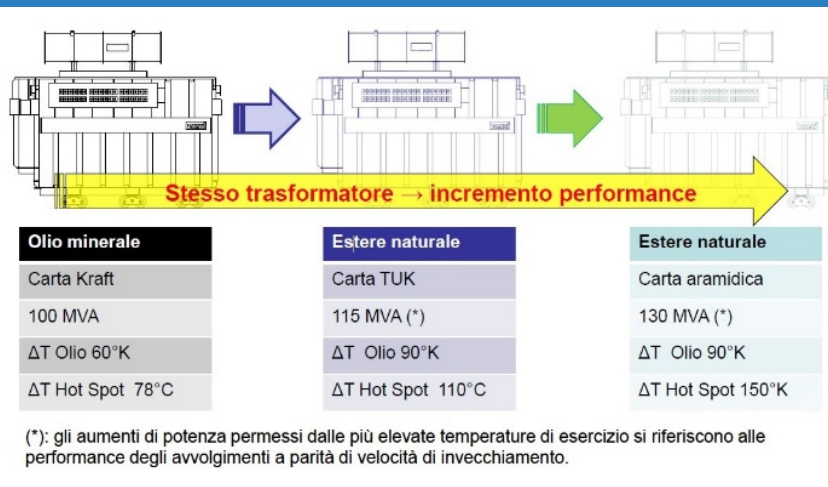
Questa progettazione consente un’ottimizzazione, in termini di quantità di materiale utilizzato, rendendo il trasformatore meno pesante senza una riduzione della potenza nominale (in kVA o MVA) e con la stessa aspettativa di vita di un trasformatore in olio minerale di pari potenza di targa.



Olio minerale	Estere naturale	Estere naturale
Carta Kraft	Carta TUK	Carta aramidica
100 MVA	100 MVA	100 MVA
$\Delta T$ Olio 60°K	$\Delta T$ Olio 90°K	$\Delta T$ Olio 90°K
$\Delta T$ Hot Spot 78°C	$\Delta T$ Hot Spot 110°C	$\Delta T$ Hot Spot 150°K

La riduzione di pesi e dimensioni nel caso esposto sono valutabili di volta in volta avendo le caratteristiche della macchina richiesta (tensione, sistema di raffreddamento, etc.).

Un'altra opzione è relativa al possibile design di un trasformatore che, a parità di potenza con uno in olio minerale, lavorando alle stesse temperature utilizzate per i trasformatori in olio minerale, avrebbe una capacità di sovraccarico ed un'aspettativa di vita utile molto più elevate.



Nel progetto di un trasformatore in estere naturale bisogna considerare anche le caratteristiche di maggior viscosità e maggior grado di ossidazione di questo fluido rispetto all'olio minerale.

Queste particolarità si traducono in un nuovo assetto del sistema di raffreddamento e nella necessità di evitare un possibile ingresso di umidità dall'esterno che vada a "contaminare" l'estere naturale.

Quest'ultimo aspetto è facilmente ovviabile nei trasformatori da distribuzione "ermetici" che evitano già questo tipo di problema per le loro caratteristiche intrinseche di progetto ed è facilmente risolvibile anche per gli altri trasformatori prevedendo l'utilizzo di una membrana posta nel conservatore del liquido isolante.

Un ulteriore aspetto da tenere in considerazione, a livello progettuale, è la compatibilità dell'estere naturale con alcuni materiali isolanti (es. guarnizioni) e la scelta di alcuni componenti idonei per l'utilizzo con questo tipo di fluido (es. OLTC, sistema di raffreddamento, isolatori).

I trasformatori che operano in climi freddi possono avere requisiti speciali. La diminuzione del punto di saturazione dell'acqua con olio minerale può comportare una riduzione della sua rigidità dielettrica.

Gli esteri naturali hanno molte meno probabilità di subire una diminuzione della resistenza dielettrica a bassa temperatura, poiché il punto

di saturazione dell'acqua dell'estere naturale è molto più alto di quello dell'olio minerale.

Gli esteri naturali, tuttavia, gelificano a basse temperature, pertanto nel loro uso in queste condizioni vanno prese adeguate precauzioni secondo le indicazioni fornite dai produttori, ed è comunque necessario considerare, nella scelta dei componenti, i movimenti meccanici come l'azionamento di un interruttore o l'inserzione di una pompa dell'olio.

### DETTAGLI PROGETTUALI

La più elevata permittività dielettrica e la più elevata viscosità implicano che macchine isolate con fluidi di questo tipo abbiano un comportamento dielettrico e termico apprezzabilmente diverso da quelle in olio minerale.

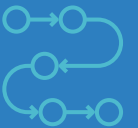
Ma non solo la parte progettuale deve adattarsi a queste caratteristiche. Per esempio il processo di trattamento del fluido ed i tempi di imbibizione dei materiali isolanti sono apprezzabilmente diversi.

### DIMENSIONAMENTO ELETTRICO

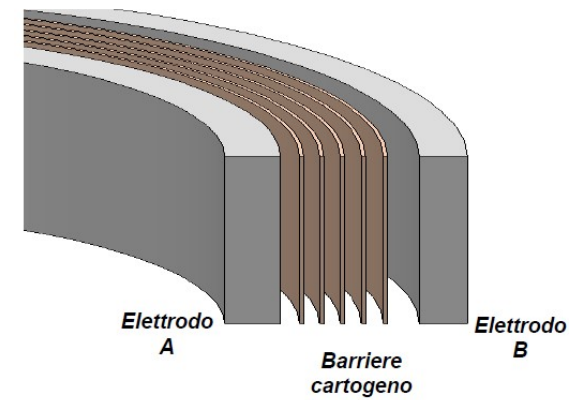
In applicazioni in corrente alternata la distribuzione del campo elettrico all'interno di una struttura isolante è di tipo capacitivo, ovvero imposta dalla permittività dielettrica del mezzo isolante.

	OLIO MINERALE	ESTERE NATURALE
Permeattività dielettrica del fluido	2.2	3.2
Permeattività dielettrica del cartogeno immerso nel fluido	4.4	5.5

Il passaggio da olio minerale a estere naturale comporta quindi una revisione delle strutture isolanti tra avvolgimenti ed elettrodi.



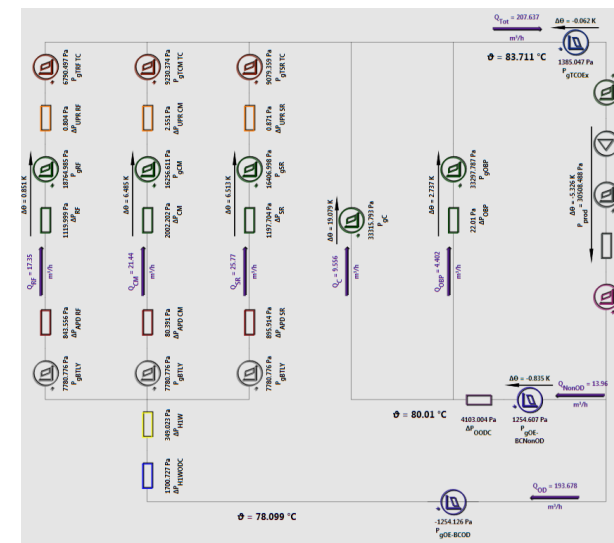


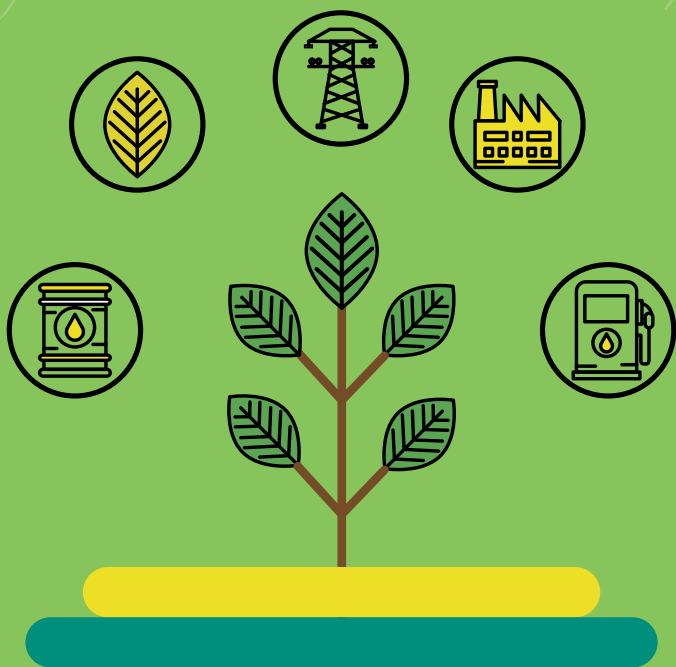


Ovviamente anche tutti i componenti del trasformatore “sensibili” ai campi elettrici, come isolatori passanti e commutatore sotto carico, necessitano di accorgimenti particolari per applicazione con estere naturale.

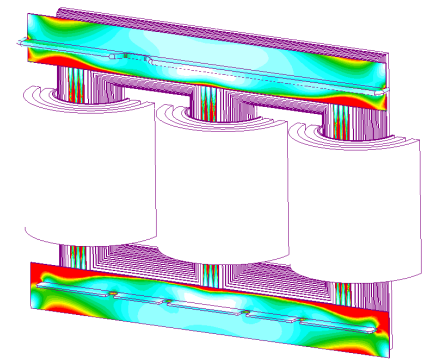
### DIMENSIONAMENTO TERMICO

La viscosità cinematica dell’estere naturale è circa quattro volte superiore a quella dell’olio minerale; questo ha un grosso impatto nel raffreddamento degli avvolgimenti. Per questo motivo, per il dimensionamento termico di trasformatori con fluidi differenti, va sviluppato un modello in grado di calcolare portate, pressione e velocità del fluido in ogni punto dell’avvolgimento, consentendo quindi di ricavarne le relative sovratemperature.





Un'altra caratteristica molto utile nell'aspetto termico è quello della valutazione della capacità di sovraccarico con una simulazione FEM dei punti caldi di cassa ed armatura.

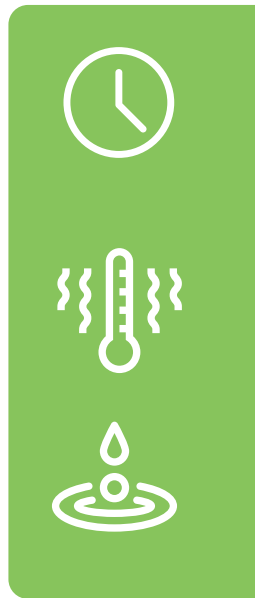
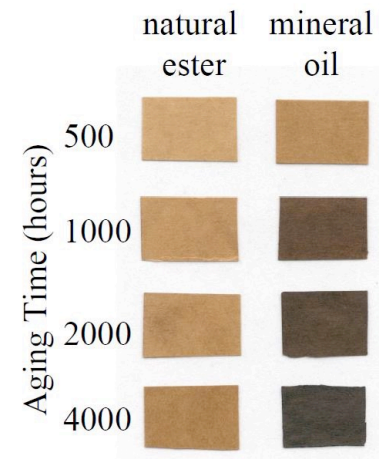


### SCELTA DEI MATERIALI ISOLANTI

La vita di un trasformatore è direttamente collegata all'invecchiamento dei materiali isolanti utilizzati. Spesso l'utilizzo di materiali più performanti rispetto alla carta Kraft tradizionale (TUK, carta aramidica, etc.) è limitato dalla temperatura massima di esercizio del liquido isolante.

L'estere naturale può lavorare a temperature decisamente più elevate dell'olio minerale.

Per questo motivo l'utilizzo accoppiato di carta termicamente più performante con l'estere naturale consente un aumento sostanziale della potenza di utilizzo di un trasformatore senza ridurne la vita attesa.







Il contatto degli esteri naturali con l'aria è sconsigliato a causa dell'innescarsi di una reazione di idrolisi, che può impattare negativamente sulle caratteristiche isolanti del fluido. Per questo motivo nei trasformatori non "ermetici" è necessaria l'installazione, all'interno del conservatore, di una membrana (o cella d'aria) per la separazione tra liquido e aria, di cui è necessario monitorare l'integrità con un dispositivo dedicato. In ogni caso, le precauzioni da prendere nel trattamento di un estere naturale, soprattutto per il riempimento in sito del trasformatore, sono più restrittive rispetto alle stesse adottate per un olio minerale.

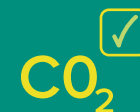
#### RIFERIMENTI NORMATIVI

L'applicazione di "oli non convenzionali" (es. esteri) nei trasformatori è regolato dalle seguenti Normative:

- IEC 62770 "Fluids for electrotechnical applications - Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment",
- È attualmente in fase di approvazione un nuovo progetto di Norma che regola la manutenzione e l'utilizzo degli esteri naturali nelle apparecchiature elettriche (Rif. Documento IEC 10/1123/FDIS per Norma IEC 62975 ED1 "Natural esters - Guidelines for maintenance and use in electrical equipment").

Infine, per quanto riguarda il dimensionamento dei trasformatori che prevedono l'utilizzo di esteri naturali e consentono al trasformatore di lavorare a temperature più alte rispetto a quelli in olio minerale, bisogna far riferimento alla seguente Norma:

- IEC 60076-14 "Liquid-immersed power transformers using high-temperature insulation materials".



Blank lined area for notes, with a stylized blue circuit-like graphic at the bottom left.



## AZIENDE ASSOCIATE





Viale V. Lancetti, 43  
20158 Milano  
Tel +39 023264.228  
Fax +39 023264.217  
[energia@anie.it](mailto:energia@anie.it)